



GraphiCon 2019

29-я Международная конференция
по компьютерной графике
и машинному зрению

Труды конференции

GraphiCon 2019

29th International Conference
on Computer Graphics and Vision

Conference Proceedings

Брянский государственный технический университет

Брянск, 23–26 сентября 2019 года

<http://graphicon2019.ru/>

УДК 004.92
ББК 32.973.26-018.2
G73

G73 GraphiCon 2019: труды 29-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Брянск, 23–26 сент. 2019 г.) / Брянский государственный технический университет. – Брянск, 2019. – 286 с.

ISSN 2618-8317

Настоящий сборник содержит материалы 29-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon 2019. В ее подготовке и проведении участвовали специалисты ведущих организаций, отраслевых и академических научно-исследовательских институтов, а также высшей школы.

Конференция GraphiCon ведет свою историю с 1991 года и является крупнейшей в России и странах СНГ научно-дискуссионной площадкой в области методов и технологий компьютерного анализа изображений, визуальной и когнитивной аналитики, 3D-реконструкции, визуальной навигации и человеко-машинного взаимодействия, виртуальной и дополненной реальности, распознавания образов и др.

В сборник включены пленарные и секционные доклады конференции. Сборник адресуется сотрудникам научно-исследовательских и образовательных организаций, специалистам предприятий ИТ-индустрии, аспирантам, студентам, а также широкому кругу читателей.

УДК 004.92
ББК 32.973.26-018.2

ISSN 2618-8317

Организационный комитет

Федонин Олег Николаевич ректор БГТУ, почетный председатель	Ерёмченко Евгений Николаевич ООО «Неогеография»	Макаренко Константин Васильевич БГТУ
Подвесовский Александр Георгиевич БГТУ, председатель	Захарова Алёна Александровна БГТУ, заместитель председателя	Масленникова Алла Александровна МГУ
Афонина Елена Владимировна БГТУ	Исаев Руслан Александрович БГТУ	Мещеряков Роман Валерьевич ИПУ РАН
Берберова Мария Александровна МФТИ	Карпов Леонид Евгеньевич ИСП РАН	Радченко Алексей Олегович БГТУ
Беспалов Виталий Александрович БГТУ	Киричек Андрей Викторович БГТУ	Ротков Сергей Игоревич ННГАСУ
Бондарев Александр Евгеньевич ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Конушин Антон Сергеевич МГУ	Сканцев Виталий Михайлович БГТУ
Будак Владимир Павлович МЭИ	Коптенок Елизавета Викторовна БГТУ	Трубаков Андрей Олегович БГТУ
Волобой Алексей Геннадьевич ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Коростелёв Дмитрий Александрович БГТУ	Трубакова Анна Алексеевна БГТУ
Галактионов Владимир Александрович ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Крылов Андрей Серджевич МГУ	Трубаков Евгений Олегович БГТУ
Дергачев Константин Владимирович БГТУ	Кузьменко Александр Анатольевич БГТУ	Турлапов Вадим Евгеньевич ННГУ
	Лагерев Дмитрий Григорьевич БГТУ	Шкаберин Виталий Александрович БГТУ

Программный комитет

Галактионов Владимир Александрович ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, председатель	Велижев Александр Брониславович МГУ	Ерёмченко Евгений Николаевич ООО «Неогеография»
Авербух Владимир Лазаревич ИММ УрО РАН	Вехтер Евгения Викторовна ТПУ	Ерофеев Михаил Викторович МГУ
Арлазаров Владимир Викторович Smart Engines	Визильтер Юрий Валентинович ГосНИИАС	Жданов Дмитрий Дмитриевич НИУ ИТМО
Барина Ольга Вячеславовна МГУ	Волобой Алексей Геннадьевич ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Захарова Алёна Александровна БГТУ
Барладян Борис Хаимович ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Выголов Олег Вячеславович ГосНИИАС	Знаменская Ирина Александровна МГУ
Батурин Юрий Михайлович ИИЕТ им. С.И. Вавилова РАН	Гетманская Александра Александровна ННГУ	Игнатенко Алексей Викторович МГУ
Бобков Валерий Александрович ИАПУ ДВО РАН	Горбачёв Вадим Александрович ГосНИИАС	Катаев Михаил Юрьевич ТУСУР
Бондарев Александр Евгеньевич ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Давыдов Сергей Васильевич БГТУ	Киричек Андрей Викторович БГТУ
Будак Владимир Павлович МЭИ	Дебелов Виктор Алексеевич ИВМиМГ СО РАН	Конушин Антон Сергеевич МГУ
Буйвал Александр Константинович университет Иннополис	Дубнищев Юрий Николаевич Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН	Копылов Андрей Валерьевич ТулГУ
Ватолин Дмитрий Сергеевич МГУ	Дышкант Наталья Федоровна МГУ	Коростелёв Дмитрий Александрович БГТУ
		Кретинин Олег Васильевич ННГУ

Крылов Андрей Серджевич МГУ	Пак Александр Яковлевич ТПУ	Терехов Максим Владимирович БГТУ
Кузьменко Александр Анатольевич БГТУ	Подвесовский Александр Георгиевич БГТУ	Тикунов Владимир Сергеевич МГУ
Кустикова Валентина Дмитриевна ННГУ	Потемин Игорь Станиславович НИУ ИТМО	Трубаков Андрей Олегович БГТУ
Лагерев Дмитрий Григорьевич БГТУ	Ризен Юлия Сергеевна ТПУ	Трубаков Евгений Олегович БГТУ
Леонов Андрей Владимирович ИИЕТ им. С.И. Вавилова РАН	Ринкевичюс Бронюс Симович МЭИ	Турлапов Вадим Евгеньевич ННГУ
Макаренко Константин Васильевич БГТУ	Ротков Сергей Игоревич ННГАСУ	Усилин Сергей Александрович ИСА РАН
Мальшев Александр Сергеевич ООО «Датавижн НН»	Рябинин Константин Валентинович ПГНИУ	Федонин Олег Николаевич БГТУ
Местецкий Леонид Моисеевич МГУ	Середин Олег Сергеевич ТулГУ	Фролов Владимир Александрович МГУ
Мещеряков Роман Валерьевич ИПУ РАН	Серяков Вадим Александрович ТПУ	Хвостиков Александр Владимирович МГУ
Михайлюк Михаил Васильевич НИИСИ РАН	Сляднев Сергей Евгеньевич ООО «Датавижн НН»	Чернявский Алексей Samsung R&D Institute Rus
Насонов Андрей Владимирович МГУ	Сорокин Дмитрий Васильевич МГУ	Чуприна Светлана Игоревна ПГНИУ
Небаба Степан Геннадьевич ТПУ	Спасенников Валерий Валентинович БГТУ	Шапиро Лев Залманович ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
Николаев Дмитрий Петрович ИППИ РАН	Столбова Ирина Дмитриевна ПНИПУ	Шкляр Алексей Викторович ТПУ
Носова Светлана Александровна ННГУ		

Международный программный комитет

Timur Paltashev AMD, USA	Andre Gagalowicz INRIA, France	Samet Refik Ankara Uni, Turkey
Marina Gavrilova University of Calgary, Canada	Sabine Coquillart INRIA, France	Bill Seaman Duke Uni, USA
Karol Myszkowski MPI, Germany	Andres Iglesias University of Cantabria, Spain	Vaclav Skala University of West Bohemia, Czech Republic
Vladimir Savchenko Hosei University, Japan	Wolfgang Heiden BRS, Germany	Iryna Wetzel Intergraph, Switzerland
Alexei Sourin NTU, Singapore	Andre Hinkenjann IVC BRS, Gemany	Alexander Wolodchenko Institute for Cartography, Germany
Olga Sourina FhG IGD, Germany	Gianluca Mura Politecnico Di Milano, Italy	
Tom Sederberg Brigham Young University, USA	Ekaterina Prasolova-Forland NTNU, Norway	

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7.

Тел.: +7 (4832) 56-09-84 E-mail: info@graphicon2019.ru Web Site: <http://graphicon2019.ru>

Организаторы, партнеры и спонсоры



АНО Научное Общество «ГрафиКон»
Организатор



Брянский государственный
технический университет
Локальный организатор



Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН
Соорганизатор



AMD Radeon Technologies Group
Информационный партнер



Luxoft
Информационный партнер



Научно-технический центр «Информационные
и промышленные технологии» (ООО)
Представительство Фонда содействия
инновациям в Брянской области
Соорганизатор

ПланФакт

ООО «Максимум Веб» (ПланФакт)
Спонсор



Дорогие друзья и коллеги!

Организационный комитет 29-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон-2019 приветствует вас в городе Брянске!

Многие годы конференция ГрафиКон является крупнейшей в России научно-дискуссионной площадкой для обсуждения методов и технологий компьютерного анализа изображений, визуальной и когнитивной аналитики, 3D-реконструкции, визуальной навигации и человеко-машинного взаимодействия, виртуальной и дополненной реальности, распознавания образов и др.

Продолжая традиции предыдущих лет, ГрафиКон активно развивается, расширяется география его участников, а вместе с ней границы научного и профессионального сообщества. Увеличивается число молодых докладчиков, что является важным условием роста научного потенциала сообщества, способствует развитию существующих и появлению новых научных школ. Расширяются тематика конференции и круг обсуждаемых вопросов. В этом году на ГрафиКон впервые появились две новые секции: «Обработка и анализ изображений в материаловедении» и «Искусственный интеллект, когнитивные технологии, автоматизация и робототехника». Интересным и знаковым событием станут доклады и мастер-классы от мировых лидеров ИТ-индустрии – компаний AMD (подразделение Radeon Technology Group) и Luxoft.

ГрафиКон-2019 проводится в Брянском государственном техническом университете в год его 90-летнего юбилея. На страницах сайта graphicon2019.ru можно узнать об истории нашего города и университета-организатора.

Мы рады всем участникам и гостям конференции и желаем плодотворной работы, приятных встреч и интересного общения со своими коллегами и партнерами. А для молодых ученых пусть дни ГрафиКона станут временем новых знакомств, помогут найти единомышленников и интересные идеи для дальнейших исследований и разработок.

Добро пожаловать на ГрафиКон!

*От имени организационного и программного комитетов,
председатель организационного комитета
ГрафиКон-2019
к.т.н., доцент Подвесовский Александр Георгиевич*

Содержание

Пленарные доклады

<i>Л.Е. Карпов, Д.И. Конеллиович, Е.А. Дергачева, А.Е. Bondarev, V.A. Galaktionov, Д.С. Ватолин, А.С. Krylov, Т.Т. Paltashev, I. Gazizov, A. Chernigin, K.N. Gowda</i> Список пленарных докладов	12
---	----

Интеллектуальные решения в компьютерной графике

<i>А.Ю. Бабичев, В.А. Фролов</i> Сравнительный анализ методов синтеза текстур по образцу	21
<i>Н.Н. Богданов, И.С. Потемин, Д.Д. Жданов, А.Д. Жданов, М.И. Сорокин</i> Эффективный метод восстановления освещения в системах смешанной реальности с использованием HDR-изображения трехмерной сцены	26
<i>В.И. Гонахчян</i> Адаптивный метод рендеринга динамических трехмерных сцен	32
<i>В.А. Семёнов, В.Н. Шуткин, В.А. Золотов, С.В. Морозов</i> Расширение метода иерархических уровней детализации для динамических сцен с детерминированным характером событий	37
<i>М.И. Сорокин, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, Б.Х. Барладян, Н.Н. Богданов, А.Д. Жданов</i> Сегментация освещенных участков света с использованием полносверточных нейронных сетей и алгоритмов компьютерного зрения для систем дополненной реальности	42

Научная визуализация и визуальная аналитика

<i>М. Charnine, E. Sokolov, A. Klovov</i> Semantic approach to visualization of evolution dynamics of topic trends in space of scientific publications using t-SNE and web-based 3D graphics	48
<i>В.А. Арбузов, Э.В. Арбузов, В.С. Бердников, Ю.Н. Дубнищев, О.С. Золотухина, С.А. Кислицын</i> Исследование конвективных структур и фазового перехода, индуцированных нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды	53
<i>В.А. Арбузов, Э.В. Арбузов, Ю.Н. Дубнищев, О.С. Золотухина, В.В. Лукашов</i> Реконструкция пространственной фазовой и температурной структуры пламени свечи методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии	58
<i>А.Р. Горбушин, С.А. Глазков, А.Н. Кравцов, Д.С. Ступак, А.В. Тенина, В.М. Фомин, Н.Н. Хозяенко</i> Оптические исследования особенностей обтекания моделей с местными сверхзвуковыми зонами в промышленной АДТ Т – 128	62
<i>И.А. Знаменская, И.Э. Иванов</i> О толщине фронта ударной волны при визуализации цифровыми методами	66
<i>В.В. Князь, М.И. Козырев, А.Н. Бордодымов</i> Преобразование инфракрасных изображений в видимый диапазон для визуализации на индикаторе пилота	70
<i>К.Н. Кучерова, С.В. Мещеряков, Д.А. Щемелинин</i> Анализ и визуализация многомерных данных в глобально распределенных облачных мониторинговых системах	74
<i>А.А. Молотков, О.Н. Третьякова</i> Визуализация процесса селективного лазерного сплавления	78
<i>И.Н. Павлов, И.Л. Расковская, Б.С. Ринкевичюс</i> Влияние спекл-структуры рассеянного лазерного излучения на погрешность измерения вибро смещения шероховатой поверхности	82
<i>К.В. Рябинин, А.И. Ахтамзян, М.А. Колесник, Е.В. Сударикова</i> Осязаемые интерфейсы для виртуальных реконструкций музейных экспонатов	87

<i>К.В. Рябинин, К.И. Белоусов, С.И. Чуприна, Н.Л. Зелянская</i> Перцептивно-когнитивный интерфейс для систем визуальной аналитики	93
<i>М.В. Сапронов, Н.М. Скорнякова</i> Моделирование индикатрис рассеяния лазерного излучения малыми сферическими поглощающими частицами	99
<i>Ю.Т. Трифанков, Д.М. Кошлаков</i> Визуализация в социально-гуманитарных дисциплинах	104
<i>В.С. Фланден, А.Ю. Поройков, Д.А. Голенцов</i> Восстановление поля локальных температур пламени с применением томографического подхода с помощью пирометра спектрального отношения	108
<i>Т.В. Яковлева, В.Г. Баженов, В.А. Крысько</i> Математическое моделирование контактного взаимодействия пластинки и балки в поле цветного шума	113

Компьютерное зрение

<i>Е.И. Safronova, Е.А. Paveleyeva</i> Palm Vein Recognition Algorithm using Multilobe Differential Filters	117
<i>Е.П. Васильев, В.Д. Кустикова, И.Б. Вихрев, К.Д. Уткин, А.В. Дудченко</i> Разработка приложения “умная библиотека” с использованием Intel Distribution of OpenVINO toolkit	122
<i>В.Ю. Гудков</i> Идентификация отпечатков пальцев по типу контрольных точек	126
<i>И.А. Канаева, Ю.А. Иванова</i> Сегментация изображений трещин дорожного покрытия	131
<i>А.Л. Липкина, Л.М. Местецкий</i> Структурный подход к классификации букв в изображениях	136

Обработка и анализ биомедицинских изображений

<i>С.Д. Черняев, О.В. Лукашенко</i> Сравнительный анализ методов сегментации фМРТ изображений, основанных на марковских случайных полях	143
--	-----

Цифровая Земля и Большие Данные

<i>Р.А. Kabanov, M.S. Sukhodoev</i> Creation of geodistributed SCADA-system	149
<i>Д.Ю. Васин</i> Регулярные методы кодирования растровых изображений дистанционного зондирования Земли	152
<i>Л.И. Лебедев, М.С. Вирясов, В.П. Громов</i> Интеллектуальный формат сжатого представления цветных графических изображений	159
<i>Г.В. Лобанов, Р.В. Прокопишин, Д.Ю. Абадонова, В.А. Крохина</i> Возможности ГИС-технологий в систематизации сведений о культурном наследии (на примере Брянской области)	163

Геометрическое моделирование. Компьютерная графика в образовании

<i>М.М. Абдуллин, А.О. Глазычев, В.Г. Муфтеев, М.А. Талыпов, М.М. Фаттахов, П.А. Федоров</i> Особенности моделирования трассы автомобильной дороги с использованием единой пространственной «В-сплайновой» кривой высокой степени	169
<i>А.А. Бойков, А.М. Федотов</i> Внедрение средств автоматической проверки решений конструктивных задач инженерной геометрии в CAD-систему	172

<i>В.В. Внук, Е.В. Ипполитов, М.М. Новиков, С.А. Чербыло</i> Применение систем автоматизированного проектирования и аддитивных технологий в восстановительной хирургии	176
<i>А.Т. Дворецкий, Т.В. Денисова</i> Квазифокальные линии	181
<i>Н.Д. Жилина, Т.В. Мошкова, С.А. Роменский, С.И. Ротков, В.А. Тюрина</i> Распознавание компонент связности в задаче восстановления трехмерной модели по проекционным изображениям	185
<i>В.В. Карабчевский</i> Исследование конических сечений в среде AutoCAD	188
<i>Е.В. Конопацкий, С.И. Ротков</i> Аппроксимация геометрических объектов многомерного пространства с помощью дуг кривых, проходящих через наперед заданные точки	191
<i>С.А. Рязанов, М.К. Решетников</i> Геометрическая модель производящей поверхности эквивалентной рабочей поверхности зуборезного инструмента «долбяк»	196
<i>В.А. Тюрина, С.И. Ротков, Т.В. Мошкова, М.В. Лагунова</i> Проблема неоднозначности в задаче синтеза каркасной модели объекта по техническому чертежу	201

Компьютерная графика, светотехника и дизайн

<i>Е.В. Анашкина, Ю.С. Ризен</i> Визуализация информации посредством инфографики	206
<i>В.П. Будаков, В.С. Желтов, В.Д. Чембаев, Т.В. Мешкова</i> Оценка качества освещения по яркостной фотографии и синтезированному изображению трехмерной сцены ..	209
<i>М.А. Викулова, Ю.П. Хмелевский</i> Формирование эргономических требований к проектированию бытовых кухонных приборов	213
<i>А.Н. Готина, Ю.П. Хмелевский</i> Использование бионического образа в проектировании детских саней как наиболее визуально комфортного ...	217
<i>Н.С. Канкеева, Е.М. Давыдова</i> Тестирование освещения проектируемого объекта в программной среде с учетом различных условий	220
<i>А.А. Павлова, Е.В. Вехтер</i> Особенности проектирования детских игровых комплексов	223
<i>А.А. Рудинская, Ю.П. Хмелевский</i> Специфика использование бионических форм при проектировании портативной колонки	226
<i>Л.Ю. Ткачева, Ю.П. Хмелевский</i> Проектирование оболочки компьютерного манипулятора с использованием метода экспертной оценки	230
<i>А.Д. Фаныгина, Ю.С. Ризен</i> Детская книжная иллюстрация как способ коммуникации	234
<i>В.В. Юриков, Е.М. Давыдова</i> Бионический метод формообразования как способ решения проблемы визуальной экологии городской среды ..	237

Автоматизация проектирования, тренажеры и симуляторы

<i>М.В. Гончарова, А.Ю. Утешев</i> Новая формула нахождения приближенного расстояния в задаче подбора неявных алгебраических многообразий	242
<i>А.А. Ладилова</i> О геометрическом моделировании поверхностей скругления	247
<i>С.Е. Сляднев, В.Е. Турлапов</i> К подавлению цепочек скруглений при помощи эйлеровых операторов и открытого ядра геометрического моделирования	249

Обработка и анализ изображений в материаловедении

Т.А. Сивкова, С.В. Губарев

Автоматизированный анализ микроструктуры материалов. Нестандартный подход к анализу изображений 255

И.Ф. Шаехова, А.Г. Панов, Н.Г. Дегтярёва, В.А. Иванова

Проблемы применения компьютерного контроля вермикулярного графита в микроструктуре чугуна 260

Искусственный интеллект, когнитивные технологии, автоматизация и робототехника

Н.А. Кривошеев, В.Г. Спицын

Методы машинного обучения для классификации текстовой информации 266

Е.С. Попова, В.Г. Спицын, Ю.А. Иванова

Использование искусственных нейронных сетей для решения задачи классификации текста 270

И.С. Стародубцев, Р.Ф. Самедов, И.М. Гайнияров, И.Н. Обабков, И.В. Антипина, Я.В. Золотарева,

А.А. Сибогатова

Аниматронная модель руки на базе ESP8266 274



Пленарные доклады

Plenary Talks

GraphiCon 2019

23 – 26 сентября 2019
Брянск, Россия

Первые годы отечественной вычислительной техники и машинной (компьютерной) графики

Л.Е. Карпов¹
mak@ispras.ru

¹Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва, Россия

Рассказывается об отечественных ЭВМ линии БЭСМ, разрабатывавшихся под руководством выдающегося ученого С. А. Лебедева, о значении, которое имели эти машины для развития страны, о месте, которое они занимали в сравнении с лучшими ЭВМ других стран. Среди этих машин выделены две – БЭСМ АН и БЭСМ-6, каждая из которых представляла собой целую эпоху в развитии вычислительной техники и программирования в нашей стране. Описывается проект, являющийся первой отечественной разработкой по машинной графике, в которой впервые в стране были созданы такие широко используемые сейчас аппаратные и программные элементы, как «растровый дисплей», «видеопамять», «геоинформационная система». Также описываются две первые отечественные библиотеки графических программ – система программирования графических задач на языке Алгол-60 ГРАФАЛ и система программирования графических задач на языке Фортран ГРАФОР, позволявшие решать наиболее актуальные в то время графические задачи, одна из важнейших среди которых – создание фотошаблонов для автоматизации изготовления многослойных печатных плат и микросхем. Рассказывается о вкладе, который внесли в развитие отечественной машинной графики разработчики этих систем – научный руководитель эксплуатации БЭСМ-6 в Институте точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН В.В. Кобелев и признанный пионер машинной графики, начальник отдела Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН Ю.М. Баяковский, который первым использовал термин «машинная графика», возглавлял лабораторию компьютерной графики и мультимедиа в Московском государственном университете и внес решающий вклад в становление международной научной конференции ГрафиКон. Приводятся примеры некоторых задач, которые были решены с применением новых графических систем: визуализация решений дифференциальных уравнений с частными производными, моделирование гравитационного взаимодействия сложных масштабных объектов, работа с плоскими двумерными объектами и с трёхмерными объектами, описываемыми функциями двух переменных.

Карпов Леонид Евгеньевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, ответственный секретарь редакционной коллегии журнала «Программирование». E-mail: mak@ispras.ru

Проекты Инжинирингового центра Брянского государственного технического университета как инструмент развития научно-образовательной деятельности

Д.И. Копелиович¹
dkopeliovich@rambler.ru

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Брянский государственный технический университет сотрудничает с большим количеством предприятий Брянской области и других регионов. В апреле 2015 г. приказом ректора БГТУ создано структурное подразделение – инжиниринговый центр в области высокотехнологичного машиностроения «High-tech Engineering». Создание инжинирингового центра стало ещё одним шагом к сближению вузовской науки и производства. В настоящее время деятельность центра заключается в выполнении НИОКР и инжиниринговых проектов для различных предприятий. Основные виды работ, выполняемые специалистами центра – проектирование электромеханических устройств, проектирование технологической оснастки, инженерные расчеты, разработка программного обеспечения в области охраны труда, разработка трехмерных моделей различных объектов, разработка обучающих систем на основе использования виртуальных тренажеров, организация и проведение образовательных мероприятий. Основными партнерами Инжинирингового центра являются: АО «Карачевский завод Электродеталь» (г. Карачев), АО «Научно-исследовательский институт развития соединителей и изделий специальной электроники» (г. Казань), ООО Научно-производственное объединение «Группа компаний машиностроения и приборостроения» (г.Брянск), ЗАО «Группа-Кремний» (г.Брянск), ООО «ДЕПО Электроникс» (г. Москва), ООО «Центр Инновационного развития СТМ» (г. Екатеринбург), ООО «СЭЙФЕТИСОФТ» (г. Москва).

Большинство сотрудников Инжинирингового центра – аспиранты, магистранты и студенты старших курсов БГТУ. Студенты, которые совмещают учебу с работой в инжиниринговом центре, гораздо быстрее понимают необходимость приобретения определенных компетенций, востребованных на производстве. Сотрудники инжинирингового центра принимают участие в различных научных мероприятиях, проводимых университетом и другими организациями, посещают профильные выставки. Определенное время будущие специалисты проводят непосредственно на предприятиях, где получают консультации по различным вопросам, изучают оборудование и технологию производства. Это позволяет студентам и аспирантам подготовиться к дальнейшей трудовой деятельности.

Копелиович Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, доцент, директор инжиниринговый центр в области высокотехнологичного машиностроения «High-tech Engineering». E-mail: dkopeliovich@rambler.ru

Визуализация социотехноприродных процессов: проблемы и вызовы

Е.А. Дергачева¹

eadergacheva2013@yandex.ru

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

Современные модели и системы визуализации данных, реализуемые на основе информационных технологий, охватывают по отдельности социальные, технологические и природные процессы развития мира. Мировое сообщество занимается мониторингом данных о всеобщих тенденциях исчерпания ресурсов, загрязнения природной среды с целью построения прогнозных сценариев социально-экономического развития во взаимосвязи с изменениями в биосфере. Однако современный мир развивается уже в условиях трансформационных переходных процессов, когда ведущей системой жизнеобеспечения взамен биосферы становится создаваемая социумом искусственная оболочка – техносфера. Она является полноправным участником обменных процессов между глобализирующимся техногенным обществом и трансформируемой естественной природой, что позволяет вести речь уже о становлении социотехноприродных закономерностей развития мира и жизни. Вследствие техногенных трансформаций естественная биологическая жизнь переходит в техносферно-городские условия существования. В мире пока отсутствуют интегративные визуальные модели, представляющие эволюционные изменения одновременно в трех системах – социуме (и человеке), техносфере и техногенно трансформируемой биосфере, на основании которых можно прогнозировать тенденции формирования устойчивого будущего человечества во взаимосвязи с расширением социотехноприродных процессов. Общеизвестную методологию визуализации необходимо дополнить методологией философии социально-техногенного развития мира и смены эволюции жизни для лучшего наглядного представления и объяснения происходящих в мире трансформационных процессов, а в более общем плане – меняющейся картины мира, становящейся постбиосферной. Это позволит увидеть перспективы и угрозы развития жизни на Земле на большой шкале глобальных социотехноприродных трендов. Междисциплинарный философский взгляд позволяет охватить мир в целостности его разнокачественных характеристик и одновременно формирует проблемное поле визуализации трансформационных процессов. В этих условиях основополагающая роль интеграционного звена принадлежит именно информационным технологиям, позволяющим обрабатывать и строить прогнозные схемы и визуально представлять разнородные данные с целью последующей разработки моделей безопасного развития человечества в техносфере.

Дергачева Елена Александровна – доктор философских наук, профессор РАН по Отделению общественных наук, профессор кафедры «Экономика, организация производства и управление» Брянского государственного технического университета. E-mail: eadergacheva2013@yandex.ru

Construction of a generalized computational experiment and visual analysis of multidimensional data

A.E. Bondarev¹, V.A. Galaktionov¹
bond@keldysh.ru, vlgal@gin.keldysh.ru

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences

The work is devoted to the problems of constructing a generalized computational experiment in the problems of computational aerodynamics. The construction of a generalized computational experiment is based on the possibility of carrying out parallel calculations of the same problem with different input data in multitasking mode. This allows carrying out parametric studies and solving problems of optimization analysis. The results of such an experiment are multidimensional arrays, for the study of which visual analytics methods should be used. The construction of a generalized experiment allows one to obtain dependences for valuable functionals on the determining parameters of the problem under consideration. The implementation of a generalized experiment allows one to obtain a solution for a class of problems in the ranges under consideration, and not just for one problem. Examples of constructing a generalized computational experiment for various classes of problems of computational aerodynamics are presented. The article also provides an example of constructing such an experiment for a comparative assessment of the accuracy of numerical methods.

Бондарев Александр Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. E-mail: bond@keldysh.ru

Галактионов Владимир Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом компьютерной графики и вычислительной оптики Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. E-mail: vlgal@gin.keldysh.ru

Революция камер глубины

Д.С. Ватолин¹
dmitriy@graphics.cs.msu.ru

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Камеры глубины – это устройства, снимающие видео, в каждом пикселе которого хранится не цвет, а расстояние до объекта в этой точке. Такие камеры существуют уже больше 20 лет, однако в последние годы скорость их развития выросла многократно и уже можно говорить про революцию, причем многовекторную. Активное развитие идет по следующим направлениям:

- *Structured Light* камеры, или камеры структурного света, когда есть проектор (часто инфракрасный) и камера, снимающая структурный свет проектора. Серьезный стимул развитию таких камер придала компания Apple, выпустив два года назад телефон с фронтальной камерой глубины на структурном свете, задействованный в технологии FaceID.
- *Time of Flight* камеры, или камеры, основанные на измерении задержки отраженного света. Камеры этого типа активно развиваются благодаря широкому использованию в промышленных роботах, также в 2019-20 годах все основные производители смартфонов выпустили или анонсировали телефоны с ToF камерами глубины, которые используются в системах дополненной реальности.

- *Depth from Stereo* камеры – классическое и, пожалуй, наиболее известное направление построения глубины из стерео. Получило сильное развитие в связи с использованием в автономных автомобилях.
- *Light Field Camera*, они же камеры светового поля или пленоптические камеры. В последние три года подобные камеры впервые выпущены массовыми тиражами в смартфонах Google Pixel 2 и Pixel 3.

И, наконец, камеры, основанные на Lidar-технологиях, особенно свежие Solid State Lidars, которые работают без отказа примерно в 100 раз дольше обычных лидаров и выдают привычную прямоугольную картинку и уже массово используются в автопилотах автомобилей.

Как следствие можно наблюдать активное развитие всех направлений, широкое распространение нового видео – видео с глубиной, а также взрывной рост спроса на новые алгоритмы обработки видео.

Ватолин Дмитрий Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории компьютерной графики и мультимедиа факультета Вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. E-mail: dmitriy@graphics.cs.msu.ru

Image denoising by hybrid approach: CNN + “classical” methods

A.S. Krylov¹

kryl@cs.msu.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Russia

Nowadays convolutional neural networks (CNN) show very good performance and achieve impressive results in image denoising. Often, especially in the case of additive white Gaussian noise they give better results than “classical” mathematical methods.

Nevertheless their results strongly depend on the used training set and even small differences in the input data can give an unpredictable output disturbance. To deal with the possible practical instability of CNN-based methods new hybrid denoising methods including some combinations of CNN methods and “classical” methods were suggested. Here by classical methods we mean edge-preserving algorithms that are based on some theoretical priors meaningful for the noise suppression. Some examples are Non-Local Means (NLM), Bilateral, Anisotropic diffusion, Total Variation, Total Generalized Variation, Wavelet-based, etc.

So these combinations of methods are much more reliable, but additional problems arise. Along with the high uncertainty of the CNN hyper parameters and training set we also have an uncertainty in the parameters of classical methods. The combination becomes problematic. We need a no-reference automatic filtering strength parameters estimation for classical methods.

In this report we present a multiscale method for automatic choice of the parameters for wide class of classical image ridge and edge preserving denoising algorithms. To control image structures by ridge based approach we calculate image denoising quality using difference between noisy and filtered images (so called method noise). Presence of regular structures in the ridge areas of the method noise image shows ridge smoothing or suppression by the testing denoising algorithm. The automatic parameter choice algorithm will be illustrated with Perona-Malik denoising method for DRIVE retinal image dataset.

The report includes a short review of the current hybrid denoising methods. An example of the hybrid method with automatic choice of the strength parameter for “classical” method is also presented.

The work was supported by Russian Science Foundation grant № 17-11-01279.

Крылов Андрей Серджевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической физики, заведующий лабораторией математических методов обработки изображений, помощник декана факультета Вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. Ломоносова. E-mail: kryl@cs.msu.ru

New Generation Platforms for HPC, Computer Graphics and Machine Intelligence

T.T. Paltashev¹

Timour.Paltashev@amd.com

¹AMD Radeon Technology Group

New 64-cores server processor extends the EPYC family for enterprises and data centers. It has several new architecture features and built on new Zen-2 CPU core which is connected to redesigned memory hierarchy with data encryption and virtualization protection. EPYC+ family has very capable I/O and power management subsystems making them a best price-performance server option for data centers and cloud computing. There is comprehensive IHV and ISV platforms ecosystem for EPYC+ and EPYC ROME with 64 Zen2 cores helping to build various configurations for applications in HPC, cloud gaming/computing and industrial supercomputing. EPYC server family is combined with Radeon Instinct GPU accelerators to deliver petaflop range performance in clusters like P47. Such powerful hardware platform is supported by Radeon Open Compute (ROCm) open source software stack for HPC and Machine Intelligence with various optimized libraries and profiling tools. Deep learning applications can be mapped via several frameworks supported by ROCm and MIOpen software stack. Radeon DNA or RDNA architecture is a backbone of new generation of Radeon RX 5700 accelerators for graphics, virtual reality and gaming.

Vega GPU Family for Graphics, Machine Intelligence Systems and HPC

T.T. Paltashev¹

Timour.Paltashev@amd.com

¹AMD Radeon Technology Group

New GPU Vega 20 become a heart of several product lines as Radeon VII in gaming, Radeon PRO WX8200 in workstations and Radeon Instinct MI50/MI60 accelerators for HPC and deep learning applications. 64 nCU compute units to accelerate demanding workloads with up to 14.7 TFLOPS of peak SPFP and 7.4 TFLOPS of peak DPFP to speed up HPC, machine learning, professional graphics applications and premium games. 16-32GB of high bandwidth cache (HBC) memory supports massive textures and data sets. Removes the need for complicated memory management and large resources are not required to remain complete in local memory with active pages have prioritized residency in HBC, inactive pages are marked for migration to slower memory and automatically moved. Vega 20 has high performance FP16 and FP32 compute units supported by open software ROCm platform for HPC and ML tasks. Radeon Instinct™ MI50/MI60 accelerators have Infinity Fabric links to support multi-GPU peer to peer communication for superior compute density and performance per node in combination with AMD EPYC™ server processors.

Палташев Тимур Турсунович – доктор технических наук, Senior Manager in AMD Radeon Technology Group. E-mail: Timour.Paltashev@amd.com

Мастер-класс от компании Luxoft

Building GPU path tracer from scratch

Ilias Gazizov, Luxoft

We present a tutorial on building GPU path tracer using Vulkan API and AMD RadeonRays Next intersection engine. We start with simple primary rays, then we proceed adding basic shading and gradually moving to more complex effects, such as shadows and global illumination.

In this tutorial we study how to initialize Vulkan and RadeonRays Next, prepare all necessary data for an intersection engine and learn best practices of building performant GPU renderers. At the end, we will have sample GPU path tracer featuring primary rays tracing, directional lights and global illumination (full source code will be available on GitHub for self study). In addition, we will see how to spend less rays and keep the same quality using modern AI-based denoiser. At the end of the presentation, we will show a live demo of Radeon ProRender, production quality renderer based on the principles described in the presentation.

Ilias Gazizov is a lead development engineer at Luxoft. He graduated from Ufa State Aviation Technical University. Ilias is working on development of RadeonRays Next library. He is interested in high-performance computing, computer graphics, code optimization. E-mail: IGazizov@luxoft.com

Implementing GPU accelerated AI-denoiser for Monte-Carlo path tracing

Aleksei Chernigin, Luxoft

Path tracing is a numerical method based on Monte-Carlo integration algorithm. Monte-Carlo methods are known to have square root convergence, hence to reduce the error by a factor of two, one needs to spend four times as many image samples. As a consequence, to get a clear image one can either render for a longer period or add more computational power to increase the number of image samples rendered per second.

This presentation focuses on an alternative approach to getting cleaner renders - AI-based image denoising. We will start with a brief introduction to deep learning, then continue with an explanation of a denoising convolutional autoencoder along with implementation details in TensorFlow framework, and finally we will show how to integrate our model into raytracing application using Microsoft DirectML for low-level GPU accelerated inferencing.

Aleksei Chernigin is a Lead Technical Expert at Luxoft. He graduated Nizhny Novgorod Lobachevsky State University, the department of Calculus Mathematics and Cybernetics. Aleksei deals with machine learning algorithms for computer graphics tasks. He is one of main contributors to AMD RadeonML inference framework. E-mail: AChernigin@luxoft.com

Мастер-класс от компании AMD

MIVisionX – Computer Vision & Machine Learning with OpenVX

Kiriti Nagesh Gowda,
AMD Radeon Technology Group



MIVisionX

In this talk, we will learn about MIVisionX toolkit and how to run inference efficiently using OpenVX and OpenVX Extensions. OpenVX is an open, royalty-free standard for cross platform acceleration of computer vision applications. It is designed by the Khronos Group to facilitate portable, optimized and power-efficient processing of methods for vision algorithms. The talk will go over each step required to convert a pre-trained neural net model into an OpenVX Graph and run this graph efficiently on any target hardware. In this talk, we will also learn about AMD MIVisionX which delivers open source implementation of OpenVX and OpenVX Extensions along with Neural Net Model Compiler & Optimizer.

MIVisionX toolkit is a set of comprehensive computer vision and machine intelligence libraries, utilities, and applications bundled into a single toolkit. AMD MIVisionX delivers highly optimized open source implementation of the Khronos OpenVX™ and OpenVX™ Extensions along with Convolution Neural Net Model Compiler & Optimizer supporting ONNX, and Khronos NNEF™ exchange formats. The toolkit allows for rapid prototyping and deployment of optimized workloads on a wide range of computer hardware, including small embedded x86 CPUs, APUs, discrete GPUs, and heterogeneous servers.



Интеллектуальные решения
в компьютерной графике

Intelligent Solutions
in Computer Graphics

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Сравнительный анализ методов синтеза текстур по образцу

А.Ю. Бабичев¹, В.А. Фролов^{1,2}

andrey.babichev@graphics.cs.msu.ru|vfrolov@graphics.cs.msu.ru.

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

²Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН.

В данной статье предлагается сравнительный анализ существующих методов синтеза текстур. Выявляются преимущества и недостатки существующих методов. В нашей работе мы руководствовались результатами обширного экспертного тестирования, в котором приняло участие более 25 человек на 20 принципиально разных текстурах. Это позволило нам сделать выводы о том, на каких типах текстур какие методы следует использовать. Наше исследование показало, что популярные в последнее время нейро-сетевые и статистические методы не являются лучшими ни по качеству синтеза, ни по скорости. Однако при этом они генерируют более разнообразные текстуры. С другой стороны, наиболее простой и быстрый метод переставления патчей показал лучшее качество и скорость. Таким образом, синтез текстур по образцу – одна из перспективных областей исследования, в которой различные подходы обладают разными преимуществами.

Ключевые слова: компьютерная графика, синтез текстур, сравнение.

Comparison of texture synthesis methods by sample

A.Y. Babichev¹, V.A. Frolov^{1,2}.

andrey.babichev@graphics.cs.msu.ru|vfrolov@graphics.cs.msu.ru.

¹Moscow State University, Moscow, Russia;

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia;

This article provides a comparative analysis of existing texture synthesis methods. The advantages and disadvantages of the methods are revealed. In our work, we were guided by the results of extensive expert testing, which was attended by more than 25 people on 20 fundamentally different textures. This allowed us to draw conclusions about what types of textures which methods should be used. Our study showed that recently popular neural network and statistical methods are neither the best in terms of synthesis quality nor speed. However, they also generate more diverse textures. On the other hand, the easiest and fastest method for rearranging patches showed the best quality and speed. Thus, pattern synthesis of textures is one of the promising areas of research in which different approaches have different advantages.

Keywords: computer graphics, texture synthesis, comparison.

1. Введение

Текстуры – одна из основных компонент синтеза реалистичных изображений. С их помощью можно описать широкое многообразие поверхностей объектов, таких как минералы, шерсть, кожа, растения, а также различные ландшафты.

Текстуры можно получить множеством различных способов, например, с помощью сканирования фотографий или картин, нарисованных вручную. Однако оба этих подхода на практике являются чрезвычайно трудоёмкими, поскольку с фотографии необходимо удалять освещение, а границы текстур нужно обрабатывать специальным образом для удаления швов (появляющихся при циклическом наложении текстуры на объект).

Созданные с помощью синтеза по образцу изображения, могут быть любого размера, а при необходимости синтез можно настроить так, чтобы он не создавал швов (что может оказаться полезным при синтезе больших текстур из маленьких, так как можно создать новую маленькую текстуру и с помощью циклического наложения получить большую, которая будет обладать изначальным качеством). Область применения синтеза текстур по образцу весьма широка: заполнение дыр, генерация контента для машинного обучения, помощь художникам.

Принцип работы алгоритмов синтеза текстур можно описать следующим образом: на вход алгоритму подаётся исходная текстура, на ее основе создается новая (например, с помощью шума), которая затем с помощью какого-то метода изменяется так, чтобы визуально быть похожей на изначальную. Методы, с помощью которых создается новая текстура, и методы, с помощью которых полученная текстура становится похожей на изначальную, определяют все многообразие методов синтеза текстур по образцу:

В данной работе мы не только сравнили методы по качеству, но и постарались ответить на следующие вопросы:

- 1) Насколько хорошо метод сохраняет структурную организацию текстуры (характер/стиль узоров);
- 2) насколько качественной и оригинальной получается текстура;
- 3) может ли метод сохранять семантику (смысл) изображаемых объектов (например, если на исходной текстуре есть цветы, будут ли цветы или их части на сгенерированной текстуре);
- 4) создает ли метод швы при циклическом наложении.

2. Обзор методов синтеза текстур по образцу

В данной секции будут описаны методы синтеза, на которых проводилось тестирование.

2.1 Синтез текстур с помощью непараметрической выборки

Данный метод [2] синтезирует новую текстуру попиксельно, начиная с одного случайно выбранного пикселя. Для построения нового пикселя p , сначала определим $\omega(p)$, как квадратный патч со стороной длины ω с центром в p , а $d_{perc}(\omega_1, \omega_2)$ – как расстояние между патчами:

$$d_{perc} = d_{SSD} * G,$$

где d_{SSD} – среднеквадратическое расстояние, а G – гауссово ядро размерности два.

В первую очередь находится

$$\omega'_{best} = \operatorname{argmin}_{\omega} d_{perc}(\omega(p), \omega),$$

где $\omega(p)$ – патч в синтезируемой текстуре с максимальной длиной стороны, а ω – патчи такой же длины, взятые из

изначального изображения. Также стоит отметить, что расстояние высчитывается только между уже построенными пикселями, то есть пиксели, значения которых еще не известны, не будут вносить вклад в расстояние.

Затем также находятся все остальные патчи ω' , для которых выполнено $d_{perc}(\omega'_{best}, \omega') < \epsilon$, где ϵ – некоторый небольшой порог (константа).

Наконец, значение искомого p может быть найдено, как среднее арифметическое всех центральных p , из найденных нами патчей ω'_{best} и ω' .

Данный процесс попиксельного построения текстуры будет продолжаться до тех пор, пока не будет построена текстура требуемого размера.

К проблемам данного алгоритма можно отнести то, что у него есть тенденция для некоторых текстур идти в «несмысловую» часть изображения и выращивать ложную текстуру, а также данный метод имеет свойство, что полученное изображение может оказаться изначальным со сдвигом.

С более подробным описанием алгоритма синтеза, а также его математическим обоснованием можно ознакомиться по [2].

2.2 Синтез текстур с помощью выборки на основе патчей

Данный алгоритм [1, 5] синтезирует изображение патчами слева направо и снизу вверх.

Сначала определим следующие переменные:

- 1) I_{in}, I_{out} – входное и синтезируемое изображение соответственно;
- 2) $B_{(x,y)}$ – патч, левый нижний угол которого имеет координаты (x, y) в I_{in} ;
- 3) B_k – k -ый патч, который будет вставлен в I_{out} ;
- 4) $E_{B_{(x,y)}}$ – граничная зона $B_{(x,y)}$, E_{out} – граничная зона I_{out} ;
- 5) ω_E – длина граничной зоны, некоторая задаваемая нами константа;
- 6) ω_B – длина квадратного патча, некоторая задаваемая нами константа.

Затем определим следующие выражения:

$$d(E_{B_k}, E_{out}^k) = \left[\frac{1}{A} \sum_{i=1}^A (p_{B_k}^i - p_{out}^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

расстояние между граничными зонами, где E_{out}^k – граничная зона для k -ого вставляемого патча, A – число пикселей в граничной зоне, $p_{B_k}^i$ и p_{out}^i – значения (одноканальные или трехканальные) i -ого пикселя в граничных зонах. Стоит отметить, что для вычисления расстояния будет учитываться только та граничная зона I_{out} , которая окажется на стыке при вставке B_k в I_{out} .

$$d_{max} = e \left[\frac{1}{A} \sum_{i=1}^A (p_{out}^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

максимально допустимое расстояние, где p_{out}^i – значения i -ого пикселя в граничной зоне E_{out}^k , e – некоторая константа не меньше нуля.

$\Psi_B = \{B_{(x,y)} \mid d(E_{B_{(x,y)}}, E_{out}^k) < d_{max}, B_{(x,y)} \text{ in } I_{in}\}$, – множество патчей, граничная зона которых отличается менее чем на d_{max} от граничной зоны I_{out} после вставки в последнюю k патчей.

Алгоритм, наконец, будет выглядеть следующим образом:

- 1) выберем любой патч B_0 размера $\omega_B \times \omega_B$ из I_{in} и вставим его в левый нижний угол I_{out} и положим $k = 1$;
- 2) для данного k построим множество Ψ_B ;
- 3) если Ψ_B оказалось пустым, положим $\Psi_B = \{B_{min}\}$, где B_{min} – патч, граничная зона которого является ближайшей к E_{out}^k ;

- 4) случайно выберем один патч из Ψ_B в качестве B_k ;
- 5) вычислим поверхностную ошибку между B_k и патчами в I_{out} , с которыми он пересекается, и затем найдем путь минимальной стоимости вдоль области пересечения и сделаем его границей B_k ;

- 6) вставим B_k в I_{out} , положим $k = k + 1$;

- 7) будем повторять шаги 2), 3), 4), 5), 6) до тех, пока I_{out} не окажется полностью заполненным.

Поверхностная ошибка вычисляется следующим образом:

$$err(E_{B_k}, E_{out}^k)_{(i,j)} = (p_{B_k}^{(i,j)} - p_{out}^{(i,j)})^2,$$

а для поиска пути минимальной стоимости (если мы рассматриваем пересечение B_k и патча слева от него) для всей граничной зоны необходимо вычислить совокупную поверхностную ошибку для всей граничной зоны:

$$err_{cm}(i, j) = err(i, j) + \min(err_{cm}(i-1, j-1), err_{cm}(i-1, j), err_{cm}(i-1, j+1)).$$

Искомым путем будет последовательность (i, j) до минимального err_{cm} , стоящего в последней строке.

Аналогичные действия проводятся для поиска пути минимальной стоимости при рассмотрении B_k и патча снизу от него.

С алгоритмом вычисления новой граничной зоны более подробно можно ознакомиться по [1], а с полным алгоритмом синтеза текстур патчами по [5].

Проблемы данного метода схожи с Texture Synthesis by Non-parametric Sampling: при синтезе определенных текстур полученная текстура может являться изначальной с некоторым сдвигом. Также вычисление новой граничной зоны может давать неприемлемый результат, если она имеет резкие цветовые переходы.

2.3 Синтез текстур с использованием сверточных нейросетей

Данный метод [4] основан на применении сверточных нейросетей, в качестве нейросети используется VGG-19, которая предобучена для распознавания объектов.

Для начала мы подадим наше исходное изображение в нейросеть и вычислим активацию для каждого слоя l нейросети. Каждая активация формирует некий набор отфильтрованных изображений, которые также известны как feature maps. Каждый слой с N_l фильтров будет иметь N_l feature maps, каждый из которых размера M_l (если считать вектор в одно измерение). Таким образом, все feature maps могут храниться в матрице $F_l \in R^{N_l \times M_l}$, где F_{jk}^l – это активация j -ого фильтра в позиции k в слое l . Затем вычисляется матрица Грамма $G^l \in R^{N_l \times N_l}$, где $G_{ij}^l = \sum_k F_{ik}^l F_{jk}^l$, – матрица, которая характеризует свойства изображения.

Затем создадим новую текстуру, проинициализировав нашу изначальную текстуру некоторым шумом (например, белым). Далее суть метод состоит в сведении созданной текстуры к изначальной с помощью метода градиентного спуска.

Функцию ошибки можно будет вычислить, как

$$\mathcal{L}(\vec{x}, \vec{\tilde{x}}) = \sum_{l=0}^L \omega_l E_l,$$

где ω_l – весовые коэффициенты вклада каждого слоя в ошибку, \vec{x} и $\vec{\tilde{x}}$ – оригинальное и генерируемое изображение соответственно, а E_l – вклад каждого l -ого слоя:

$$E_l = \frac{1}{4N_l^2 M_l^2} \sum_{i,j} (G_{ij}^l - \hat{G}_{ij}^l)^2.$$

Производную E_l можно вычислить, как

$$\frac{\partial E_l}{\partial \hat{F}_{ij}^l} = \begin{cases} \frac{1}{N_l^2 M_l^2} ((\hat{F}^l)^T (G^l - \hat{G}^l))_{ji}, & \hat{F}_{ij}^l > 0 \\ 0, & \hat{F}_{ij}^l < 0. \end{cases}$$

Наконец, градиент E_l и градиент $\mathcal{L}(\vec{x}, \vec{\hat{x}})$ могут быть вычислены с помощью метода обратного распространения ошибок, и весь последующий процесс сводится к минимизации ошибки. Подробнее о данном методе можно прочитать по [4].

У данного метода есть один существенный минус – неопределенность количества его итераций. Поскольку градиент, вычисляемый для минимизации, может быть очень мал по сравнению с текущей ошибкой, метод может очень медленно сходиться. Возможным решением данной проблемы может быть остановка минимизационного процесса при ошибке, равной некоторой величине, но это может повлечь за собой существенные различия между синтезируемой и изначальной текстурой.

2.4 Глубокая корреляция для синтеза текстур

Данный метод [6] во многом повторяет ранее рассмотренный синтез текстур с использованием сверточных нейросетей: он основан на использовании предобученной для распознавания объектов нейросети VGG-19, а также на оптимизации матрицы Грамма изначальной текстуры, проинициализированной некоторым шумом, с помощью метода обратного распространения ошибок.

Однако данный метод в функции ошибок помимо матрицы Грамма имеет еще три важных компонента. Пусть $F_{j(n,m)}^l$ – это активация j -ого фильтра в позиции (n,m) в слое l . Тогда введем следующие переменные:

$$R_{j(x,y)}^l = \sum_{n,m} \omega_{x,y} F_{j(n,m)}^l F_{j(n-x,m-y)}^l,$$

набор матриц «глубокой взаимосвязи», где $x \in [-\frac{N_l}{2}; \frac{N_l}{2}]$, $y \in [-\frac{M_l}{2}; \frac{M_l}{2}]$, $\omega_{(x,y)} = [(N_l - x)(M_l - y)]^{-1}$.

$$E_{DCor}^l = \frac{1}{4} \sum_{x,y,j} (R_{j(x,y)}^l - \hat{R}_{j(x,y)}^l)^2,$$

энергия «глубокой взаимосвязи» l -ого слоя.

$$E_{DCor} = \sum_l \omega_l^{Dc} E_{DCor}^l,$$

полная энергия «глубокой взаимосвязи», где ω_l^{Dc} – весовые коэффициенты для данного слагаемого функции ошибок.

$$E_{Div}^l = \frac{1}{2} \sum_{n,m,j} (F_{j(n,m)}^l - \hat{F}_{j(n,m)}^l)^2,$$

энергия «разнообразия» l -ого слоя.

$$E_{Div} = \sum_l \omega_l^D E_{Div}^l,$$

полная энергия «разнообразия», где ω_l^D – весовые коэффициенты для данного слагаемого функции ошибок.

$$E_{Smooth}^l = \frac{1}{2\sigma} \sum_{n,m,j} \log \sum_{\delta n, \delta m} \exp \left[-\sigma (F_{j(n,m)}^l - F_{j(n-\delta n, m-\delta m)}^l)^2 \right],$$

энергия «гладкости» l -ого слоя, где σ – некоторая константа, δn и δm – соседние индексы.

$$E_{Smooth} = \sum_l \omega_l^S E_{Smooth}^l,$$

полная энергия «гладкости», где ω_l^S – весовые коэффициенты для данного слагаемого функции ошибок.

Таким образом, итоговая функция ошибок имеет следующий вид:

$$\mathcal{L} + E_{DCor} + E_{Div} + E_{Smooth}.$$

Весь оставшийся алгоритм сводится к оптимизации функции ошибок методом обратного распространения ошибок. Более подробно о данном методе можно прочитать по [6].

Все проблемы этого метода схожи с проблемами синтеза текстур с использованием сверточных нейросетей.

2.5 Синтез текстур с помощью многоуровневой выборки

В основе этого метода [3, 7] лежит разложение изображения в пирамиды гауссиан. Сначала определим следующие переменные:

- 1) I_a, I_s – входное и выходное изображения;
- 2) G_a, G_s – пирамида гауссиан, построенная из I_a, I_s соответственно;
- 3) $N(p)$ – соседство вокруг пикселя p (например, все пиксели левее и выше p , расстояния не больше 2);
- 4) $G(L), G(L, x, y)$ – L -ый уровень пирамиды G и пиксель с координатами (x, y) в G ;

Данный алгоритм можно описать следующими шагами:

- 1) проинициализируем I_s , как белый шум, имеющий размер, равный I_a ;
- 2) разложим I_a, I_s в G_a, G_s ;
- 3) положим $L = 1$ – уровень пирамиды, имеющий наименьшее разрешение;
- 4) пройдем по всем пикселям (x_s, y_s) пирамиды $G_s(L)$ (шаги 5) – 9);
- 5) положим, что N_s – соседство (x_s, y_s) уровня L пирамиды G_s , $N_a^{best} = null$, $C = null$;
- 6) пройдем по всем пикселям (x_a, y_a) пирамиды $G_a(L)$ (шаги 7)-8));
- 7) пусть N_a – соседство (x_a, y_a) уровня L пирамиды G_a ;
- 8) если $d(N_a, N_s) > d(N_a^{best}, N_s)$, то $N_a^{best} = N_a$, $C = G_a(L, x_a, y_a)$, где d – некоторое расстояние, например среднеквадратичное;
- 9) $G_s(L, x_s, y_s) = C$, $L = L + 1$;
- 10) I_s – это результат сборки пирамиды G_s .

С более подробным описанием метода можно ознакомиться по [3, 7].

Поскольку данный метод основан на использовании только локальных соседств, он не сможет выдавать хороший результат на текстурах со сложными визуальными структурами (например, текстуры с прогрессивными изменениями в размере, цвете или ориентации или текстуры, детали которых зависят от их относительного положения), так как для них требуется анализ значительно большего соседства.

3. Выбор текстур

Для проверки способности методов сохранять структурированность, были отобраны текстуры, представляющие собой повторяющиеся несложные паттерны с малым количеством используемых цветов и без резких градиентных переходов. Такие текстуры выбирались с целью исключить влияние на синтез свойств текстур, кроме её структурной организации. Так, на рис. 2, представлена текстура, состоящая из совершенно одинаковых деталей (кирпичей), а на рис. 1 – состоящая из сильно похожих деталей.

Чтобы узнать, насколько качественной и оригинальной получается текстура, синтезируемая тем или иным методом, были выбраны текстуры, состоящие из одноцветного фона с некоторой хаотичной картинкой поверх него. Такие

текстуры были выбраны с идеей, что любые методы синтеза должны отработать приемлемо на таких типах текстур в силу их простоты, но полученный результат может быть слишком похожим на изначальную текстуру или отличаться произвольными выбросами цветов, не свойственных данной текстуре. Результаты данной проверки можно увидеть на рис. 3 и рис. 4.

Для проверки возможности метода сохранить семантический смысл отбирались текстуры, представляющие собой хаотически повторенные, похожие друг на друга паттерны, в которых уже может использоваться произвольное количество цветов. Такие текстуры являются простыми узорами. С результатами данной проверки можно ознакомиться на рис. 5, рис. 6.

4. Результаты

Результаты синтеза всех рассмотренных методов можно увидеть в разделе иллюстрации, на рисунках 1,2,3,4,5,6. Для выявления плюсов и минусов методов было проведено экспертное сравнение: предлагалось поставить оценку от 0 до 4 каждому методу на каждой текстуре из тестового набора. В таблице ниже приведены средние арифметические результатов с округлением в большую сторону.

	Структура	Оригинальность /качество	Семантика	Швы
Patch-B	4	3	3	есть
No-Par	3	2	3	нет
Conv N	1	3	2	есть
DeepC	3	1	2	есть
MultiR	2	3	2	есть

5. Выводы

Как можно заметить по иллюстрациям, самым лучшим и стабильным методом оказался Patch-Based [1][5], на большинстве картинок он выдал приемлемый, если не лучший результат, однако к значительным минусам метода можно отнести то, что новая картинка получается полностью из исходной переставлением блоков, что значительно вредит оригинальности текстуры.

Обычный нейросетевой [4] метод плохо сохраняет структуру текстуры, но зато выдает довольно качественную и оригинальную картинку. Улучшение нейросетевого метода, Deep correlation [6], ведет себя наоборот: созданные им текстуры имеет схожую структуру с исходным изображением, однако они получаются плохого качества (с артефактами), а также сильно похожими на исходное. Также в силу вышеперечисленного следует и то, что оба метода плохо сохраняют семантику изображения.

Texture Synthesis by Non-parametric Sampling [2] хорошо сохраняет структуры текстур, однако в силу того, что этот метод синтезирует текстуру попиксельно, результаты его работы получаются слишком низкого качества, что является существенным минусом метода.

Текстуры, получаемые Multiresolution Sampling методом [3, 7], сохраняют неплохую структурированность, а также качество, но, несмотря на это, проигрывают другим методам в их сильных аспектах.

Таким образом, можно подвести итог, что для задач синтеза, не требующих абсолютно новой картинки лучше всего подходит Patch-Based метод [1, 5]; для задач заполнения небольших дыр в изображении наилучшим решением будет Non-parametric Sampling метод [2]. При требованиях создать новую оригинальную текстуру без требований структурированности следует использовать

обычный нейросетевой метод [4] или Multiresolution Sampling метод [3, 7].

6. Иллюстрации



Рис. 1. Слева направо, сверху вниз: 1) исходное изображение, 2) Patch-Based, 3) Non-parametric Sampling, 4) Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks, 5) Deep Correlations for Texture Synthesis, 6) Multiresolution Sampling Procedure for Synthesis.

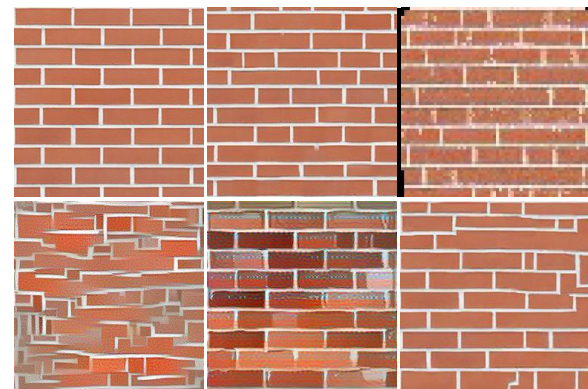


Рис. 2. Слева направо, сверху вниз: 1) исходное изображение, 2) Patch-Based, 3) Non-parametric Sampling, 4) Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks, 5) Deep Correlations for Texture Synthesis, 6) Multiresolution Sampling Procedure for Synthesis.

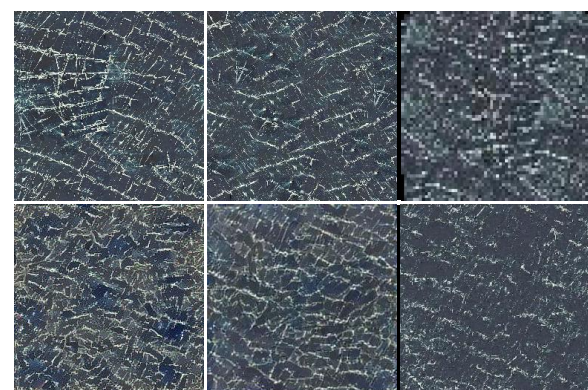


Рис. 3. Слева направо, сверху вниз: 1) исходное изображение, 2) Patch-Based, 3) Non-parametric Sampling, 4) Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks, 5) Deep Correlations for Texture Synthesis, 6) Multiresolution Sampling Procedure for Synthesis.

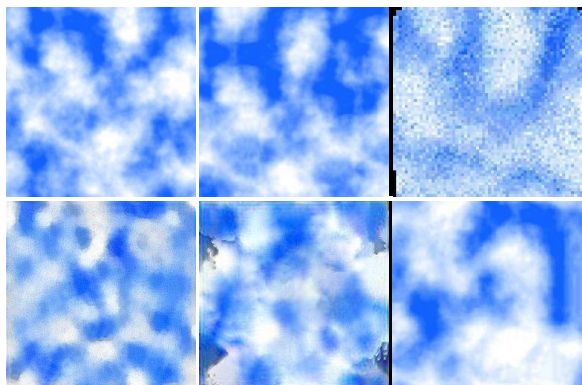


Рис. 4. Слева направо, сверху вниз: 1) исходное изображение, 2) Patch-Based, 3) Non-parametric Sampling, 4) Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks, 5) Deep Correlations for Texture Synthesis, 6) Multiresolution Sampling Procedure for Synthesis.



Рис. 5. Слева направо, сверху вниз: 1) исходное изображение, 2) Patch-Based, 3) Non-parametric Sampling, 4) Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks, 5) Deep Correlations for Texture Synthesis, 6) Multiresolution Sampling Procedure for Synthesis.



Рис. 6. Слева направо, сверху вниз: 1) исходное изображение, 2) Patch-Based, 3) Non-parametric Sampling, 4) Texture Synthesis Using Convolutional Neural Networks, 5) Deep Correlations for Texture Synthesis, 6) Multiresolution Sampling Procedure for Synthesis.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-31-20032 и 18-01-00569.

8. Литература

[1] Alexei A. Efros and William T. Freeman. 2001. Image quilting for texture synthesis and transfer. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive*

techniques (SIGGRAPH '01). ACM, New York, NY, USA, 341-346. DOI: <https://doi.org/10.1145/383259.383296>

[2] Alexei A. Efros and Thomas K. Leung. 1999. Texture Synthesis by Non-Parametric Sampling. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision - Volume 2 - Volume 2* (ICCV '99), Vol. 2. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 1033-.

[3] Jeremy S. De Bonet. 1997. Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (SIGGRAPH '97). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 361-368. DOI: <https://doi.org/10.1145/258734.258882>

[4] Leon A. Gatys, Alexander S. Ecker, and Matthias Bethge. 2015. Texture synthesis using convolutional neural networks. In *Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1* (NIPS'15), C. Cortes, D. D. Lee, M. Sugiyama, and R. Garnett (Eds.), Vol. 1. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 262-270.

[5] Lin Liang, Ce Liu, Ying-Qing Xu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. 2001. Real-time texture synthesis by patch-based sampling. *ACM Trans. Graph.* 20, 3 (July 2001), 127-150. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/501786.501787>

[6] Omry Sendik and Daniel Cohen-Or. 2017. Deep Correlations for Texture Synthesis. *ACM Trans. Graph.* 36, 5, pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/3015461>

[7] Li-Yi Wei and Marc Levoy. 2000. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (SIGGRAPH '00). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 479-488. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/344779.345009>

С полными результатами можно ознакомиться по ссылке <https://drive.google.com/file/d/1pHBgQk-XWw1U6LNRxUIP5oushcQDCznH/view> (методы даны в той же последовательности, что и на рисунках).

Об авторах

Бабичев Андрей Юрьевич, студент кафедры интеллектуальных информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета. E-mail: andrey.babichev@graphics.cs.msu.ru.

Фролов Владимир Александрович, к.ф.-м.н., научный сотрудник кафедры интеллектуальных информационных технологий факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета и Института Прикладной Математики имени М. В. Келдыша РАН. E-mail: vfrolov@graphics.cs.msu.ru.

Эффективный метод восстановления освещения в системах смешанной реальности с использованием HDR-изображения трехмерной сцены

Н.Н. Богданов¹, И.С. Потемин¹, Д.Д. Жданов¹, А.Д. Жданов¹, М.И. Сорокин¹
nnbogdanov@corp.ifmo.ru|ipotemin@yandex.ru|ddzhdanov@mail.ru|andrew.gtx@gmail.com|vergotten@gmail.com
¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Одна из основных проблем устройств смешанной реальности – физически правильное представление распределения яркости для виртуальных объектов и их теней в реальном мире. Другими словами, восстановление корректного распределения яркости сцены является одним из ключевых параметров, позволяющих решить проблему корректного взаимодействия между виртуальным и реальным мирами, однако нейронные сети не позволяют определить положение источников света, которые не находятся в прямой видимости. В работе предлагается метод восстановления параметров источников освещения исходя из анализа теней, отбрасываемых объектами. Приводятся результаты работы предложенного метода, оценивается точность восстановления положения источников света и демонстрируется визуальное отличие изображения сцены с исходными источниками света от этой же сцены с восстановленными параметрами источников света.

Ключевые слова: смешанная реальность, распределение яркости, изображение в широком динамическом диапазоне, 3D-сцена, дополненная реальность, восстановление положения источника света, не прямое освещение, прямое освещение, точечный источник света.

The efficient method of illumination restoration in mixed reality systems with use of HDR image of 3D scene

N.N. Bogdanov¹, I.S. Potemin¹, D.D. Zhdanov¹, A.D. Zhdanov¹, M.I. Sorokin¹
nnbogdanov@corp.ifmo.ru|ipotemin@yandex.ru|ddzhdanov@mail.ru|andrew.gtx@gmail.com|vergotten@gmail.com
¹ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

One of the main problems of mixed reality devices is the physically correct representation of the brightness distribution for virtual objects and their shadows in the real world. In other words, restoring the correct distribution of scene brightness is one of the key parameters to solve the problem of correct interaction between the virtual and real worlds, but neural networks do not allow to determine the position of light sources that are not in line of sight. The paper proposes a method for restoring the parameters of light sources based on the analysis of shadows cast by objects. The results of the proposed method are presented, the accuracy of restoring the position of light sources is estimated and the visual difference between the image of the scene with the original light sources from the same scene with the restored parameters of light sources is demonstrated.

Keywords: mixed reality, luminance distribution, High-Dynamic Range Image, 3D-scene, augmented reality, reconstruction of light source position, indirect illumination, direct illumination, point light source.

1. Введение

В настоящее время технологии VR (виртуальная реальность), AR (дополненная реальность), MR (смешанная реальность) развиваются очень быстро [1, 2, 3]. На рынке представлено множество устройств VR, AR, MR от различных производителей [4, 5, 6], а над улучшением качества восприятия и повышением эффективности данных технологий работают многие исследовательские группы [7, 8, 9]. Существует ряд реализованных пилотных проектов, использующих эти технологии не только в индустрии развлечений и игр, технологии находят применение в медицине [10], в архитектуре [11], в военном деле [12] и в других областях.

Технология смешанной реальности сложнее технологий виртуальной или дополненной реальностей. Если в системе виртуальной реальности человек полностью погружен в виртуальный мир и не видит окружающее пространство, а в системе дополненной реальности человек наблюдает вспомогательные элементы, такие как, например, данные навигации или информационные сообщения, то в системе смешанной реальности человек видит виртуальные объекты, добавленные в пространство реального мира, при этом у него не должно возникать конфликта зрительного восприятия. Для того, чтобы виртуальный объект выглядел

достаточно реалистично, необходимо выполнить несколько условий. Во-первых, виртуальный объект должен иметь соответствующие текстуры и оптические свойства поверхности (отражение, преломление, преломление). В некоторых случаях свойства поверхности (текстура, оптические свойства) могут быть назначены вычислительной системой или пользователем произвольно, но на основе данных из достоверной библиотеки материалов.

Вторым важным условием реалистичного восприятия виртуальных объектов является их способность отбрасывать тени в соответствии с условиями освещения. Виртуальные объекты должны визуализироваться таким образом, чтобы их виртуальные тени коррелировали с тенями от реальных объектов и не вызывали чувства дискомфорта при наблюдении смешанного изображения.

В данной статье авторы предлагают эффективный метод восстановления положения источников света (ИС) для систем смешанной реальности с учетом освещения реального мира.

2. Анализ существующих работ

Ранее авторы рассматривали вопрос восстановления распределения яркости методом трех сфер, который

заклучался в определении координат положения источника света в пространстве сцены [13]. В статье было показано, что разработанный метод определения координат положения источника света на основе анализа HDRI может обеспечить достаточно точные результаты. Тем не менее, метод имеет ряд недостатков, таких как:

1. Работоспособен только при условии, что поверхности имеют свойства отражения, близкие к закону Ламберта, то есть идеально "матовые" или диффузно отражающие поверхности.
2. Метод эффективен только для одного точечного источника света.

Предлагаемый метод лишен этих недостатков. Он может работать с произвольными диффузными поверхностями (заданными ДФР), а также с несколькими источниками света.

Вопросами восстановления условий освещения реальных объектов занимаются различные группы исследователей. В работе [14] представлен метод, основанный на высококачественной оценке освещенности методами сверточной нейронной сети (СНС, англ. - CNN). Авторы обучают СНС, используя синтезированные изображения, и впоследствии применяют ее для анализа реальных изображений. Чтобы поддерживать точность и эффективность метода, результаты оценки освещенности объединяются от нескольких экземпляров СНС. Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый метод дает достаточно точные оценки при анализе изображений реального мира.

В работе [15] представлен метод визуализации теней с помощью освещения, полученного в ходе анализа изображений в приложениях дополненной реальности. Для аппроксимации результатов освещения и затенения окружающей среды система использует купол с разноцветными источниками света. Цвет каждой тени определяется областью окружающей среды за источником света. В результате становится возможным устанавливать непосредственное влияние изменений условий освещения на отбрасывание теней виртуальными объектами.

В статье [16] предложена концепция анализа теней в режиме реального времени для приложений дополненной реальности, использующих теневые объемы. Концепция была реализована в прототипе «shadowAReality» с положительными результатами. Тени значительно улучшают реальную сцену и предлагают пользователю более интуитивный и реалистичный мир. Как представлено в статье [17], алгоритм анализа теневого объема может быть улучшен за счет использования порталов, окклюзии и методов отбора усеченного вида, позволяющих избежать рендеринга ненужных теневых объемов. Кроме того, возможно улучшение алгоритма теневого объема с использованием языка затенения nVIDIA Cg [18, 19].

Авторы работы [20] представляют метод восстановления освещения и свойств поверхности по случайно отсканированной геометрии. Это означает быструю и потенциально шумную процедуру сканирования немодифицированных и неструктурированных сцен с помощью стандартного датчика RGB-D. В отличие от процедур восстановления светотехнических характеристик объектов, требующих тщательной подготовки в лабораторных условиях, этот метод работает с данными, которые могут быть получены пользователями в полевых условиях. Чтобы обеспечить надежную процедуру восстановления, авторы сегментировали полученную геометрию на поверхности с однородными свойствами материала и рассчитали перенос излучения на этих сегментах. С такими входными данными авторы решили обратную задачу рендеринга – факторизацию освещения и свойств материала, используя итеративную оптимизацию в

форме сферических гармоник. Это позволяет учитывать самозатенение и восстанавливать зеркальные свойства объектов. Полученные данные можно использовать для генерации широкого спектра приложений смешанной реальности, включая рендеринг синтетических объектов с соответствующим освещением в заданной сцене, а также синтез изображения сцены (или ее части) с новым освещением. Была продемонстрирована надежность данного подхода на реальных и синтезированных примерах в различных условиях освещения и проведено сравнение с исходными данными.

Для восстановления параметров естественного и искусственного освещения по HDRI изображениям существует ряд работ [21-23], которые позволяют найти и выделить яркие источники света, создающие блики и тени. Однако для гарнитур смешанной реальности при нахождении параметров естественного освещения (положение солнца) более естественный подход должен основываться на анализе параметров датчиков, позволяющих найти положение солнца, используя данные его модели (широта, долгота, дата и время).

Рассмотренные работы предлагают эффективные подходы для восстановления распределения освещения в системах смешанной реальности, что в ряде случаев позволяет получить удовлетворительные результаты. С другой стороны, рассмотренные подходы хорошо работают, когда в сцене присутствует только один источник света (солнце или искусственный источник света) или источники света находятся на значительном расстоянии (практической бесконечности). В реальном мире присутствует множество источников света. Поэтому авторами предложен новый подход, который может восстановить параметры освещения в сложных сценах с несколькими источниками света.

3. Метод

Алгоритм разработанного метода продемонстрирован на рисунке 1 и состоит из следующих этапов:

1. Получение входных данных от MR-устройства:
 - HDR RGB изображение видимого пространства,
 - карта глубины сцены.
2. Построение 3D модели на основе полученных данных.
3. Поиск по 2D HDR изображению и 3D модели теней и распознавание объектов, которые их отбрасывают.
4. Добавление в 3D модель горизонтальных поверхностных детекторов света. Их количество зависит от высоты помещения, шаг между соседними детекторами составляет 0.1 – 0.2 м (в среднем 5-10% от высоты помещения).
5. Добавление в 3D модель виртуальных узких конических источников света по контурам теней (точка контура «обстреливает» тонкими пучками соответствующий объект, создающий тень, по всему его видимому контуру). Количество источников выбирается в зависимости от сложности контура тени. Для восстановления положения источников света рекомендуется размещать виртуальные источники для каждого объекта, имеющего тень. В общем случае 3D модель не является необходимой составляющей данного алгоритма. Изображение сцены с картой ее глубин, привязанной к системе координат наблюдателя, формирует достаточный набор данных для формирования пучков лучей по контуру объекта.
6. Направление виртуальных ИС, расположенных по контуру тени, на контур предмета.

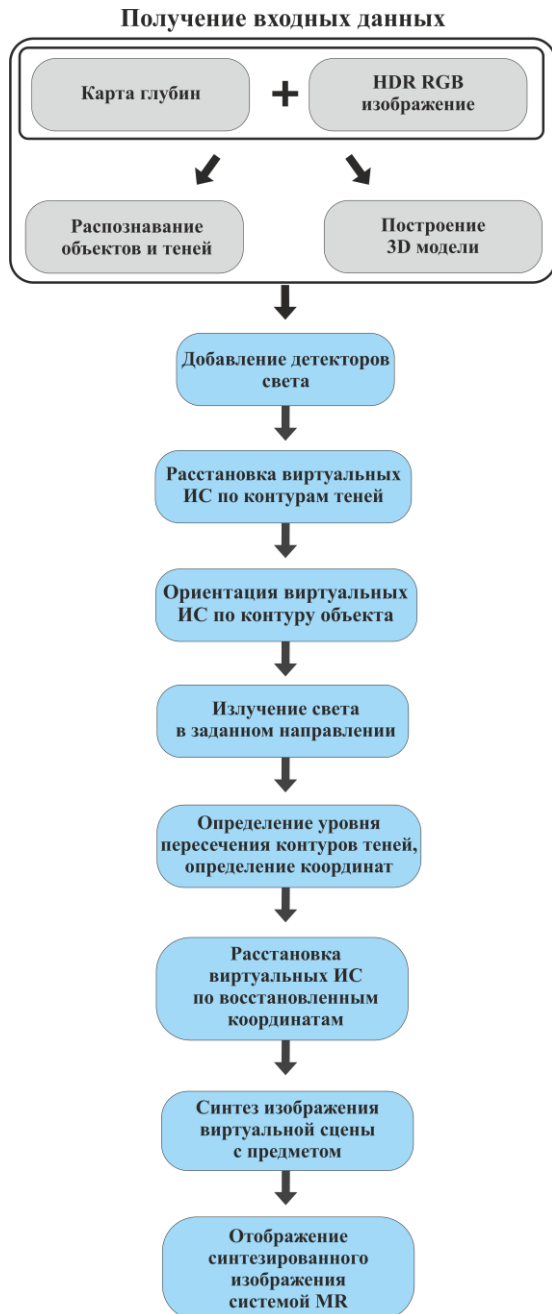


Рис. 1. Алгоритм восстановления освещения с использованием HDR-изображения 3D сцены

7. Излучение света виртуальными коническими источниками и его регистрация на поверхностных приемниках. Для каждого источника будет сформирован соответствующий контур тени на приемниках. Результаты моделирования по результатам данного этапа продемонстрированы на рис.2. В данном случае круглый стол освещался одним источником света малого размера.
8. На приемниках света анализируется относительная площадь пересечения большинства теней по отношению к суммарной площади теней. Чем ближе к источнику света расположен приемник, тем меньше относительная площадь пересечения большинства теней, и чем дальше удалены приемники, тем больше относительная площадь пересечения. В ближайшей к виртуальным

источникам света области площадь пересечения всех теней будет минимальна.

9. Зная координаты точки в горизонтальной плоскости и положение этой плоскости можно говорить о полном восстановлении координат реального источника света и расположить точечный источник света по вычисленным координатам. Повторяя данное действие для всех восстановленных координат, можно расставить все точечные источники света в сцене.
10. Синтезировать изображения сцены с виртуальными объектами для левого и правого глаза.
11. Вывести синтезированное изображение виртуального предмета на MR устройство.

Стоит отметить, что пока метод реализован частично. Авторы не решали вопросы пунктов 1, 2, 3 данного метода, поскольку они уже решены другими исследователями. Решение проблем, связанных с распознаванием теней, связью теней с отбрасывающими их объектами, выделением контуров объектов, подробно описаны в работах [24-27]. Оценка работоспособности метода была произведена в виртуальном прототипе реального мира, где в качестве наблюдателя использовался виртуальный прототип реального MR устройства. Данный метод исследования визуального восприятия систем смешанной реальности был детально описан в работе [28].

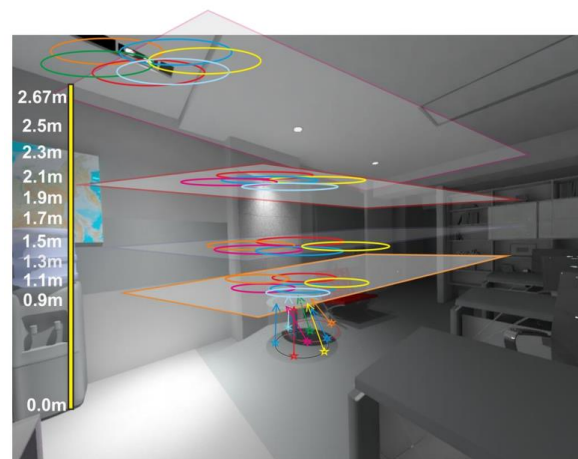


Рис. 2. Графическое представление метода

4. Результаты моделирования

Приведенный выше алгоритм был реализован на Python в системе фотореалистичной визуализации Lumiscept. Модификация сцены офисного помещения, включающая расстановку детекторов излучения и узких конических источников света (каждый контур формировался источником света своего цвета), с началом координат на границе тени и направленных на точки, находящиеся на границе объекта, была реализована на Python. Далее, используя Lumiscept API, запускался метод прямой стохастической трассировки, который формировал распределения освещенности на детекторах излучения. Далее приложение, написанное на Python, анализировало изображения, полученные на детекторах излучения, и находило детекторы, в которых линии контуров от источников света имели общую точку пересечения (область максимального пересечения контуров была минимальна). Данные детекторы (координата Z) и области на детекторах (координаты X, Y) принимались за ориентировочные положения источников света.

Основное время работы алгоритма занимал расчет освещения в системе Lumiscept (порядка минуты на Intel Core

i5) и анализ изображения линий контуров (до пяти минут на высоком разрешении детекторов).

На примере модели офисного интерьера авторы рассмотрели метод восстановления освещения для приложения смешанной реальности с использованием HDR-изображения трехмерной сцены. На следующих рисунках 3 и 4 представлено синтезированное HDR-изображение интерьера реального офисного помещения, карта яркости и визуализация лучей.

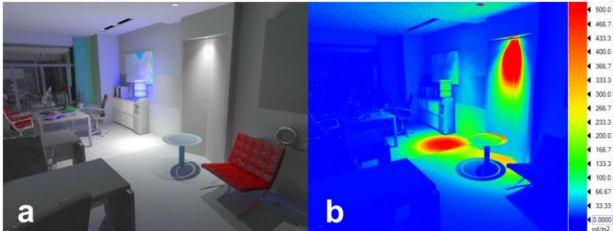


Рис. 3. Синтезированное HDR-изображение интерьера офисного помещения (a) и соответствующая карта яркости (b)

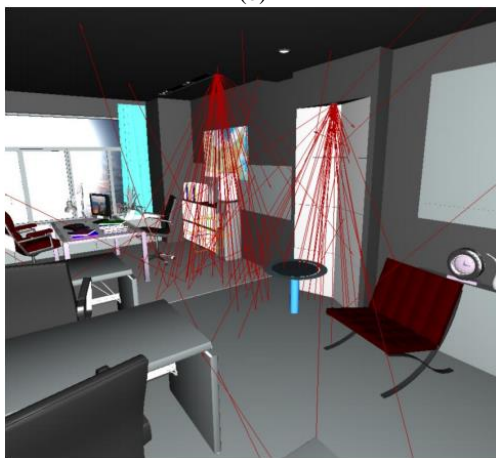


Рис. 4. Визуализация лучей в интерьере офисного помещения

Данный интерьер имеет сложную геометрию, которая освещается искусственными источниками света.

Рисунок 5 показывает участок интерьера, где проводился численный эксперимент. В сцене присутствуют предметы мебели, такие как кресло, журнальный столик, точечные светильники на потолке.

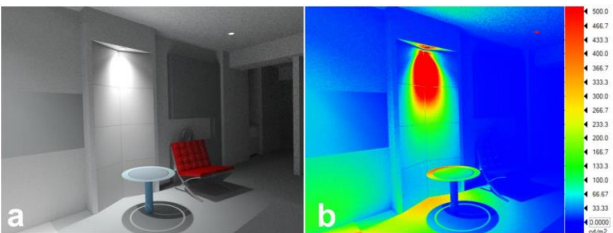


Рис. 5. Синтезированное HDR-изображение области эксперимента (a) и соответствующая карта яркости (b)

На этапе получения входных данных были определены геометрия предметов и теней. Далее эти объекты сохраняются и используются. Например, круглый журнальный столик отбрасывает две тени, которые были распознаны и связаны с этим объектом. На данный момент этап распознавания теней, предмета и привязка их к координатам изображения (и соответственно сцены) проводится вручную.

На рисунке 6 графически представлен следующий этап. Программа размещает виртуальные источники света по

контурам теней в виртуальной модели офиса. В этом случае были определены две круглые тени, отбрасываемые журнальным столиком.

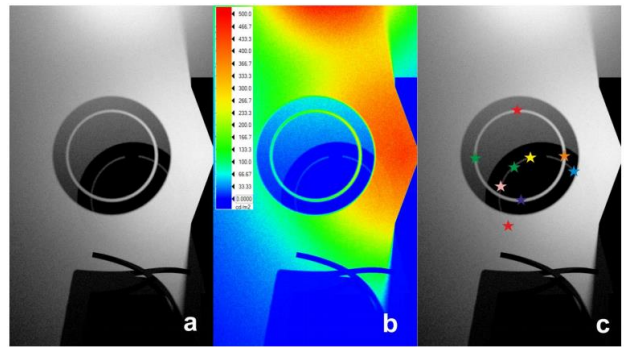


Рис. 6. Вид теней на полу (a), его карта яркости (b), координаты для виртуальных источников света (c)

На следующем этапе программа формирует узкие пучки лучей, направленные на точки, лежащие на краю журнального столика. В данном исследовании авторы обозначили источники света, формирующие контур, отдельным цветом. Далее программа создавала несколько поверхностных детекторов света на разных уровнях. Узкие конические источники света позволяли создать контрастные силуэты на всех поверхностных приемниках излучения. Предполагалось, что на некотором уровне появится область с минимальной площадью пересечения большинства всех теней, и это позволит найти положение источника света. Анализ изображения на детекторах производился с помощью приложения, написанного на Python.

В виртуальном прототипе использовалось только два источника света, а другие источники света были отключены. Первый источник света имел координаты XYZ = (1.5, 0.4, 2.2) метра, где третья координата (Z) это высота от поверхности пола. Второй имел координаты XYZ = (0.9, 1.8, 2.7) метра. В модели присутствовало несколько поверхностных детекторов, ближайшие к реальным источникам света находились на уровне 2.1 метра и на уровне 2.67 метра. Авторы предполагают, что если погрешность отклонения от целевого значения будет составлять не более 5%, то это не окажет значительного влияния на распределение яркости в сцене и человек сможет наблюдать виртуальные объекты без заметного дискомфорта. Следующий рисунок 7 показывает результаты моделирования.

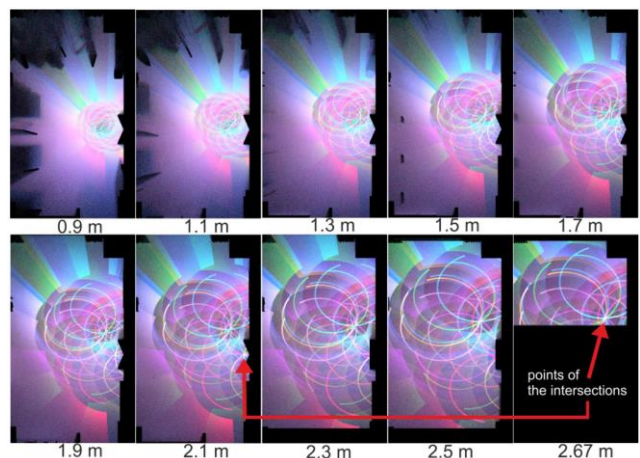


Рис. 7. Расчётные плоскости на разных уровнях и определенные точки пересечения силуэтов

В результате моделирования было получено, что первое пересечение имеет координаты XYZ = (1.48, 0.39, 2.1) метра, второе пересечение имеет координаты XYZ = (0.88, 1.77, 2.67) метра. Координаты пересечений очень близки к реальному положению источников света. В таблицах 1 и 2 приведены сводные данные для исходных и восстановленных координат положения света.

Ось	X	Y	Z
Исходное положение источника света, м	1.5	0.4	2.2
Восстановленное положение источника света, м	1.48	0.39	2.1
Абсолютная погрешность положения источника света, м	-0.02	-0.01	-0.1
Относительная погрешность положения источника света	0.013	0.025	0.04

Таблица 1. Исходные и восстановленные координаты положения первого источника света

Ось	X	Y	Z
Исходное положение источника света, м	0.9	1.8	2.7
Восстановленное положение источника света, м	0.88	1.77	2.67
Абсолютная погрешность положения источника света, м	-0.02	-0.03	-0.03
Относительная погрешность положения источника света	0.022	0.016	0.01

Таблица 2. Исходные и восстановленные координаты положения второго источника света

На следующем этапе в центр пересечения теней были установлены точечные источники света, после чего можно было визуально оценить качество восстановления источников света.

Для проверки визуального восприятия интерьера с использованием восстановленных положений источников света было синтезировано изображение исходной сцены с использованием полученных параметров освещения. На рисунке 8 и рисунке 9 показаны результаты синтеза изображения исходной сцены с исходными и восстановленными источниками света.

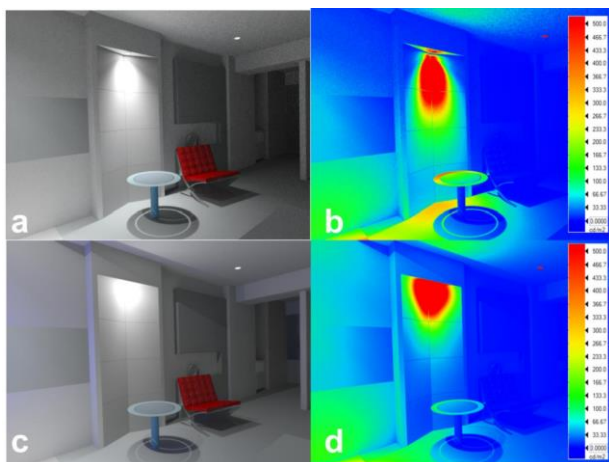


Рис. 8. Вид на экспериментальную зону. Интерьер с реальными источниками света (а) и с восстановленными источниками света(с), (b, d) соответствующие карты яркости

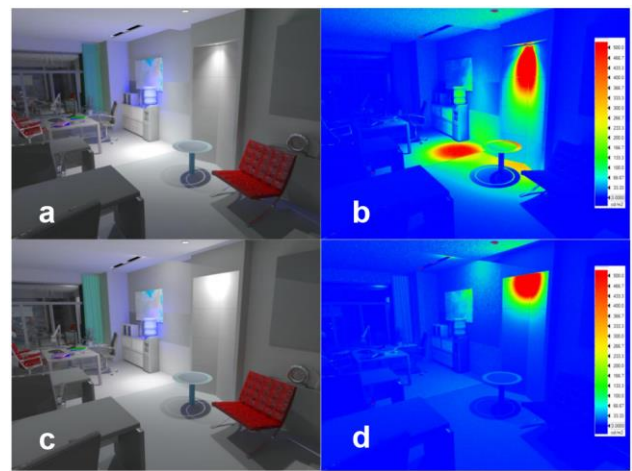


Рис. 9. Вид на комнату. Интерьер с реальными источниками света (а) и с восстановленными источниками света(с), (b, d) соответствующие карты яркости

Заключение

В данной работе было показано, что разработанный метод определения координат положения источников света на основе анализа теней с использованием HDRi позволяет обеспечить достаточно точное восстановление положения источников света, при условии отсутствия сильного зашумления входных данных. Несмотря на то, что данный алгоритм был реализован на Python в системе Lumiscript и его производительность не соответствует требованиям систем реального времени, в ближайшее время планируется его реализация на GPU и в дальнейшем на кристалле для использования в новых устройствах смешанной реальности. Кроме того, планируется усовершенствовать алгоритм определения минимальной области пересечения контуров, формируемых тенями, в случае сложного освещения протяженными источниками света, и алгоритм определения границ объекта, формирующего тень.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10190).

Литература

- [1] Parsons, S. and Cobb, S., "State-of-the-art of virtual reality technologies for children on the autism spectrum," *European Journal of Special Needs Education* 26(3), 355-366 (2011).
- [2] Palmarini, R., "A systematic review of augmented reality applications in maintenance," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 49, 215-228 (2018).
- [3] Izadi, S., "The Reality of Mixed Reality," *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction. ACM*, 12 (2016).
- [4] Oculus Rift, <https://www.oculus.com> (10 April 2019).
- [5] Epson Moverio, <https://moverio.epson.com> (10 April 2019).
- [6] Microsoft Hololens, <https://www.microsoft.com/en-us/hololens> (10 April 2019).
- [7] William, R. and Craig, A., [Understanding virtual reality: Interface, application, and design], Morgan Kaufmann, (2018).
- [8] Iis, T. P., Jung, T. H., and Claudia M. D., "Embodiment of wearable augmented reality technology in tourism experiences," *Journal of Travel research* 57(5), 597-611 (2018).
- [9] Trout, T., "Collaborative mixed reality (MxR) and networked decision making," *Next-Generation Analyst VI. Vol. 10653. International Society for Optics and Photonics*, (2018).
- [10] Sheena, B., Anandasabapathy, S. and Shukl, R. "Use of augmented reality and virtual reality technologies in endoscopic

- training," *Clinical Gastroenterology and Hepatology* 16(11), 1688-1691 (2018).
- [11] Kiljae, A., Ko, D., and Gim, S. "A Study on the Architecture of Mixed Reality Application for Architectural Design Collaboration," *International Conference on Applied Computing and Information Technology*. Springer, Cham, 4861 (2018).
- [12] Livingston, M., Zhuming, A., and Decker, J. W., "Human Factors for Military Applications of Head-Worn Augmented Reality Displays," *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham, 56-65 (2018).
- [13] Wang, X., Zhdanov, D. D., Potemin, I. S., Wang, Y. and Cheng, H., "The efficient model to define a single light source position by use of high dynamic range image of 3D scene," *Proc. SPIE 10020, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology IV, 100200I* (31 October 2016)
- [14] Mandl, D., Yi, K. M., Mohr, P., Roth, P. M., Fua, P., Lepetit, V., Schmalstieg, D. and Kalkofen D., "Learning lightprobes for mixed reality illumination," *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 82-89(2017).
- [15] Supan, P., Stuppacher, I. and Haller, M., "Image Based Shadowing in Real-Time Augmented Reality," *IJVR* 5.(3), 1-7 (2006).
- [16] Haller, M., Drab, S. and Hartmann, W., "A real-time shadow approach for an augmented reality application using shadow volumes," *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. ACM, 56-65 (2003).
- [17] Everitt, C. and Kilgard, M. J., "Practical and Robust Stenciled Shadow Volumes Hardware-Accelerated Rendering," *arXiv preprint cs/0301002* (2003).
- [18] Randima, F. and Kilgard, M. J., [The Cg Tutorial: The definitive guide to programmable real-time graphics], Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., (2003).
- [19] Kirk, D., [CG Toolkit, User's Manual], Nvidia Corporation, Santa Clara, CA, (2002).
- [20] Richter-Trummer, T., "Instant mixed reality lighting from casual scanning," *2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 27-36 (2016).
- [21] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Расчет солнечного освещения, заданного изображением с большим динамическим диапазоном // Труды 16-ой международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям - *ГрафиКон'2006*, Россия, Новосибирск, июль 1-5, 2006, с. 467-472.
- [22] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А., Шапиро Л.З. Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном // "*Программирование*", № 5, 2006, с. 62-80.
- [23] Валиев И.В., Волобой А.Г., Галактионов В.А. Физически корректная модель солнечного освещения, задаваемая изображением с большим динамическим диапазоном // "*Вестник компьютерных и информационных технологий*", № 9, 2009, с. 10-17.
- [24] Hariharan, Bharath, et al. "Simultaneous detection and segmentation." *European Conference on Computer Vision*. Springer, Cham, (2014).
- [25] Gupta, Saurabh, Pablo Arbelaez, and Jitendra Malik. "Perceptual organization and recognition of indoor scenes from RGB-D images." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (2013).
- [26] Kim, Dong, Muhammad Arsalan, and Kang Park. "Convolutional neural network-based shadow detection in images using visible light camera sensor." *Sensors* 18.4 (2018): 960.
- [27] Ji, Jing, Xudong Jiang, and Wei Sun. "Shadow detection using double-threshold pulse coupled neural networks." *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2016.

- [28] Potemin I.S., Livshits I., Zdanov D., Zhdanov A., Bogdanov N. An application of the virtual prototyping approach to design of VR, AR, and MR devices free from the vergence-accommodation conflict. *Proceedings of SPIE – (2018), Vol. 10694*, pp. 1069404

Об авторах

Богданов Николай Николаевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail nnbogdanov@corp.ifmo.ru.

Потемин Игорь Станиславович, к.т.н., доцент кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail ipotemin@yandex.ru.

Жданов Дмитрий Дмитриевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail ddzhdanov@mail.ru.

Жданов Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail adzhdanov@corp.ifmo.ru.

Сорокин Максим Игоревич, аспирант кафедры визуализации (базовой) факультета программной инженерии и компьютерной техники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Его E-mail vergotten@gmail.com.

Адаптивный метод рендеринга динамических трехмерных сцен

В.И. Гоначьян¹
pusheax@ispras.ru

¹Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва, Россия

Рендеринг динамических трехмерных сцен представляет сложность из-за невозможности выполнения предобработки для объединения и упрощения полигональных моделей, сохранения информации о видимости. При рендеринге сцен с большим количеством подвижных объектов производительность зачастую падает из-за перезаписи командных буферов, выполнения лишних проверок видимости. Предлагается модель производительности, согласно которой вычисляется требуемый объем памяти и выполняется оценка времени выполнения основных этапов прямого рендеринга. Предлагается адаптивный метод рендеринга динамических сцен, который выбирает наиболее эффективный метод использования командных буферов и количество аппаратных проверок видимости в зависимости от состояния сцены. В отличие от существующих методов рендеринга динамических сцен, предложенный метод учитывает затраты на составление и посылку командных буферов, вычисляет оптимальное количество проверок видимости, используя модель производительности рендеринга. Результаты тестирования предложенного адаптивного метода показали его эффективность при рендеринге динамических сцен с большим количеством объектов.

Ключевые слова: рендеринг, составление командных буферов, удаление невидимых поверхностей, модель производительности рендеринга.

Adaptive Rendering of Dynamic 3D Scenes

V.I. Gonakhchyan¹
pusheax@ispras.ru

¹Ivannikov Institute for System Programming of the RAS, Moscow, Russia

Rendering of dynamic 3d scenes is challenging because it is impossible to perform preprocessing to merge and simplify polygonal models, to precalculate visibility information. The dynamic behavior of objects (visibility change, movement) is causing command buffers rebuilding and rejecting of invisible objects often does not result in performance gains. We propose an adaptive method for visualizing dynamic scenes, which selects the most efficient method for recording and using command buffers and the number of hardware occlusion queries. Proposed adaptive method is based on the performance model, which performs an estimation of the execution time of the main stages of forward rendering. Testing results of the proposed method showed its effectiveness when rendering large dynamic scenes.

Keywords: rendering, command buffer recording, occlusion culling, performance model of rendering.

1. Введение

Динамические сцены содержат большое количество объектов с меняющимися характеристиками: видимость, положение, материал. В некоторых приложениях, таких как САПР, необходимо иметь возможность выделять и передвигать любые объекты в сцене. Это вызывает затраты, связанные с перестроением иерархии, перезаписыванием командных буферов. Для решения этой проблемы предлагается метод составления иерархии с пространственными индексами, которая также используется для сокращения затрат на буферизацию команд рендеринга. Для определения затрат на буферизацию и времени рендеринга предлагается модель производительности рендеринга.

Большие трехмерные сцены содержат невидимые объекты, которые, тем не менее, отправляются на графический процессор для рендеринга. Методы удаления невидимых поверхностей (occlusion culling) используются для отбраковки невидимых объектов. При рендеринге динамических сцен нельзя выполнить предобработку для определения видимости объектов и зачастую используются аппаратные проверки видимости (hardware occlusion queries). Однако в некоторых случаях выполнение аппаратных проверок видимости может понизить производительность рендеринга. Существующие методы, такие как иерархические проверки видимости, отправка одного запроса на группу объектов, плохо справляются с масштабными сценами. В данной работе, на основе предложенной модели производительности вычисляется оптимальное количество проверок видимости.

Во время рендеринга динамические сцены сильно изменяются. Обычно новая сцена содержит маленькое количество объектов, затем количество объектов постепенно увеличивается, назначаются новые положения, материалы, видимость. Для рендеринга различных состояний сцены требуются различные способы, учитывающие характеристики сцены в данный момент времени. В данной статье, предлагается адаптивный метод рендеринга, который подбирает наиболее эффективный метод буферизации объектов и количество запросов видимости для текущего состояния сцены.

Рассмотрим работы по оценке времени рендеринга. В работе [6] предложен адаптивный метод рендеринга с заданной частотой кадров. Для каждого кадра выбирается подходящий уровень детализации объектов для поддержки целевой частоты кадров. В [12] учитывается попадание вершин в кэш памяти после трансформации, предлагается суммировать времена работы различных этапов конвейера для получения консервативной оценки времени рендеринга. Существующие методы оценки времени рендеринга не учитывают работу по составлению и отправке буферов команд, которая может отнимать значительное время при большом количестве объектов. В данной работе предлагается использовать новые возможности современного графического интерфейса Vulkan для измерения времени рендеринга.

Существует множество методов удаления невидимых поверхностей [5]. В данной работе рассматривается рендеринг динамических сцен, поэтому наибольший интерес представляют методы удаления невидимых поверхностей без предобработки сцен [2,8]. В этих работах исследованы проверки видимости (occlusion query). Для

сокращения времени ожидания результатов запросов видимости предложили выполнять отправку запросов видимости для листьев иерархии, проверять результаты видимости в следующем кадре. Иерархические аппаратные проверки видимости подходят для рендеринга динамических сцен и используются в данной работе.

Некоторые методы выполняют генерацию буфера команд на графическом процессоре (indirect rendering) [4]. При этом не выполняется дорогостоящая передача команд на графический процессор. Однако метод рассчитан на пообъектное отсечение, выполнение иерархических проверок видимости представляется затруднительным.

Рассмотрим развитие программных интерфейсов для рендеринга трехмерных сцен. В OpenGL до версии 1.4 команды рендеринга посылались на графический процессор в режиме “immediate mode” (команды и вершины отправлялись на графический процессор каждый кадр). В OpenGL 1.5 были добавлены объекты “VBO”, которые позволили хранить вершины в памяти графического процессора [9]. Это помогло ускорить взаимодействие центрального и графического процессоров, но проблемы составления командных буферов и валидации состояния остались. Расширение OpenGL “NV_command_list” помогло ускорить составление и отправку буферов команд. Это повысило эффективность рендеринга сцен САПР с большим количеством объектов [10]. Недавно разработали новый графический интерфейс Vulkan, который позволил более эффективно работать с командными буферами и при необходимости отключать валидацию состояния. В программной реализации методов данной работы используется Vulkan.

Исследование производительности составления командных буферов в Vulkan было проделано в работах [3,11]. В отличие от существующих работ, в данной статье предлагается использовать вспомогательные буфера (secondary command buffer) для хранения команд рендеринга в узлах иерархии. Производительность составления и отправки командных буферов в Vulkan была исследована в работе [7].

2. Модель производительности

В этой главе предлагается модель производительности, позволяющая рассчитать время выполнения прямого рендеринга динамической сцены за один проход на центральном и графическом процессорах.

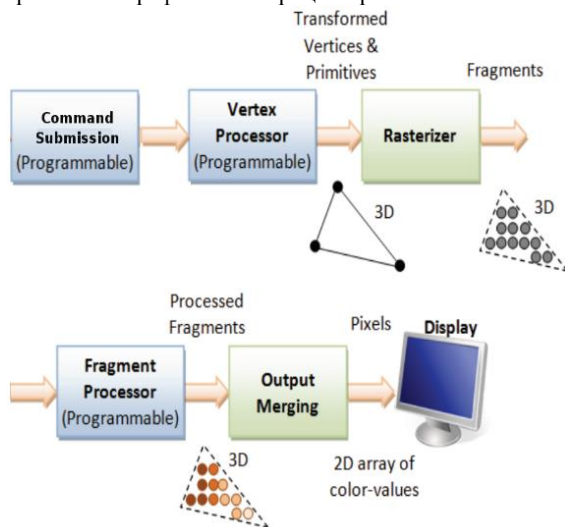


Рис. 1. Основные этапы рендеринга объектов сцены.

На рис. 1 изображены основные этапы рендеринга, которые включают обработку объекта на центральном

процессоре и графическом процессоре. Любой из этих этапов может быть узким местом при выполнении рендеринга. Первый этап (Command Submission) происходит на центральном процессоре. Команда рендеринга содержит информацию о состоянии конвейера графического процессора и смещение в памяти, по которому хранятся вершины (индексы вершин) объекта. Команды посылаются по шине на графический процессор. Далее устанавливается новое состояние конвейера или продолжается использование старого состояния. При обработке вершин (Vertex Processor) выполняется трансформация вершин для перевода вершин в плоскость изображения. Далее происходит растеризация для определения пикселей, которые входят в треугольник. Во время следующего этапа (Fragment Processor) происходит вычисление цвета каждого пикселя треугольника с учетом источников освещения и текстур. Далее происходит объединение результатов и вывод на экран.

Зачастую на практике производительность падает именно на программируемых этапах рендеринга. Первый этап может быть лимитирующим при рендеринге сцен с большим количеством объектов. Второй этап — когда сцена содержит большое количество вершин. Четвертый этап — когда выводится большое количество пикселей на экран, либо вычисления в фрагментном шейдере достаточно дорогие.

Рендеринг происходит наиболее быстро, когда вершины и командные буфера хранятся в памяти графического процессора. Необходимо определить заранее, что все объекты сцены и ресурсы поместятся в память. Формула для оценки объема потребляемой памяти:

$$M_{scene} = N_{vert} * M_{vert} + N_{index} * M_{index} + N_{tc} * M_{tc} + N_{norm} * M_{norm} + \sum_i M_i^{tex} + \sum_i M_i^{buf} + \sum_i M_i^{desc}, \quad (1)$$

где M_{vert} — объем памяти, который занимает одна вершина, M_{index} — объем памяти, который занимает один индекс, M_{tc} — объем памяти, который занимают текстурные координаты одной вершины,

M_{norm} — объем памяти, который занимает одна нормаль,

M_i^{tex} — объем памяти, который занимает текстура,

M_i^{buf} — объем памяти, который занимает командный буфер или буфер с матрицей трансформации и цветом,

M_i^{desc} — объем памяти, который занимает описание ресурса графического интерфейса,

N_{vert} , N_{index} , N_{tc} , N_{norm} — количество вершин, индексов вершин, текстурных координат, нормалей.

Предположим, что геометрия и текстуры сцены S загружены в видеопамять, для ускорения рендеринга используется иерархия H . Во время рендеринга происходит составление и отправка команд рендеринга на графический процессор и выполнение рендеринга на графическом процессоре. Выведем формулу для оценки времени выполнения прямого рендеринга (составление буферов команд происходит на центральном процессоре, рендеринг выполняется за один проход) полигональной сцены S с учетом буферизации команд и проверок видимости:

$$T(S, H) = T_{buf}(S) + \max(T_{state}(S), T_{vert}(S), T_{frag}(S)) + T_{fc}(H) + T_{buf}(H) + \max(T_{state}(H), T_{vert}(H), T_{frag}(H), T_{z-buffer}(H)), \quad (2)$$

где S — множество объектов сцены,

H — множество узлов иерархии,

$T_{buf}(S)$ — время составления и отправки буферов команд,

$T_{state}(S)$ — время установки состояния конвейера,

$T_{vert}(S)$ — время выполнения преобразования вершин,
 $T_{frag}(S)$ — время вычисления цвета пикселей,
 $T_{fc}(H)$ — время выполнения отсеечения узлов методом “Frustum Culling”,
 $T_{z-buffer}(H)$ — время проверок видимости треугольников узлов иерархии H .

В формуле (2) выполняется суммирование, потому что команды составляются на центральном процессоре до посылки, а для точного выполнения проверок видимости требуется сначала выполнить рендеринг всех объектов сцены.

Для вычисления членов T_{vert}, T_{frag} требуются количество треугольников объекта $N_{\Delta}(O_i)$ и количество фрагментов (пикселей) $f(O_i)$:

$$T_{vert}(O_i) = N_{\Delta}(O_i)T_{\Delta}(m_k), \quad (3)$$

$$T_{frag}(O_i) = f(O_i)T_{frag}(m_k), \quad (4)$$

где $T_{\Delta}(m_k)$ — время рендеринга одного треугольника с материалом m_k ,

$T_{frag}(m_k)$ — время рендеринга одного фрагмента (пикселя) с материалом m_k .

Для вычисления $T_{frag}(m_k)$ производится вывод треугольника на весь экран, потому что в этом случае преобладающее количество вычислений будет происходить во фрагментном шейдере. Для вычисления $T_{\Delta}(m_k)$ производится рендеринг большого количества маленьких треугольников, потому что в этом случае самой долгой стадией конвейера будут загрузка геометрии из памяти графического процессора и выполнение трансформации вершин. Для вычисления $T_{state}(O_i)$ происходит рендеринг одного маленького треугольника, что вызывает задержку, связанную со сменой состояния конвейера. Для измерения $T_{vis}(n_j)$ происходит рендеринг сцены с большим количеством треугольников и выполнение проверок видимости узлов иерархии.

В таблице 1 приведены результаты тестирования предложенной модели производительности. Выполняется генерация сцены, состоящей из случайно расположенных параллелепипедов, измеряется точное время рендеринга и вычисляется время по формуле (2), погрешность оценки. Показано, что модель производительности работает достаточно точно на различных генерируемых данных.

Табл. 1. Тестирование предложенной модели производительности при увеличении количества объектов

Кол-во объектов	Точное время выполнения рендеринга (миллисек.)	Оценка на основе предложенной модели (миллисек.)	Погрешность оценки (%)
10	0.00657	0.00611	7.05
20	0.00700	0.00668	4.64
30	0.00743	0.00751	1.14
100	0.01452	0.01338	7.88
1000	0.091	0.089	2.38
5000	0.442	0.424	4.19
50000	4.07	4.19	3.46
100000	7.71	8.38	8.77
300000	22.95	25.14	9.54

3. Оценка количества невидимых объектов

В этой главе предлагается метод оценки количества невидимых объектов в трехмерных сценах. Требования, предъявляемые к методу: консервативность, предсказуемое время выполнения.

Узлы иерархии с количеством объектов, значительно превышающим среднее количество объектов в одном узле, обозначаются, как затратные, этот статус распространяется

снизу-вверх по иерархии. При этом родительский узел является затратным, если хотя бы один дочерний узел затратный. Для оценки количества невидимых объектов достаточно проверить видимость затратных узлов. Для повышения эффективности проверки видимости выполняются при обходе иерархии сверху вниз. Таким образом, у метода есть два параметра: минимальное количество объектов в затратных узлах, количество проверяемых узлов.

В таблице 2 приведено время выполнения метода (время обхода иерархии и выполнения проверок видимости) на генерированной сцене, содержащей 70000 объектов, при увеличении количества проверяемых узлов. Таким образом, предложенный метод позволяет за ограниченное время получить консервативную оценку количества невидимых объектов.

Табл. 2. Эффективность предложенного метода при увеличении количества проверяемых узлов

Количество проверяемых узлов	Оценка количества невидимых объектов предложенным методом	Время выполнения предложенного метода (миллисек.)
10	0	0.031
20	10513	0.059
30	20858	0.084
100	27523	0.261
300	39617	0.753
1000	42554	2.75
2000	45839	4.9
10000	48782	23.42

4. Адаптивный метод рендеринга

Предлагается адаптивный метод рендеринга больших динамических сцен, который использует предложенные выше метод оценки количества невидимых объектов и модель производительности графического процессора для выбора наиболее эффективного способа рендеринга. Кратко опишем основные способы рендеринга типовых состояний сцены:

1. Если в сцене мало объектов, предлагается выполнять перезапись буфера команд каждый кадр, отсеечение объектов, не попадающих в область видимости камеры.
2. В сцену добавили некоторое количество объектов, при этом составление командного буфера стало отнимать существенное время. В этом случае нужно использовать иерархию для разбиения пространства, подготовить командные буфера для каждого узла иерархии, выполнять отсеечение узлов, не попадающих в область видимости камеры.
3. После добавления очередного объекта количество невидимых объектов превысило пороговое значение. Предлагается выполнять аппаратные проверки видимости.

Рассмотрим более подробно каждый способ и условия переходов между ними. В первом способе каждый кадр измеряется время записи команд рендеринга. Адаптивный метод использует первый способ, пока выполняется условие:

$$T_{buf}(S) + T_{fc}(S) < T_{buf}(H) + T_{fc}(H), \quad (5)$$

где $T_{buf}(H)$ — время на составление и загрузку буферов команд, соответствующих узлам дерева, T_{fc} — время на отсеечение объектов, не попадающих в область видимости камеры.

Первый способ рендеринга используется для динамических сцен, в которых большинство объектов меняет свое положение, а также в случае, когда отсечение делать выгоднее на уровне объектов, чем на уровне узлов иерархии. Для сцен с малым количеством подвижных объектов и существенным временем записи ($T_{buf}(S) \gg T_{buf}(H)$) условие (5) перестает выполняться и происходит переход ко второму способу рендеринга. Для определения требований по памяти используется формула (1).

Для сокращения затрат на построение иерархии при рендеринге динамических сцен для пространственного индексирования объектов используется окто-дерево. Также каждому узлу окто-дерева соответствует буфер команд (secondary command buffer). Каждый объект попадает только в один буфер команд (single reference octree). Каждый кадр происходит оценка количества невидимых объектов с помощью метода, предложенного в главе 3. Адаптивный метод использует второй способ рендеринга до тех пор, пока выполняется условие:

$$T(S) < T(S_{vis}) + T_{vis}(H), \quad (6)$$

где $T(S_{vis})$ — время рендеринга видимых объектов,

$T_{vis}(H)$ — время выполнения проверок видимости.

Условие (6) выполняется, когда все объекты видимые или время выполнения проверок видимости неоправданно высокое. Переход к третьему способу рендеринга происходит, когда количество невидимых объектов достаточно высокое и, выполняя проверки видимости, можно сэкономить много времени.

Определим оптимальное количество проверок видимости. Время рендеринга сцены определяется по формуле:

$$T(q) = c(q)t_c + s(q)t_s + e(q)t_e, \quad (7)$$

где q — количество проверок видимости узлов иерархии,

$c(q)$ — количество записываемых команд рендеринга,

$s(q)$ — количество отправляемых командных буферов,

$e(q)$ — количество примитивов на лимитирующем этапе конвейера (вершин или пикселей),

t_c — среднее время записи одной команды рендеринга,

t_s — среднее время отправки командного буфера,

t_e — среднее время выполнения лимитирующего этапа конвейера (трансформации вершины, расчета цвета фрагмента).

Во время рендеринга накапливается статистика, которая позволяет определить функции $c(q)$, $s(q)$, $e(q)$. Количество невидимых вершин (пикселей) монотонно растет с увеличением количества проверок видимости. Зачастую рост происходит быстрее при малых q , а затем останавливается при больших q . Анализ показал, что логарифмическая зависимость является наилучшим приближением количества невидимых вершин с ростом количества проверок видимости. Накопив достаточное количество точек, можно выполнить регрессию для определения функций:

$$c(q) = \alpha_n c_n (n_0 - s_1 \ln(1 + q)) + q, \quad (8)$$

$$s(q) = (n_0 + 1 - s_1 \ln(1 + q)), \quad (9)$$

$$e(q) = (e_0 + pq - e_1 \ln(1 + q)), \quad (10)$$

где c_n — среднее количество объектов в узле,

α_n — средняя доля перезаписываемых командных буферов, которая определяется по динамике объектов сцены до текущего момента времени,

n_0 — количество непустых узлов в иерархии,

e_0 — количество вершин (пикселей) при рендеринге сцены,

p — количество вершин (пикселей), приходящихся на один узел иерархии,

s_1 — коэффициент пропорциональности в зависимости количества невидимых узлов от количества проверок видимости,

e_1 — коэффициент пропорциональности в зависимости количества невидимых вершин (пикселей) от количества проверок видимости.

Определение минимума (7) вместе с ограничениями на количество проверок видимости $0 \leq q \leq n_0$ является задачей нелинейного программирования. Функция $T(q)$ является непрерывной и дифференцируемой на множестве ограничений, поэтому минимум является либо стационарной точкой, либо лежит на границе множества ограничений (теорема 14.1 [1]). Для нахождения стационарной точки решим уравнение $T'(q) = 0$ и получим:

$$q^* = \frac{\alpha_n c_n s_1 t_c + s_1 t_s + e_1 t_e}{p t_e + t_c} - 1. \quad (11)$$

Сравнив $T(0)$, $T(n_0)$, $T(q^*)$, можно найти минимальное время выполнения рендеринга сцены и соответствующее значение q .

5. Тестирование

Тестирование проводится на трех динамических сценах (см. рис. 2), характеристики которых приведены в таблице 3. В процессе анимации сцен происходит добавление новых объектов, удаление временных объектов, изменение цвета объектов. Количество объектов в тестовых сценах растет со временем.

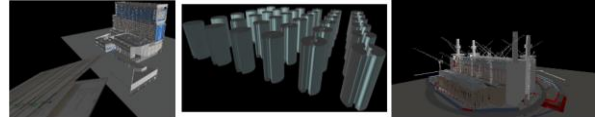


Рис. 2. Тестовые сцены 1, 2, 3.

Табл. 3. Характеристики тестовых сцен

Сцена	Количество вершин	Количество треугольников	Количество объектов
1	32483139	10827713	71961
2	30462912	10154304	221796
3	94388454	31462818	270431

Тесты проводятся на компьютере с конфигурацией: Intel Core i7-7700 3.6GHz, 16GB RAM, NVIDIA Geforce GTX 1070. Тест заключается в перемещении камеры по сцене, проигрывании анимации и измерении времени рендеринга кадра с применением одного из трех методов ускорения рендеринга:

1. Отсечение узлов дерева, не попадающих в камеру (frustum culling). Объекты видимых узлов дерева добавляются в командный буфер при иерархическом обходе дерева сверху вниз.
2. Проверка видимости всех листовых узлов дерева на графическом процессоре (hardware occlusion query). Проверки осуществляются относительно буфера глубины графического процессора с помощью команд API (vkCmdBeginQuery, vkGetQueryPoolResults). Получение результатов запросов видимости происходит с задержкой в несколько кадров для избежания простоя центрального процессора. Также используется техника составления вспомогательных командных буферов для узлов дерева и отсечение узлов дерева, не попадающих в камеру.
3. Предложенный адаптивный метод, который выбирает наиболее эффективный способ рендеринга в данный момент времени.

При рендеринге использовались три кадровых буфера (triple buffering), выполнялся вывод на экран последнего записанного кадрового буфера (mailbox), не применялось сглаживание, запись командных буферов осуществлялась в однопоточном режиме.

Сравнение предложенного адаптивного метода с методами "Frustum culling", "Occlusion queries" представляет интерес, потому что данные методы

используются во многих программах трехмерного рендеринга.

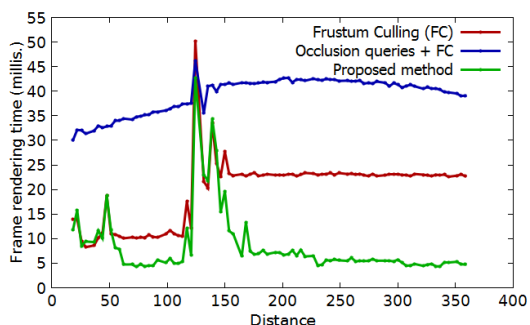


Рис. 3. Сравнение времени рендеринга кадра трех методов рендеринга при проходе по сцене 1 и одновременном проигрывании анимации.

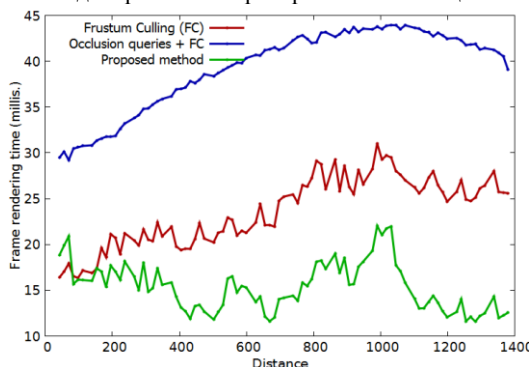


Рис. 4. Сравнение времени рендеринга кадра трех методов рендеринга при проходе по сцене 2 и одновременном проигрывании анимации.

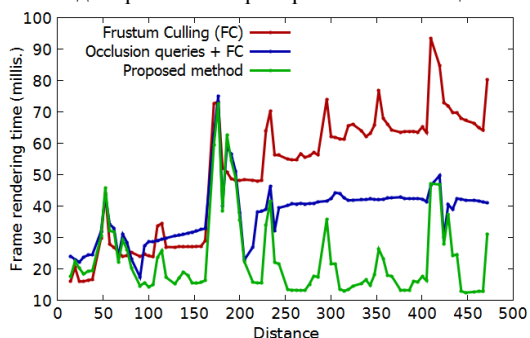


Рис. 5. Сравнение времени рендеринга кадра трех методов рендеринга при проходе по сцене 3 и одновременном проигрывании анимации.

Тестирование показывает, что метод выполнения аппаратных проверок видимости всех листовых узлов отнимает значительное время и метод “Frustum culling” работает эффективнее, чем “Occlusion queries” (см. рис. 3, 4). В сценах с относительно большим количеством полигонов проверки видимости все-таки дают прирост производительности (см. рис. 5). Адаптивный метод последовательно применяет три описанных способа рендеринга по мере добавления объектов в сцену во время тестирования. В начале анимации сцен используется простой способ записи командных буферов и отсеивания объектов. Когда запись команд рендеринга объектов отнимает значительное время, происходит переход ко второму способу рендеринга. Затем на основе накопленной статистики вычисляется количество проверок видимости для эффективного рендеринга. Ухудшение производительности адаптивного метода (скачки на графике) в основном связано с перезаписыванием командных буферов узлов иерархии при появлении новых

объектов. В среднем адаптивный метод дает наилучший результат на рассмотренных тестовых сценах.

6. Заключение

Была предложена модель производительности прямого рендеринга для оценки объема потребляемой памяти и времени выполнения рендеринга с учетом буферизации команд и проверок видимости. Был разработан и реализован адаптивный метод управления командными буферами и проверками видимости для эффективного рендеринга динамических трехмерных сцен. Адаптивный метод использует предложенную модель производительности рендеринга и метод оценки количества невидимых объектов для выбора наиболее эффективного способа рендеринга данного состояния динамической сцены. Тестирование показало, что предложенный адаптивный метод эффективно справляется с рендерингом динамических сцен.

7. Литература

- [1]. Черняк, А. А., Черняк, Ж. А., Метельский, Ю. М., Богданович, С. А. Методы оптимизации: теория и алгоритмы. 2-е изд. М.: Юрайт, 2017. 357 с.
- [2]. Bittner J., Wimmer M., Piringer H., Purgathofer W. Coherent Hierarchical Culling: Hardware Occlusion Queries Made Useful // Computer Graphics Forum. 2004. Vol. 23, No 3. pp. 615–624.
- [3]. Blackert A. Evaluation of Multi-Threading in Vulkan. Linköping University, 2016.
- [4]. Bucci J. and Doghramachi H. Deferred+: next-gen culling and rendering for dawn engine. URL: <https://eidomontreal.com/en/news/deferred-next-gen-culling-and-rendering-for-dawn-engine>.
- [5]. Cohen-Or D., Chrysanthou Y.L., Silva C.T., Durand F. A survey of visibility for walkthrough applications // IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics. 2003. Vol. 9, No 3. pp. 412–431.
- [6]. Funkhouser T.A., Séquin C.H. Adaptive display algorithm for interactive frame rates during visualization of complex virtual environments // Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM Press, 1993. pp. 247–254.
- [7]. Gonakhchyan V. Efficient command buffer recording for accelerated rendering of large 3d scenes // Proceedings of the 12th International Conference on Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing. 2018. pp. 397–402.
- [8]. Guthe M., Balázs Á., Klein R. Near Optimal Hierarchical Culling: Performance Driven Use of Hardware Occlusion Queries // Eurographics Symposium on Rendering. 2006. pp. 207–214.
- [9]. History of OpenGL. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/History_of_OpenGL#OpenGL_1.5_.282003.29.
- [10]. Lorach T. Approaching Zero Driver Overhead // SIGGRAPH 2014.
- [11]. Shiraf J. An exploratory study of high performance graphics application programming interfaces. University of Tennessee at Chattanooga, 2016.
- [12]. Wimmer M., Wonka P. Rendering time estimation for real-time rendering // Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering. 2003. pp. 118–129.

Об авторах

Гонахчян Вячеслав Игоревич, младший научный сотрудник ИСП им. В.П. Иванникова РАН. E-mail: pusheax@ispras.ru.

Расширение метода иерархических уровней детализации для динамических сцен с детерминированным характером событий

В.А. Семёнов^{1,2,3}, В.Н. Шуткин¹, В.А. Золотов¹, С.В. Морозов^{1,4}

sem@ispras.ru|v451ly@ispras.ru|vladislav.zolotov@ispras.ru|serg@ispras.ru

¹Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Москва, Россия;

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия;

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия;

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Рендеринг больших трёхмерных сцен с убедительным уровнем реализма является серьёзной проблемой компьютерной графики. Одним из распространённых подходов к решению этой проблемы является использование различных уровней детализации (LOD) для объектов сцены в зависимости от их удалённости от наблюдателя. Более эффективным для больших сцен является подход с иерархическими уровнями детализации (HLOD), когда уровни детализации создаются не для каждого объекта индивидуально, а сразу для больших групп объектов. Однако данный метод сталкивается с трудностями, когда в сцене происходят изменения. В данной работе рассматривается класс сцен с детерминированным характером событий и приводится метод для их эффективного рендеринга, основанный на использовании иерархических динамических уровней детализации (HDLOD). Описываются алгоритмы генерации HDLOD и их применение при визуализации сцен.

Ключевые слова: рендеринг, динамические сцены, полигональные модели, уровни детализации.

Extension of HLOD Technique for Dynamic Scenes with Deterministic Events

V.A. Semenov^{1,2,3}, V.N. Shutkin¹, V.A. Zolotov¹, S.V. Morozov^{1,4}

sem@ispras.ru|v451ly@ispras.ru|vladislav.zolotov@ispras.ru|serg@ispras.ru

¹Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia;

³National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia;

⁴M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Rendering of large 3D scenes with a convincing level of realism is a challenging computer graphics problem. One of the common approaches to solving this problem is to use different levels of details (LOD) for scene objects, depending on their distance from the observer. Using hierarchical levels of detail (HLOD), when levels of details are created not for each object individually, but for large groups of objects at once, is more effective for large scenes. However, this method faces great challenges when changes occur in the scene. This paper discusses a specific class of scenes with a deterministic nature of events and introduces a method for effective rendering of such scenes based on usage of so-called hierarchical dynamic levels of details (HDLOD). Algorithms for generating HDLOD and their use for visualization of the scenes are also described.

Keywords: rendering, dynamic scenes, polygonal models, level of details.

1. Введение

Рендеринг больших трёхмерных сцен с убедительным уровнем реализма является серьёзной проблемой компьютерной графики. Зачастую такие сцены состоят из тысяч или миллионов полигональных моделей, созданных или полученных с очень высоким уровнем детализации. Объекты сцены могут дополняться динамическим поведением, описывающим их появление, движение или исчезновение в соответствии с детерминированным расписанием или случайно происходящими событиями.

Детальные модели с точно определенными расписаниями не всегда являются необходимыми, а зачастую даже мешают эффективному рендерингу сцен с достаточной для интерактивности частотой кадров на современном графическом оборудовании. Высокая производительность рендеринга особенно критична для многих систем CAD/CAM/CAE, функциональность которых включает как отображение сложных сцен, так и манипулирование индивидуальными объектами в пространстве и во времени.

Одним из перспективных подходов к рендерингу сложных сцен является упрощение моделей и использование их серий разного разрешения с подходящими

для текущего положения камеры уровнями детализации (LOD). Это направление исследований в компьютерной графике имеет давнюю историю, начавшуюся с введения концепции LOD Джеймсом Кларком в 1976 году. Реализация этой концепции подразумевает, что подходящие уровни детализации будут выбраны и отображены таким образом, что более точные представления будут использоваться для близких объектов, а более грубые — для дальних объектов. Хотя концепция LOD допускает более широкую интерпретацию, основные усилия исследователей были сосредоточены на преобразованиях полигональных представлений.

Были разработаны многочисленные алгоритмы упрощения, преследующие одну общую цель: сократить количество полигонов в сетке, при этом сохранив детали и характеристики оригинала, насколько это возможно. В целом, алгоритмы различаются по основной операции прореживания, используемой для преобразования сетки, и по метрике ошибки, используемой для измерения вносимых искажений. По используемой операции прореживания можно выделить следующие алгоритмы: удаление вершины, стягивание ребра, исключение грани, кластеризация вершин, объединение вершин и другие. Алгоритмы с удалением вершины обычно используют схему с

приоритезацией вершин, согласно которой вершины последовательно выбираются, их соседние грани удаляются, а получающееся отверстие заново триангулируется [11, 12]. Алгоритмы кластеризации вершин используют вспомогательную решетку, окружающую упрощаемую полигональную сетку. В каждой ячейке решетки вершины объединяются в одну новую вершину, инцидентные грани обновляются соответствующим образом [8]. Алгоритмы стягивания ребер итеративно выбирают ребро, которое трансформируется в одну вершину с вырождением соседних граней [4, 5, 7]. Следует особенно выделить алгоритм [3]. За счёт использования как стягивания ребер, так и объединения вершин, а также квадратичной метрики ошибки этот алгоритм показывает хорошую производительность и качество упрощения. При этом, что немаловажно, он может применяться для сеток, которые не являются односвязными двумерными многообразиями.

В настоящее время для решения задач визуализации больших сцен широко применяются иерархические уровни детализации (HLOD) [1, 2]. В отличие от традиционных уровней детализации, иерархические предоставляют упрощённые представления не для индивидуальных объектов, а для целых групп, организованных в многоуровневые иерархии. Вместо анализа индивидуальных объектов и выбора подходящего уровня детализации для каждого из них становится возможным обрабатывать сразу целые группы объектов при обходе иерархии уровней детализации. Работа с группами объектов позволяет достичь большей степени упрощения, сократить время обхода дерева сцены и количество вызовов отрисовки.

Однако иерархические уровни детализации затруднительно применять для произвольных динамических сцен. Каждый раз, когда объекты появляются, исчезают или двигаются, их представления должны быть пересчитаны. Время центрального процессора, необходимое для пересчётов, как правило, больше времени графического процессора, необходимого для рендеринга сцены, что делает иерархические уровни детализации бесполезными для динамических сцен. Известные попытки оптимизировать пересчёты благодаря использованию инкрементальных обновлений и их параллельному исполнению на многопроцессорных системах с разделяемой памятью не привели к значимому успеху [2].

В данной статье будут рассматриваться динамические сцены с детерминированным характером событий, описывающих появление и исчезновение объектов сцены. Для эффективной визуализации сцен такого типа предлагается новый подход, названный иерархическими динамическими уровнями детализации (HDLOD). Используя априорное знание о событиях в сцене, данный подход позволяет создавать иерархические уровни детализации, не требующие пересчёта при анимации сцены. Предлагаемый подход принципиально отличается от методов использования уровней детализации при рендеринге сцен с типовыми геометрическими моделями и предопределёнными шаблонами поведения, например, сцен моделирования пешеходных потоков [9].

2. Иерархические динамические уровни детализации

Пусть сцена $S(t)$ определена в трёхмерном евклидовом пространстве E^3 на моделируемом временном периоде $t \in [0, T]$ и представлена как линейный список объектов $s(g_s, f_s) \in S$, имеющих фиксированные пространственные позиции и неизменные геометрические представления $g_s \subseteq E^3$. Статус присутствия объектов в сцене определяется их функциями поведения $f_s(t): [0, T] \rightarrow \{0, 1\}$ таким образом, что функция $f_s(t)$ принимает единичное значение, если

объект s присутствует в сцене в момент времени t , и нулевое значение — если отсутствует. В дальнейшем будем называть такие сцены детерминированными псевдо-динамическими. Следует отметить, что движущиеся непрерывно объекты могут быть смоделированы путём дискретизации непрерывного пути и имитации последовательных событий появления и исчезновения экземпляров объекта вдоль этого пути. Предполагается, что в сцене перемещается относительно малое количество объектов, или даже что такие движения вообще отсутствуют. Несмотря на это ограничение, рассматриваемый класс сцен имеет множество промышленных применений. В частности, это визуальное планирование и моделирование сложных строительных проектов, городских инфраструктурных программ, автоматизированное сборочное машиностроение.

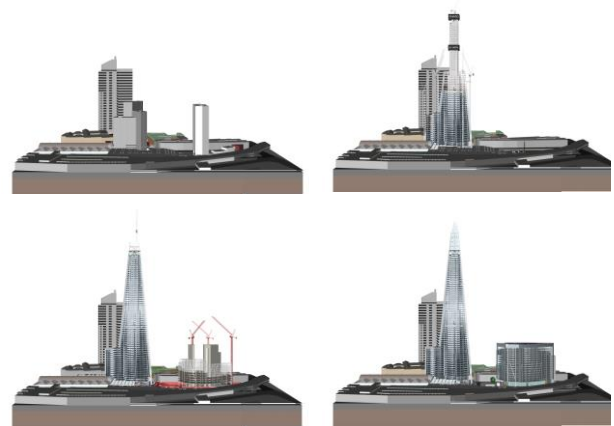


Рис. 1. Пример псевдо-динамической сцены.

На рис. 1 показан пример псевдо-динамической сцены, моделирующей строительство небоскрёба в соответствии с предварительно подготовленным планом проекта. По мере изменения времени моделирования строительные элементы и оборудование устанавливаются на строительной площадке или удаляются. Элементы ландшафта остаются неизменными на протяжении всего моделируемого периода. Такие виды поведения воспроизводятся при помощи стандартных функций, представленных на рис. 2.

Installed	Removed	Temporary	Skipped
Static	Absent	Re-installed	Re-deleted

Рис. 2. Некоторые стандартные функции поведения.

В дальнейшем будем предполагать, что объекты сцены геометрически представлены как наборы треугольников с вершинами, ссылающимися на общее множество точек. Не делается никаких предположений насчёт твердотельности объектов или многообразности их граничных представлений, поскольку часто лишь так называемый "полигональный суп" предоставляется для целей рендеринга без гарантий каких-либо топологических свойств.

Будем называть иерархическими динамическими уровнями детализации (HDLOD) дерево кластеров $C(G, F) = \{c(g_c, f_c), <\}$, представленное множеством кластеров $c(g_c, f_c)$ с приписанными геометрическими представлениями g_c и функциями поведения $f_c(t): [0, T] \rightarrow [0, 1]$. В отличие от функций поведения объектов $f_s(t)$,

которые принимают значения 0 или 1, функции поведения кластеров $f_c(t)$ принимают значения на отрезке от 0 до 1, используя таким образом понятие частичной истины. Действительно, поскольку некоторые из объектов кластера могут присутствовать в сцене в некоторый момент времени, в то время как другие могут в этот же момент отсутствовать, невозможно вынести однозначный вердикт о статусе присутствия всего кластера. Для кластеров также определено отношение агломерации $<$ таким образом, что $c' < c$ тогда и только тогда, когда кластер $c' \in C$ является прямым потомком (в дереве) кластера $c \in C$. Листья дерева являются точно заданными индивидуальными объектами. Внутренние узлы представляют собой кластеры, агрегирующие геометрию и поведение объектов в соответствующих поддеревьях. Корень — это кластер, содержащий наименее точное и наиболее упрощённое представление всей сцены. На рис. 3 показан пример несбалансированного HDLOD дерева с узлами различной степени.

Каждый кластер $c \in C$ хранит не только геометрическое и поведенческое представление, но также и такие производные атрибуты, как: ограничивающий параллелепипед b_c , размер или мощность w_c , а также пространственная погрешность ϵ_c и временная погрешность γ_c , которые будут определены ниже. Фактически эти атрибуты насчитываются при генерации иерархических динамических уровней детализации и используются при их отображении. Таким образом, каждый HDLOD кластер представляется как кортеж $c(g_c, f_c, b_c, w_c, \epsilon_c, \gamma_c)$.

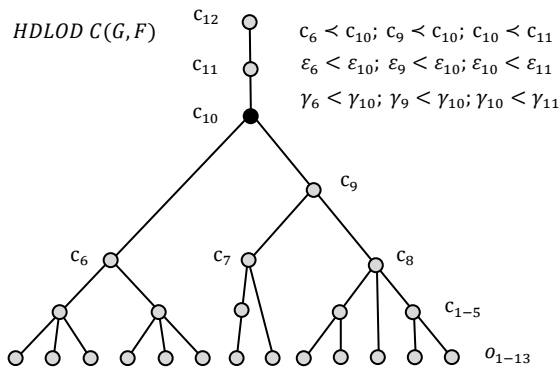


Рис. 3. Дерево HDLOD и некоторые агломерационные и алгебраические соотношения

Пространственную погрешность ϵ_c можно определить как абсолютную погрешность, которая устанавливает допустимое максимальное локальное отклонение геометрического представления кластера c от агрегированного представления объектов $o < \dots < c' < c$:

$$\epsilon_c = \max_{c' < c} (\epsilon_{c'}) + D_H \left(g_c, \bigcup_{c' < c} g_{c'} \right).$$

Здесь погрешность ϵ_c определена рекуррентно с использованием метрики Хаусдорфа $D_H(A, B)$, которая представляет собой наибольшее из всех расстояний от точки из одного множества до ближайшей точки другого множества:

$$D_H(A, B) = \max \{ \max_{x \in A} \min_{y \in B} D(x, y), \max_{y \in B} \min_{x \in A} D(x, y) \},$$

где A, B — замкнутые множества точек и $D(x, y)$ — функция метрики в Евклидовом пространстве.

Временную точность γ_c можно определить как максимальное отклонение функции поведения кластера от индивидуальных функций поведения оригинальных объектов:

$$\gamma_c = \max_{c' < c} (\gamma_{c'} + D_F(f_c, f_{c'})),$$

где расстояние $D_F(f_A, f_B)$ вычисляется с использованием функциональной метрики:

$$D_F(f_A(t), f_B(t)) = \frac{1}{T} \int_0^T |f_A(t) - f_B(t)| dt.$$

Данные параметры используются для оценки пространственной близости объектов, отклонения геометрии и близости временных поведений. Пространственные погрешности вычисляются в процессе упрощения геометрии кластера. Временные погрешности должны быть вычислены вместе с функцией поведения кластера. Для вычисления функции поведения кластера предлагается использовать следующую формулу:

$$f_c(t) = \frac{\sum_{c' < c} w_{c'} f_{c'}(t)}{\sum_{c' < c} w_{c'}}.$$

Использование взвешенных сумм позволяет в большей степени учитывать поведение значимых объектов и надлежащим образом воспроизводить поведение кластера. Если функция $f_c(t)$ принимает единичное значение, значит все объекты кластера присутствуют в сцене в момент времени t . Если функция принимает нулевое значение, все объекты кластера отсутствуют в момент времени t .

Для каждого кластера необходимо принять решение о том, стоит ли отображать его, проигнорировать, или использовать более точные дочерние представления. Для этого вычисляется зависящая от времени пространственная погрешность $\delta_c(t)$ (пространственная ошибка, вызванная как геометрическим, так и временным упрощением):

$$\delta_c(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } f_c(t) = 0 \\ \epsilon_c, & \text{при } f_c(t) = 1 \\ \epsilon_c + (1 - f_c(t)) \sum_{c' < c} w_{c'}, & \text{при } \frac{1}{2} \leq f_c(t) < 1 \\ \epsilon_c + f_c(t) \sum_{c' < c} w_{c'}, & \text{при } 0 < f_c(t) < \frac{1}{2} \end{cases}$$

При визуализации сцены совершается обход дерева кластеров. В каждом узле атрибуты кластера анализируются для определения необходимости дальнейшего обхода поддерева. Проверяется, присутствует ли кластер в сцене в указанное время моделирования ($f_c(t) > 0.5$), попадает ли ограничивающий параллелепипед b_c кластера в конус видимости, а также является ли погрешность $\delta_c(t)$ кластера достаточной для получения необходимого качества. Если все условия удовлетворены, представление кластера немедленно выбирается для отображения. В данном случае всё поддерево может быть исключено из обхода. Если третье условие не удовлетворяется, продолжается обход поддерева кластеров и дочерние узлы проходят такие же проверки, пока не будут достигнуты листовые узлы с точно заданными объектами сцены. Псевдокод описанного алгоритма представлен на рис. 4.

```
PROCEDURE DISPLAY (HDLOD tree, VIEW view, TIME time,
RESOLUTION resolution)
{
DISPLAY CLUSTER (ROOT (tree), view, time, resolution)
}

PROCEDURE DISPLAY CLUSTER (CLUSTER node, VIEW view, TIME time,
RESOLUTION resolution)
{
IF (VALUE OF (BEHAVIOR FUNCTION (node), time) EQUAL 0)
RETURN
ELSE IF (IS OUTSIDE FRUSTUM (BOUNDING BOX (node), view))
RETURN
ELSE IF (VALUE OF (DELTA FUNCTION (node), time) /
DISTANCE (node, view) < resolution)
RENDER (GEOMETRY (node), view)
ELSE
{
SET OF CLUSTER children = CHILDREN NODES (node)
FOR EACH (CLUSTER child IN children)
DISPLAY CLUSTER (child, view, time, resolution)
}
}
```

Рис. 4. Псевдокод алгоритма отображения HDLOD.

3. Генерация HDLOD

Иерархические динамические уровни детализации могут быть сгенерированы автоматически при помощи предложенного метода, который использует иерархическую (снизу-вверх) кластеризацию и многоуровневый контроль точности. Метод начинается с индивидуальных объектов и последовательно группирует их во всё большие и большие кластеры, пока не будет достигнуто желаемое количество уровней. Корневые кластеры могут быть в дальнейшем ещё сильнее упрощены, если потребуется отображать эту сцену как часть более сложной композиции. Кластеризация должна проводиться при строгом контроле точности, результирующее дерево HDLOD должно удовлетворять множеству требований и условий касательно ожидаемого количества уровней детализации, степени узлов, пространственной плотности и перекрытия дочерних кластеров, их временной близости и снижения сложности кластеров с повышением уровня.

К сожалению, классические методы кластеризации не могут быть напрямую применены к проблемам генерации HDLOD. Предъявляемые требования достаточно сложны и могут противоречить друг другу. Это препятствует математической формализации метрических функций и критериев связности, необходимых для методов кластеризации [13]. Неприемлемо высокая вычислительная сложность этих методов является другой причиной, препятствующей адаптации классических результатов.

Например, наивная реализация агломеративной кластеризации имеет временную сложность $O(n^3)$ и требует $O(n^3)$ памяти, что делает её бесполезной даже для простых сцен. Более быстрая иерархическая кластеризация с временной сложностью $O(n^2)$ и потреблением памяти $O(n^2)$ также не подходит для решения обсуждаемых проблем [13].

Поэтому предлагается формировать деревья HDLOD, руководствуясь другими принципами. Процесс кластеризации разделяется на шаги, на каждом из которых сформированные кластеры удовлетворяют определённым требованиям по точности. По мере того как делаются новые шаги, эти требования ослабляются таким образом, чтобы гарантировать завершение процесса после определённого количества шагов, равного числу уровней детализации L . Лишь активные кластеры участвуют в этом процессе в противовес пассивным кластерам, которые уже были проанализированы и сгруппированы.

На каждом запланированном шаге метода l ($1 \leq l \leq L$) делается попытка сформировать новые кластеры с погрешностями $\varepsilon_c \leq \varepsilon(l)$, $\gamma_c \leq \gamma(l)$. Для этого пороговые значения $\varepsilon(l)$, $\gamma(l)$ предварительно насчитываются таким образом, что они монотонно увеличиваются с увеличением уровня $\varepsilon(l-1) < \varepsilon(l)$, $\gamma(l-1) < \gamma(l)$. Пороговые погрешности могут быть выбраны следующим образом:

$$\varepsilon(l) = w^{1-l/L}/R, \quad \gamma(l) = 1/\tau + (1 - 1/\tau) \cdot w^{1-l/L},$$

где w — это размер наименьшего из объектов сцены, отнесённый к размеру всей сцены (например, диагональ параллелепипеда, ограничивающего все объекты сцены за весь период моделирования, в том числе временно установленные и удаляемые), R — эффективное разрешение (число пикселей по одной из осей, делённое на поле зрения камеры) и τ — эффективная временная дискретизация, используемая для анимационных целей (типичный временной шаг между последовательными событиями, отнесённый ко всему моделируемому периоду).

На каждом шаге метода представители из числа активных кластеров выбираются с использованием кривых пространственного заполнения и соответствующих упорядочений Гильберта [10]. С одной стороны, это позволяет выбирать представителей во всём объеме сцены, с другой — локализовать их в плотно заполненных областях.

Далее для каждого представителя осуществляется поиск соседей как в пространстве, так и во времени. Соседи должны удовлетворять условиям по пространственной и временной близости, а также гарантировать формирование родительского кластера с запланированной точностью. Если для текущего представителя не удалось найти подходящих соседей, он исключается из анализа на текущем шаге, но будет участвовать в следующих. Функция поведения родительского кластера определяется путем вычисления взвешенной функции поведения $f_c(t)$, приведённой выше. Результирующее геометрическое представление родительского кластера g_c получается объединением полигональных моделей дочерних кластеров. Оно должно быть упрощено для достижения необходимого снижения сложности с повышением уровня, например, с использованием упомянутого алгоритма [3]. Псевдокод описанного алгоритма представлен на рис. 5.

Используя предварительно вычисленные и развёрнутые индексы, кластеризация может быть осуществлена за $O(n \log n)$, где n — количество объектов сцены. В сравнении с классическими методами кластеризации, упомянутыми выше, этот результат является гораздо более приемлемым для больших сцен. Для быстрого поиска соседей могут применяться различные индексные структуры [10], в частности, для псевдо-динамических сцен показывают хорошую производительность регулярные динамические октодеревья [6]. В данной реализации использовались простые упорядочения по каждой из координат.

```

PROCEDURE GENERATE HDLOD (SCENE scene, INTEGER levels,
                           HDLOD tree)
{
  SET OF CLUSTER active = NULL, next = NULL
  FOR EACH (OBJECT object IN OBJECTS (scene))
  {
    CLUSTER cluster = FORM CLUSTER (object)
    ADD TO (cluster, tree)
    ADD TO (cluster, active)
  }
  FOR EACH (INTEGER step = 1 TO levels)
  {
    REAL epsilon, gamma
    COMPUTE LEVEL THRESHOLDS (scene, levels, step, epsilon,
                              gamma)
    WHILE (NOT EMPTY (active))
    {
      CLUSTER representative = SELECT REPRESENTATIVE (active)
      SET OF CLUSTER neighbors = FIND NEIGHBORS (active,
                                                  representative, epsilon, gamma)
      IF (IS EMPTY (neighbors))
      {
        ADD TO (representative, next)
        REMOVE FROM (representative, active)
      }
      ELSE
      {
        SET OF CLUSTER children
        ADD TO (representative, children)
        FOR EACH (CLUSTER neighbor IN neighbors)
          ADD TO (neighbor, children)
        CLUSTER cluster = CREATE CLUSTER (children)
        SIMPLIFY (cluster, epsilon, gamma)
        ADD TO (cluster, tree)
        ADD TO (cluster, next)
        REMOVE FROM (representative, active)
        FOR EACH (CLUSTER neighbor IN neighbors)
          REMOVE FROM (neighbor, active)
      }
    }
    COPY (next, active)
    EMPTY (next)
  }
}

```

Рис. 5. Псевдокод алгоритма генерации HDLOD.

4. Вычислительные эксперименты

Для того чтобы апробировать введённую концепцию HDLOD, а также предложенный метод для автоматической генерации и визуализации HDLOD, была проведена серия вычислительных экспериментов. Были измерены значения времени рендеринга кадра при навигации по заданной сцене при фиксированных моментах времени моделирования, а также среднее время кадра для анимации на протяжении

всего периода моделирования. В качестве тестовой была выбрана представленная на рис. 1 динамическая сцена строительства небоскрёба. Модель состоит из 79396 строительных элементов, представленных полигональными сетками, суммарно содержащими 3632126 треугольников. План строительства включает 67099 активностей, каждая из которых отвечает за определённые работы на строительной площадке и порождает соответствующие события в динамической сцене.

Для оценки эффективности иерархических динамических уровней детализации и исключения фактора отсечения конусом видимости эксперименты были проведены для камеры, расположенной на различных расстояниях от сцены. В первом положении камера была размещена на максимально близком расстоянии, при котором сцена была видна полностью. В других положениях камера размещалась на таких расстояниях, что сцена занимала одну четвёртую и одну шестнадцатую области экрана. Были выбраны положения времени в начале и в конце моделируемого периода, а также в одной третьей и в двух третях модельного периода. Вычислительные эксперименты проводились на компьютере типичной конфигурации: Intel Core i7-4790 CPU (3.6 GHz), 16 GB of RAM, GeForce GTX 750 Ti (2 GB).

	1/1 экрана	1/4 экрана	1/16 экрана	Без HDLOD
Начало	7.02	1.5	0.66	40.88
1/3 периода	8.7	2.75	0.71	82.9
2/3 периода	26.47	2.93	0.74	121.3
Конец	28.17	3.15	0.76	164.83
Анимация	18.63	2.87	0.72	105.4

Таблица 1. Время кадра (в миллисекундах) при визуализации сцены строительства небоскрёба.

В таблице 1 приведены результаты измерений производительности в ходе описанных экспериментов. В последней колонке содержатся результаты, полученные при рендеринге индивидуальных объектов без использования иерархии упрощённых представлений HDLOD. Очевидно, что применение HDLOD значительно повышает производительность, и по мере удаления камеры от сцены достигаемый эффект растёт. При приближении камеры к отдельному объекту или группе объектов эффект от применения HDLOD незначителен, поскольку доминирующим фактором становится отсечение сцены конусом видимости. Подобное поведение наблюдается как при навигации по статической сцене, зафиксированной в выбранные моменты времени, так и при анимации сцены. Проведённая серия экспериментов была распространена на другие задачи визуального моделирования проектов строительства, городских инфраструктурных программ, машиностроительных процессов. Её результаты подтверждают высокую эффективность и масштабируемость предложенного метода.

5. Заключение

Таким образом, в данной статье была представлена концепция иерархических динамических уровней детализации (HDLOD) и методы для их автоматической генерации и визуализации. В отличие от традиционных методов уровней детализации, подходящих только для статических сцен, разработанный метод применим к широкому классу детерминированных псевдо-динамических сцен, возникающих в многочисленных промышленных приложениях. Дальнейшая работа будет посвящена исследованию алгоритмических вариантов разработанного метода, а также его обобщениям для сцен с непрерывно движущимися объектами.

6. Литература

- [1] Cesium 3D Tiles. Beyond 2D Tiling. 2016. <https://cesium.com/presentations/files/FOSS4GNA2016/3DTiles.pdf>
- [2] Erikson, C. et al., 2001. HLODs for Faster Display of Large Static and Dynamic Environments. I3D '01 Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics. New York, USA, pp. 111-120.
- [3] Garland, M. and Heckbert, P.S., 1997. Surface simplification using quadric error metrics. SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, USA, pp. 209-216.
- [4] Guézic, A., 1995. Surface Simplification With Variable Tolerance. 2nd Annual International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Baltimore, USA, pp. 132-139.
- [5] Hoppe, H., 1996. Progressive Meshes. SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, USA, pp. 99-108.
- [6] Morozov, S. et al, 2018. Indexing of Hierarchically Organized Spatial-Temporal Data Using Dynamic Regular Octrees. Petrenko A., Voronkov A. (eds) Perspectives of System Informatics. PSI 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10742, pp. 276-290.
- [7] Ronfard, R. and Rossignac, J., 1996. Full-range approximation of triangulated polyhedra. Computer Graphics Forum, Vol. 15, No. 3, pp. 67-76.
- [8] Rossignac J. and Borrel P., 1993. Multi-resolution 3D approximations for rendering complex scenes. Falcidieno B., Kunii T.L. (eds) Modeling in Computer Graphics. IFIP Series on Computer Graphics. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany.
- [9] Rudomin, I. et al, 2014. Hierarchical level of detail for varied animated crowds. Visual Computer Vol. 30(6-8), pp. 949-961.
- [10] Samet, H., 2006. Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures. Morgan Kaufmann, Burlington, USA.
- [11] Schroeder, W.J. et al., 1992. Decimation of Triangle Meshes. SIGGRAPH '92 Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, USA, pp. 65-70.
- [12] Soucy, M. and Laurendeau, D., 1996. Multiresolution Surface Modeling Based on Hierarchical Triangulation. Computer Vision and Image Understanding, Vol. 63, No. 1, pp. 1-14.
- [13] Xu, D. and Tian, Y., 2015. A Comprehensive Survey of Clustering Algorithms. Annals of Data Science, Vol. 2, pp. 165-193.

Об авторах

Семёнов Виталий Адольфович, д.ф.-м.н., проф., зав. отделом Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. E-mail: sem@ispras.ru.

Шуткин Василий Николаевич, аспирант Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. E-mail: v4511y@ispras.ru.

Золотов Владислав Александрович, к.ф.-м.н., н.с. Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. E-mail: vladislav.zolotov@ispras.ru.

Морозов Сергей Вячеславович, к.ф.-м.н., в.н.с. Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. E-mail: serg@ispras.ru

Сегментация освещенных участков сцены с использованием полносверточных нейронных сетей и алгоритмов компьютерного зрения для систем дополненной реальности

М.И. Сорокин¹, Д.Д. Жданов¹, И.С. Потемин¹, Б.Х. Барладян², Н.Н. Богданов¹, А.Д. Жданов¹
 vergotten@gmail.com|ddzhdanov@mail.ru|ipotemin@yandex.ru|bbarladian@gmail.com
 |nnbogdanov@itmo.ru|adzhdanov@itmo.ru

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

²ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия.

Актуальность данной темы обусловлена бурным развитием систем виртуальной и дополненной реальности. Проблема заключается в формировании естественных условий освещения объектов виртуального мира в реальном пространстве. Для решения задачи определения источников света и восстановления его оптических параметров была предложена полносверточная нейронная сеть, позволяющая «схватить» особенности поведения света. На выходе нейронной сети получаем сегментированное изображение с классами и уровнями освещенности. Полносверточная нейронная сеть отлично подходит для сегментации изображения, поэтому в качестве «энкодера» была взята архитектура VGG-16 со слоями, которые сворачивают некую область входного изображения до 1x1 пикселя и классифицируют его к одному из классов.

Обучение полносверточной нейронной сети осуществлялось на 221 тренировочных и 39 проверочных изображениях со скоростью обучения 1E-2 на 200 эпохах. После обучения по критерию оценки «IoU» (intersection over union) точность составила порядка 70 процентов, а точность классификации к первому классу составила практически 90 процентов.

Ключевые слова: классификация, освещение, свёрточные нейронные сети, сегментация.

Segmentation of illuminated areas of scene using fully-convolutional neural networks and computer vision algorithms for augmented reality systems

Maxim I. Sorokin¹, Dmitry D. Zhdanov¹, Igor S. Potemin¹, Boris Barladian², Nikolai N. Bogdanov¹, Andrey D. Zhdanov¹
 vergotten@gmail.com|ddzhdanov@mail.ru|ipotemin@yandex.ru|bbarladian@gmail.com
 |nnbogdanov@itmo.ru|adzhdanov@itmo.ru

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia;

²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia.

The relevance of this topic is due to the rapid development of virtual and augmented reality systems. The problem lies in the formation of natural conditions for lighting objects of the virtual world in real space. To solve a light sources determination problem and recovering its optical parameters were proposed the fully-convolutional neural network, which allows catching the 'behavior of light' features. The output of FCNN is a segmented image with light levels and its strength. Naturally, the fully-convolutional neural network is well suited for image segmentation, so as an encoder was taken the architecture of VGG-16 with layers that pools and convolves an input image to 1x1 pixel and wisely classifies it to one of a class which characterizes its strength.

Neural network training was conducted on 221 train images and 39 validation images with learning rate 1E-2 and 200 epochs, after training the loss was 0,2. As a test was used an 'intersection over union' method, that compares the ground truth area of an input image and output image, comparing its pixels and giving the result of accuracy. The mean IoU is 0.7, almost rightly classifying the first class with a value of 90 percents of accordance and the last class with a probability of 30 percents.

Keywords: classification, illumination, convolutional neural networks, segmentation.

1. Введение

Дополненная реальность (augmented reality, AR) — это та среда, которая создается в результате наложения информации или объектов на воспринимаемый мир в реальном времени. Для этого могут использоваться как компьютерные устройства: смартфоны и планшеты, так и различные гаджеты: очки и шлемы дополненной реальности. В отличие от виртуальной реальности человек не воспринимает какую-то другую реальность, он все так же видит реальный мир, но немного в дополненном состоянии.

Уже сегодня дополненная и виртуальная реальность сильно повлияли на образование и медицину. С помощью дополненной реальности хирурги повышают уровень своего

профессионализма, а методы лечения и диагностики заболеваний меняются в лучшую сторону. Более того, благодаря виртуальной реальности возможности врачей сильно увеличиваются, а с помощью дистанционных браслетов врачи осуществляют полный контроль состояния пациентов на любом расстоянии. Хорошим примером являются микрофоны и микрокамеры, встроенные в очки дополненной реальности, которые помогают при реабилитации глухих или немых людей, способствуя скорейшей социальной адаптации.

В сфере образования очки дополненной реальности позволяют разнообразить учебный процесс, удерживая внимание школьников и студентов, а в науке очки дополненной реальности можно использовать для виртуальных экспериментов. Виртуальная реальность также

используется в компьютерных играх: в онлайн-играх есть целые виртуальные галактики, которые можно посетить, не выходя из дома.

Кроме того, уже появились виртуальные помощники для водителей. Голосовые команды, подключенные к смартфону, и отображение информации в очках дополненной реальности помогают в управлении автомобилем и решении неотложных вопросов.

Распространение в повседневной жизни технологий AR и VR приведет к массовому использованию интерактивного цифрового телевидения. Уже возможно посетить виртуальные экскурсии по городам и музеям, используя экранные гаджеты, со смартфонами возможно видеть виртуальный мир, а технологии дополненной реальности позволяют совершать очень даже реальные покупки в виртуальных магазинах.

Однако, какими бы оптимистичными ни были все эти утверждения, проблема реалистичного рендеринга еще не полностью решена. Дело в том, что все объекты дополненной реальности должны соответствовать условиям окружающей среды. И если мы говорим об освещении, то все объекты виртуального мира должны соответствовать освещению реального мира, должны быть правильно освещены и давать тени в противоположном направлении от источника света. Следовательно, в этой статье решается проблема восстановления оптических источников света.

Также в этой статье рассматриваются методы фильтрации. Приведены примеры рассмотренных методов решения задач улучшения визуального представления и выделения контуров объектов на изображениях.

2. Анализ существующих работ

Поскольку данный подход фокусируется на сегментации освещенных областей, существует несколько решений, которые только частично решают поставленную задачу. В настоящее время сверточные нейронные сети активно используются для решения различных задач, связанных непосредственно с анализом и обработкой изображений, будь то классификация или распознавание каких-либо отдельных участков. Сверточные нейронные сети уже доказали свою силу в различных классификациях изображений, и освещение не является исключением.

Например, в работе [1] представлен анализ освещения на открытом воздухе с использованием полносверточной сети. Следующая работа [2] в качестве входных данных анализирует панорамные изображения окружающей среды под открытым небом и встраивает изображение под эти условия среды. Как и ранее рассмотренные работы, работа [3] также анализирует окружение и строит тени объектов так, как они должны быть. В работе [4] также используется сверточная сеть, но для определения того, где находится объект: на открытом воздухе или в помещении. Следующая статья [5] представляет свою собственную архитектуру и решает три различные задачи: прогнозирование глубины, оценка нормалей поверхности и семантическая маркировка.

Многие работы [6,7,8,9] были направлены на обнаружение объектов с использованием сверточных нейронных сетей. Отличие нейронной сети, описанной в данной работе, заключается в том, что набор данных генерируется с использованием мощного рендерера - «Lumiscert» [10], который использовался для обучения нейронной сети, восстанавливая сегментированные участки света, похожие на эталонные изображения (ground truth), с помощью объектной функции «categorical crossentropy».

Поскольку реалистичные цифровые изображения синтезируются методами стохастической трассировки лучей, они могут содержать шумовую составляющую. Для

устранения шума в системах компьютерного зрения используются различные алгоритмы фильтрации, например, детектор краев «Канни», оператор Собеля или медианный фильтр. Однако эти фильтры не всегда подходят для решения проблемы устранения шума, возникающего в результате процесса стохастической трассировки лучей. Для устранения такого шума наиболее подходящими будут фильтры, интегрированные в процесс трассировки лучей [11, 12].

Работы [13,14,15,16] так же, как и данная работа направлены на восстановление освещения для систем дополненной реальности, но для различных целей и задач. Среди данных статей рассматриваются методы анализа прямого освещения, не принимая во внимание вторичного для объектов виртуальной реальности. Также, в рассматриваемых работах рассматривается проблема, связанная с нахождением непосредственно самого наблюдателя в системе дополненной реальности и освещения относительно его самого. Был предложен метод восстановления источников освещения по теням объектов, но это лишь может дать направление луча, а не оптические свойства.

Главное отличие данной работы от вышеперечисленных заключается в том, что в существующих работах, используя огромные наборы данных, нейронную сеть учат не только распознавать освещенные участки изображения, но и в ряде случаев встраивать изображения под конкретные условия окружающей среды. Главная задача настоящей работы — это определения и классификация реальной освещенности помещения в световых единицах. Данная работа сосредоточена на определении освещенности и яркости видимых участков сцены. Для этого была использована вручную синтезированная выборка изображений с реалистичными оптическими параметрами сцены. Несмотря на то, что выборка состоит всего из 260 изображений (221 использовалось для обучения, а 39 для проверки), на выходе нейронная сеть с хорошей точностью классифицирует реальные оптические параметры освещения среды, которые было принято разделить по значению освещенности на 5 классов, где первый - 0 люкс, что означает не освещено вовсе, а 5 класс – освещенность, создаваемая от источника света в виде обычной комнатной лампы. Главное достоинство нейронных сетей, помимо гибкой настройки алгоритма и хороших результатов на выходе — это простота их использования. В отличие от сложных алгоритмов, требующих значительных ресурсов, нейронную сеть после обучения можно использовать даже на мобильных устройствах и других платформах.

3. Реализация

Преимущества сверточных нейронных сетей уже не раз доказаны на многих соревнованиях по компьютерному зрению и хакатонам. Они заключаются в способности сетей изучать и строить сложные карты признаков, основанные на данных предыдущих сверточных слоев, которые на практике позволяют изучать, распознавать и строить сложные иерархии признаков.

В качестве архитектуры сверточной сети было решено брать архитектуру VGG16 Net, которая с успехом использовалась в следующих работах [17, 18]. Она состоит из 5 блоков со слоями свертки, пулинга и функцией активации ReLU между слоями. В отличие от данной архитектуры было решено не использовать метод регуляризации «dropout», а в качестве метода оптимизации был выбран «Nesterov», это связано с небольшим набором данных для обучения.

Архитектура данной сети и ее детали представлены на рисунке 1.

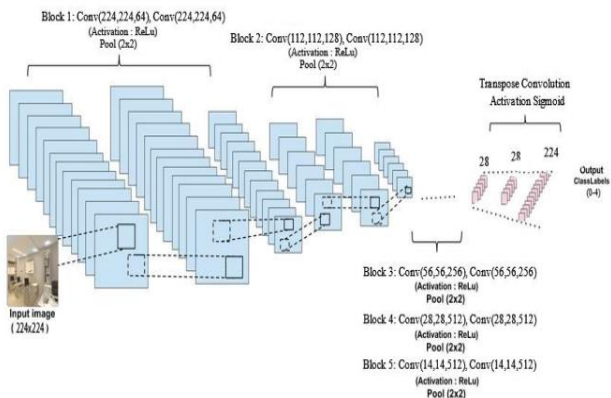


Рис. 1. Архитектура и описание полносверточной нейронной сети

Поскольку использовался метод обучения «с учителем», то изображения и их соответствующие маски в представлении псевдоцветов подавались на вход нейронной сети, где более «холодные» цвета отвечают за менее интенсивное освещение, в то время как «более теплые» цвета указывают на более освещенные участки.

Задача полносверточной сети - классифицировать каждый пиксель изображения к одному конкретному классу. То есть, проходя через все сверточные слои, сеть относит определенную область изображения к одному классу в соответствии с интенсивностью освещения. В данной реализации присутствуют 5 классов освещения. После того, как сеть привязала анализируемую область к определенному классу освещения, в действие вступает функция «upsample». Задача этой функции – использовать метод «ближайшего соседа» для восстановления исходной размерности изображения. Более подробно о слое «upsample». «Upsample» это своего рода функция, которая конвертирует изображение с низкой размерностью в изображение с более высокой размерностью путем дублирования каждого пикселя, что называется методом ближайшего соседа (nearest neighbor approach).

Обучение полносверточной нейронной сети проводилось на 260 изображениях (221 для обучения, 39 для тестирования) с 200 эпохами. Для проверки точности определения был использован метод «intersection over union», который сравнивает оригинальное изображение и предсказанное. При этом значение средней точности составило порядка 70 процентов, что является хорошим результатом для небольшого набора данных.

Для устранения шума синтезированного изображения использовался специализированный фильтр подавления шума вторичного освещения. Кроме того, чтобы не загромождать изображение ненужными деталями, было решено использовать алгоритмы для уменьшения шума «sobel» и «thresholding», которые подчеркивают градиенты яркости на краях изображений, оставляя тем самым только очертания интерьера. Это помогает значительно уменьшить вычислительную нагрузку, а также выделить внутренние границы.

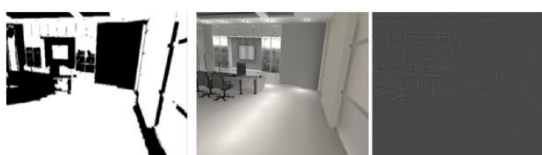


Рис. 2. Алгоритмы фильтрации для уменьшения шума

На рисунке 2 представлены алгоритмы фильтрации, использующиеся совместно с нейронными сетями, а на рисунке 3 представлен пример тестового набора данных в виде «heatmap» маски оригинального изображения, который содержит различные виды освещения (темные и освещенные) для полноты обучения.

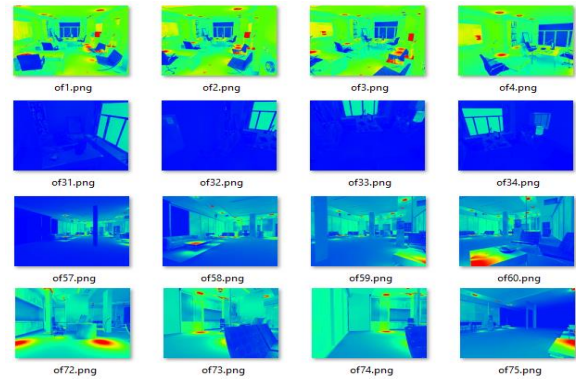


Рис. 3. Тестовый набор данных для обучения

Тестовые изображения и их маски создавались с помощью программного средства «Lumiscert» методом стохастической трассировки лучей. Каждое изображение получалось путем поворота и наклона камеры наблюдателя, тем самым охватывая и источники освещения, и отраженные участки для более полной выборки. Были выставлены границы от 0 до 550 люкс, что характеризует собой минимальные и самые освещенные участки помещения. Помимо этого, всего выделены 5 основных диапазонов освещения, так называемые «классы освещения», которые и были указаны как параметры обучения и нахождения на тестовых данных. На рисунке 4 представлен схематический рисунок предложенного метода.

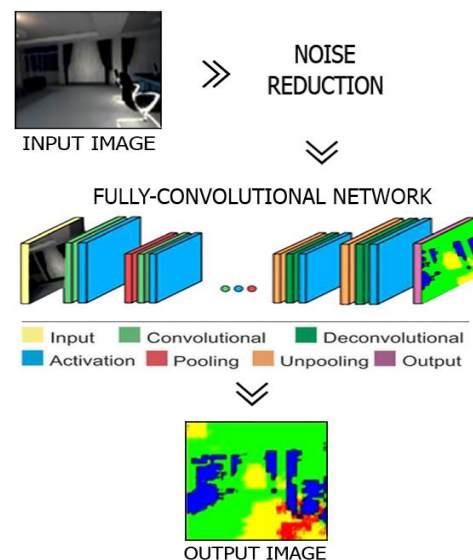


Рис.4. Схематический рисунок метода определения освещенных участков помещения

На рисунке 5 показан пример работы обученной полносверточной нейронной сети. Где на левом изображении исходное оригинальное изображение, правое изображение – эталонное (ground truth), а среднее - предсказанное нейросетью.

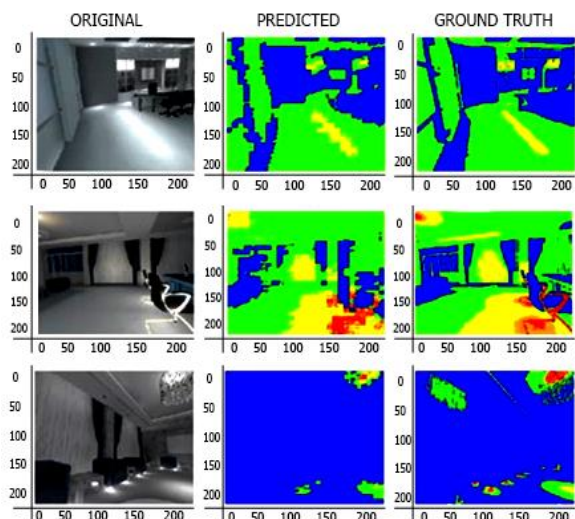


Рис. 5. Пример работы обученной полносверточной нейронной сети

Как можно видеть, результаты довольно близки к эталонным изображениям, но сеть по-прежнему не очень хорошо схватывает самые яркие участки. Это связано с обучающей выборкой, мы считаем, что увеличение обучающей выборки должно решить эту проблему. На данном этапе нейронная сеть работает достаточно хорошо, но есть ряд моментов, которые можно улучшить. Например, добавить алгоритм определения источников света [18] и разработать алгоритм определения диффузных поверхностей.

Полученные изображения будут использоваться непосредственно в задачах восстановления источников освещения и реальных оптических свойств для задач дополненной реальности. Данные изображения необходимы для разработки качественных методов и алгоритмов определения и классификации источников освещения и их отражений, с дальнейшим восстановлением реалистичного освещения для объектов виртуальной и дополненной реальности.

Заключение

В рамках этой работы была обучена полносверточная нейронная сеть, состоящая из 5 блоков для классификации освещенных областей комнаты. В дополнение к обучению в сети также использовались алгоритмы компьютерного зрения, позволяющие фильтровать изображения, выделяя основные зоны помещения, что предполагает плавный переход к семантической составляющей комнаты. В дальнейшем планируется усовершенствовать семантическую составляющую нейронной сети в сочетании с алгоритмами фильтрации для определения освещенных областей и различий между ними.

Благодарности

Работа выполнена при частичной государственной финансовой поддержке грантами РФФИ № 18-08-01484 и № 18-01-00569.

Литература

[1] Hold-Geoffroy, Y., Sunkavalli, K., Hadap, S., Gambaretto, E. and Lalonde, J.-F., "Deep outdoor illumination estimation," In Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2017).

[2] Lalonde, J.-F., Efros, A. A. and Narasimhan, S. G., "Estimating the natural illumination conditions from a single outdoor image," International Journal of Computer Vision, 98(2), 123–145 (2012).

[3] Gardner, M.-A., Sunkavalli, K., Yumer, E., Shen, X., Gambaretto, E., Gagné, C. and Lalonde, J.-F., "Learning to predict indoor illumination from a single image," ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia), preprints (2017).

[4] Lombardi, S. and Nishino, K., "Reflectance and Illumination Recovery in the Wild," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 38, 129–141 (2016).

[5] Eigen, D. and Fergus, R., "Predicting Depth, Surface Normals and Semantic Labels with a Common Multi-Scale Convolutional Architecture," International Conference on Computer Vision (2015).

[6] Girshick, R. B., Donahue, J., Darrell, T. and Malik, J., "Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation," CVPR (2014).

[7] Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R. and LeCun, Y., "Overfeat: Integrated recognition, localization and detection using convolutional networks," ICLR (2013).

[8] Simonyan, K. and Zisserman, A., "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," CoRR, abs/1409.1556 (2014).

[9] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V. and Rabinovich, A., "Going deeper with convolutions," CoRR, abs/1409.4842 (2014).

[10] "Lumicept | Integra Inc.," Integra Inc., 2019, <<https://integra.jp/en/products/lumicept>> (April 12, 2019).

[11] Д.Д. Жданов, С.В. Ершов, А.Г. Волобой. Метод подавления стохастического шума изображения, сгенерированного Монте-Карло трассировкой лучей, сохраняющий мелкие детали // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 194. 15 с.

[12] С.В. Ершов, Д.Д. Жданов, А.Г. Волобой. Модификация стохастической трассировки лучей для снижения шума на диффузных поверхностях // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 204. 17 с.

[13] Heymann, S., Smolic, A., Müller, K., Froehlich, B., "Illumination reconstruction from real-time video for interactive augmented reality," International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services (WIAMIS), (2005)

[14] Bruno Augusto Dorta, M., Rafael Rego, D., Cristina Nader, Vasconcelos., Esteban, C., "Deep light source estimation for mixed reality," VISIGRAPP 2018 - Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, (303-311), (2018)

[15] Salma, J., Philippe, R., Eric, M., "Illumination Estimation Using Cast Shadows for Realistic Augmented Reality Applications," Adjunct Proceedings of the 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct (2017)

[16] Frahm, Jan-Michael., Koester, K., Grest, D., Koch, R., "Markerless Augmented Reality with Light Source Estimation for Direct Illumination," European Conference on Visual Media Production, (211-220), (2005)

[17] Long, J., Shelhamer, E. and Darrell T., "Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation," The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 3431-3440 (2015).

[18] Xu-yang Wang; Dmitry D. Zhdanov; Igor S. Potemin; Ying Wang and Han Cheng. The efficient model to define a single light source position by use of high dynamic range image of 3D scene // Proc. SPIE 10020, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology IV, 100200I (October 31, 2016)

Об авторах

Сорокин Максим Игоревич, аспирант кафедры визуализации (базовой) факультета программной инженерии и компьютерной техники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. E-mail vergotten@gmail.com.

Жданов Дмитрий Дмитриевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой технологий визуализации Университета ИТМО. E-mail ddzhdanov@mail.ru.

Жданов Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. E-mail adzhdanov@corp.ifmo.ru.

Потемин Игорь Станиславович, к.т.н., доцент кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. E-mail ipotemin@yandex.ru.

Богданов Николай Николаевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. E-mail nnbogdanov@corp.ifmo.ru

Барладян Борис Хаимович, к.т.н., старший научный сотрудник ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. E-mail bbarladian@gmail.com.



Научная визуализация
и визуальная аналитика

Scientific Visualization
and Visual Analytics

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Semantic Approach to Visualization of Evolution Dynamics of Topic Trends in Space of Scientific Publications Using t-SNE and Web-based 3D Graphics

M. Charnine¹, E. Sokolov¹, A. Klovov²

mc@keywen.com|evgeny.sokolov@phystech.edu|aaklovov@yandex.ru

¹FRC CSC of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

This paper describes a semantic approach to visualization of 3D cyberspace of Artificial Intelligence (AI) publications and their topic trends evolution using web-based 3D graphics. The purpose of research is to group AI publications with same subject into clusters for further visualization of topic trends dynamics. An unsupervised method and algorithm for visualizing the dynamics of topic trends by generating a time series of 2D and 3D semantic visual maps with predictive information is described. The method includes semantic similarity measure and citation prediction for documents, topic modeling and clustering, dimensionality reduction, virtual reality technology, representation of dynamics using time filters. As an example of particular implementation, the method is demonstrated on AI collection data using technologies of neural network prediction, LDA clustering, t-SNE dimensionality reduction, WebVR visualization. Cluster dynamics associated with scientific trends is analyzed. The growth in number of clusters and their consolidation during the period from 1954 to 1993 is demonstrated. It is shown that 3D visual map better preserves articles similarity and high-dimensional clusters structure than 2D visual map. The proposed cyberspace implemented by WebVR and interactive 3D graphics can be considered as a dynamic learning environment that is convenient for discovering new significant articles, ideas and trends.

Keywords: virtual reality, web-based 3D graphics, WebVR, scientific papers, topic modeling, dynamics of topic trends, semantic similarity, visualization, visual map.

1. Introduction

Trend prediction has become an extremely popular in many industrial sectors and scientific literature. It is beneficial for strategic planning and decision making, and facilitates exploring new research directions. Modern Artificial Intelligence tools are capable of processing tremendous volumes of data, reaching the human-level performance for various applications. Achieving high performance in unsupervised prediction and visualization of emerging trends in scientific literature can discover promising directions for future research and potentially lead to breakthrough discoveries in any field of science. Visual analytics helps us to make more reliable forecasts and increase the credibility of the model used. Visual analytics not only lets us predict future data values based on historic data over time, but we can also include underlying factors and filters, which may improve the accuracy of our forecasts. In our previous works [3,6], we proposed a model of cyberspace in which the most cited and significant scientific papers are represented by spheres/objects of a large size and the distance between papers is based on their semantic similarity. This work is a step forward in the same line of research. We offer here a new way to visualize the dynamics of topic trends using the proposed cyberspace for the purpose of predictive visual analytics. In scientific literature researchers analyze trends for individual words/terms, for sets of similar terms (topics), as well as for sets/clusters of semantically similar documents and texts. In this paper we present a new way to visualize trends using semantic space of scientific documents (cyberspace) with time-varying clusters/topics. The dynamic changes of these topical clusters and their interconnections in the cyberspace can be viewed as an animation.

Cybernetic worlds and virtual reality (VR) are often used for educational and research purposes. VR is essentially a computer-generated reality, also referred to as cyberspace, virtual environment, simulations, and artificial worlds [10]. The idea of creating cyberspace of scientific papers is not a new idea. One of the first implementations of such cyberspace is the Semantic Constellation created by Chaomei Chen [4,5,2]. In the Constellation the papers are presented by spheres in 3D space and the distance between papers is based on a computed measure of semantic similarity between them.

Based on the achievements of AI in recent years, in our previous works [3, 6], we have proposed 3D space of scientific papers that is similar to Chen's Constellation, but we have improved visualization features and semantic accuracy. In addition to that, in this paper, we have improved the dynamics representation and prediction features of the proposed cyberspace.

In recent years, a great progress has been made both in the development of new visualization tools such as WebVR [9] and in the analysis of semantic textual similarity. Latent Dirichlet Allocation (LDA), Word2Vec [1,8] and Word Mover's Distance (WMD) [11] methods were often used to evaluate the semantic similarity of texts. LDA is unsupervised topic modeling and text-mining tool that is frequently used for discovery of hidden semantic structures in a text body. The Word2Vec method evaluates semantic similarity of different words, while the WMD method is able to evaluate semantic similarity of different phrases without common words. In our approach the visualization and cyberspace construction is implemented using t-distributed Stochastic Neighborhood Embedding (t-SNE) method, that is a clustering and visualization tool.

The achievements of AI of the last years described above were used in our works [3,6], but a key question remained unanswered: How to represent the dynamics and forecasts in the cyberspace of scientific papers? This question is very important because it helps to discover promising directions for future research. The answer to this question is given in this article in which we propose a new method for visualizing dynamics of topic trends in the cyberspace of scientific papers.

In Section 3 we describe new unsupervised method and algorithm for visualizing the dynamics of topic trends by generating a time series of 2D and 3D semantic visual maps with predictive information. The method includes semantic similarity measure and citation prediction for documents, topic modeling and clustering, dimensionality reduction, virtual reality technology, representation of dynamics using time filters. As an example of particular implementation, the method is demonstrated using technologies of neural network prediction, LDA clustering, t-SNE dimensionality reduction and WebVR visualization. The method is demonstrated on the AI collection data described in the next Section.

2. AI collection (Data Set)

In our experiments, we analyze DBLP citation network, which is a collection of articles on Artificial Intelligence from 1936 to 2017, compiled by aminer.org and referred to here as AI collection. The citation data is extracted from DBLP (Digital Bibliography & Library Project dblp.org), ACM (Association for Computing Machinery acm.org), MAG (Microsoft Academic Graph), and other sources. We used the V10 version released in October 2017. This data set consists of 3,079,007 articles and 25,166,994 citation relationships. For each article there is a title, authors, year of publication and links. Some articles have a brief description (abstract). We have processed all such articles with abstracts. In total, 118,768 articles with abstracts from 1949 to 1993 were processed. The considered data set does not contain abstracts for articles after 1993. That's why we have analyzed and demonstrated the growth in number of articles clusters and their consolidation only during the period from 1954 to 1993. In this paper, the AI collection was analyzed in different directions: topical clusters and their dynamics were discovered (Section 3), prediction of cited articles (Section 4) were calculated, calculations were visualized in 2D (Section 5) and 3D (Section 6).

3. Unsupervised method for visualizing the dynamics of topic trends

Our goal is to create an unsupervised method and algorithm for visualizing the dynamics of topic trends by generating a time series of 2D and 3D semantic visual maps with predictive information. The method includes semantic similarity measure and citation prediction for documents, topic modeling and clustering, dimensionality reduction, virtual reality technology, representation of dynamics using time filters. This method/algorithm consists of the following steps.

- 1) Data retrieval and extracting the following fields from the received data: article titles, brief descriptions, and publication years.
- 2) Remove all the numbers and bring the text to lower case.
- 3) Extract tokens from the text.
- 4) Stemming and removing stop-words.
- 5) Citation prediction for documents.
- 6) Topic modeling, clustering and calculating semantic similarity measure.
- 7) Dimensionality reduction and coordinates calculation by compressing n-dimensional vector space into 2D or 3D.
- 8) Generating a time series of 2D and 3D semantic visual maps using virtual reality technology, time filters and citation prediction information.

Each step of the above method can have multiple different implementations. Below is an example of particular implementation in which the method is demonstrated on AI collection data using technologies of neural network prediction, LDA clustering, t-SNE dimensionality reduction, WebVR visualization. This particular implementation of the method/algorithm consists of the similar steps from 1 to 8 supplemented with detailed information.

- 1) AI collection data retrieval and extracting the following fields from the received data: article titles, brief descriptions, and publication years.
- 2) Remove all the numbers and bring the text to lower case.
- 3) Extract tokens from the text.
- 4) Stemming and removing stop-words.
- 5) Citation prediction for documents using neural network technology described in the Section 4.
- 6) Topic modeling, clustering and calculating semantic similarity measure. Topic modeling is done using Latent

Dirichlet Allocation (LDA). As a result, we obtain θ vectors, which show how topics are distributed in each document, and β distributions, which words are more likely to be in certain topics. In our case, there are 8 distinct topical clusters described in Section 5. Thus, we use LDA to get a list of topics and a list of words specific to each topic, i.e. an actual topic description. All training is conducted without a teacher (unsupervised), because input data consists from unmarked texts of articles.

7) Dimensionality reduction and coordinates calculation by compressing n-dimensional vector space into 2D or 3D using t-SNE algorithm. T-distributed Stochastic Neighborhood Embedding (t-SNE), a clustering and visualization method [7] has rapidly become a standard tool in a number of natural sciences. T-SNE is used to facilitate visual inspection and provides two and three dimensional embeddings of high-dimensional data which preserve data similarity. T-SNE is a fruitful technological method with a lot of options for further development. It is efficiently used to visualize complex multidimensional objects including scientific publications. However, t-SNE is usually not used to visualize dynamic processes. In this paper we develop an approach for using t-SNE to visualize the dynamics of topic trends of scientific publications.

8) Generating a time series of 2D and 3D semantic visual maps using virtual reality technology, time filters and citation prediction information. Visual maps generation is done using time filters with the ability to change time intervals in order to track the dynamics of topical clusters development (see Section 5 and Section 6).

4. Prediction of cited articles

The most cited and significant articles in the AI collection were discovered using a deep learning neural network algorithm. The algorithm was created using Python library Keras which allows you to select the number of neural network layers and specify the number of neurons in each layer, the activation function, etc.

The proposed algorithm predicts the probability of citing in the next 3 years based on historical data about titles or abstracts of the articles. The neural network architecture of the proposed algorithm consisted of 4 layers: the first is the layer of embeddings obtained using the Word2Vec architecture, the second layer is biLSTM. The third layer was a linear layer and solved the problem of classification. The last layer consisted of one output neuron. The prediction accuracy for titles of 2017 was ~ 0.6 and for abstracts of 1993 ~ 0.63 by the ROC AUC metric.

For visualization, 20 articles with abstracts and largest citation forecast were selected. These articles are shown as polyhedra octahedrons in Fig. 4. The coordinates of these articles in 3D space were calculated by t-SNE algorithm. The neural network architecture of the proposed deep learning algorithm is presented in the Fig. 1.

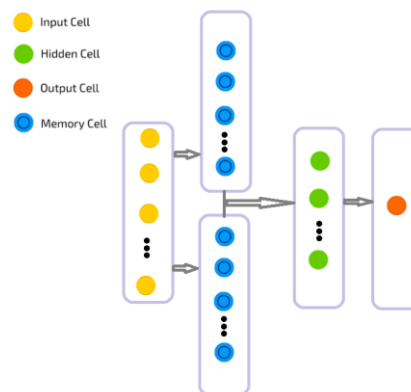


Fig. 1. Neural network architecture.

5. Creating 2D visual map

2D visual maps are created by compressing n-dimensional vector space into 2D using t-SNE algorithm. Visualization is carried out by generating a time series of 2D semantic visual maps using time filters with the ability to change time intervals in order to track the dynamics of topical clusters development. Visualization is done using an interface written in JavaScript.

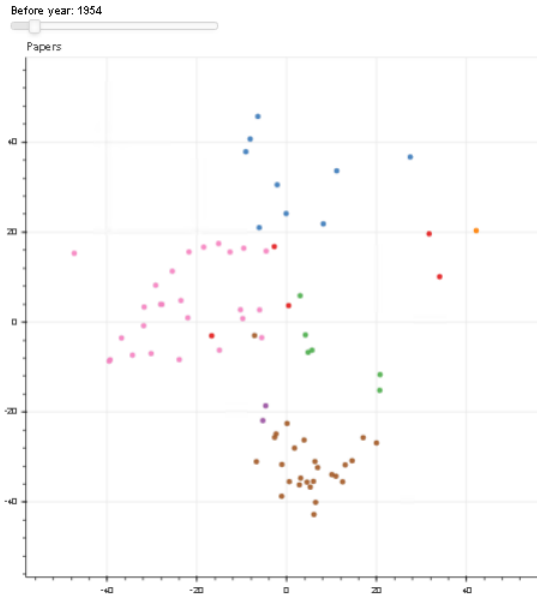


Fig. 2. 2D cluster structure in 1954.

Fig. 2 presents 2D visual map of the AI collection and 2D cluster structures in 1954. In 1954 the first 3 clusters begin to form: pink cluster corresponds to computing systems and algorithms; brown – to digital signal processing; blue – to programming languages and Natural Language Processing.

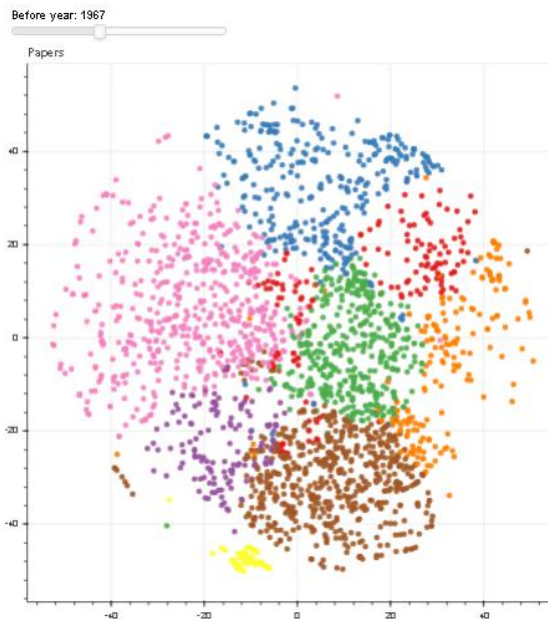


Fig. 3. 2D cluster structure in 1967.

Fig. 3 presents 2D visual maps of the AI collection and 2D cluster structures in 1967. In 1967 already all main clusters had

been formed. To those clusters that began to stand out in 1954, the following were added: purple, corresponding to robotics; green – optimization methods and algorithms; orange – theoretical problems in computer science and computational complexity; red, still very rarefied – neural networks and computer networks; yellow – an erroneous cluster of German articles.

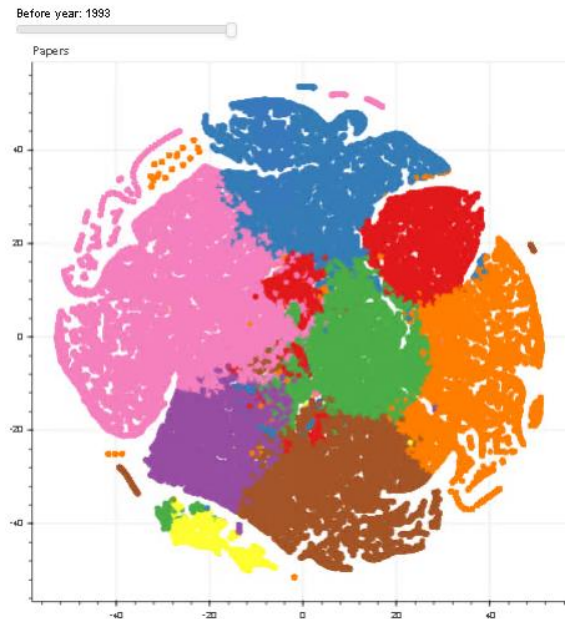


Fig. 4. 2D cluster structure in 1993.

Fig. 4 presents 2D visual maps of the AI collection and 2D cluster structures in 1993. In 1993 the red cluster (networks) consists of two large parts, which is the result of the distortion of high-dimensional space where red cluster is connected. The comparison of visualization in 2D and 3D shows that 3D visual map better preserves high-dimensional clusters structure than 2D visual map.

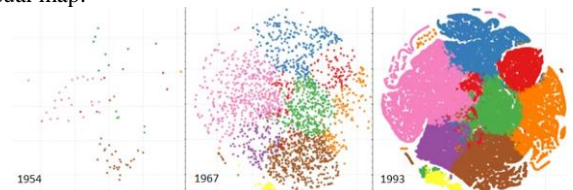


Fig. 5. Time series of 2D semantic visual maps.

Fig. 5 demonstrates that a time series of 2D semantic visual maps can be a good representation of the dynamics of topic trends. Such sequence of visualizations can be presented in the form of animation or a movie. Similarly, the time series of 3D visual maps allows us to present the dynamics in more detail.

6. WebVR visualization of 3D map

We use WebVR technology for creating 3D visual map of the AI collection (see Section 2) based on the results of t-SNE algorithm.

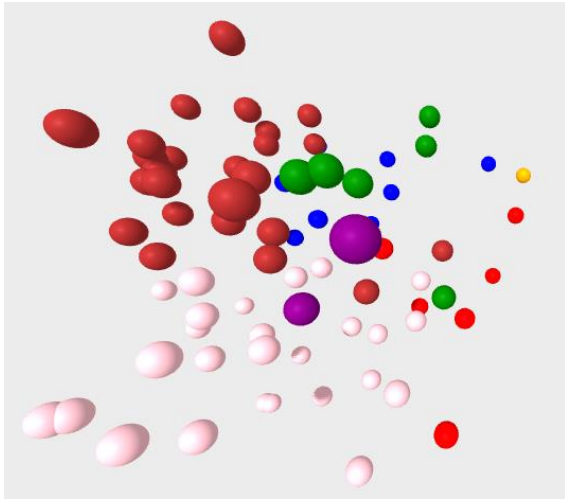


Fig. 6. 3D cluster structure in 1954.

WebVR provides JavaScript API that allows to build a three-dimensional picture. The easiest way to start working with WebVR is to use existing libraries, such as Three.js, D3.js or other frameworks capable of developing VR environment. WebVR provides the ability to rotate a 3D model, view it from different angles, and thus create a more complete picture of the text collection structure.

The Mozilla VR team developed A-Frame in mid-2015 (<https://aframe.io>). A-Frame is a WebVR framework that makes implementing virtual reality experiences quicker and easier by enabling to code in HTML. A-Frame is open source and it is primarily maintained by Mozilla and the WebVR community. A-Frame is an entity component system framework for Three.js where developers can create 3D and WebVR scenes using HTML.

Fig. 6 presents 3D visual map of the AI collection and 3D cluster structure in 1954. The coordinates of spheres in Fig. 6 are calculated by t-SNE algorithm which uses semantic similarity measures between documents in the collection. The color of the spheres points to topical cluster. This map is one of the screenshots of the virtual reality scene that was built using WebVR and A-Frame technology. Below is a fragment of HTML-code from which this virtual reality scene was built.

```

<!DOCTYPE html > <html > <head >
<script src= " https:// aframe.io / releases /0.7.0/
aframe.min.js "> </script > </head > <body > <a-scene >
<a-octahedron position="-1.0869318 -1.3309450
0.6411748" radius="0.30" color="pink" shadow></a-
octahedron>
<a-sphere position="-1.3742855 -0.3519478 0.8263161"
radius="0.10" color="pink" shadow></a-sphere>
...
<a-sky color= "# ECECEC "></ a-sky >
</ a-scene > </body > </html >

```

This HTML-code was automatically created based on 3D coordinates calculated by t-SNE algorithm which uses semantic similarity measures between documents in the collection calculated using LDA algorithm (see Section 3). Parameters "color" (that represent topical cluster) in HTML-code are also calculated by LDA algorithm.

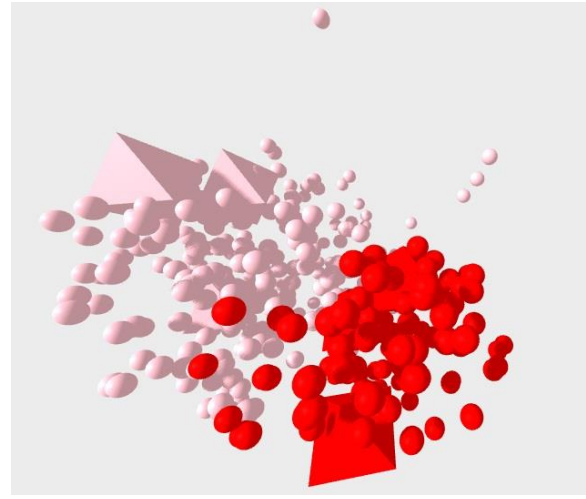


Fig. 7. 3D cluster structure in 1993 filtered by time and topic.

Fig. 7 presents 3D visual map of the AI collection and 3D cluster structure in 1993. This map uses article filters by time (until 1993) and filters by topic (all clusters except pink and red are prohibited).

Red cluster on 2D map of 1993 in Fig. 4 consists of two large parts, which is the result of distortion of high-dimensional space, where red cluster is connected. In Fig. 7, this red cluster consists of one large part, which is more correct. Thus, the comparison of visualization in 2D and 3D shows that 3D visual map better preserves articles similarity and high-dimensional clusters structure than 2D visual map.

In Fig. 7, the articles with largest citation forecasts are presented as polyhedra octahedrons. These forecasts were calculated using a deep learning neural network algorithm described in Section 4. Visualization of this predictive information allows you to better understand the dynamics of future trends and find the most promising topics. Such predictive visual analytics helps us to make more reliable forecasts and increase the credibility of the model used.

7. Future work

We plan to improve visualization features of proposed cyberspace by visualizing formal links between articles and the most reliable of implicit links. We also plan to visualize multilingual collections for integrating information from different languages. Also, our plans include:

- to improve semantic similarity measure by using Word2Vec, Doc2Vec, WMD and other new methods;
- to improve semantic similarity measure by taking into account the time of the articles and direction of implicit links;
- to check our results on different collections in other subject areas and in other languages.

8. Conclusion

An unsupervised method and algorithm for visualizing the dynamics of topic trends by generating a time series of 2D and 3D semantic visual maps with predictive information is described. The method includes semantic similarity measure and citation prediction for documents, topic modeling and clustering, dimensionality reduction, virtual reality technology, representation of dynamics using time filters. As an example of particular implementation, the method is demonstrated on AI collection data using technologies of neural network prediction, LDA clustering, t-SNE dimensionality reduction, WebVR visualization.

The comparison of visualization in 2D and 3D shows that 3D visual map better preserves articles similarity and high-dimensional clusters structure than 2D visual map. The colors of the articles in visual maps correspond to different topical clusters. The articles with largest citation forecast in 3D visual map are presented as polyhedra octahedrons. This forecast was calculated using a deep learning neural network algorithm. For a better visual representation of trend dynamics, the time series of semantic visual maps can be presented in the form of a 3D film or animation.

The presented algorithm can be a good tool for analyzing the emergence of scientific topics and their trends in any research field. The results obtained will make it possible to notice in time new promising areas for attracting timely financing in order to create new competitive technologies that will be in demand in the market.

9. Acknowledgment

This work is supported by Russian Foundation for Basic Research, grants 19-07-00857, 16-29-09527, 18-07-00909 and 18-07-01111. We are grateful to the Russian Foundation for Basic Research for financial support of our projects.

10. References

- [1] O. Abdelwahab and A. Elmaghraby. UofL at SemEval-2016 Task 4: Multi Domain word2vec for Twitter Sentiment Classification. In Proceedings of the 10th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2016). Association for Computational Linguistics, 2016, pp. 164–170. <https://doi.org/10.18653/v1/S16-1024>
- [2] M. Dodge and R. Kitchin. Exposing the Second Text of Maps of the Net, *Journal of Computer-Mediated Communication* 5, 2000, http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue4/dodge_kitchin.htm
- [3] M. Charnine, S. Klimenko, “Semantic cyberspace of scientific papers,” Proc. 2017 International Conference on Cyberworlds, 20-22 September 2017, Chester, United Kingdom, pp.146-149.
- [4] C.Chen, “Structuring and visualizing the WWW with Generalized Similarity Analysis”, Proceedings of the Eighth ACM Conference on Hypertext (Hypertext’97), 1997, Southampton, UK, pp. 177-186.
- [5] C.Chen, “Visualization of knowledge structures”, Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2002.
- [6] S.Klimenko, M.Charnine, O.Zolotarev, N.Merkureva, A.Khakimova, “Semantic approach to visualization of research front of scientific papers using web-based 3D graphic,” Proc. 2018 International Conference Web3D’18, June 20–22, 2018, Poznan, Poland.
- [7] L.J.P. Maaten van der and G.E. Hinton. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 9(Nov), 2008, pp. 2579–2605.
- [8] T. Mikolov, G. Corrado, K. Chen, and J. Dean. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space, 2013, Vol. 1, pp. 1–12.
- [9] S. Neelakantam and T. Pant. Learning Web-based Virtual Reality: Build and Deploy Web-based Virtual Reality Technology. 2017.
- [10] H.Patel, R.Caedinali “Virtual Reality Technology in Business”, *Management Decision*, 1994, 32, 7, 5-12.
- [11] J. Tian and M. Lan. ECNU at SemEval-2016 Task 1: Leveraging Word Embedding From Macro and Micro Views to Boost Performance for Semantic Textual Similarity. In Proceedings of the 10th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2016).

Association for Computational Linguistics, 2016, pp. 621–627. <https://doi.org/10.18653/v1/S16-1094>.

About the authors

Dr. Michael Charnine is a senior researcher of the Institute of Informatics Problems of the Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences. E-mail: mc@keywen.com.

Sokolov Evgeniy is a postgraduate student of the Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences. E-mail: evgeny.sokolov@phystech.edu.

Klokov Alexey is a student of Moscow Institute of Physics and Technology with math modeling specialization. E-mail: aaklokov@yandex.ru.

Исследование конвективных структур и фазового перехода, индуцированных нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды

В.А. Арбузов^{1,3}, Э.В. Арбузов^{1,2,3}, В.С. Бердников^{1,3}, Ю.Н. Дубнищев^{1,3,4}, О.С. Золотухина^{1,3}, С.А. Кислицын^{1,3}
 arbutov@itp.nsc.ru|arbutov@math.nsc.ru|berdnikov@itp.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|
 melexina-olga17@yandex.ru|100pch@mail.ru

¹ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

²ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

³ФГБУН Новосибирский государственный технический университет, Россия;

⁴ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Методами сдвиговой интерферометрии и численного моделирования исследован процесс эволюции конвективных структур и фазовый переход, индуцированные нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды, ограниченном плоскими теплообменными поверхностями. Выполнено численное моделирование температурного поля как поля изотерм в режиме монотонного охлаждения горизонтальных стенок. Решена задача фрагментарной реконструкции гильбертограмм и сдвиговых интерферограмм из численной модели поля изотерм. Гидродинамика конвективных течений, коэволюция температурных полей, интерференционных и гильберт-структур смоделированы и исследованы с учетом инверсии плотности воды в окрестности изотермы (+4°C), в условиях фазового перехода и роста слоя льда на нижней теплообменной плоскости. Моделирование выполнено с использованием пакета программ собственной разработки. Актуальность такого рода исследований обусловлена особой важностью конвекции в геодинамике, физике атмосферы и океана, в гидродинамических и теплофизических процессах, связанных с образованием и ростом кристаллов.

Ключевые слова: оптическая диагностика, сдвиговая интерферометрия, конвективные потоки.

Investigation of convective structures and phase transition induced by non-stationary boundary conditions in a horizontal layer of water

V.A. Arbuzov^{1,3}, E.V. Arbuzov^{1,2,3}, Berdnikov V.C.^{1,3}, Yu.N. Dubnishchev^{1,3,4}, O.S. Zolotukhina^{1,3}, S.A. Kislitsyn^{1,3}
 arbutov@itp.nsc.ru|arbutov@math.nsc.ru|berdnikov@itp.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|
 melexina-olga17@yandex.ru|100pch@mail.ru

¹Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

²Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

⁴Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The evolution of convective structures and the phase transition induced by non-stationary boundary conditions in a horizontal water layer bounded by flat heat-exchange surfaces were studied by shear interferometry and numerical simulation methods. Numerical modeling of the temperature field as a field of isotherms in the mode of monotonous cooling of horizontal walls was performed. The problem of fragmentary reconstruction of hilbertograms and shear interferograms images from a numerical model of the isotherm field was solved. The hydrodynamics of convective currents, the coevolution of temperature fields, interference and Hilbert structures have been modeled and studied taking into account the inversion of water density in the vicinity of the isotherm (+4°C), under conditions of phase transition and growth of the ice layer on the lower heat transfer plane. The simulation was performed using a proprietary software package. The relevance of this kind of research is due to the special importance of convection in geodynamics, physics of the atmosphere and the ocean, in hydrodynamic and thermophysical processes associated with the formation and growth of crystals.

Keywords: optical diagnostics, shear interferometry, convective currents.

1. Введение

Методы оптической диагностики в значительной мере определяют уровень экспериментальных исследований в современной гидро- и газодинамике. Выбор конвективных течений в качестве объекта приложений оптической диагностики объясняется особой важностью конвекции в геодинамике, физике атмосферы и океана, в гидродинамических и теплофизических процессах с фазовыми переходами, связанных с образованием и ростом кристаллов [6, 7]. Актуальность такого рода исследований в последнее время возросла из-за наблюдаемых аномалий в образовании и таянии льда в арктических и антарктических регионах, а также интенсификации освоения морских нефтегазоносных районов Арктики. Экспериментальные и

теоретические исследования конвективных процессов и динамики фазового перехода вода–лёд с учётом аномалии плотности воды в области 0÷4°C необходимы для многочисленных технических и технологических приложений. Изучение динамики фазовых переходов в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода–лёд требует применения не возмущающих методов диагностики, основанных на современных достижениях оптики, лазерной техники и информационных технологий. Необходимостью таких исследований мотивирована настоящая работа.

2. Метод исследования

Изучение динамики фазовых переходов в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных

структур в системе вода–лёд требует применения не возмущающих методов диагностики, основанных на современных достижениях оптики, лазерной техники и информационных технологий. Структура исследовательского комплекса, содержащего систему оптической диагностики и экспериментальный стенд, аналогична описанной в [5]. Система оптической диагностики содержит последовательно расположенные: осветительный модуль, состоящий из источника света, конденсорной линзы и щелевой диафрагмы, помещённой в передней фокальной плоскости объектива, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде. Такой средой является вода, заполняющая прямоугольную полость 1 (рис. 1) с прозрачными стёклами оптического качества.

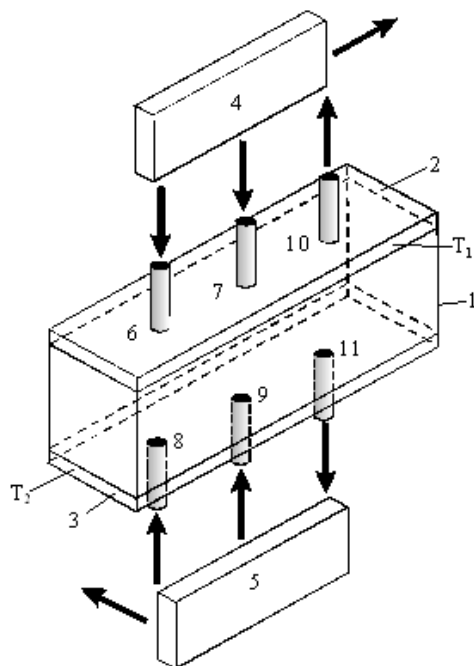


Рис. 1. Гидродинамический стенд

Внутренние размеры полости 136×86×30 мм. Верхняя и нижняя стенки образованы охлаждаемыми плоскопараллельными медными пластинами высокого качества 2 и 3. Температура верхней пластины (T_1) регулируется и поддерживается термостатом в пределах до $-8,5^\circ\text{C}$. Температура нижней пластины (T_2) – в диапазоне от комнатной температуры до -17°C . Внутри пластин имеются полости, в которые подаётся охлаждающая жидкость из термостатов 4 и 5. Термостаты управляются компьютером по заданной программе. Трубки, подающие хладагент в верхнюю и нижнюю пластины, обозначены цифрами 6, 7, 8, 9, трубки оттока – 10, 11. Расположение подающих трубок и трубок оттока может меняться в соответствии с условиями эксперимента. Расстояния между трубками – 80 мм.

Оптическая система диагностики реализована на базе теневого прибора ИАБ–463М с модифицированными под задачи эксперимента модулями светового источника, пространственно-частотной фильтрации оптического сигнала, сдвиговой интерферометрии, гильберт-визуализации, а также модулем регистрации изображения визуализированных фазовых возмущений светового поля, индуцированных исследуемой средой. Модуль сдвиговой интерферометрии реализован на базе модифицированного интерферометра Маха–Цендера. Изображения визуализированных фазовых структур, регистрируются цифровой видеокамерой и подвергаются компьютерной обработке.

В пространстве между верхней и нижней термостатируемыми поверхностями температурные градиенты индуцируют возникновение конвективных структур, которые проявляются как динамические возмущения полей оптической фазовой плотности. Эволюция конвективных структур осложняется аномалией плотности воды в диапазоне температур $0\div 4^\circ\text{C}$. Методами сдвиговой интерферометрии выполняется визуализация градиентов возмущений фазовой оптической плотности в слое воды. Эти возмущения индуцируются нестационарными температурными граничными условиями на горизонтальных поверхностях, ограничивающих исследуемую среду (рис. 1).

3. Результаты

Нестационарные граничные условия в исследуемой среде задаются температурами верхней и нижней термостатированных поверхностей. Температуры контролируются термомпарами. На рис. 2 зелёная линия иллюстрирует зависимость от времени температуры верхней термостатированной теплообменной поверхности. Стационарное значение температуры поддерживается на значение температуры в течение интервала 7000 с. Красная линия отображает температуру нижней теплообменной поверхности на том же временном интервале. Динамика изменения этой температуры задаёт нестационарность граничных условий, индуцирующих эволюцию конвективных течений и фазовый переход.

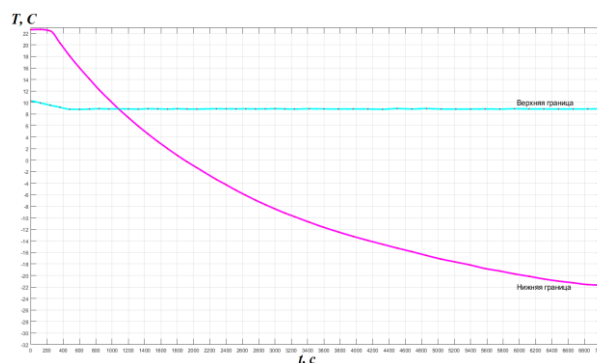


Рис. 2. Температуры верхней (голубая линия) и нижней (красная линия) теплообменных поверхностей, ограничивающих слой воды, на временном интервале $0\div 7000$ с.

На рис. 3 показаны примеры сдвиговых интерферограмм, визуализирующих конвективные структуры, фазовый переход и образование ледяного слоя.

Широкая тёмная полоса соответствует области максимального градиента температуры. Структура полученных интерферограмм определяется температурой исследуемой жидкости, а интерференционные полосы соответствуют изотермам. Широкая тёмная полоса соответствует пространственной локализации больших градиентов температуры, где интерференционные полосы сливаются. В процессе выхолаживания слоя жидкости вблизи нижней термостатированной поверхности при росте градиента температуры вода становится переохлажденной жидкостью, переходя в состояние неустойчивого равновесия. В такой среде возникает переход из жидкой фазы в твердокристаллическое состояние. Это – фазовый переход первого рода, реализация которого проявляется возникновением волны кристаллизации и сопровождается выделением тепловой энергии, что влияет на динамическое распределение градиента оптической плотности, индуцируя фазовые возмущения в зондирующем световом поле.

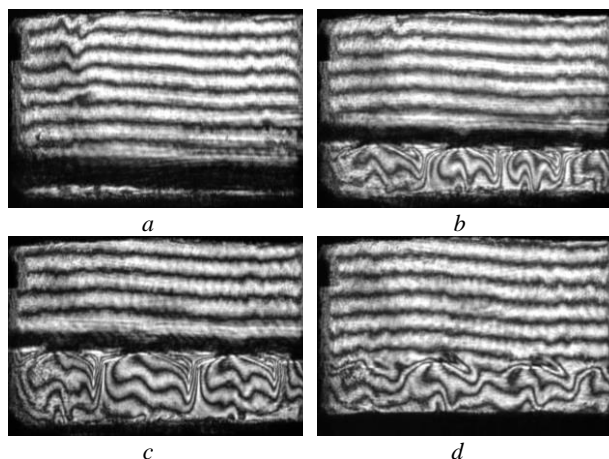


Рис. 3. Визуализация поля фазовой плотности методом сдвиговой интерферометрии:

- (a) – $t = 48$ [мин] 45 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей (момент образования ячейистой структуры на нижней горизонтальной стенке);
- (b) – $t = 1$ [ч] 8 [мин] 42 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей;
- (c) – $t = 1$ [ч] 19 [мин] 41 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей (возникновение волны кристаллизации на нижней горизонтальной стенке);
- (d) – $t = 1$ [ч] 19 [мин] 41 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей (образование слоя льда толщиной 8 мм на нижней горизонтальной стенке).

Рис. 4, иллюстрирующий эволюцию формы и толщины слоя льда на нижней термостатированной стенке по мере её выхолаживания после фазового перехода.

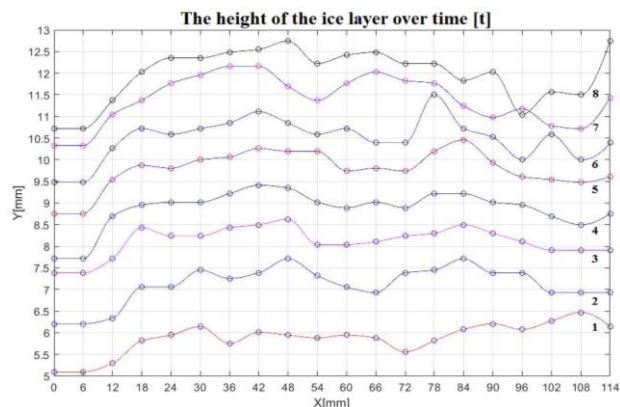


Рис. 4. Эволюция толщины слоя льда после фазового перехода:

- (1) – 1 [ч] 23 [мин] 44 [с]; (2) – 1 [ч] 27 [мин] 44 [с];
- (3) – 1 [ч] 31 [мин] 44 [с]; (4) – 1 [ч] 35 [мин] 44 [с];
- (5) – 1 [ч] 39 [мин] 44 [с]; (6) – 1 [ч] 43 [мин] 44 [с];
- (7) – 1 [ч] 47 [мин] 44 [с]; (8) – 1 [ч] 51 [мин] 44 [с].

В качестве верификации результатов, было проведено численное моделирование температурных полей конвективных течений в виде динамической структуры изотерм. Из этих структур реконструировались гильбертограммы и сдвиговые интерферограммы, которые затем сравнивались с результатами, полученными в эксперименте (рис. 5).

Конвективный теплообмен в жидкости в двумерной постановке описывался безразмерной системой уравнений Навье–Стокса, энергии и непрерывности в приближении Буссинеска. Проводящий теплообмен в массивных горизонтальных стенах оргстекла моделировался с использованием уравнения теплопередачи. Уравнения решались численно методом конечных элементов в

сопряженной формулировке. Были учтены зависимости плотности и коэффициента объемного теплового расширения от температуры. На твердых границах для скорости (и, соответственно, для функции тока) были заданы условия адгезии и не протекания. Граничное условие для вихря получено из поля функции тока с использованием метода [3]. На границе раздела жидкости с твердыми стенками принималось условие непрерывности температуры и теплового потока.

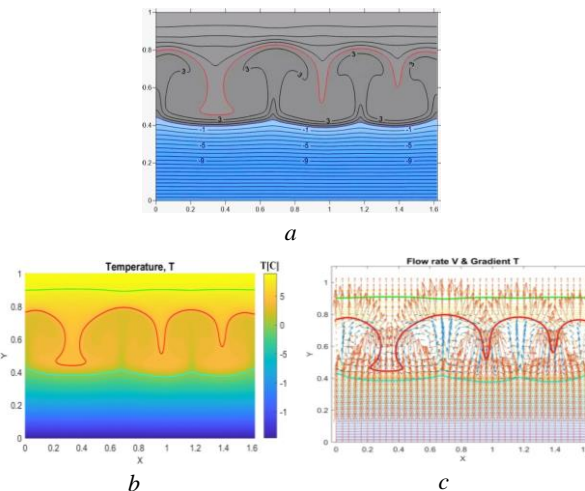


Рис. 5. Численная модель: (a) – изотермическое поле ($t = 4993$ [с] момента охлаждения); (b) – численная модель температурного поля от начального поля изотерм (голубая линия – изотерма 0°C , красная линия – изотерма $+4^\circ\text{C}$, зелёная линия – изотерма $+8^\circ\text{C}$); (c) – поля скоростей и градиентов температуры.

Использовалась неравномерная треугольная сетка, сгущённая в разной степени до всех границ расчетной области, с числом узлов $\approx 4 \cdot 10^4$. Линейные базисные функции даны на элементах. Клеточный пошаговый алгоритм для максимального угла был применён для построения триангуляции [2].

Задача решалась в нестационарной постановке: начальная температура системы $+10.26^\circ\text{C}$, температура на горизонтальных границах задавалась в соответствии с картой температуры, полученной при проведении эксперимента (рис. 2). Наружные поверхности боковых стенок адиабатические.

Температурные поля восстанавливались из численных моделей изотерм (рисунок 5, a, b). Графики построены в относительных единицах (на рисунках реальный размер длины кюветы, равный 86 мм, взят за масштаб при переходе к безразмерным уравнениям и граничным условиям). Кроме того, моделирование поля изотерм дополняется расчётом поля скоростей и градиентов температуры (рис. 5, c).

Фазовая структура зондирующего поля, индуцированного в исследуемой среде температурными граничными условиями, определяется как:

$$\Delta\varphi(x, y, T) = k[n(x, y, T) - n_0]l, \quad (1)$$

где l – толщина слоя жидкости, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число светового поля, $n(x, y, T)$ – показатель преломления жидкости как функция пространственных координат x, y и температуры T .

Эта функция определяется температурной зависимостью удельного преломления воды. Температурная зависимость показателя преломления дистиллированной воды рассчитывалась, согласно [1, 4], с учётом плотности и удельного преломления на длине волны $\lambda = 589,3$ нм при нормальном атмосферном давлении (рис. 6). Из

полученного оптического фазового поля реконструированы гильберт-изображения и сдвиговые интерферограммы (рис. 7).

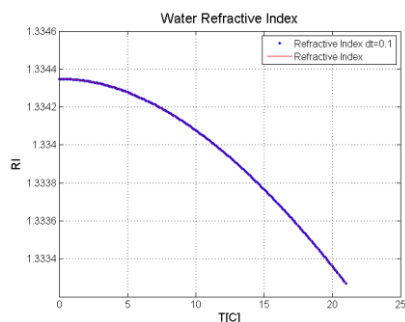


Рис. 5. Зависимость показателя преломления дистиллированной воды от температуры от -2°C до $+21^{\circ}\text{C}$ [3, 5].

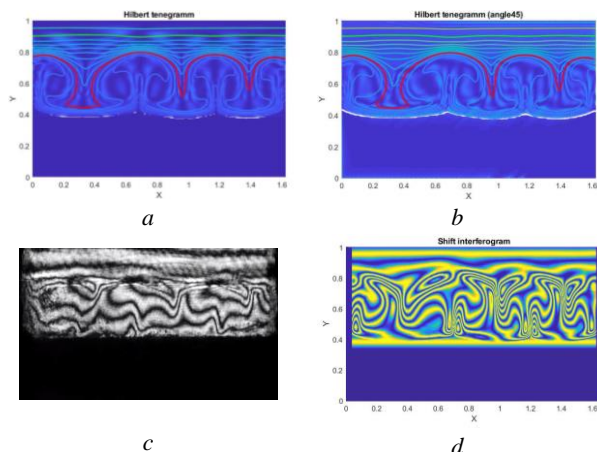


Рис. 7. (a) – численно смоделированная гильбертограмма при вертикальной ориентации щелевого источника излучения; (b) – численно смоделированная гильбертограмма при ориентации щелевого источника излучения под углом 45° , (белая линия – изотерма 0°C , красная линия – изотерма $+4^{\circ}\text{C}$, зелёная линия – изотерма $+8^{\circ}\text{C}$); (c) – экспериментальная сдвиговая интерферограмма; (d) – численно смоделированная сдвиговая интерферограмма.

Структуры экспериментальной и численно реконструированной интерферограмм имеют сходный характер, как и в случае исследования конвективных структур и фазового перехода, индуцированных в вертикальном слое воды, ограниченном параллельными теплообменными поверхностями [4]. Наблюдаемые зависимости могут быть использованы при разработке алгоритма решения обратной задачи восстановления температурного поля по экспериментальным гильбертограммам.

4. Заключение

Методами гильберт-оптики, сдвиговой интерферометрии и численного моделирования исследована структура и эволюция конвективных структур, индуцированных нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды, ограниченном плоскими теплообменными поверхностями, в условиях монотонного охлаждения. Решена задача восстановления полей гильбертовых изображений и сдвиговых интерферограмм по фазе оптической плотности по численно полученным полям эволюции изотерм и скорости. Исследования конвективных течений, вызванных нестационарными граничными

условиями, актуальны для решения различных фундаментальных и прикладных задач, примером которых является разработка новых технологий выращивания кристаллов, понимание конвективных процессов в толще воды при изучении арктических и антарктических регионов мирового океана.

5. Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А. Гришкову за помощь в работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Гос. рег. АААА–А17–117030310010–9, проект III.18.2.5. Гос. рег. АААА–А17–117022850021–3), финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00707), частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-38-00790-мол_а) и комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН II.1 (проект 0314-2018-0010).

6. Литература

- [1] Иванов А. Введение в океанографию. Перевод с французского Плахина Е.А., Шифриной К.С. Издательство: Мир. Москва. 1978.
- [2] Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. 128 с.
- [3] Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г.. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2007. 896 с.
- [4] Таблицы стандартных справочных данных: Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 1000°C . ГСССД 2-77., Издательство стандартов. Москва. 1978.
- [5] Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Berdnikov V.C., Dubnishchev Yu.N., Melekhina O.S. Dynamics of the Crystallization Front Induced by the Temperature Gradient at the Uped Boundary of a Horizontal Layer of a Fluid // Optoelectronics, Instrumentations and Data Processing. 2017. V. 53, No 2. P. 131–135. DOI: 10.3103/S87566990170220042.
- [6] Dubnishchev Yu.N., Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Berdnikov V.S., Melekhina O.S., Shlapakova E.O. Visualization of Convective Structures by Methods of the Hilbert Optics and Phase-Shift Interferometry // 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. Naples, Italy, 15–18 June, 2015. pp. 1–6.
- [7] Lappa M. Thermal Collection: Patterns, Evolution and Stability. Chichester: John Wiley Sons. 2010.

Об авторах

Арбузов Виталий Анисифорович, д.т.н., в.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@itp.nsc.ru.

Арбузов Эдуард Витальевич, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт математики СО РАН, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН, доцент кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@math.nsc.ru.

Бердников Владимир Степанович, д.ф.-м.н., г.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры прикладной математики факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета. E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru.

Дубнищев Юрий Николаевич, д.т.н., г.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических

информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru.

Золотухина Ольга Сергеевна, аспирантка кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН. E-mail: melexina-olga17@yandex.ru.

Кислицын Степан Александрович, аспирант кафедры прикладной математики факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН. E-mail: 100pch@mail.ru.

Реконструкция пространственной фазовой и температурной структуры пламени свечи методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии

В.А. Арбузов^{1,3}, Э.В. Арбузов^{1,2,3}, Ю.Н. Дубнищев^{1,3,4}, О.С. Золотухина^{1,3}, В.В. Лукашов¹
arbusov@itp.nsc.ru|arbusov@math.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|melexina-olga17@yandex.ru|luka@itp.nsc.ru
¹ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
²ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
³ФГБУН Новосибирский государственный технический университет, Россия;
⁴ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В работе обсуждается исследование структуры пламени свечи. Адаптированная к изучению проблем горения оптическая диагностика основана на визуализации фазовых возмущений, индуцированных в зондирующем световом поле изучаемой средой, методами гильберт-оптики и интерферометрии в сочетании с попиксельной обработкой динамической структуры регистрируемых изображений. Диагностический комплекс реализован на основе прибора ИАБ–463М с модифицированными узлами оптической фильтрации, светового источника, регистрации и обработки информации. Визуализирована динамическая фазовая структура пламени свечи. В реперных точках с помощью термопар измерены значения температуры. На осесимметричных участках из гильбертограмм восстановлена фазовая функция и с применением обратного преобразования Абеля реконструировано температурное поле пламени.

Ключевые слова: оптическая диагностика пламени, гильберт-оптика, интерферометрия.

Reconstruction of the spatial phase and temperature structure of a candle flame using Hilbert optics and shear interferometry methods

V.A. Arbusov^{1,3}, E.V. Arbusov^{1,2,3}, Yu.N. Dubnishchev^{1,3,4}, O.S. Zolotukhina^{1,3}, V.V. Lukashov¹
arbusov@itp.nsc.ru|arbusov@math.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|melexina-olga17@yandex.ru|luka@itp.nsc.ru
¹Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;
²Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;
³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;
⁴Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The study of the structure of the candle flame is discussed in the work. The optical diagnostics adapted to the study of combustion problems is based on the visualization of phase disturbances induced in the probe light field by the medium under study with using Hilbert optics and interferometry methods combined with pixel-by-pixel processing of the dynamic structure of the recorded images. The diagnostic complex is implemented on the basis of the IAB–463M device with modified blocks of optical filtration, light source, registration and information processing. The dynamic phase structure of the candle flame was visualized. The temperature was measured using thermocouples at the reference points. The phase function was restored on axisymmetric sections from the obtained hilbertograms. The temperature field of flame was reconstructed using the inverse Abel transform.

Keywords: optical diagnostics of flames, Hilbert optics, interferometry.

1. Введение

Методы гильберт-оптики и интерферометрии составляют одно из направлений невозмущающей диагностики реагирующих струй и пламени [2, 4]. Они основаны на визуализации и анализе фазовых возмущений, индуцированных исследуемой средой в зондирующем световом поле. В работе [5] исследовалось диффузное горение струи водорода методами гильберт-оптики. Использовался оптический диагностический комплекс на основе прибора ИАБ–463М [1], оснащённого модифицированными модулями гильберт-фильтрации, интерференции, светового источника, регистрации гильберт-изображения и обработки информации. В работе [7] описан метод оценки распределения температуры в асимметричном пламени с применением высоконтрастного стереоскопического фотографирования. Сообщается о спектральной реконструкции температурных полей с использованием пирометрии цветовых соотношений и интерферометрической томографии [6].

Целью данной работы является адаптация методов гильберт-оптики и интерферометрии к решению задач диагностики с реконструкцией пространственной фазовой и температурной структуры пламени. Исследования мотивируются научной и практической значимостью проблемы, состоящей в поиске методов управления структурными и термодинамическими параметрами факела [3].

2. Метод исследования

Комплекс оптической диагностики создан на основе прибора ИАБ–463М [7] с модифицированными под задачи эксперимента модулями гильберт-фильтрации, интерферометрии, источника зондирующего поля, регистрации и обработки оптического сигнала [5].

На рис. 1 показана упрощённая схема комплекса оптической диагностики пламени свечи для метода гильберт-визуализации. Он содержит осветительный модуль, состоящий из источника света 1, коллиматорной линзы 2 и щелевой диафрагмы 3, помещённой в передней фурье-плоскости объектива 4, формирующего зондирующее

поле. Фурье-спектр фазовых возмущений, индуцируемых в зондирующем поле свечой 5, локализуется в частотной плоскости объектива 6, где помещён квадрантный гильберт-фильтр 7, ориентация которого согласована с диафрагмой 3. Объектив 8 выполняет обратное фурье-преобразование фильтрованного поля, формируя, в зависимости от спектральных характеристик светового источника, аналитический или гильберт-сопряжённый оптические сигналы, которые регистрируются цифровой видеокамерой 9, подключенной к компьютеру 10.

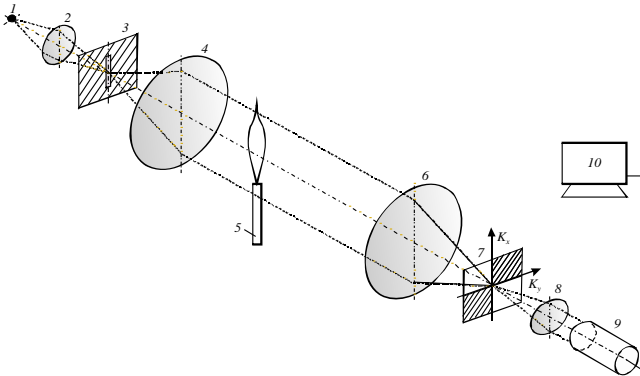


Рис. 1. Схема гильберт-визуализатора.

Гильберт-преобразование обладает свойствами перераспределения энергии из области низких пространственных частот в высокочастотную область. Экстремумы и градиенты фазовой оптической плотности исследуемой среды трансформируются в визуализированные структуры гильберт-полос. Пространственное распределение гильберт-полос несёт информацию о возмущениях фазовой оптической плотности, индуцированных температурным полем.

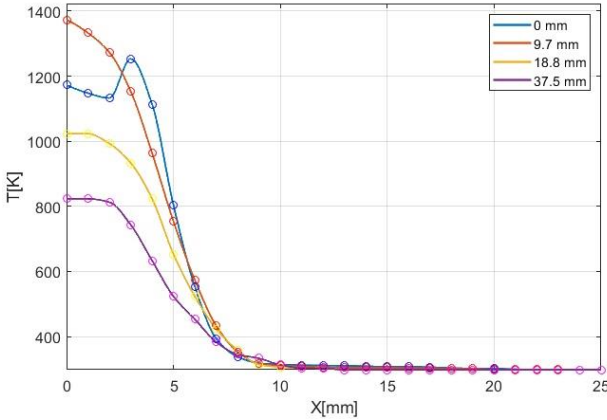


Рис. 2. Температурные профили пламени свечи в сечениях на расстояниях 0 ÷ 37,5 мм от конца фитиля.

Пламя свечи выбрано в качестве классического объекта для апробации метода диагностики. На рис. 2 представлены результаты измерения температурного профиля пламени свечи в сечениях на различных расстояниях от конца фитиля, выполненные с помощью ХА-термопары (диаметр провода 0,1 мм). Гильберт-изображение и интерферограмма пламени свечи показаны на рис. 3.

Фазовая структура зондирующего светового поля, возмущённого исследуемой средой, определяется как:

$$\Delta\psi(x, y) = k \int_{z_1}^{z_2} [n(x, y, z) - n_0] dz, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число зондирующего поля; $n(x, y, z)$ – показатель преломления среды в пространственной структуре пламени; n_0 – показатель преломления невозмущённой пламенем среды. Ось z

задаётся направлением зондирующего светового пучка, сечение факела описывается в координатах x, z . Выбор положения сечения определяется координатой y . Координаты z_1, z_2 задают размер сечения пламени по направлению зондирующего пучка.

В случае осевой симметрии пламени формула (1) трансформируется в уравнение Абеля:

$$\Delta\psi(x, y) = 2k \int_x^R [n(r) - n_0] \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - x^2}}, \quad (2)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$, R – радиус сечения рассматриваемой зоны, $n(r)$ – показатель преломления на расстоянии r от оси факела. Уравнение Абеля решается приближённым методом, основанным на аппроксимации экспериментальных данных температуры кривыми Безье (частный случай В-сплайнов).

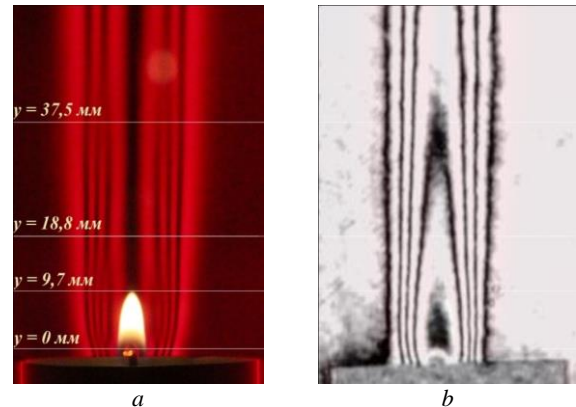


Рис. 3. Экспериментальные гильбертограмма – (a) и интерферограмма – (b) пламени свечи.

Полный фазовый сдвиг $\psi(x, y)$ для светового луча в сечении $y = const$ зависит от коэффициента преломления $n(r, x)$ на отрезке (z_1, z_2) , (рис. 4).

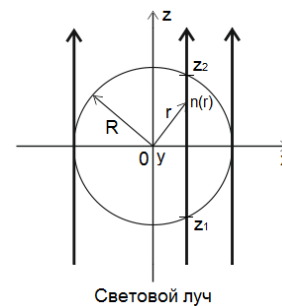


Рис. 4. Сечение исследуемого осесимметричного объекта в плоскости $y = const$.

Найденные из уравнения Абеля осесимметричные распределения коэффициента преломления $n(r, y)$ в сечении (y) факела позволяют определить радиальные поля температуры $T(r, y)$. Для этого можно воспользоваться уравнением Гладстона–Дейла:

$$T(r, y) = \left[\frac{n_0 - 1}{n(r, y) - 1} \right] T_0, \quad (3)$$

где T_0 – температура и n_0 – показатель преломления среды, окружающей пламя.

На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие, согласно уравнениям (2) и (3), восстановление радиального распределения температуры пламени (a) свечи в сечениях, расположенных на расстояниях $y = 0$ мм и $y = 18,8$ мм от конца фитиля. Красная линия на рисунках 5, b отображает фазовую функцию $\psi(x, y)$ в выбранных сечениях, полученную из уравнения Абеля, зелёная и чёрная линии – интерферограмму и гильбертограмму, реконструированные

из фазовой функции $\psi(x, y)$. Синяя линия – экспериментальная гильбертограмма.

Из сравнения экспериментальной и реконструированной гильбертограмм в выбранных сечениях видно, что точки локальных минимумов совпадают. Это означает совпадение фазовой функции, полученной из решения уравнения Абеля, и реальной фазовой функции. Следовательно, совпадают реальное и восстановленное поля температур в выбранных сечениях пламени свечи. Критерием правдоподобия полученных результатов является фазовая идентичность реконструированной и экспериментальной гильбертограмм, которая достигается повторением описанной процедуры. В сечении $y = 0$ мм, как видно из рисунка, осевая симметрия пламени нарушается, т.е. число гильберт-полос справа и слева от центра сечения ($x = 0$) не совпадает. Одна из причин этого – деформация фитиля свечи в процессе горения, другая – возможные возмущения стационарности внешних граничных условий. Как видно из рис. 5, температура пламени, реконструированная из гильбертограммы, и температура, измеренная с помощью термопар, хорошо согласованы.

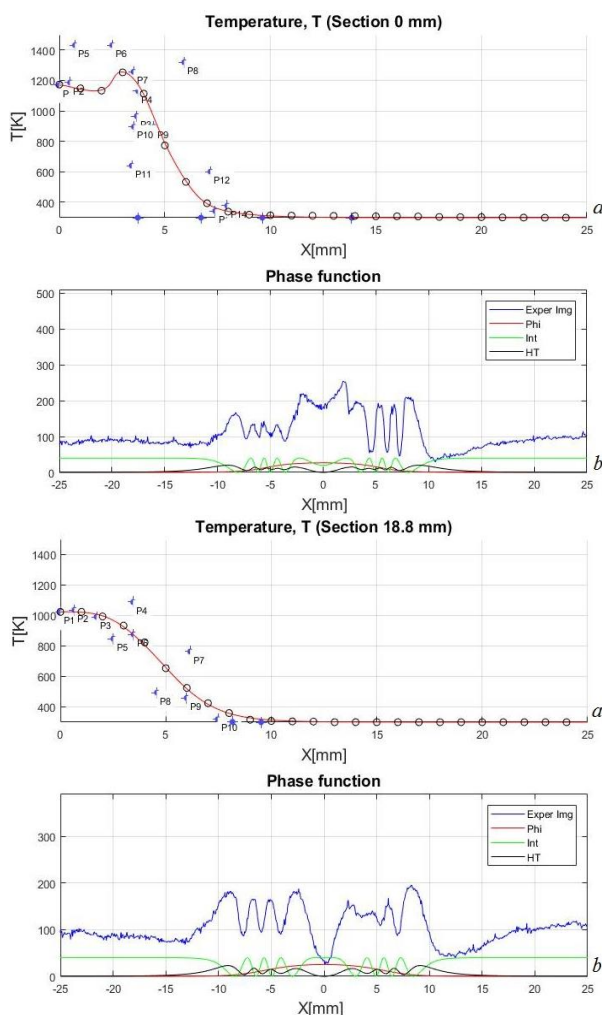


Рис. 5. Реконструкция фазовой структуры и температуры пламени свечи в сечениях $y = 0$ мм и $y = 18,8$ мм: (а) красная линия – восстановленная температура (кружочки – данные термопары); (б) красная линия – фазовая функция, зелёная – интерферограмма, реконструированная из фазовой функции, чёрная – реконструированная гильбертограмма, синяя – экспериментальная гильбертограмма.

На рис. 6 представлено температурное поле, реконструированное из гильберт-изображения пламени.

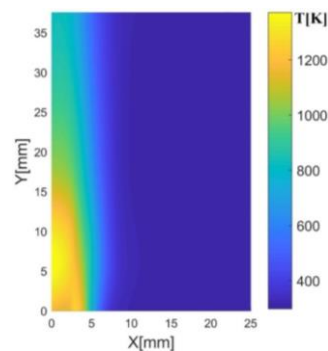


Рис. 6. Температурное поле пламени свечи, реконструированное по гильберт-изображению.

В качестве верификации полученных результатов решена обратная задача: из реконструированного температурного поля (рис. 6) восстановлено гильберт-изображение (рис. 7, б) и интерферограмма (рис. 8, б), которые сопоставлены изображениям, полученным в эксперименте (рис. 7, а и 8, а).

Из рис. 7 и 8 видно, что структуры, полученные в эксперименте и реконструированные, имеют сходный характер. Этим подтверждается достоверность результатов. Некоторое расхождение обусловлено искажением осевой симметрии пламени в реальном эксперименте из-за влияния динамических возмущений воздушной среды, окружающей пламя.

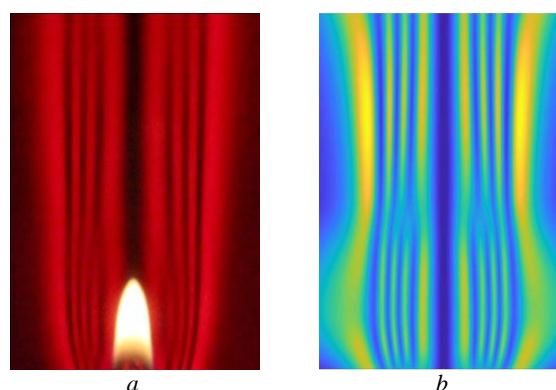


Рис. 7. (а) – гильберт-изображение пламени свечи, полученное в эксперименте; (б) – гильберт-изображение, численно смоделированное по реконструированному температурному полю.

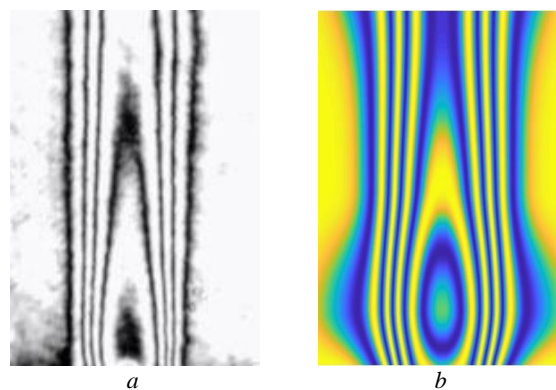


Рис. 8. (а) – интерферограмма пламени свечи; (б) – интерферограмма, численно смоделированная по реконструированному температурному полю.

3. Заключение

В представленной работе исследование пламени свечи выполнено с применением методов гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии в приближении осевой симметрии пламени с использованием преобразования Абеля. Достоверность результатов подтверждается сравнением гильбертограмм и интерферограмм, полученных в эксперименте, и реконструированных из фазовой структуры по Абелю. Результаты сравнения используются как критерий качества моделирования фазовой структуры и температурного поля с использованием преобразования Абеля при исследовании процесса горения.

4. Благодарности

Авторы выражают благодарность Н.С. Буфетову за помощь в работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Гос. рег. АААА–А17–117030310010–9) и при поддержке комплексной Программы фундаментальных научных исследований СО РАН II.1 (проект 0314-2018-0010).

5. Литература

- [1] Белозёров А.Ф. Оптические методы визуализации потоков. Казань: издательство КГТУ. 2007. 747 с.
- [2] Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское издательство. 2003. 408 с.
- [3] Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых макро- и микроструктурных течений и микроструйное горение (обзор) // Сибирский физический журнал. 2017. 12, (3). С. 83–89.
- [4] Dubnishchev Yu.N., Lemanov V.V., Lukashov V.V., Arbuzov V.A., Sharov K.A. Hydrodynamic vortex structures in a diffusion jet flame (Electronic edition). «Swirling Flows and Flames». pp. 32-5. DOI: 10.5772/intechopen.80610. Published: November 5th 2018. <https://www.intechopen.com/online-first/hydrodynamic-vortex-structures-in-a-diffusion-jet-flame>.
- [5] Dubnishchev Yu.N., Arbuzov V.A., Lukashov V.V., Sharov K.A., Lemanov V.V. Optical Hilbert Diagnostics of Hydrogen Jet Burning // Optoelectron., Instrum. Data Process. 2019. 55: pp. 16-19. <https://doi.org/10.3103/S8756699019010035>
- [6] Jochen A.H. Dreyer, Radomir I. Slawchov, Eric J. Rees, Jethro Akroyd, Maurin Salamanca, Sebastian Mosbach, and Markus Kraft. Improved methodology for performing the inverse Abel transform of flame images for cilir ratio pyrometry // Applied Optics. 2019. 58, (10). pp. 2662–2670.
- [7] Qunxing Huang, Fei Wang, Jianhua Yan, and Yong Chi. Simultaneous estimation of the 3-D soot temperature and volume fraction distributions in asymmetric flames using high-speed stereoscopies images // Applied Optics. 2012. 51 (15). pp. 2968–2978.

Об авторах

Арбузов Виталий Анисифорович, д.т.н., в.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@itp.nsc.ru.

Арбузов Эдуард Витальевич, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт математики СО РАН, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН, доцент кафедры оптических

информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@math.nsc.ru.

Дубнищев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, г.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru.

Золотухина Ольга Сергеевна, аспирантка кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН. E-mail: melexina-olga17@yandex.ru.

Лукашов Владимир Владимирович, к.т.н., в.н.с. Институт теплофизики СО РАН, заведующий лабораторией термомеханической аэродинамики Институт теплофизики СО РАН. E-mail: luka@itp.nsc.ru.

Оптические исследования особенностей обтекания моделей с местными сверхзвуковыми зонами в промышленной АДТ Т – 128

Горбушин А.Р.¹, Глазков С.А.¹, Кравцов А.Н.¹, Ступак Д.С.¹, Тенина А.В.¹, Фомин В.М.¹, Хозяенко Н.Н.¹
 gorbushin@tsagi.ru|glazkov@tsagi.ru|kravcov-an@rambler.ru|mr.strong.filipov@mail.ru|
 tenina.n@yandex.ru|sergin55@mail.ru|hozko@rambler.ru

¹ Федеральное государственное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского», (ФГУП «ЦАГИ»), г. Жуковский, Россия

В работе рассматриваются результаты эффективного применения метода пространственной визуализации обтекания моделей в промышленной аэродинамической трубе (АДТ) Т – 128, совмещенные со стандартными весовыми испытаниями. Проведена визуализация обтекания модели путем управления уровнем влажности и температуры потоков рабочей части. Представлены результаты согласованного стандартного весового эксперимента и физического исследования особенностей обтекания аэродинамической модели в промышленной АДТ Т - 128. В стандартных весовых испытаниях методами видеосъемки исследована сложная структура течения, возникающая при обтекании аэродинамической модели при дозвуковых и трансзвуковых скоростях. Результаты согласованного весового эксперимента и визуализация особенностей обтекания аэродинамической модели в промышленной АДТ Т - 128 позволили получить физическую информацию о структуре течения (возникновение ударно-волновой структуры, отрывы потока, «тряску» крыла, деформацию консоли крыла, образование асимметричных вихрей). Это в значительной мере позволяет расширить информативность экспериментальных исследований, повысить их надежность и давать правильную интерпретацию получаемых результатов.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, физический и весовой эксперимент, пространственная визуализация потока, ударные волны, отрыв потока, асимметрия образования вихрей, информативность исследований, интерпретация экспериментальных данных.

OPTICAL RESEARCH OF THE PECULIARITIES OF THE FLOW AROUND MODELS WITH LOCAL SUPERSONIC ZONES IN INDUSTRIAL ADT T – 128

Gorbushin A.R., Glazkov S.A., Kravtsov A.N., Stupak D.S., Tenina A.V., Fomin V.M., Khozyenko N.N.
 gorbushin@tsagi.ru|glazkov@tsagi.ru|kravcov-an@rambler.ru|mr.strong.filipov@mail.ru|
 tenina.n@yandex.ru|sergin55@mail.ru|hozko@rambler.ru

¹Federal state unitary enterprise "Central Aerohydrodynamic Institute named after professor N.E. Zhukovsky", (FGUP TSAGI), Zhukovskiy, Russia

The paper discusses the results of the effective application of the method of spatial visualization of the flow around models in industrial ADT T - 128, combined with standard weight tests. Visualization of flow over the model was performed by varying humidity and temperature of the flow in test section. The results of a consistent standard weight experiment and a physical study of the characteristics of the flow around an aerodynamic model in an industrial ADT T - 128 are presented. In standard weight tests using video methods, the complex flow structure arising from the flow around an aerodynamic model at subsonic and transonic speeds is investigated. The results of balance measurements with simultaneous application of the method of spatial flow visualization around model in industrial T - 128 wind tunnel allowed to obtain physical information on the flow structure - a shock-waves, flow separation, wing vibration and deformation, the onset of asymmetric vortices. This greatly allows to expand the information content of experimental studies, to increase their reliability and to give a correct interpretation of the results obtained.

Keywords: aerodynamic wind tunnel, physical and weight experiment, spatial visualization of the flow, shock waves, flow separation, asymmetry of vortices, informativity of research, interpretation of experimental data.

1. Введение

В промышленных аэродинамических трубах (АДТ) ЦАГИ используются различные методы для визуализации течения вблизи поверхности моделей летательных аппаратов (ЛА). Описание этих методов приведено в работах [1-6].

В промышленной АДТ Т-128 разработан и экспериментально проверен метод пространственной визуализации обтекания моделей одновременно с проведением стандартных весовых измерений путем управления уровнем влажности и температуры потока [7-10]. В данной работе экспериментально проведена пространственная визуализация обтекания модели одновременно с выполнением программы стандартных весовых измерений. Основное внимание уделено исследованию особенностей обтекания аэродинамической компоновки, визуализации физической картины обтекания крыла модели, образованию газодинамических

особенностей и деформации консоли крыла. Анализ представленных материалов исследований по углам атаки с одновременно измеряемыми АДХ позволил определить и объяснить различные особенности в изменении АДХ. Выявить режимы перестройки обтекания, связанные, например, с возникновением ударно-волновой структуры, отрывом потока, «тряской» крыла, деформацией консоли крыла, а также образование асимметричных вихрей.

2. Экспериментальная установка

Аэродинамическая труба Т-128 – крупнейшая в в России трансзвуковая аэродинамическая труба переменной плотности с компрессорным приводом. Построена в 1982 г. и сдана в эксплуатацию в 1983 г.

Аэродинамическая труба Т-128 относится к классу больших трансзвуковых компрессорных установок переменной плотности (изменение плотности воздуха

внутри оболочки трубы обеспечивается изменением давления). В настоящее время в мире существует всего 11 установок этого класса. Из них две трубы в мире имеют рабочие части большего



Рис. 1. Модель пассажирского самолета в рабочей части

размера по сравнению с Т-128: 16Т центра имени Арнольда (AEDC) и 11фт НИЦ имени Эймса NASA. Т-128 – единственная промышленная установка в мире с секционно - регулируемой перфорацией стенок рабочих частей.

Аэродинамическая труба Т-128 является трубой постоянного действия и переменной плотности. Для Т-128 было спроектировано пять сменных рабочих частей (РЧ). Наличие сменных РЧ позволяет проводить трудоемкую подготовку эксперимента вне контура трубы, что увеличивает её производительность. Размер поперечного сечения РЧ на входе составляет $2,75 \times 2,75$ м, на выходе $2,75 \times 3,5$ м. Длина рабочей части составляет 12 м. Боковые стенки состоят из двух участков: перфорированных панелей и створок камеры смещения. Фотография рабочей части с установленной в ней моделью приведена на рис. 1.

Боковые перфорированные стенки РЧ имеют приводы и могут перемещаться как в сторону сужения сечения РЧ, так и в сторону расширения. В случае сведения концы боковых панелей перемещаются до размера 2,6 м, а при расширении до размера 3,25 м. Установка их в разные положения зависит от вида эксперимента и необходима для компенсации нарастания толщины пограничного слоя на стенках рабочей части.

Регулируемая перфорация РЧ выполнена в виде круглых ступенчатых отверстий, секционирована по длине и ширине (высоте). 128 приводов позволяют установить различную степень проницаемости по поясам и секциям в диапазоне от 0 до 18%. Это позволяет обеспечить равномерный поток в зоне расположения модели и минимальное влияние стенок рабочей части на обтекание моделей ЛА.

Автоматическая система управления аэродинамической трубы обеспечивает точность поддержания числа Маха набегающего потока $\Delta M = 0,0005 \div 0,001$. Уровень пульсаций коэффициента статического давления на оси рабочей части представлен на рис. 2 в сравнении с зарубежными трубами.

3. Метод пространственной визуализации обтекания моделей

В АДТ Т-128 экспериментально проверена возможность пространственной визуализации обтекания моделей одновременно с выполнением программы стандартных весовых измерений путем управления уровнем влажности и температуры потока [7 - 10]. Для этого, как показали исследования, необходимо ограничить осушку воздуха в

тракте АДТ перед началом программы весовых испытаний. Например, для визуализации течения за элементами модели самолёта с источниками образования мощных вихревых структур (наплывы на фюзеляже и крыле, стреловидные кромки крыла и оперения) на режиме $M=0,9$ требуется обеспечить, регулируя процесс осушки воздуха в контуре АДТ, сочетание влажности и температуры торможения в пределах $G=(4,5 \div 8,0) \text{ г/м}^3$ и $T_0=(20 \div 35)^\circ\text{C}$.

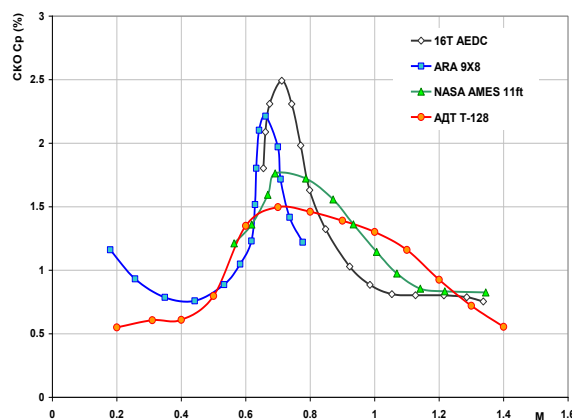


Рис. 2. Пульсации статического давления на оси рабочей части

Даже при рассеянном освещении картина обтекания достаточно хорошо проявляется. Анализ представленных материалов исследований по углам атаки с одновременно измеряемыми АДХ позволяет в этом случае определить и объяснить различные особенности в изменении АДХ. Выявить режимы перестройки обтекания, связанные, например, с образованием асимметричного развития вихрей. При этом, визуализация процесса формирования и развития вихревых структур на модели самолета была получена при выполнении обычной программы определения аэродинамических сил и моментов на весах.

4. Экспериментальные результаты

В данной работе рассматриваются результаты эффективного применения метода пространственной визуализации обтекания моделей в промышленной АДТ Т-128 совмещенные со стандартными весовыми испытаниями. Представлены результаты согласованного стандартного весового эксперимента и физического исследования особенностей обтекания аэродинамической модели в промышленной АДТ Т - 128. Исследование особенностей обтекания аэродинамической компоновки проводилось при помощи видеокамеры Sanyo VCC-6572P (скорость съёмки 25 кадров/сек, разрешение: по горизонтали – 520, по вертикали – 400 телевизионных линий). Это позволило провести интерпретацию измеряемых аэродинамических сил и моментов, связав их изменения со структурой течения возле ЛА.

На рис. 3 представлены результаты пространственной визуализации обтекания модели, совмещенные со стандартными весовыми испытаниями. Показаны зависимости коэффициента подъемной силы C_y от угла атаки α при числах Маха набегающего потока $M_\infty = 0,5, 0,7$ и $0,9$, а также соответствующие им поля течения возле модели.

Во всем рассмотренном диапазоне углов атаки $\alpha = -4^\circ \div 10^\circ$ при $M_\infty = 0,5$ возле модели наблюдается дозвуковое поле течения. Данному режиму обтекания соответствует практически линейная зависимость коэффициента подъемной силы C_y от угла атаки. На рисунке 3 показано поле течения возле модели при $M_\infty = 0,5$ и $\alpha = 7,7^\circ$.

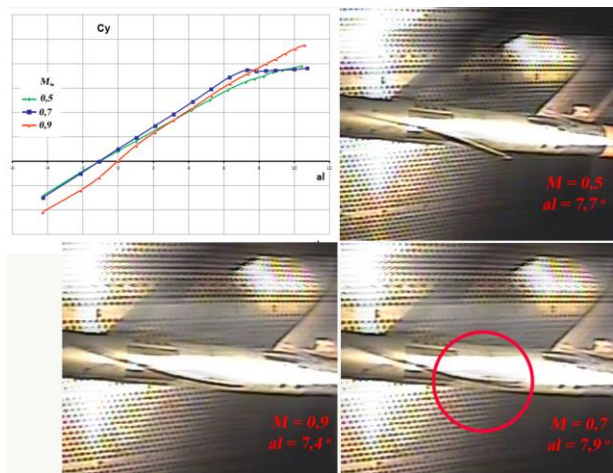


Рис. 3. Пространственная визуализация обтекания модели, совмещенная со стандартными весовыми испытаниями

При $M_\infty = 0.7$ и угле атаки α равном примерно $4^\circ - 5^\circ$ на верхней поверхности крыла появляется сверхзвуковая зона с замыкающим скачком уплотнения. С увеличением угла атаки из-под скачка уплотнения начинаются отрывы пограничного слоя ($\alpha > 7^\circ$). Наблюдается “тряска” крыла. На рис. 3 показано характерное поле течения для рассматриваемого случая обтекания возле модели с особенностью обтекания в виде “тряски” при $M_\infty = 0.7$ и $\alpha = 7.9^\circ$.

На отрицательных углах атаки при $M_\infty = 0.9$ на нижней поверхности крыла появляется сверхзвуковая зона с замыкающим скачком уплотнения, что приводит к резкому снижению коэффициента подъемной силы C_y на отрицательных и небольших положительных углах атаки. При $\alpha > 2^\circ$ имеет место скачок уплотнения только на верхней поверхности крыла. Во всем рассмотренном положительном диапазоне углов атаки при $\alpha > 2^\circ$ наблюдается практически линейная зависимость коэффициента подъемной силы C_y от угла атаки. На рис. 3 показано поле течения возле модели при $M_\infty = 0.9$ и $\alpha = 7.4^\circ$.

Зависимости коэффициента подъемной силы C_y от угла атаки α при числах Маха набегающего потока $M_\infty = 0.5, 0.7$ и 0.9 с соответствующими комментариями, полученными на основе пространственной визуализации обтекания модели и связанными со структурой течения возле ЛА показаны на рис. 4.

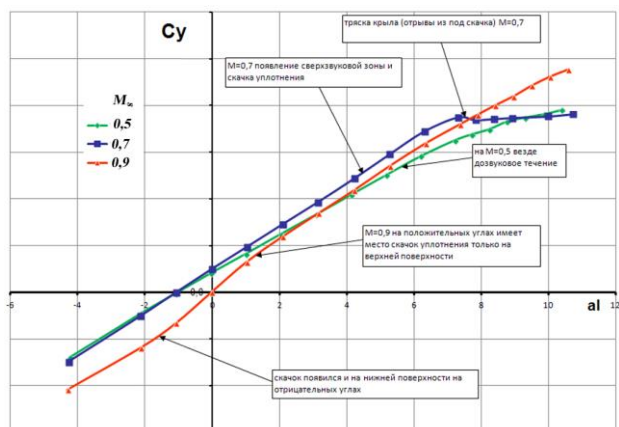


Рис.4. Зависимости коэффициента подъемной силы C_y (α) при $M_\infty = 0.5, 0.7$ и 0.9 с соответствующими особенностями обтекания модели

Изложенные выше особенности обтекания модели хорошо прослеживаются на характере зависимостей

коэффициента момента тангажа m_z от угла атаки α при числах Маха набегающего потока $M_\infty = 0.5, 0.7$ и 0.9 . Зависимости коэффициента момента тангажа m_z от угла атаки α при числах Маха набегающего потока $M_\infty = 0.5, 0.7$ и 0.9 с соответствующими комментариями, полученными на основе пространственной визуализации обтекания модели и связанными со структурой течения возле ЛА показаны на рис. 5.

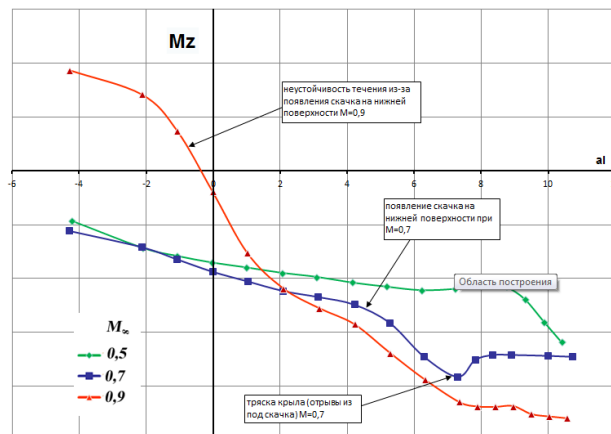


Рис. 5. Зависимости коэффициента момента тангажа m_z (α) при $M_\infty = 0.5, 0.7$ и 0.9 с соответствующими особенностями обтекания модели

Характерной особенностью обтекания рассмотренной модели является образование асимметричных вихрей на углах атаки $\alpha > 7^\circ$. При больших значениях числа Маха набегающего потока M_∞ асимметрия обтекания по углам атаки наступает раньше (рис. 6).

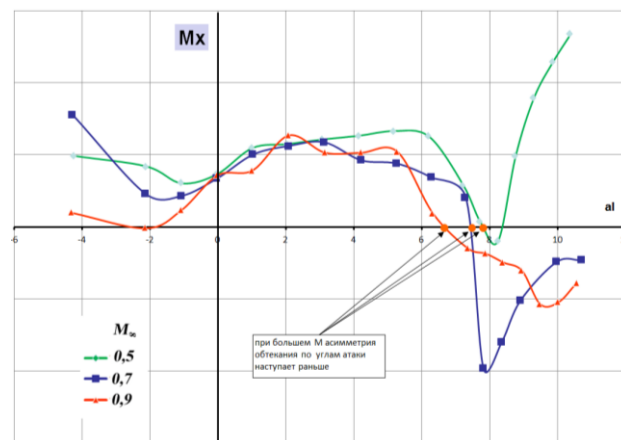


Рис. 6. Зависимости коэффициента момента тангажа m_x (α) при $M_\infty = 0.5, 0.7$ и 0.9 с соответствующими особенностями обтекания модели.

5. Заключение

В стандартных весовых испытаниях методами видеосъемки исследована сложная структура течения, возникающая при обтекании аэродинамической модели при дозвуковых и трансзвуковых скоростях. Результаты согласованного весового эксперимента и визуализация особенностей обтекания аэродинамической модели в промышленной АДТ Т-128 позволили получить физическую информацию о структуре течения (возникновение ударно-волновой структуры, отрывы потока, «тряску» крыла, деформацию консоли крыла, образование асимметричных вихрей) одновременно с

измерением аэродинамических сил и моментов на весах в стандартном темпе их проведения. Это в значительной мере расширяет информативность экспериментальных исследований, повышает их надежность и дает возможность проводить правильную интерпретацию получаемых результатов.

6. Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-01-00671 а).

7. Литература

- [1] Mosharov V.E., Orlov A.A., Radchenko V.N. Application of Correlation Analysis in Surface Flow Visualization with Oil Film // Proc. of SPIE /Ed. by Y.N. Dubnitshev, B.S. Rinkevichyus. Bellingham: SPIE, WA. 2006. V.6262. P. 62620B.
- [2] Kulesh V.P., Mosharov V.E., Orlov A.A., Ostroukhov S.P., Radchenko V.N. Application of Pressure Sensitive Paint for Determination of Aerodynamic Loads and Moments on Propeller Blade // Proc. Of SPIE / Ed. By Y.N. Dubnitshev, B.S. Rinkevichyus. Bellingham: SPIE, WA. 2006. V.6262. P.62620K.
- [3] Мошаров В.Е., Радченко В.Н. Измерение полей тепловых потоков в трубах кратковременного действия с помощью люминесцентных преобразователей температуры // Ученые записки ЦАГИ, 2007, Т. XXXVIII, №1-2, С.94-101.
- [4] Crowder J.P. Handbook of flow visualization. Tufts / Ed. by Wen Jei Yang. N.Y.: Taylor & Francis, 2001. P. 131.
- [5] Бражко В.Н. Способ визуализации линий тока на поверхности моделей в аэродинамических трубах // Труды ЦАГИ, вып. 1749, 1976.
- [6] Carlomango G.M., Cardone G., Meola C. Astarita T. Infrared Thermography as a Tool for Thermal Surface Flow Visualization // Journal of Visualization. V.1 No 1, 1998.
- [7] Горбушин А.Р., Фомин В.М., Шиповский Г.Н. Методы визуализации течений на поверхности моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах и примеры их приложения в промышленности // Труды восьмой международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков" (ОМИП – 2005). – М., 28 июня – 1 июля 2005.
- [8] Горбушин А.Р., Фомин В.М., Хозяенко Н.Н., Шиповский Г.Н., Чевагин А.Ф., Чернышева С.М. Методика совмещения физических исследований со стандартным весовым экспериментом в промышленных аэродинамических трубах // Труды девятой международной научно-технической конференции. Оптические методы исследования потоков (ОМИП – 2007). – М., 26-29 июня, 2007.
- [9] Горбушин А.Р., Фомин В.М., Хозяенко Н.Н., Шиповский Г.Н. Исследование аэродинамических эффектов при совмещении физических и весовых испытаний в промышленной АДТ ЦАГИ Т-128 // Труды десятой юбилейной международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков" (ОМИП – 2009). – М., 23-26 июня, 2009.
- [10] Fomin V.M., Gorbushin A.R., Khozyaenko N.N., Morozov A.N., Shipovsky G.N. // Flow visualization techniques used in TsAGI's industrial wind tunnels. PSFVIP-8: The 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. – М., August 21st-25th, 2011.

Об авторах

Горбушин Антон Роальдович, к.т.н., доцент Московского физико-технического института, начальник лаборатории Федерального государственного предприятия

«Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: gorbushin@tsagi.ru.

Глазков Сергей Александрович, к.т.н., начальник сектора Федерального государственного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: glazkov@tsagi.ru.

Кравцов Александр Никифорович, к.т.н., доцент по специальности «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов», доцент Московского авиационного института, начальник сектора Федерального государственного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: kravcov-an@rambler.ru.

Ступак Дмитрий Александрович, инженер Федерального государственного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: mr.strong.filipov@mail.ru.

Тенина Анастасия Владимировна, инженер Федерального государственного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: tenina.n@yandex.ru.

Фомин Владимир Михайлович, к.т.н., доцент Московского авиационного института, ведущий научный сотрудник Федерального государственного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: sergin55@mail.ru.

Хозяенко Николай Николаевич, начальник сектора Федерального государственного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского». E-mail: hozko@rambler.ru.

О толщине фронта ударной волны при визуализации цифровыми методами

И.А.Знаменская¹, И.Э.Иванов¹

znamen@phys.msu.ru

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Цель данной работы – провести анализ возможностей измерения толщины фронта ударной волны 1) при ее экспериментальной визуализации в газодинамическом потоке различными оптическими методами и 2) при численном моделировании разрывных течений газа. Приведены результаты цифровой регистрации фронта ударной волны, движущейся со скоростью до чисел Маха $M=4,5$ на основе теневых методов с различной экспозицией; при использовании теневого фонового метода, интерферометрии, трассерной цифровой визуализации (PIV). Показано, что и в эксперименте, и в численных расчетах измеряемая толщина фронта ударной волны определяется совокупностью параметров течения, в том числе, скоростью движения ударной волны (относительно сетки или относительно регистратора), вязкостью среды (физической или схемной). На результаты экспериментальных измерений влияет время экспозиции, угол наблюдения.

Ключевые слова: ударная волна, плотность, поток, визуализация, вязкость.

On the visible thickness of the shock wave at digital imaging

I. A. Znamenskaya¹, I. E. Ivanov¹

znamen@phys.msu.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The purpose of this work is: to analyze the possibilities of the shock wave front thickness measuring 1) in experimental flow visualization of the gas dynamic flow using various optical methods and 2) in the numerical simulation of supersonic gas flow. The results of the moving shock wave with Mach number up to $M=4,5$ digital recording are presented. Images were recorded on the base of shadow methods with different time exposures; using BOS (background oriented schlieren), interferometry, Particle Image Velocimetry (PIV). It is shown that both in the experiment and in numerical calculations, the measured thickness of the shock wave front is determined by a set of flow parameters, including the shock wave velocity (relative to the grid or relative to the recorder); the medium viscosity (physical or schematic). The results of experimental measurements are influenced by exposure time, watching angle.

Keywords: shock wave, density, flow, visualization, viscosity.

1. Введение

Ударная волна в газовой среде представляет собой поверхность разрыва, которая движется внутри среды со скоростью, превышающей скорость звука. При этом давление, плотность, температура, скорость, энтальпия испытывают скачок. Величина скачка описывается соотношениями Ранкина – Гюгонио. В реальном газе фронт ударной волны имеет конечную толщину, определяемую рядом факторов. В частности, она зависит от плотности, давления скорости ударной волны, вязкости газа. Принято оценивать толщину фронта как величину порядка нескольких длин свободного пробега молекул (от 2 до 10). При этом, несмотря на наноразмерные параметры фронта, считать ударную волну “нанообъектом” никак нельзя, т.к. ее протяженность теоретически может быть бесконечна, а реально - в сотни и тысячи раз превышает толщину фронта. Такой объект движется мимо регистратора со сверхзвуковой скоростью. Ударная волна может рассматриваться как очень тонкий пограничный слой с большим потоковым градиентом скорости du/dx . Это накладывает определенные условия на методы регистрации изображения фронта ударной волны и ее визуализации при численном моделировании [1, 3, 7, 8, 9].

Методы визуализации, позволяющие зарегистрировать ударную волну, используют физические явления рефракции, рассеяния, поглощения, интерференции, люминесценции, ионизации.

Теневым методом и его разновидности (прямой теневой метод, шлирен метод, теневой фоновый метод, цветной теневой метод, а также интерферометрические методы) – основаны на рефракции. Рефракция – света это изменение направления световых лучей в среде с изменяющимся в

пространстве показателем преломления n . Явление рефракции позволяет визуализировать оптические неоднородности в твердых, жидких и газовых средах используя электромагнитное излучение различных длин волн.

При визуализации поля течения газа теневым методом изменение освещенности пропорционально степени изменения градиента плотности газа. Особые проблемы возникают при использовании явления рефракции для визуализации больших градиентов показателя преломления, в частности, на границах раздела сред, контактных поверхностях, ударных, взрывных волнах.

В данной работе рассмотрены некоторые методы и результаты визуализации ударных волн на основе рефракции, интерференции, трассирования (рассеяние) а также при численном моделировании течений с разрывами и возможности разрешения ширины фронта.

2. Регистрация изображений оптическими методами.

При наличии в потоке ударных волн, контактных разрывов - происходят отклонения луча на поверхности разрыва. Теневое изображение ударной волны представляет собой темную полосу со стороны набегающего потока, сменяющуюся яркой светлой полосой, интенсивность которой постепенно уменьшается.

Оптический показатель преломления среды n связан с локальной плотностью среды формулой Лоренц-Лорентца, которая для газов имеет вид:

$$\frac{n-1}{\rho} = k$$

где k -постоянная величина, для воздуха равная $0,22635 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$

При просвечивании области течения с переменной плотностью луч, распространяющийся параллельно оси z и проходящий через неоднородность, отклоняется от первоначального направления распространения на угол альфа

$$\alpha \cong \int_0^L \frac{\partial}{\partial x} \ln n(x, y, z) dz$$

На фронте плоской ударной волны с числом Маха $M=2$ в воздухе давлением 75 торр. плотность газа скачком увеличивается примерно в 2,6 раз. При этом величина показателя преломления газа n увеличивается во столько же раз, до $7,8 \cdot 10^{-5}$. Ширина фронта УВ при данных условиях имеет порядок 10^{-5} см, градиент показателя преломления газа в направлении, перпендикулярном ее плоскости, имеет величину порядка 10^{-2} см^{-1} . Размер, соответствующий ширине фронта ударной волны, соответствует элементу изображения меньше одного пикселя.

При использовании монохроматических когерентных источников (лазеров) имеет место эффект дифракции света параллельно к плоскости её фронта или под малым углом; либо регистрация осуществляется вне границ применимости теневого методов.

На рисунке 1 приведено распределение интенсивности света на фронте ударной волны, полученное с помощью высокоскоростной съемки, соответствующее ему изменение интенсивности и плотности газа вдоль фронта. Для зондирования потока использовался белый источник света. Экспозиция кадра около 1 микросекунды.

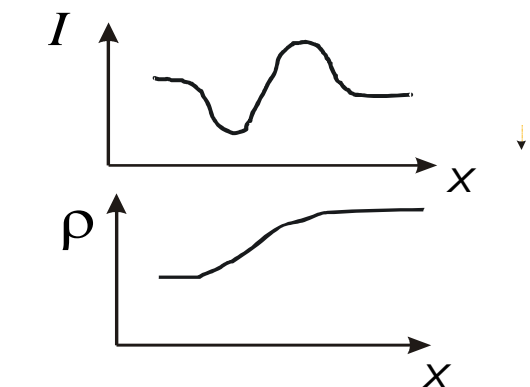
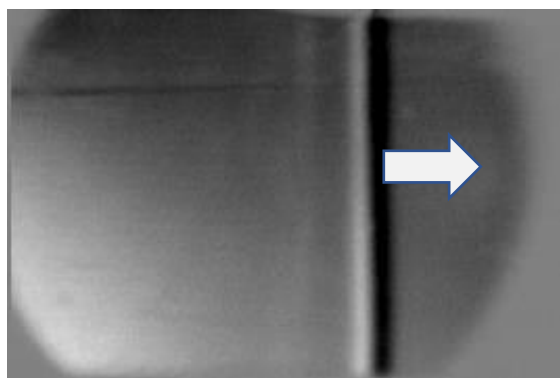


Рис. 1. Теневое изображение ударной волны в канале

При использовании монохроматических когерентных источников (лазеров) имеет место эффект дифракции света на фронте ударной волны. Это связано с тем, что длина волны света имеет тот же порядок, что и толщина фронта ударной волны. Изображение ударной волны, полученное с лазерным источником света с длиной волны 532 нм

приведено на рис 2. Видна широкая центральная темная полоса и несколько полос параллельных убывающей интенсивности.

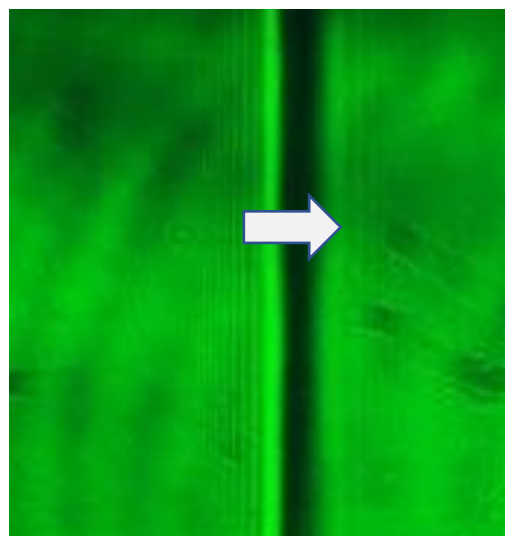


Рис. 2. Изображение ударной волны при зондировании монохроматическим источником

На 3 приведены результаты съемки и кросс-корреляционной обработки фронта ударной волны $M=2,2$ теньвым фоновым методом. Было показано [3,4], что при углах наблюдения менее 4° метод становится практически неприменим для регистрации плоского фронта ударной волны.

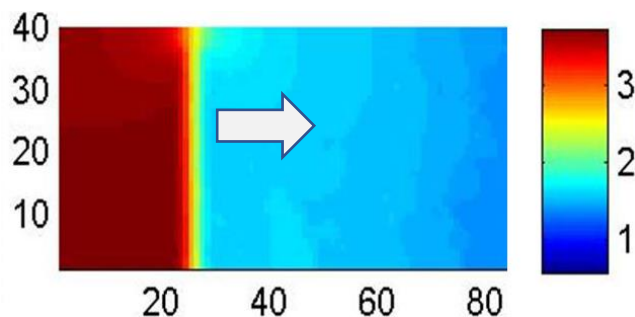


Рис. 3. Изображение плоской ударной волны при регистрации теньвым фоновым методом.

При анализе интерферограмм большую сложность представляет определение изменения плотности при переходе через поверхность разрыва, особенно для плоских течений. На толщине ударной волны трудно или же невозможно установить соответствие полос на интерферограммах при переходе через ударную волну при съемке с монохроматическим источником света. Для решения этой проблемы существуют специальные методы интерферометрических измерений. На рисунке 4 приведена интерферограмма плоской ударной волны, полученная с помощью интерферометра Маха – Цендера.

На рисунке 5 приведено изображение фронта ударной волны, выходящей из канала ударной трубы, полученное методом анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry - PIV) и поля скоростей за ней. Приведен профиль распределения скорости потока вдоль оси симметрии течения в области ударной волны. Описание эксперимента приведено в работе [6]. Толщина фронта, зарегистрированная этим методом на основании регистрации скачка скорости газа, может составлять 2-4 мм.

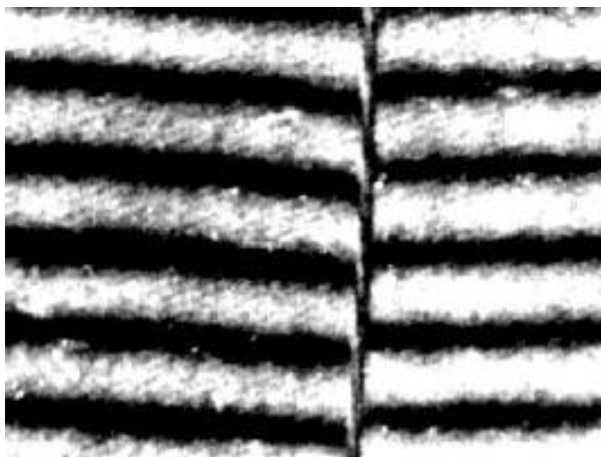


Рис. 4. Интерферограмма плоской ударной волны.

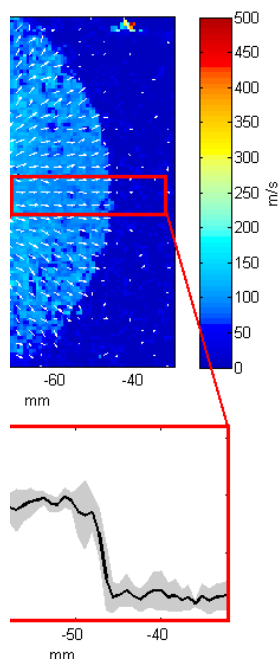


Рис. 5. PIV изображение и профиль ударной волны.

3. Регистрация ударных волн при изменении скорости движения.

При движении ударной волны толщина фронта при постоянной экспозиции существенно зависит от скорости волны. На рисунке 6 приведены 4 последовательных теневых изображения плоской ударной волны до и после явления распада разрыва на границе газ-плазма при инициировании наносекундного разряда в канале [5]. Съемка велась высокоскоростной камерой, интервал между кадрами 4 мкс, экспозиция около 1 мкс. После импульсного объемного разряда плоская исходная волна S_0 , двигавшаяся с числом Маха 4.4 распадается на 3 плоских разрыва: две ударные волны и контактную поверхность. Налево навстречу потоку движется ударная волна с нулевой скоростью относительно регистратора. Она имеет минимальную толщину менее 1 мм, исходная волна имеет толщину в 5-6 раз больше. Движущаяся направо волна имеет скорость в 2 раза меньше, чем исходная и соответствующую толщину на изображении.

Проведены цифровая обработка изображений и измерения толщины фронта в зависимости от положения фронта ударной волны при постоянной экспозиции. По полученным данным проведена оценка скорости разрывов на основе измерения относительной ширины фронта.

4. Численное моделирование.

В численных расчетах толщина фронта УВ определяется схемной (численной) вязкостью, которая зависит от размера расчетных ячеек в направлении перпендикулярном фронту УВ, от параметров разностной схемы (порядка аппроксимации) и некоторых других факторов (скорость движения УВ относительно сетки) [2].

Как правило, при старте расчета от разрывных начальных данных на нескольких временных шагах формируется характерная S – образная структура фронта ударной волны, которая остается примерно одинаковой при распространении волны по равномерной сетке.

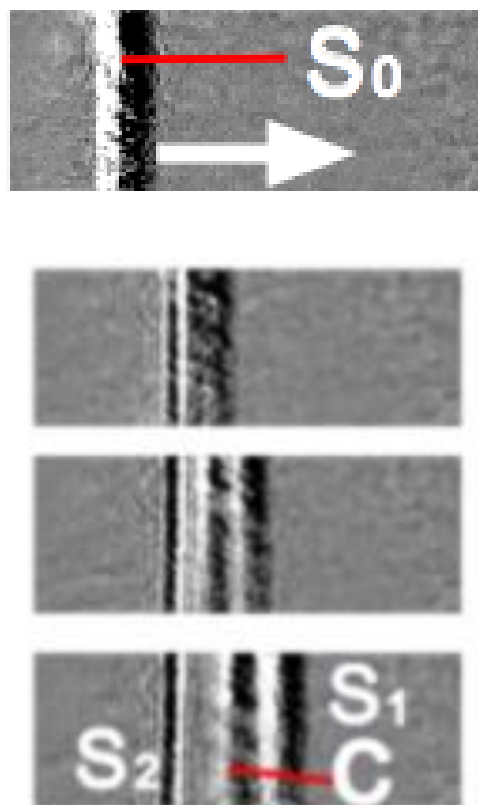


Рис. 6. Связь ширины фронта ударной волны с ее скоростью при явлении распада разрыва.

Для современных схем второго и более порядка точности толщина фронта составляет 3-5 расчетных ячеек для фронтов движущихся ударных волн и 1-2 ячейки для фронтов стационарных волн.

Если размер ячейки расчетной сетки в направлении перпендикулярном фронту ударной волны станет соизмерим с длиной свободного пробега молекул среды при условиях как перед фронтом, так и после фронта, то в численном расчете с помощью решения уравнений Навье-Стокса воспроизводится с некоторыми погрешностями структура фронта ударной волны с числами Маха меньше 4. Для больших чисел Маха погрешности существенно возрастают в силу необходимости учета физических процессов.

На рисунках 7 - 9 приведены изображения фронта плоской ударной волны при движении по невозмущенному газу при численном моделировании ее движения в канале. Приведены три различных типа представления фронта ударной волны, визуализирующие градиенты соответствующих параметров в области разрыва.

5. Заключение

Проведен анализ толщины фронта ударной волны при экспериментальной визуализации в потоке различными оптическими методами и при численном моделировании сверхзвуковых течений. Приведены изображения ударной волны, полученные на основе теневых методов с различной экспозицией, с использованием теневого фонового метода, интерферометрии, трассерной цифровой визуализации (PIV).

Показана аналогия экспериментальной и численной визуализации фронта ударной волны; если размер ячейки расчетной сетки соизмерим с длиной свободного пробега молекул среды то в численном расчете структура фронта воспроизводится с некоторыми погрешностями; на измеренное значение толщины фронта влияет длина волны зондирующего монохроматического зондирующего излучения; толщина фронта УВ определяется, в том числе, скоростью движения УВ (относительно сетки или относительно регистратора), вязкостью среды (физической или схемной).

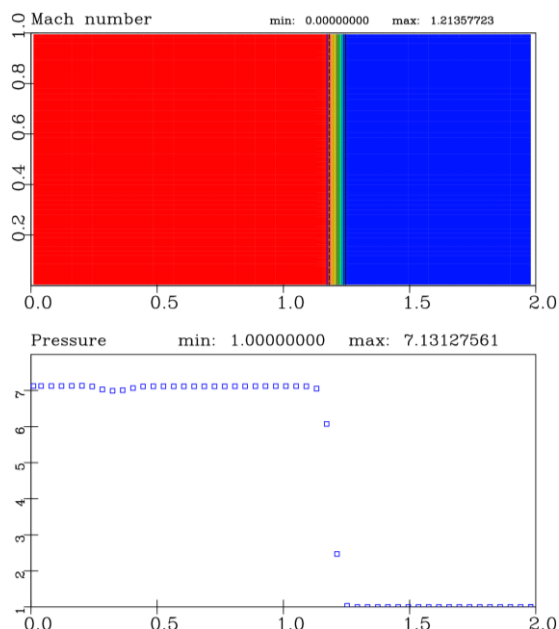


Рис. 7. Изменение числа Маха и давления на фронте ударной волны

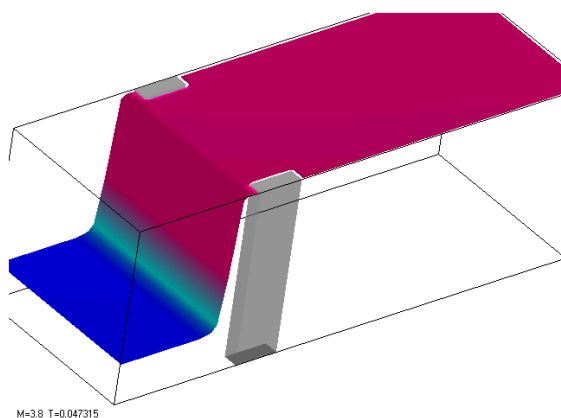


Рис. 8. Изменение плотности на фронте ударной волны в 3D представлении

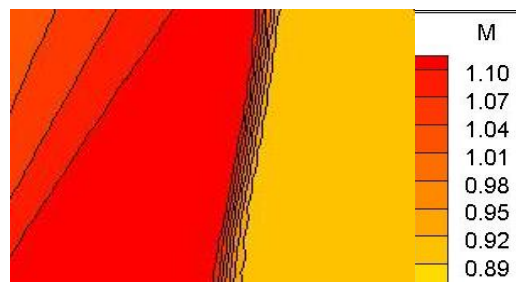


Рис. 9. Изменение числа Маха на фронте ударной волны

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант 18-19-00672)

7. Литература

- [1] Ван Дайк. Альбом течений жидкости и газа // М.: Мир, 1986. VanDyke. An Album of Fluid Motion // Parabolic Press. 1982.
- [2] Волков К.Н., Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике. Издательство: ФИЗМАТЛИТ 2017.
- [3] Знаменская И. А., Коротева Е. Ю., Глазырин Ф. Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки // Научная визуализация. — 2018. — Т. 10, № 4. — С. 100–108.
- [4] Глазырин Ф.Н., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В. и др. Исследования ударно-волнового течения в канале теневым и теневым фоновым методами // Автометрия. 2012. Т.48. №3. С.101–110.
- [5] Doroschenko. Igor, Znamenskaya. Irina, Koroteev. Dmitry, Kuli.-zade. Tahir. When shock is shocked: Riemann problem dynamics at pulse ionization of a shock wave // Physics of Fluids. — 2017. — Vol. 29, no. 10.
- [6] Glazyrin F. N., Mursenkova I. V., Znamenskaya I. A. PIV tracer behavior on propagating shock fronts // Measurement Science and Technology. — 2016. — Vol. 27, no. 1. — P. 1–10.
- [7] Hargather J., Settles S. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques // Meas. Sci. Technol 2017. V. 28. N. 4.
- [8] Havermann M., Haertig J., Rey C., et al. PIV Measurements in Shock Tunnels and Shock Tubes // Particle Image Velocimetry. 2008. V. 112. P. 429-443.
- [9] Kleine H. Filming the invisible—time-resolved visualization of compressible flows // Eur. Phys. J. Spec. Top. 2010. V.182, Is. 1, P. 3–34.

Об авторах

Знаменская Ирина Александровна, д.ф.-м.н., профессор кафедры молекулярной физики и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета. e-mail: znamen@phys.msu.ru

Иванов Игорь Эдуардович, к.ф.-м.н., доцент кафедры молекулярной физики и экстремальных состояний вещества физического факультета Московского государственного университета. e-mail: ivanovmai@gmail.ru

Преобразование инфракрасных изображений в видимый диапазон для визуализации на индикаторе пилота

В.В. Князь^{1,2}, М.И. Козырев^{1,3}, А.Н. Бордодымов¹
vl.kniaz@gosniias.ru | j18r11@gmail.com | bordodymov@gmail.com

¹ФГУП «ГосНИИАС», 125319, Москва, ул. Викторенко, 7;

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, Россия;

³Московский Государственный Технический Университет Имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия;

Камеры дальнего инфракрасного диапазона позволяют повысить ситуационную осведомлённость экипажа в условиях ограниченной видимости и в ночное время. Подобные камеры устанавливаются на современные гражданские самолёты в составе системы улучшенного видения. При этом интерпретация тепловизионного изображения экипажем для верной оценки текущей ситуации требует определённого опыта в силу того, что вид сцены в инфракрасном диапазоне сильно отличается от видимого диапазона и подвержен изменениям при смене времени суток и времён года. В данной работе рассматривается глубокая генеративно-сопоставительная нейронная сеть для автоматического преобразования тепловизионных изображений в семантически подобные цветные изображения видимого диапазона.

Ключевые слова: визуализация, глубокие свёрточные нейронные сети, индикатор пилота, визуальная аналитика.

Thermal-to-color image translation for visualization on the pilot's display

V.V. Kniaz^{1,2}, M.I. Kozyrev^{1,3}, A.N. Bordodymov¹
vl.kniaz@gosniias.ru | j18r11@gmail.com | bordodymov@gmail.com

¹State Res. Institute of Aviation Systems (GosNIAS), 125319, 7, Victorenko str., Moscow, Russia;

²Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT), Russia;

³Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

Long range infrared cameras may provide increasing crew situational awareness in limited vision and night conditions. Similar cameras are installed in modern civil aircrafts as part of an improved vision system. Correct thermal image interpretation by the crew requires certain experience, due to the fact that view of the scene very different from the visible range and may change within time of day and season. This paper discusses the deep generative-adversary neural network to automatically convert thermal images to semantically similar color images of the visible range.

Keywords: visualization, deep convolutional neural networks, pilot primary display, visual analytics.

1. Введение

Повышение ситуационной осведомлённости экипажа является залогом обеспечения безопасности полёта. В настоящее время в состав бортового оборудования многих гражданских самолётов входят системы улучшенного видения. Данная система включает датчик инфракрасного диапазона, который производит обзор кабиной обстановки в передней полусфере, и вычислитель который принимает видеосигнал и выводит его на индикатор пилота. Тепловизионный инфракрасный датчик обеспечивает отображение видимых объектов и рельефа местности в условиях низкой освещённости и затруднённой видимости.

К числу недостатков системы улучшенного видения с инфракрасным датчиком можно отнести сложности при интерпретации тепловизионного изображения. В силу того, что тепловое излучение объектов в разную погоду может быть различным, то их вид на кадре системы улучшенного видения может сильно варьироваться от времени года и времени суток. Например, взлётно-посадочная полоса может быть светлой на тёмном фоне в солнечный день и тёмной на светлом во время дождя. Для облегчения задачи обнаружения пилотом визуальных ориентиров представляется целе-

сообразным предварительная обработка кадра системы улучшенного видения для преобразования изображения инфракрасного диапазона в видимый диапазон.

В данной работе рассматривается метод преобразования монохромных тепловизионных изображений в цветные изображения видимого диапазона. Метод использует модифицированный вариант генеративно-сопоставительной сети ColorMatchGAN. Представлена архитектура сети. Для обучения и тестирования сети собрана обучающая выборка с помощью квадрокоптера DJI Mavic PRO, оснащённого камерами видимого и дальнего инфракрасного диапазона. Представлена методика полуавтоматического геометрического совмещения кадров видимого и инфракрасного диапазонов. Модифицированная сеть ColorMatchGAN обучена на собранной выборке. Тестирование производилось на независимой выборке объёмом в 400 кадров

2. Анализ работ в данной области

Системы повышения ситуационной осведомлённости на основе машинного зрения получили широкое распространение в течение последнего десятилетия [2, 11]. Наиболее широкое распространение получили системы на основе инфракрасных датчиков дальнего ин-

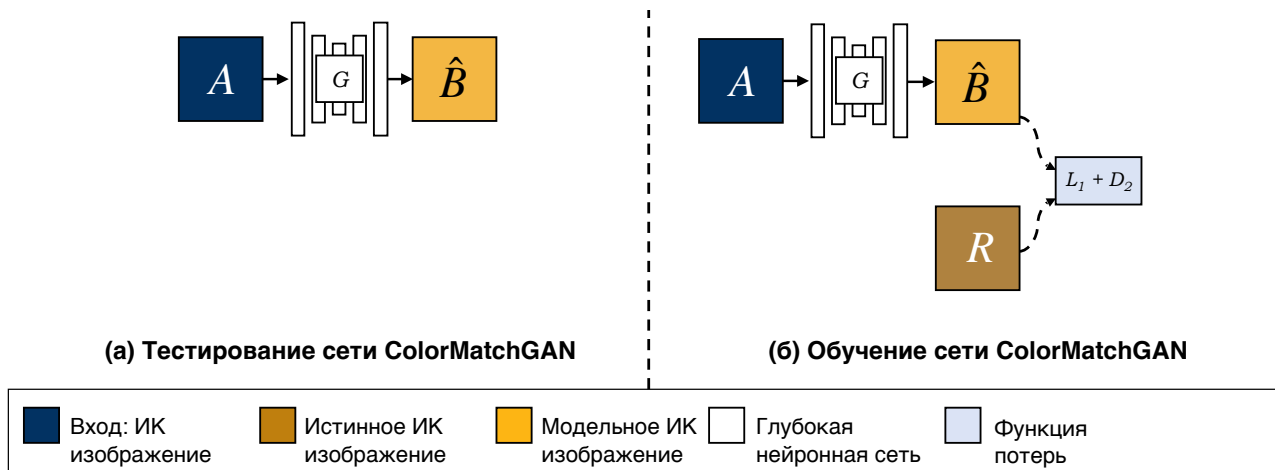


Рис. 1. Архитектура сети ColorMatchGAN.

фрактального диапазона (8-14 мкм), которые производят обзор каabinной обстановки в направлении движения воздушного судна [2, 11]. Такие системы принято называть системами улучшенного зрения (СУВ). Основными критериями качества систем улучшенного зрения является дальность обнаружения взлётно-посадочной полосы и препятствий на её поверхности или в воздухе. Для повышения дальности обнаружения объектов предложены разнообразные алгоритмы повышения качества изображения [7].

Несмотря на существенное повышение ситуационной осведомлённости, обеспечиваемое современными системами улучшенного зрения, интерпретация тепловизионных изображений может вызывать у экипажа значительные сложности. Целесообразной является предобработка тепловизионного изображения, производящая предсказание цветов объектового состава и фона для облегчения интерпретации наблюдаемой сцены. В течение последних пяти лет активно развиваются нейросетевые методы обработки изображений на основе генеративно-сопоставительных нейронных сетей [3, 4]. Основная идея генеративно-сопоставительного подхода заключается в обучении двух соревнующихся сетей: генератора G и дискриминатора D . Цель генератора выучить заданное распределение изображений $B \subset \mathbb{R}^{W \times H \times C}$ и научиться воспроизводить его на основе вектора шума z или входного изображения A . Целью дискриминатора является бинарная классификация входного изображения на классы: «реальное» и «модельное». «Реальные» изображения $B \in \mathcal{B}$ принадлежат пространству выходных изображения. «Модельные» изображения \hat{B} являются результатом работы сети генератора G . Сопоставительная функция потерь накладывает на сеть генератор штраф, в случае, если сеть дискриминатор производит верную классификацию изображений \hat{B} классом «модельное». Таким образом, сеть генератор пытается строить максимально правдоподобные изображения \hat{B} , чтобы запутать сеть дискриминатор.

В последние годы был предложен ряд работ по преобразованию спектрального диапазона изображений на основе генеративно-сопоставительных нейросетей [1, 5, 10]. В данной работе рассматривается модификация архитектуры ColorMatchGAN [5], предназначенной для предсказания цветных изображений по тепловизионным изображениям.

3. Метод преобразования инфракрасных изображений в видимый диапазон

Целью рассматриваемого метода является отображение входного изображения $A \in \mathbb{R}^{W \times H}$ дальнего инфракрасного диапазона в цветное изображение видимого диапазона $B \in \mathbb{R}^{W \times H \times 3}$. Требуемое отображение $G : A \rightarrow \hat{B}$ реализуется с помощью модифицированной сети генератора на основе архитектуры ColorMatchGAN [5]. В данном разделе рассмотрены условные генеративно-сопоставительные нейронные сети, лежащие в основе разрабатываемого метода, представлена модифицированная архитектура сети и методика подготовки обучающей выборки.

Архитектура сети

Генеративно-сопоставительные сети используют [3] сопоставительную функцию потерь для снижения вероятности переобучения сети. Генеративно-сопоставительные сети создают изображение \hat{B} для заданного вектора случайного шума z , $G : z \rightarrow \hat{B}$ [3, 4]. Условные генеративно-сопоставительные сети получают дополнительную информацию A в дополнение к вектору z , $G : \{A, z\} \rightarrow \hat{B}$. Обычно, A – это изображение, которое трансформируется генеративной моделью G . Дискриминативная модель тренирована для того чтобы различать «реальные» изображения из целевого домена B от «модельных» \hat{B} , созданных генератором. Каждая модель тренируется одновременно. Дискриминативная модель создает сопоставительную потерю, которая заставляет генератор производить «модельные» \hat{B} изображения, которые не отличить от «реальных» B .

Архитектура сети ColorMatchGAN [5] включает генератор U-Net [8] и дискриминаторе PatchGAN [4]. Архитектура сети ColorMatchGAN представлена на рисунке 1.

Построение обучающей выборки

Для обучения модифицированной архитектуры сети использовалась обучающая выборка LAERT [6]. Данная выборка собрана с помощью квадрокоптера DJI Mavic PRO, оснащённого встроенной камерой видимого диапазона, и дополнительной камерой дальнего инфракрасного диапазона (8-14 мкм) MH-SM576-6 с разрешением 640×480 пиксел. Общий вид квадрокоптера приведён на рисунке 2.



Рис. 2. Вид квадрокоптера Mavic PRO с камерами видимого и инфракрасного диапазона.

В силу того, что камера видимого диапазона закреплена на гиросtabilизированном подвесе, а тепловизионная камера жёстко соединена с корпусом, между цветными и тепловизионными изображениями присутствует динамическое расхождение. Для устранения геометрического расхождения разработана методика полуавтоматического совмещения изображений двух диапазонов.

Методика совмещения изображений двух диапазонов основана на использовании матрицы гомографии.

$$H = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

Пусть (x_v, y_v) – точка на изображении видимого диапазона и (x_t, y_t) – точка на тепловизионном изображении, в том же физическом месте. Тогда гомография H связывает их следующим образом

$$H = \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix}$$

Если параметры матрицы гомографии известны, то можно найти переход от заданной точки на снимке в видимом диапазоне (x_v, y_v) к соответствующей точке (x_t, y_t) на изображении инфракрасного диапазона. Для расчёта матрицы гомографии необходимо знать,

как минимум, четыре соответствующие точки на двух изображениях.

Очевидно, что процесс автоматической расстановки пар точек на всех кадрах видеопоследовательности трудоёмкий процесс. Для автоматизации задачи предлагается использовать прослеживание точек между кадрами с помощью кросс-корреляции. Четыре соответствующие точки расставляются на первом кадре видеопоследовательности и прослеживаются до того момента, пока они видны в поле зрения камеры. Координаты (x_v^i, y_v^i) , (x_t^i, y_t^i) каждой точки, на каждом кадре i , заносятся в массив. После этого для каждого элемента полученного массива производится преобразование кадра видимого диапазона к кадру инфракрасного диапазона.

Предложенная методика была реализована в виде сценария на языке Python. Для прослеживания соответствующих точек использовалось API пакета трёхмерного моделирования Blender. Примеры из обучающей выборки приведены на рисунке 3.

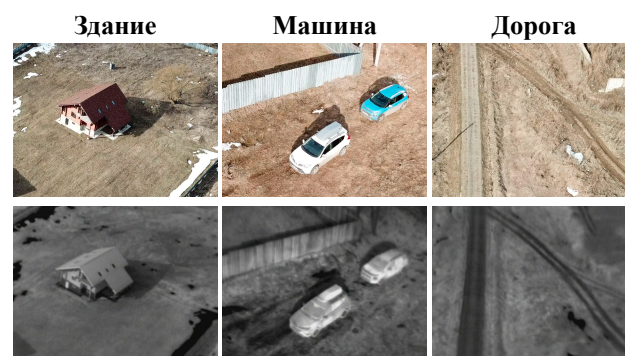


Рис. 3. Примеры из обучающей выборки LAERT.

4. Экспериментальное тестирование метода

ColorMatchGAN обучался на независимом тестовом разделе обучающей выборки LAERT, с использованием библиотеки PyTorch. При обучении использовался графический процессор NVIDIA 1080 Ti. Процесс обучения занял 76 часов для генератора G и дискриминатора D . Для оптимизации сети использовался алгоритм градиентного спуска Adam с начальной скоростью обучения 0.0002 и параметрами моментов $\beta_1 = 0.5$, $\beta_2 = 0.999$, аналогично работе [4].

Результаты экспериментального тестирования сети приведены на рисунке 4. Качественное сравнение результатов показывает, что сеть ColorMatchGAN обеспечивает прирост качества предсказываемых цветных изображений. Количественное тестирование по метрике LPIPS [9] показывает, что расстояние между истинными цветными изображениями и предсказанием ColorMatchGAN меньше аналогичного расстояния для изображений, предсказанных нейросетью pix2pix на 20%.

5. Заключение

Рассмотрен метод преобразования изображений дальнего инфракрасного диапазона в цветные изображения видимого диапазона. Предложенный метод основан на генеративно-сопоставительных нейронных сетях. Разработана и реализована в виде сценария на языке Python для библиотеки PyTorch модификация архитектуры сети ColorMatchGAN. Предложенная модификация состоит в переходе в цветовое пространство Lab для повышения равномерной сходимости процесса обучения. Произведена обработка многоспектральной обучающей выборки LAERT для синхронизации и геометрического совмещения кадров видимого и инфракрасного диапазона. Сформированы обучающая выборка, объёмом 4000 кадров и независимая тестовая выборка объёмом 400 кадров.

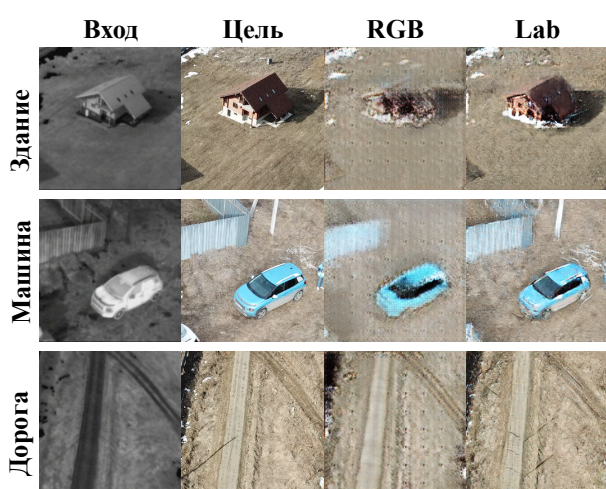


Рис. 4. Результаты экспериментального тестирования сети.

Произведено обучение нейросети ColorMatchGAN и сети аналога pix2pix. Тестирование обученных сетей показало превосходство предложенной сети ColorMatchGAN в части реалистичности и интерпретируемости синтезируемых изображений. Анализ работы предложенного метода на видеопоследовательностях подтверждает работоспособность предложенного подхода.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 17-29-04410.

7. Литература

[1] Berg Amanda, Ahlberg Jorgen, Felsberg Michael. Generating Visible Spectrum Images From Thermal Infrared // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops. — 2018. — June.

- [2] Arthur Jarvis J., Norman R. Michael, Kramer Lynda J. et al. Enhanced vision flight deck technology for commercial aircraft low-visibility surface operations. — 2013. — Access mode: <https://doi.org/10.1117/12.2016386>.
- [3] Generative adversarial nets / Ian Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza et al. // Advances in neural information processing systems. — 2014. — P. 2672–2680.
- [4] Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks / Phillip Isola, Jun-Yan Zhu, Tinghui Zhou, Alexei A Efros // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — IEEE, 2017. — P. 5967–5976.
- [5] Knyaz V. V., Bordodymov A. N. LONG WAVE INFRARED IMAGE COLORIZATION FOR PERSON RE-IDENTIFICATION // ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2019. — Vol. XLII-2/W12. — P. 111–116. — Access mode: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W12/111/2019/>.
- [6] Knyaz Vladimir. Multimodal data fusion for object recognition. — Vol. 110590. — 2019. — P. 110590P. — Access mode: <https://doi.org/10.1117/12.2526067>.
- [7] Petro Ana Belén, Sbert Catalina, Morel Jean-Michel. Multiscale retinex // Image Processing On Line. — 2014. — P. 71–88.
- [8] Ronneberger Olaf, Fischer Philipp, Brox Thomas. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention / Springer. — 2015. — P. 234–241.
- [9] The Unreasonable Effectiveness of Deep Features as a Perceptual Metric / Richard Zhang, Phillip Isola, Alexei A Efros et al. // The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2018. — Jun.
- [10] ThermalGAN: Multimodal Color-to-Thermal Image Translation for Person Re-Identification in Multispectral Dataset / Vladimir V. Knyaz, Vladimir A. Knyaz, Jiří Hladůvka et al. // Computer Vision – ECCV 2018 Workshops. — Springer International Publishing, 2018.
- [11] Vygolov Oleg, Zheltov Sergey. Enhanced, synthetic and combined vision technologies for civil aviation // Computer Vision in Control Systems-2. — Springer, 2015. — P. 201–230.

Об авторах

Князь Владимир Владимирович, начальник группы ГосНИИАС, аспирант ГосНИИАС. Его e-mail vl.knyaz@gosniias.ru.

Козырев Марк Игоревич, техник ГосНИИАС. Его e-mail J18r1L@gmail.com.

Бордодымов Артём Николаевич, инженер ГосНИИАС. Его e-mail bordodymov@gmail.com.

Анализ и визуализация многомерных данных в глобально распределенных облачных мониторинговых системах

К.Н. Кучерова¹, С.В. Мещеряков¹, Д.А. Шемелинин¹

kristina.mylife@gmail.com|serg-phd@mail.ru|dshchmel@gmail.com

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Качественное оказание информационных ИТ услуг, предоставляемых во всех регионах мира через глобальную сеть Интернет, предполагает применение современных глобально распределенных облачных ИТ технологий с большими потоками многомерных данных и поэтому является актуальной проблемой. В данной статье кратко описаны методы анализа и визуализации многомерных данных мониторинга, основанных на ключевых критериях производительности облачной ИТ системы, на примере конкретной глобально распределенной инфраструктуры международной ИТ компании. Внедрение предложенных методов визуальной аналитики в ведущих мировых ИТ компаниях – RingCentral (США) и Zabbix (Латвия), – позволило повысить качество и доступность предоставляемых ИТ услуг до общемирового уровня 99,999% в режиме 24/7. Использование новых решений в ИТ компаниях подтверждено актами о внедрении и публикациями в диссертациях соавторов.

Ключевые слова: информационная система, глобально распределенная инфраструктура, многомерные данные, облачные вычисления, мониторинг событий, системный анализ, графическая визуализация.

Analysis and visualization of big data in globally distributed cloud computing monitoring systems

K.N. Kucherova¹, S.V. Mescheryakov¹, D.A. Shchemelinin¹

kristina.mylife@gmail.com|serg-phd@mail.ru|dshchmel@gmail.com

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Quality of IT Services (QoS), providing across all globally distributed regions via Internet, use modern cloud computing IT technologies having big data flow and, therefore, is actual. This paper briefly describes the methods of analysis and visualization of monitoring big data based on Key Performance Indicators (KPIs) of a cloud computing IT system using real world example of globally distributed infrastructure of the International IT Company. Implementation of proposed methods of visual analytics in worldwide leading IT companies – RingCentral (USA) and Zabbix (Latvia), – allowed improving of QoS and availability of IT services up to a worldwide level of 99.999% in 24/7 mode. Implementation of new solutions in IT companies is confirmed by corresponding documents and by publications in PhD and DSc thesis of the coauthors.

Keywords: information system, globally distributed computing infrastructure, big data, cloud computing, monitoring events, system analysis, graphics visualization.

1. Введение

Объектом исследования является международная ИТ компания RingCentral (RC), США [9], предоставляющая информационные услуги [1] во всех регионах мира (Северная Америка, Западная Европа, Юго-Восточная Азия) с использованием облачных технологий на основе построенного глобально распределенного вычислительного комплекса (ГРВК) [3].

Цель исследования состоит в повышении качества информационных услуг (Quality of Service, QoS) и доступности Интернет сервисов на основе внедрения методов визуализации и анализа ключевых показателей производительности (Key Performance Indicators, KPIs), таких как [2]:

1. Оценка качества соединения (Mean Opinion Score, MOS) [7], предоставленная системой Palladion [8].
2. Число успешно завершённых вызовов.
3. Число безуспешных запросов на соединение.
4. Число потерянных/оборванных соединений, и т.п.

2. Мониторинг информационной системы

Информационная система (ИС) мониторинга активности клиентов компании RC поддерживает более чем 350 тыс. юридических компаний в различных регионах мира, каждая из которых может обслуживать тысячи физических лиц. Большой поток данных с удаленных клиентов и серверов в единую централизованную ИС мониторинга составляет до

500 значений в секунду (Values per Second, VPS) для каждого сервера по каждой измеряемой метрике.

Поэтому в компании RC установлена система Zabbix [12] как одно из 5 наиболее популярных и эффективных мониторинговых решений в мире для контроля основных системных метрик:

- 1) доступность сетевых ресурсов;
- 2) загрузка процессора;
- 3) наличие свободной оперативной памяти;
- 4) наличие свободного места на внешних носителях;
- 5) возможность своевременного прогнозирования утечки системных ресурсов [5], и др.

Интервал времени опроса в зависимости от системной метрики составляет от 1 секунды и более с возможностью реагирования на возможные неполадки в реальном времени. Объем хранимых исторических данных мониторинга варьируется от 1 недели и более в зависимости от наличия ресурсов базы данных мониторинга и заранее определяется конфигурацией Zabbix, которая включает [4]:

- 1) общее количество серверов в системе мониторинга;
- 2) тип данных каждой измеряемой метрики;
- 3) интервал времени опроса по каждой измеряемой метрике;
- 4) наличие триггеров срабатывания в случае аномалии различного приоритета;
- 5) графики и диаграммы изменения исторических данных о производительности ИС в целом и тенденций поведения отдельных метрик.



Рис. 1. Визуализация мониторинговых данных ИС.

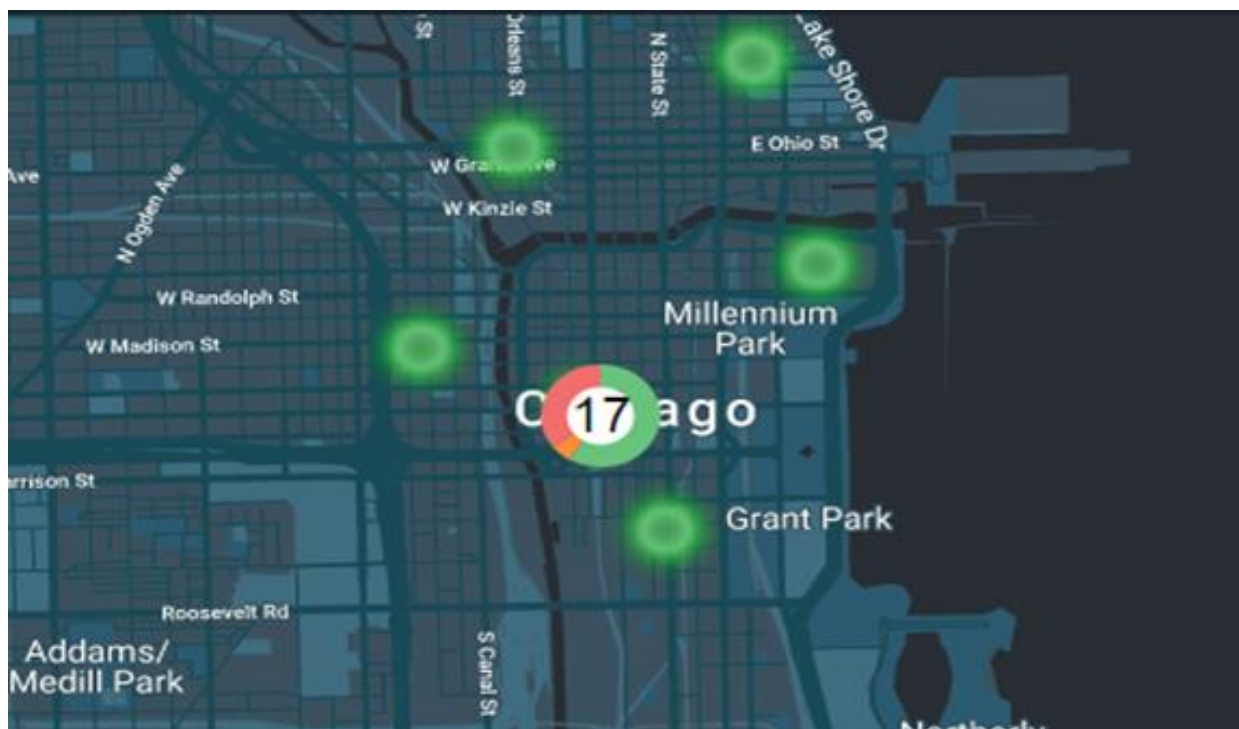


Рис. 2. Детализация мониторинговых данных ИС.

3. Визуализация мониторинговых данных ИС

Пример графического интерфейса визуализации мониторинговых событий ИС и QoS предоставляемых информационных услуг в ГРВК компании RC представлен на рис. 1.

С одной стороны, он свидетельствует о хорошей читабельности общего состояния ИС в целом, а с другой, о низкой степени детализации предоставляемых информационных сервисов и в этой связи плохой читабельности интерфейса как для оперативного дежурного, так и для системного аналитика.

На графическом интерфейсе рис. 1 выделены 5 основных рабочих областей:

1. График QoS соединений – содержит информацию об общем количестве активных запросов и количестве успешных вызовов за период времени с процентом умеренных и плохих соединений, а также сравнением с базовым значением MOS. KPI индикаторы зеленого цвета отображают соединения с высоким MOS. Если индикатор оранжевый или красный, это означает, что значение MOS хуже заданного.
2. Диаграмма качества звонков «Погодная карта» (Weather map) – представляет собой географическое распределение информации о качестве соединений на основе IP-адресов, взятых из мониторинговых данных от терминальных устройств пользователей. Чтобы увидеть качество соединений для конкретной географической области, в которой находится конечный пользователь, предусмотрена функциональность масштабирования (рис. 2), которая позволяет обслуживающему персоналу определять проблемы в каналах связи и в кратчайшие сроки уведомлять об обнаруженных аномалиях.
3. Графики процентов потери Интернет пакетов – эти две диаграммы визуализируют тенденции потери пакетов для восходящего и нисходящего тренда. В этом примере данные представлены за последние 24 часа, где каждый столбец – это процентное соотношение количества потерянных пакетов по сравнению с базовым уровнем для этого часа.
4. Агрегированные данные по 10 самым проблемным географическим зонам с возможностью фильтрации по 5 различным категориям KPI – Интернет провайдер, контроллер сетевой сессии, раздел данных клиентов, пользователь, его местоположение.
5. Исторические данные – представляют собой более детализированные диаграммы выбранной категории KPI.

4. Анализ мониторинговых данных ИС

Графический интерфейс оперативных данных мониторинга облачной инфраструктуры RC (рис. 1 и 2) обеспечивает визуализацию общего состояния всего ГРВК с возможностью быстрого реагирования обслуживающего персонала на аномальные события в ИС. Однако в процессе объективного роста числа Интернет пользователей RC и соответственно рабочей нагрузки на ИС, адекватное увеличение количества обслуживающего персонала и компьютерного оборудования диктует необходимость решения следующих новых задач:

- 1) улучшить QoS предоставляемых ИТ сервисов за счет сокращения времени отказов ИС;
- 2) повысить надежность средств мониторинга с точки зрения аналитики и визуализации причины и тенденции потенциального отказа ИС;
- 3) сократить время устранения неисправностей и автоматизировать процедуру восстановления ИТ сервисов без участия человека.

Для решения этих задач разработана технология мониторинга с использованием визуальной аналитики и прогнозирования событий в ГРВК на основе объективных исторических данных. Предложенная технология реализована программно-инструментальными средствами и внедрена в международной ИТ компании Zabbix (Рига, Латвия), которая в настоящее время входит в 5 наиболее популярных мониторинговых решений в мировой ИТ индустрии [6].

Предложенные математические модели прогнозирования основаны на 5 основных параметрических функциях, которые могут вычисляться в системе мониторинга в реальном режиме времени для каждого удаленного сервера по каждой измеряемой метрике:

- 1) линейная

$$f(t) = a + b t;$$
- 2) полиномиальная порядка n

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n;$$
- 3) экспоненциальная

$$f(t) = a \exp(b t);$$
- 4) логарифмическая

$$f(t) = a + b \log(t);$$
- 5) степенная

$$f(t) = a t^b.$$

Параметры n , a , b , a_0 , a_1 , a_2 , ..., a_n , прогностических моделей вычисляются мониторинговой системой Zabbix автоматически на основе исторически накопленных статистических данных классическими методами решения систем линейных алгебраических уравнений Гаусса-Джордана, Вейерштрасса (Джордан-Кернер), Ньютона, Гершгорина [10].

Критерием соответствия вычисленных прогностических результатов исторически реальным статистическим данным является традиционно общепринятый коэффициент корреляции (детерминации) $R^2 \rightarrow 1$ – это доля дисперсии случайной ошибки прогностической модели σ^2 относительно дисперсии статистической выборки данных σ_i^2 :

$$R^2 = 1 - \sigma^2 / \sigma_i^2;$$

$$0,9 < R^2 < 1.$$

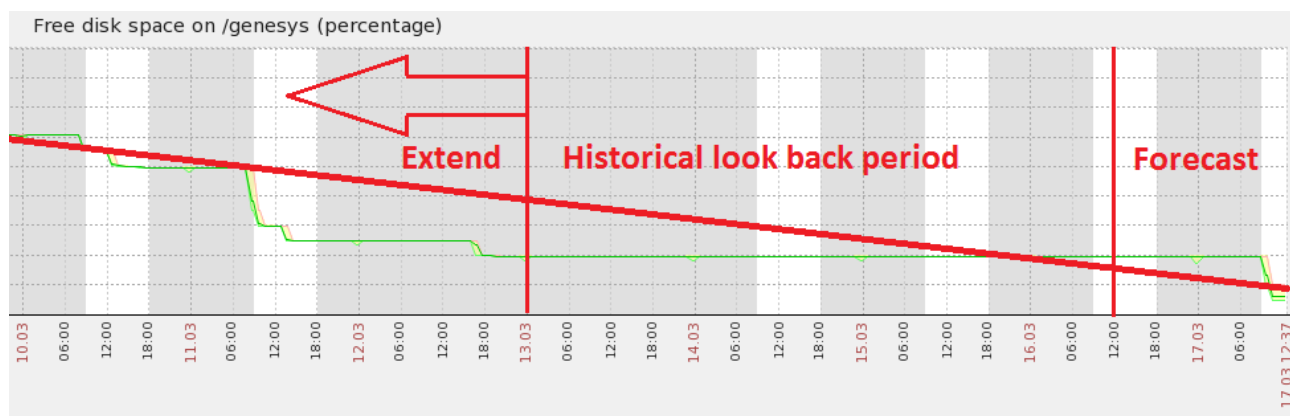


Рис. 3. Прогнозирование свободного места на диске.

В практической реализации мониторинговой системы Zabbix тип прогностической модели по каждой измеряемой метрике выбирается заранее и конфигурируется вручную исходя из визуального анализа исторических графиков. В дальнейшем в процессе эксплуатации коэффициент R^2 автоматически оценивается для различных наборов параметров выбранной модели и оптимизируется с использованием известных математических методов и моделей временных рядов Лагранжа, Фишера, Акаике [11]. Тип модели прогнозирования, так же как исторический интервал времени для анализа статистики и горизонт прогнозирования, можно поменять в любой момент времени в случае недостоверного прогноза.

По результатам прогнозирования в мониторинговой системе Zabbix предусмотрены триггеры, которые срабатывают и посылают уведомление заблаговременно в случае, если прогнозируемое значение метрики может выйти за пределы заданного порога в период установленного горизонта времени прогнозирования.

Графическая иллюстрация визуального аналитического подхода к прогнозированию показана на рис. 3 на примере мониторинга свободного места на диске с применением линейной математической модели. Важным условием достоверности прогноза является соблюдение правильных пропорций от 5:1 до 10:1 между интервалом времени исторической статистики и горизонтом прогнозирования как показано на рис. 3.

Дальнейшей задачей развития системы мониторинга удаленных серверов является разработка моделей прогнозирования для волнообразных циклических рабочих нагрузок, при которых перечисленные функции мало эффективны по причине многочисленных ложных срабатываний триггеров в системе мониторинга в начале и конце рабочего дня, в выходные и праздники [4].

5. Выводы

Предложенный подход к анализу и визуализации многомерных данных мониторинга глобально распределенной ИС реализован в международной IT компании RingCentral [9], что позволило, наряду с другими средствами автоматизации, улучшить QoS облачных сервисов и повысить уровень их доступности до лучших мировых показателей 99,999% в режиме обслуживания 24/7.

Традиционный подход к мониторингу многомерных данных ГРВК (сбор статистики с удаленных серверов с заданным интервалом времени опроса, сравнение полученных данных с заданным пороговым значением и уведомление в случае аномалии) дополнен новым решением, цель которого – прогнозирование событий в ИС на основе объективной исторической статистики. Для этого разработаны математические модели прогнозирования и внедрены в одной из ведущих в мире мониторинговых систем Zabbix [12].

Превентивное обнаружение аномалий в системе позволяет избежать отказов в сервисном обслуживании и выполнять мероприятия по их устранению в часы плановой профилактики, что особенно актуально для современных облачных технологий ГРВК.

Внедрение моделей прогнозирования в систему мониторинга также позволяет регламентировать рабочую нагрузку на ИС, получать уведомления о тенденции роста пользовательских запросов и масштабировать вычислительные ресурсы заблаговременно, а не во время пиковой нагрузки со стороны пользователей.

6. Литература

[1] Мещеряков С.В., Щемелинин Д.А. Методы визуализации и анализа больших данных в облачных

информационных системах // Труды 28-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению (Графикон). – Томск, ТПУ, 2018. – С. 151-154, <http://2018.graphicon.ru/>

- [2] Efimov V. Performance and Quality Evaluation of Cloud Information Services // Communications in Computer and Information Science. – Springer International Publishing Switzerland, 2016, V. 601. – P. 230-237, <http://www.springer.com/gp/book/9783319308425>
- [3] Efimov V.V., Yakovlev K.A. Integration and Continuous Service Delivery in Globally Distributed Computing System // Humanities and Science University Journal. – 2017. – №30. – С. 13-20, <http://uni-journal.ru/technics/archive/>
- [4] Kucherova K., Mescheryakov S., Shchemelinin D. Prediction Experience and New Model // The 7th Annual International IT Zabbix Conference, Riga, Latvia, 2017, http://www.zabbix.com/conf2017_agenda.php, <https://youtu.be/4TY4eIB7tiw>
- [5] Mescheryakov S., Shchemelinin D. Capacity Management of Java Based Business Applications Running on Virtualized Environment // The 39th International IT Conference on Computer Performance Evaluation and Management by Computer Measurement Group (CMG), La Jolla, CA, USA, 2013, <http://www.cmg.org/publications/conference-proceedings/conference-proceedings-2013/>
- [6] Mescheryakov S., Shchemelinin D. Proactive and Reactive Monitoring // The 4th Annual International IT Zabbix Conference, Riga, Latvia, 2014, http://www.zabbix.com/conf2014_agenda.php, <http://www.youtube.com/watch?v=PbUwr7tcikw>
- [7] Nadeem Unuth. Mean Opinion Score (MOS): A Measure of Voice Quality, <https://www.lifewire.com/measure-voice-quality-3426718>
- [8] Palladion. User Manual, https://serviceassurance.yourservices.co.uk/help/_static/palladion-user-manual.pdf
- [9] RingCentral Inc. Official web site, <http://www.ringcentral.com/>
- [10] Verschelde J. The Method of Weierstrass (also known as the Durand–Kerner method), 2003.
- [11] Ward M.D., Ahlquist J.S. Maximum Likelihood for Social Science: Strategies for Analysis. Cambridge University Press, 2018. ISBN 978-1-316-63682-4.
- [12] Zabbix Enterprise-class Monitoring Solution. Official web site, <http://www.zabbix.com/product.php>

Об авторах

Кучерова Кристина Николаевна, аспирант кафедры «Инженерная графика и дизайн» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail kristina.mylife@gmail.com.

Мещеряков Сергей Владимирович, д.т.н., профессор кафедры «Инженерная графика и дизайн» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail serg-phd@mail.ru.

Щемелинин Дмитрий Александрович, к.т.н., докторант кафедры «Инженерная графика и дизайн» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail dshchmel@gmail.com.

Визуализация процесса селективного лазерного сплавления

А.А. Молотков^{1,2}, О.Н. Третьякова^{1,2}

karacerr@gmail.com|tretiyakova_olga@mail.ru

¹ФГБОУ ВО Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, Россия;

² ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура", Москва, Россия

В данной работе рассматривается вопрос о визуализации ранее смоделированного авторами процесса селективного лазерного сплавления в целях упрощения анализа полученных результатов и подбора технологических параметров работы установок аддитивного производства. В статье представлены два возможных подхода для визуализации процесса селективного лазерного сплавления и поддерживаемых функций, упрощающих работу и проведение исследований в рамках новой технологии. Реализованные подходы позволят снизить требования к уровню подготовки специалистов, работающих на оборудовании российского производства. В двумерном режиме визуализации делается упор на возможности более детального исследования процесса. В трехмерном – на возможности обзора картины в целом. Рассмотрены несколько реализованных принципов упрощения геометрии для визуального представления. Представлены преимущества и недостатки проделанной работы и полученных результатов.

Ключевые слова: 3D модель, визуализация, математическая модель, селективное лазерное сплавление.

Visualization of the process of selective laser melting

A.A. Molotkov^{1,2}, O.N. Tretiyakova^{1,2}

karacerr@gmail.com|tretiyakova_olga@mail.ru

¹Moscow aviation Institute (national research University) MAI, Moscow, Russia;

²SPC "Lasers and equipment" LLC, Moscow, Russia

This paper deals with the visualization of the previously simulated by the authors selective laser melting process in order to simplify the analysis of the results and the selection of technological parameters of the additive production unit. The article presents two possible approaches for visualization of the selective laser fusion process and supported functions which simplify the work and research in the framework of the new technology. The implemented approaches will reduce the requirements for the level of training of specialists working on Russian-made equipment. In the two-dimensional visualization mode, the emphasis is on the possibility of a more detailed study of the process. In a three-dimensional there is the ability of the broader scope and to see the big picture. Several implemented principles of geometry simplification for visual representation are considered. The advantages and disadvantages of the work done and the results obtained are presented.

Keywords: 3D model, visualization, mathematical model, selective laser melting.

1. Введение

Технология послойного лазерного сплавления SLM (selective laser melting) – относительно новая технология аддитивного производства, позволяющая получать изделия сложной формы, которые невозможно создавать при помощи классических методов производства. Стоит отметить, что данная технология реализована на отечественном оборудовании, рис. 1.

Узость технологического окна параметров, вызванная как сложностью геометрии изготавливаемых деталей, рис. 2, так и сложностью самого процесса изготовления, рис. 3, приводит к необходимости проведения численного моделирования. В первом приближении задача моделирования процесса SLM сводится к моделированию теплообмена. В основе разработанной нами модели лежит явная численная схема вида:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,m}^{n+1} - H_{i,j,m}^n}{\Delta t} = & \frac{K}{h_z^2} (T_{i+1,j,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i-1,j,m}^n) \\ & + \frac{K}{h_y^2} (T_{i,j+1,m}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j-1,m}^n) \\ & + \frac{K}{h_x^2} (T_{i,j,m+1}^n - 2T_{i,j,m}^n + T_{i,j,m-1}^n) + q, \end{aligned}$$

где H – энтальпия,

K – теплопроводность,

h – пространственный шаг,

T – температура,

q – теплота, получаемая материалом от лазера,

Δt – временной шаг,

i, j, m – индексы пространственных координат,

n – индекс времени.

В работе [1] подробнее описано проведенное нами численное моделирование теплообмена в процессе SLM и сравнение с расчетами других авторов. На основе полученных результатов создана программа. Важной её частью являются визуальные компоненты, отвечающие за отображение полученных результатов. В программе предусмотрено два режима визуализации: двумерный и трёхмерный.



Рис. 1. Экспериментальная установка МЛ-6-1.

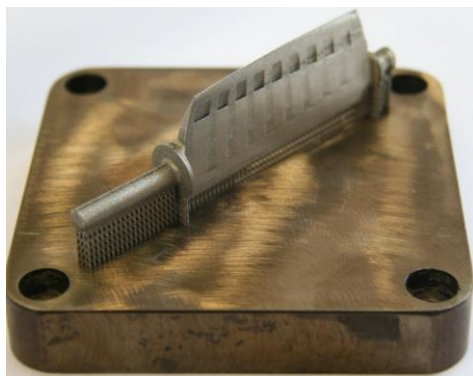


Рис. 2. Деталь, изготовленная на установке МЛ-6-1.

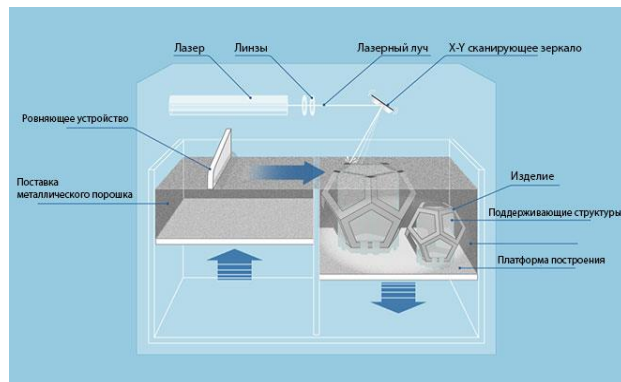


Рис. 3. Принципиальная схема SLM процесса. [2]

2. Общая информация

Программный код написан на языке C# с применением технологий платформы .NET (WPF). Установочная программа создана при помощи системы NSIS (Nullsoft Scriptable Install System). Программа предназначена для работы на ОС Microsoft Windows и требует наличия платформы .NET Framework 4.7. Для визуализации активно используются возможности открытой библиотеки SharpGL для C#, позволяющей без труда пользоваться возможностями OpenGL. Применение архитектурного паттерна разработки MVVM (Model-View-ViewModel) позволило отделить логику приложения от визуальной части (представления) и достичь более четкой и осмысленной структуры. В роли входных данных выступают файлы формата CLI (Common Layer Interface) – универсальный формат для ввода геометрических данных в системы изготовления моделей, основанные на технологиях изготовления слоев (LMT). Он подходит для систем, использующих послойное фотоотверждение смолы, спекание или связывание порошка, резку листового материала, затвердевание расплавленного материала и любые другие системы, которые создают модели послойно. Данный формат активно используется в отрасли. Данные такого формата получаются в результате работы различных программ для подготовки данных и редактирования STL для аддитивного производства. Ярким примером такой программы является Materialize Magics.

3. Двумерная визуализация

В режиме 2-D послойно отображается деталь, проекции поддержек, необходимых для компенсации образующихся в ходе процесса термических напряжений и предотвращения деформаций. При необходимости программа:

1. Создает одну или несколько эквидистант, очерчивающих контур детали, что позволяет

осуществлять обход детали по контуру лазером в различных режимах. Это позволяет добиваться в последствии более высокого качества поверхности.

2. Разбивает внутреннее пространство на области варьированной площади и проводит их заштриховку. Каждая получившаяся штрих-линия является траекторией лазера. Процедура такой «заштриховки» является этапом подготовки технического задания станка.

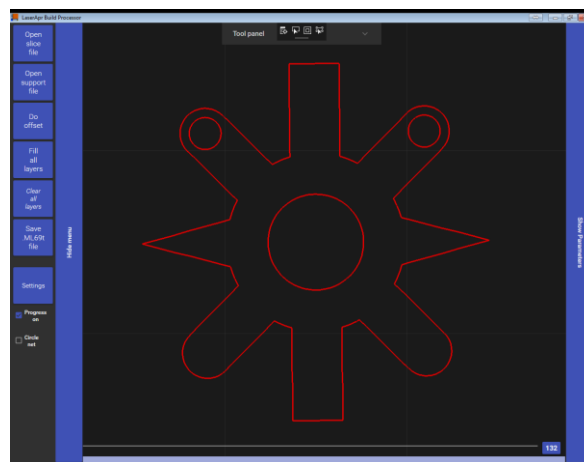


Рис. 4. Контур детали.

В последствии, на каждый слой, рис. 4, после проведения симуляции, накладывается поле температур, рис. 5, рис. 6, рис. 7. При расчёте учитывается траектория движения лазера, его мощность, скорость, форма распределения излучения, теплофизические параметры материала, насыпание порошка. Информация о каждом шаге численного расчёта сохраняется в буфер, что позволяет увидеть поле температур в любое время предстоящего процесса сплавления для каждого слоя. Для упрощения анализа полученных результатов предусмотрена функция создания пользовательских палитр, при помощи которой технолог может сам определять количество цветовых интервалов, их длину, цвет, какой вариант заливки (градиентный или сплошной) для какого интервала использовать. Реализована возможность динамического изменения отслеживаемого интервала при помощи двухпалочного слайдера, что позволяет сконцентрироваться на определённой, интересующей технолога области. Поскольку даже в слоях с высокой кучностью расположенных объектов и густой их заштриховкой количество отображаемых элементов относительно не высоко, проблем с производительностью даже на слабых системах не возникает. Напротив, такая проблема остро встаёт при трёхмерном отображении.

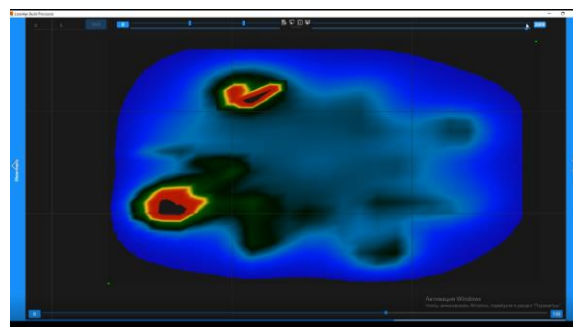


Рис. 5. Визуализация нагрева детали в процессе изготовления в момент времени T1.

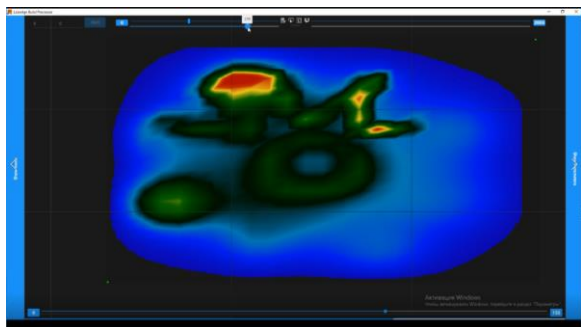


Рис. 6. Визуализация нагрева детали в процессе изготовления в момент времени T2.

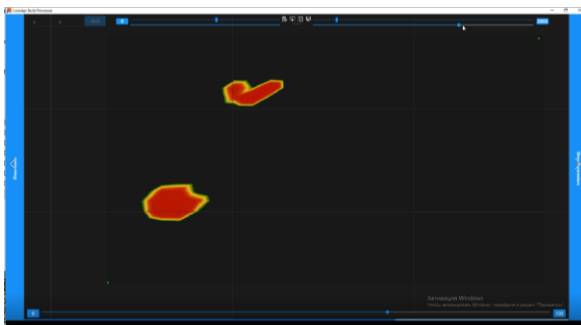


Рис. 7. Выделение критической зоны наибольшего нагрева.

4. Трёхмерная визуализация

В 3-D режиме отображаются все слои вместе, что позволяет увидеть деталь в исходном виде, рис. 8. Сохраняется возможность просмотра температур, рис. 9, рис. 10, но, в отличие от 2-D режима, поле температур можно просматривать в трёх проекциях. Отображаемые в этом режиме цвета накладываются на три перпендикулярные секущие плоскости. При движении каждой из этих плоскостей из отображения убираются мешающие просмотру части детали. Таким образом в 3-D режиме оператор имеет возможность видеть температуры не только на плоскости XY, но и в плоскостях YZ и XZ. Поскольку для больших деталей количество отображаемых графических примитивов, построенных на основе карты слоёв, превышает в некоторых случаях полмиллиона, перед отрисовкой проводится упрощение отображаемой геометрии, таким образом, чтобы для оператора разница была слабо заметна. Упрощение реализовано тремя принципами:

1. Нарезание трёхмерной модели изготавливаемой детали происходит в программах подготовки данных, о чем указывалось ранее. Поскольку геометрия слоя определяется путём поиска пересечения примитивов (треугольных), составляющих модель объекта, в результирующем файле очень часто даже прямые линии представляют из себя не один, а несколько объектов. Такие отрезки, без риска потери точности можно вновь объединить в один, там самым уменьшив количество отображаемых в последствии примитивов. Вычислительная сложность такого упрощения, как несложно догадаться, составляет

$$O(N),$$

где N – число элементов в слое, и применяется лишь один раз.

2. Поскольку к создаваемым деталям в промышленности предъявляются высокие требования, линии различной степени кривизны аппроксимируются прямыми отрезками малых

размеров, позволяющих сохранять высокое качество поверхности. При визуализации же такая точность очень часто является излишней. Поэтому для отображения используется не оригинальная карта слоёв, а её упрощённый вариант. Если для двух отрезков начало одного отрезка совпадает с концом второго, и один отрезок лежит под небольшим углом к другому (если данный угол меньше заданной величины, зависящей от расстояния между точкой обзора и рассматриваемыми отрезками), то такие отрезки можно заменить одним в упрощённой версии карты слоёв. Вычислительная сложность, поскольку в слое отрезки лежат по порядку, и необходимо сравнивать только соседние, так же составляет

$$O(N),$$

где N – число элементов в слое.

3. Чаще всего два любых соседних слоя отличаются несильно, это позволяет, при небольшом приближении исключать целые слои из упрощённой карты. Слои считаются непохожими, если в одном слое существуют отрезки, наводящиеся на большое расстоянии от всех отрезков другого слоя. Вычислительная сложность сравнения слоёв, для определения «похожести», составляет

$$O(N * M),$$

где N и M – число элементов в двух сравниваемых слоях.

Все идеи реализуются достаточно просто, стоит отметить, что в соответствие к каждому слою ставится специальная числовая пометка, равная величине приближения, после которой различия в слоях незаметны и данный слой потенциально не должен отрисовываться – это позволяет дополнительно уменьшить число побочных вычислений

Второй и третий способы упрощения применяются при изменении масштаба отображения. Таким образом, при уменьшении масштаба количество отображаемых примитивов в большинстве случаев уменьшается, что снижает нагрузку на систему и ускоряет работу программы, а при увеличении масштаба – детализация отображаемой детали увеличивается, что позволяет не допускать потерь в информативности. В результате получается повысить кадровую частоту для больших и сложных деталей в среднем с 7 до 15 FPS. Несмотря на то, что и 15 FPS – это довольно малое число, этого оказывается вполне достаточно, в связи с тем, что отображаются сугубо стационарные объекты и движение представлено только в виде вращения и перемещения камеры, перемещения секущих плоскостей, изменения числа отображаемых слоёв.

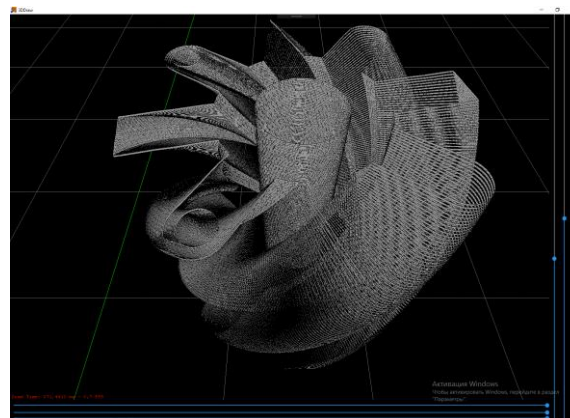


Рис. 8. Трёхмерная модель создаваемой детали.

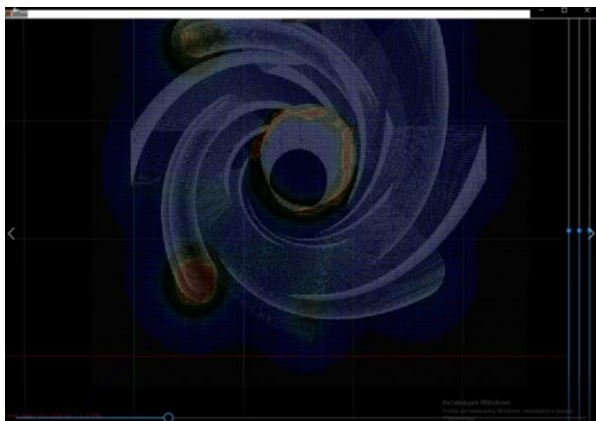


Рис. 9. Модель детали с наложенной поточечной моделью отображения температуры.

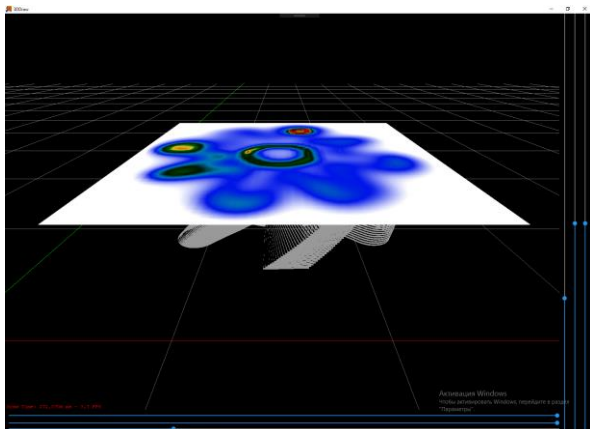


Рис. 10. Модель детали с секущей плоскостью, на которую наложено рассчитанное поле температур. Промежуточные значения температур получены при помощи линейной интерполяции.

5. Преимущества и недостатки

Чаще всего термические расчёты и подобные численные исследования проводят в специальных программах, таких как продукты семейства Ansys и Comsol. Создание собственных моделей slm процесса в данных системах представляет высокую сложность, задание всей геометрии в ручном режиме требует просто невероятного количества времени, а автоматизация данного процесса требует высокого знания специфичных языков, таких как специально разработанный для использования в Ansys параметрический язык APDL, и высокого уровня навыков программирования. Поэтому в таких системах существуют свои решения данной проблемы, более подробно о различиях этих моделей от нашей мы писали в работе [1]. Здесь же стоит подробнее остановиться в различиях в визуализации. В решении Ansys для процесса SLM полученные температуры отображаются на поверхности создаваемой детали в виде соответствующего цвета, добраться до значений в глубине детали не так просто, этого можно добиться предварительным разбиением детали на части в графическом редакторе или при помощи APDL, тут мы опять приходим к необходимости знания специального языка, освоение которого крайне трудозатратно. Возникают проблемы с настройкой цветовой палитры, по умолчанию цвета в палитре заданы, а интервал, которому соответствуют цвета, привязаны к максимуму и минимуму температуры. За всё время пользования данным продуктом, удобно настроить палитру у нас так и не получилось. В нашей же работе пользователь может легко подобрать цветовую

палитру, привязать цвета к определённым температурам или интервалам температур, выделять интересные области, использовать кусочно-линейный или градиентный вид закрашивания, при помощи секущих видеть температуры в любой точке в любой момент времени. Все эти возможности доступны технологу через пользовательский интерфейс, что существенно снижает требования к уровню подготовки пользователя. Также наша программа включена в ПО для установки отечественного производства МЛ-6-1. Процесс расчёта и отображения его результатов работает асинхронно, что позволяет в это время продолжать пользоваться другими функциями ПО станка или проводить исследование на стороннем ПК.

Из основных минусов представляемой работы стоит указать, что в основном расчёт проходит однопоточно, что не позволяет полноценно использовать вычислительные возможности многоядерных процессоров. Так же не используется возможность расчётов на GPU, что так же реализовано в некоторых решениях от крупных компаний. В более профессиональных программах большое внимание уделено внешнему виду работы и визуализации расчёта, текстурированию, работе с освещением, наше же решение визуально смотрится более грубым.

6. Заключение

В результате созданием двух режимов отображения ранее разработанной модели удалось добиться упрощения процесса исследования и анализа получаемых результатов. Обширная, но пока не всеохватывающая функциональность даёт возможность технологам видеть всю полноту получаемой в ходе моделирования информации о процессе, видеть динамику происходящего, отслеживать интересные области. Дополнительная возможность использовать два этих режима одновременно (с выводом картинки на один экран или на несколько) позволяет одновременно видеть картину целиком и концентрироваться на отдельных, локальных зонах.

7. Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству группы компаний «Лазеры и Аппаратура» за помощь в материально-техническом обеспечении проведения экспериментальных исследований и моделирования рассматриваемого процесса.

8. Литература

- [1] Лебёдкин И. Ф., Молотков А. А., Третьякова О. Н. Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий // Труды МАИ: Электронный журнал, ISSN:1727-6924, №101, 2018.
- [2] SLM (Selective Laser Melting) — технология 3D-печати [Электронный ресурс] // 3d.globatek.ru: [сайт]. URL: http://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/slm-tech/

Об авторах

Третьякова Ольга Николаевна, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры 801 «Физика» факультета №8 «Информационные технологии и прикладная математика» Московского Авиационного Института. с.н.с ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура". E-mail: tretiyakova_olga@mail.ru.

Молотков Андрей Андреевич, магистр кафедры 802 «Мехатроника и теоретическая механика» факультета №8 «Информационные технологии и прикладная математика» Московского Авиационного Института, м.н.с ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура". E-mail: karacert@gmail.com.

Влияние спекл-структуры рассеянного лазерного излучения на погрешность измерения вибро смещения шероховатой поверхности

И.Н. Павлов¹, И.Л. Расковская¹, Б.С. Ринкевичус¹
inpavlov@bk.ru|raskovskail@mail.ru|rinkevbs@mail.ru

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Исследовано влияние спекл-структуры рассеянного лазерного излучения на погрешность измерения вибро смещения шероховатой поверхности с помощью лазерного доплеровского вибromетра, собранного по дифференциальной схеме. Приведена схема установки для исследования характеристик отраженного от различных поверхностей лазерного пучка и приведены полученные экспериментальные изображения. Показано, что структура отраженного и рассеянного пучка сильно зависит от параметров шероховатости исследуемой поверхности. На основе результатов численного моделирования получены характерные размеры неровностей поверхности, при которых происходит разрушение структуры пучка и образование спекл-структуры. Показано, что в случае частично развитой спекл-структуры погрешность будет определяться относительным вкладом зеркальной компоненты, контрастом и средней интенсивностью спекл поля. Для оценки погрешности проведено численное моделирование при заданных параметрах поверхности, пучка и рассеивателей.

Ключевые слова: спекл-структура, измерение вибро смещения, лазерное излучение, вибromетрия, погрешность измерений.

The Influence of the Speckle Structure of the Scattered Laser Radiation on the Measurement Error of the Rough Surface Vibration Displacement

I.N. Pavlov¹, I.L. Raskovskaya¹, B.S. Rinkevichyus¹
inpavlov@bk.ru|raskovskail@mail.ru|rinkevbs@mail.ru
¹National Research University "MPEI", Moscow, Russia

The influence of the speckle structure of the scattered laser radiation on the measurement error of the rough surface vibration displacement using laser Doppler vibrometer assembled according to a differential scheme is studied. The scheme of the experimental setup for investigation of characteristics of laser beam reflected from different surfaces is described and the obtained experimental images are given. It is shown that the structure of a reflected and scattered beam highly dependent on parameters of roughness of an investigated surface. Based on the results of numerical simulation, characteristic dimensions of surface irregularities are obtained, at which the beam structure is destroyed and the speckle structure is formed. It is shown that in case of a partially developed speckle structure, the error will be determined by the relative contribution of a mirror component, a contrast and an average intensity of a speckle field. To estimate the error, a numerical simulation was performed for given parameters of a surface, beam and scatterers.

Keywords: speckle-structure, measurement of vibration displacement, laser radiation, vibrometry, measurement error.

1. Введение

Измерение быстропеременных деформаций элементов и узлов двигателей и энергетических установок является важной и актуальной задачей метрологического обеспечения при проведении их испытаний. В данной работе обсуждается возможность измерения при помощи лазерного метода параметров быстропеременных деформаций, возникающих в металлическом образце при возбуждении в нем механических колебаний, и исследуется влияние спекл-структуры [1, 12] рассеянного излучения на погрешность измерения вибро смещения шероховатой поверхности образца. Для измерения параметров вибраций целесообразно использовать разработанные ранее лазерные методы диагностики неоднородных сред и поверхностей [2-7, 11, 13]. При применении лазерных методов различные аспекты эффектов, связанных с шероховатостью поверхности, представляют самостоятельный интерес и исследовались в работах [8-10].

2. Экспериментальная установка

Для исследования отражающих характеристик исследуемой поверхности была создана экспериментальная установка, показанная на рис. 1, включающая в себя гелий-неоновый лазер 1 фирмы JDSU с длиной волны 632,8 нм и мощностью 10 мВт, бумажный экран с отверстием 2, металлическую деталь 3, и фотоаппарат для регистрации распределения интенсивности отраженного пучка на

обратной стороне экрана. Исследовались различные отражающие объекты с шероховатой и хорошо обработанной гладкой поверхностью.



Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования характеристик отраженного от различных поверхностей лазерного пучка: 1 – лазер, 2 – экран с отверстием для прохода лазерного пучка, 3 – камертон.

На рис. 2а показано изображение, соответствующее распределению интенсивности в сечении лазерного пучка, отраженного от шероховатой поверхности камертона, а на рис.2б – аналогичное изображение для пучка, отраженного от шлифованной поверхности камертона. В первом случае наблюдается частично развитая спекл-структура, а во

втором – практически зеркальное отражение с шумовым облаком небольшой интенсивности.

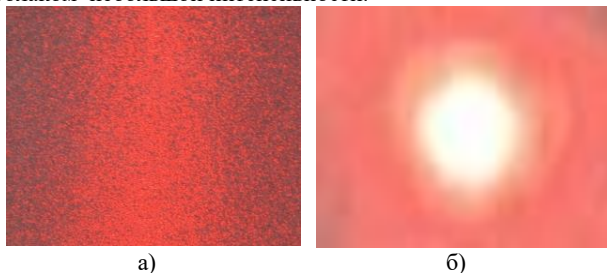


Рис. 2. Изображения отраженного лазерного пучка: а) от шероховатой поверхности камертона, б) от шлифованной поверхности камертона

Образование спекл-структуры обусловлено тем, что когерентное излучение, отражаясь от шероховатого объекта или проходя через неоднородную среду, приобретает случайную фазовую модуляцию, затем эта модуляция проявляется в структуре рассеянного излучения, делая его пространственно неоднородным [1, 12]. Любая реализация спекл-поля представляет собой результат интерференции большого числа волн, пришедших от различных рассеивателей. Поскольку рассеяние носит случайный характер, то и образующиеся световые пятна будут расположены случайным образом в плоскости наблюдения, имея при этом случайную форму и размеры.

Важной характеристикой является контраст спеклов, который характеризует глубину пространственной модуляции рассеянного поля. Контраст является аналогом видности интерференционных полос, которые наблюдаются при интерференции гладких полей. Контраст развитых спеклов всегда равен единице. В случае развитых спеклов диаметр невозмущенного лазерного пучка и средний размер спеклов примерно равны между собой в плоскости наблюдения. Частично-развитое спекл-поле отличается от развитого наличием зеркального компонента в плоскости наблюдения. Поэтому контраст частично развитых спеклов много меньше единицы. На рис. 3 представлены фотографии спекл-поля, образующегося при освещении шероховатой поверхности пучком лазера.

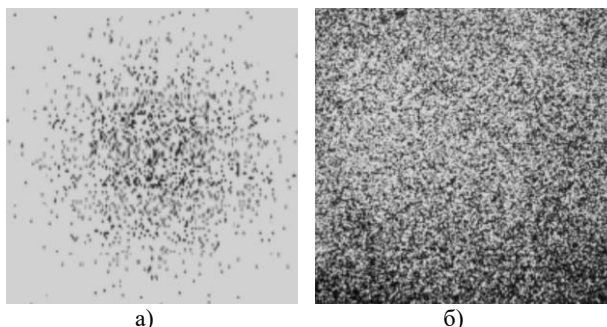


Рис. 3. Спекл-поле, образующееся при освещении шероховатой поверхности лазерным пучком: а) частично развитая спекл-структура (инвертированное изображение), б) развитая спекл-структура.

При непрерывном движении пучка относительно шероховатой поверхности очертания световых пятен видоизменяются, а реализации спекл-поля постоянно меняют одна другую. Динамика спеклов широко используется в лазерной метрологии при измерениях скорости движения шероховатых поверхностей и случайных потоков [12].

Если информативным параметром является сигнал, обусловленный зеркальным отражением либо рассеянным

излучением от конкретного локализованного рассеивателя, то шумовое облако спекл-поля будет мешающим фактором, причем при развитой спекл-структуре характер шума будет гауссовским. Практически полное разрушение зеркальной составляющей пучка и контраст спеклов равный единице приводит к тому, что отношение сигнал/шум в этом случае также порядка единицы, а погрешность соответственно может достигать 100%. В случае частично-развитой спекл-структуры отношение сигнал/шум будет определяться относительным вкладом зеркальной компоненты, контрастом и средней интенсивностью спекл поля. Для оценки погрешности целесообразно проведение численного моделирования для заданных характеристик поверхности, пучка и рассеивателей.

3. Результаты эксперимента

Для получения количественных характеристик рассеянного излучения, соответствующих реальным металлическим поверхностям, на основе установки, изображенной на рис. 1, был проведен эксперимент по визуализации (с последующим количественным анализом изображений) структуры отраженного и рассеянного от поверхности камертона пучка гелий-неонового лазера.

В эксперименте, состоящем из трех серий, расстояние от лазера до камертона 285 мм, от камертона до экрана 350 мм, угол между падающим и отраженным лучом 26,2 град. В первой серии исследуется структура пучка, отраженного от полированной поверхности, во второй – от шероховатой поверхности, в третьей – от полированной поверхности, с нанесенной на нее риски. Для четвертой серии (рассеянный свет собирался линзой) расстояние от лазера до камертона то же (285 мм), от камертона до линзы 450 мм, от линзы до экрана 150 мм, угол между падающим и рассеянным пучком тот же (26,2 град).

На рис. 4 для сравнения представлены изображения структуры сечения пучка, отраженного от поверхности для трех серий эксперимента. Все три изображения получены при одном и том же времени экспозиции 1946 мкс.

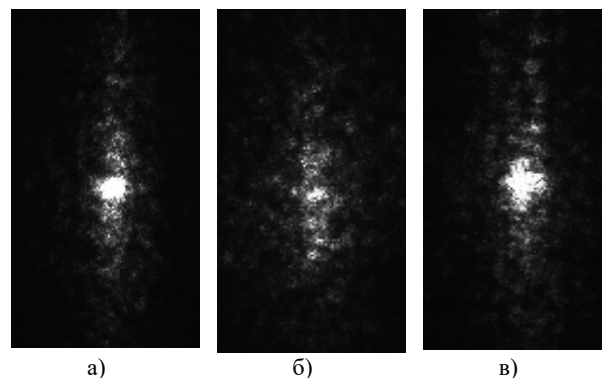


Рис. 4. Изображения структуры сечения пучка, отраженного от поверхности для трех серий эксперимента: а) полированная поверхность, б) шероховатая поверхность, в) полированная поверхность с риски (горизонтальной царапиной).

При увеличении времени экспозиции до 15906 мкс во всех трех сериях хорошо визуализируется частично-развитая спекл-структура (рис.5). Как следует из рис.4-5 в случае шероховатой поверхности наиболее заметно снижение интенсивности зеркальной составляющей на фоне шумового облака. На рис. 6а,б в одинаковом масштабе представлены соответствующие изображения для поля пучка, рассеянного на шероховатой поверхности и того же рассеянного пучка, собранного линзой при примерно одинаковых экспозициях.

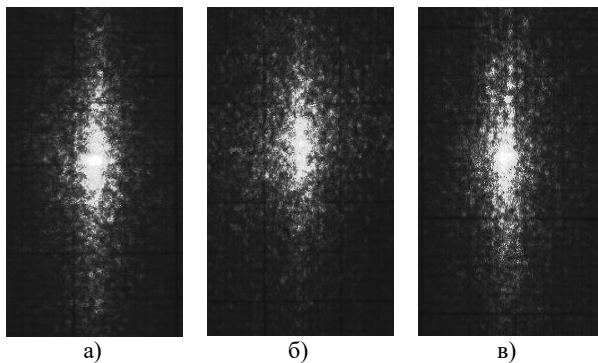


Рис. 5. Визуализация спекл-структуры для пучка, отраженного от поверхности для трех серий эксперимента: а) полированная поверхность, б) шероховатая поверхность, в) полированная поверхность с риской (горизонтальной царапиной).

Диаметр сфокусированного пучка равен примерно 500 мкм, спеклы на изображении отсутствуют, однако интенсивность сфокусированного пучка очень мала, что может привести к дополнительным погрешностям из-за фоновой засветки.

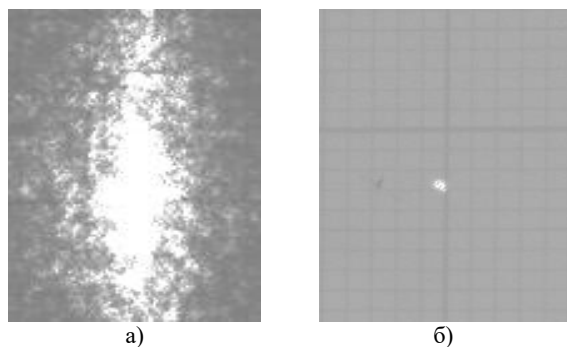


Рис. 6. Изображения распределения интенсивности в сечении пучка, рассеянного на шероховатой поверхности (а) и того же рассеянного пучка (б), собранного линзой, при экспозициях соответственно 15906 мкс и 13964 мкс.

Для количественной оценки влияния шумового поля спеклов была проведена обработка изображений и получены графики изменения интенсивности в сечении рассеянного (отраженного) пучка в зависимости от горизонтальной координаты. На рис.7 фактическая ширина отраженного от полированной поверхности пучка около 4000 мкм соответствует примерно 20 пикс по горизонтальной оси. Интенсивность по вертикальной оси измеряется в условных единицах. На рис 8-9 представлены аналогичные изображения для шероховатой поверхности и поверхности с риской.

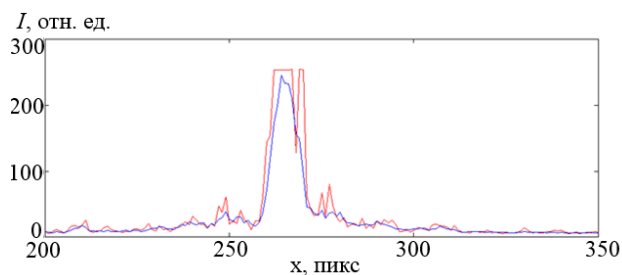


Рис. 7. Распределение интенсивности в сечении пучка, отраженного от полированной части камертона. Красная кривая – график распределения интенсивности, построенный по одной реализации, синий – усредненный по 11 реализациям.

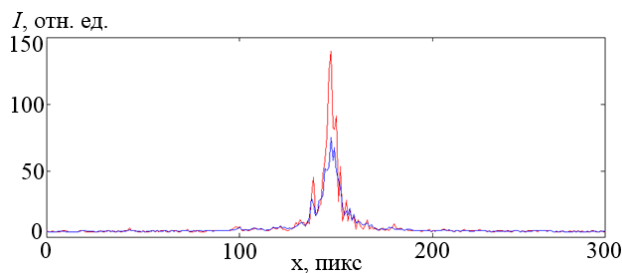


Рис. 8. Распределение интенсивности в сечении пучка, отраженного от шероховатой части камертона. Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

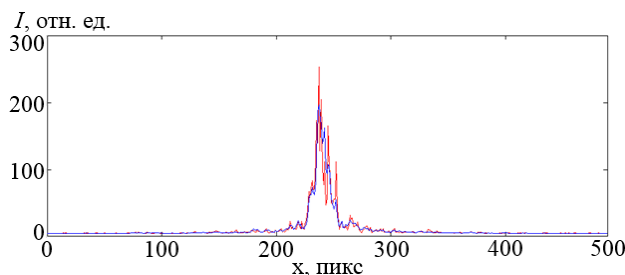


Рис. 9. Распределение интенсивности в сечении пучка, отраженного от полированной части камертона с риской. Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

На рис. 10 показано распределение интенсивности для рассеянного пучка, собранного линзой. Рассеянный от полированной части пучок (рассеянный свет собирался под углом $26,2^\circ$ к направлению распространения падающего лазерного пучка), фокусировался с помощью линзы с фокусным расстоянием 110 мм в точку на экране (рис.6б). Диаметр сфокусированного пучка 500мкм соответствует примерно 10 пикс по горизонтальной оси. На рис. 11 показано аналогичное изображение при времени экспозиции 49896 мкс.

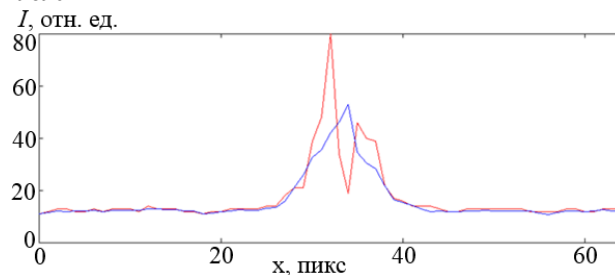


Рис. 10. Распределение интенсивности для рассеянного пучка, собранного линзой, при времени экспозиции 13964 мкс. Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

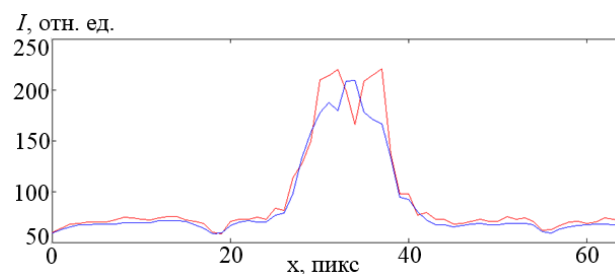


Рис. 11. Распределение интенсивности для рассеянного пучка, собранного линзой, при времени экспозиции 49896 мкс. Красная кривая построена по одной реализации, синяя – усреднение по 7 реализациям.

Как следует из графиков на рис. 10-11, даже при фокусировке пучка и видимом отсутствии спекл-структуры, распределение интенсивности оказывается весьма изрезанным и сопровождается фоном, уровень которого составляет примерно $0,6 I_0$, где I_0 – среднее значение интенсивности «незашумленного» пучка, соответственно погрешность в этом случае может достигать 60%.

4. Численное моделирование

Для исследования влияния характеристик поверхности на интенсивность в сечении рассеянного пучка и уровень шума, создаваемого спекл-полем, было проведено численное моделирование, основанное на применении интеграла Кирхгофа при условии задания случайного распределения фазы зондирующего излучения на границе, совпадающей с отражающей поверхностью. Распределение фазы определялось средними значениями высоты и протяженности неровностей поверхности.

На рис. 12-14 представлены результаты моделирования для крупномасштабных неоднородностей средней протяженностью порядка 100 мкм, средний уровень (высота) неровностей изменялся от 6 до 0,5 мкм, исходный диаметр зондирующего пучка 1 мм (по оси абсцисс может быть измерен диаметр отраженного пучка в мм), экран находится на расстоянии 100 мм. По оси ординат рассчитываются интенсивность рассеянного пучка, нормированная к максимальной интенсивности исходного пучка.

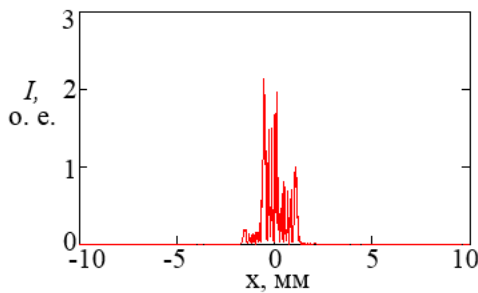


Рис. 12. Огибающая интенсивности рассеянного пучка при крупномасштабных неоднородностях отражающей поверхности (средняя высота неровностей 6 мкм).

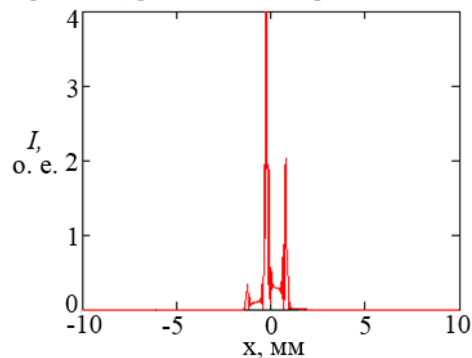


Рис. 13. Огибающая интенсивности рассеянного пучка при крупномасштабных неоднородностях отражающей поверхности (средняя высота неровностей 3 мкм).

Крупномасштабные (протяженностью порядка сотен мкм) неровности поверхности приводят к сильной «изрезанности» огибающей пучка при сохранении его локализации в области зеркального отражения, причем пиковые значения близки к исходным значениям интенсивности, а уширение пучка примерно соответствует дифракционной расходимости.

Как показано на рис. 15-17, дополнительное наличие мелкомасштабной (протяженности неровности единицы и

десятки мкм) шероховатости приводит фактически к полному разрушению структуры пучка, нарушению его локализации и формированию спекл-структуры с контрастом близким к единице. Средняя высота неровностей при моделировании в пределах 1-4 мкм. Средняя высота мелкомасштабных неровностей для рисунка 15 равна 1 мкм, крупномасштабных, соответственно – 3 мкм.

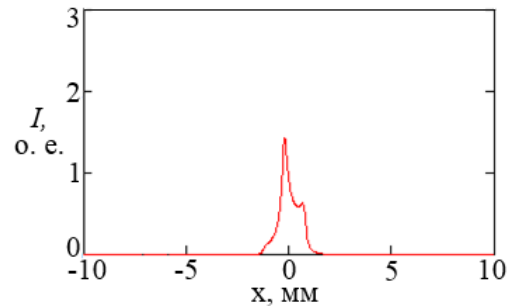


Рис. 14. Огибающая интенсивности рассеянного пучка при крупномасштабных неоднородностях отражающей поверхности (средняя высота неровностей 0,5 мкм).

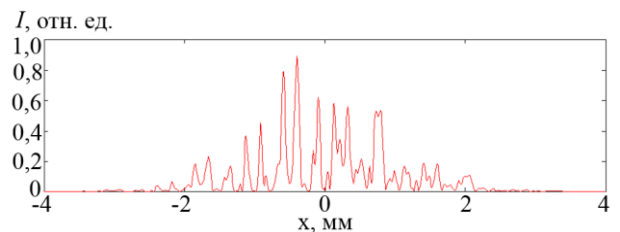


Рис. 15. Огибающая интенсивности при наличии крупномасштабных (высота 3 мкм, протяженность 100 мкм) и мелкомасштабных (высота 1 мкм, протяженность 10 мкм) неровностей отражающей поверхности.

Для рис. 16 средняя высота мелкомасштабных неровностей – 2 мкм при прочих равных условиях. При увеличении высоты мелкомасштабных неоднородностей происходит расплывание пучка, а интенсивность в пиковых значениях падает (см. далее рис. 17).

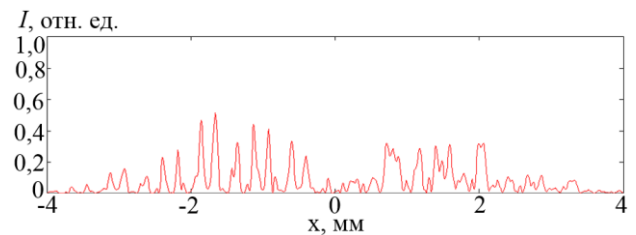


Рис. 16. Огибающая интенсивности при наличии крупномасштабных (высота 3 мкм, протяженность 100 мкм) и мелкомасштабных (высота 2 мкм, протяженность 10 мкм) неровностей отражающей поверхности.

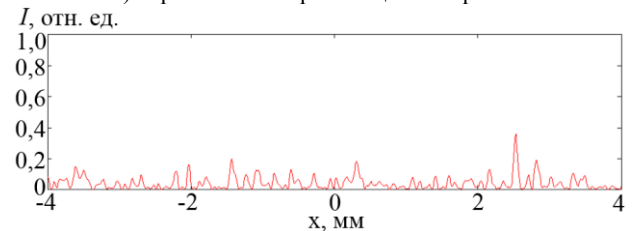
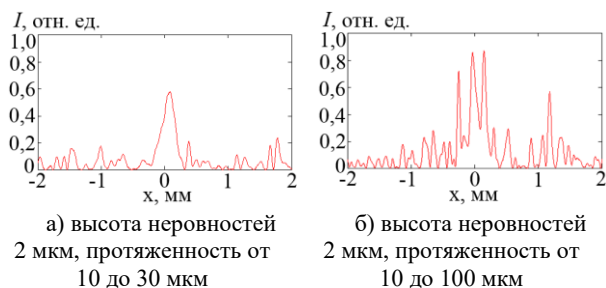


Рис. 17. Огибающая интенсивности при наличии крупномасштабных (высота 3 мкм, протяженность 100 мкм) и мелкомасштабных (высота 5 мкм, протяженность 10 мкм) неровностей отражающей поверхности.

На рис. 18а представлены результаты моделирования интенсивности отраженного пучка при наличии зеркального

участка поверхности, характерный размер которого составляет 100 мкм при диаметре пучка 500 мкм. Средняя высота неровностей при этом 2 мкм, масштаб от 10 до 30 мкм.

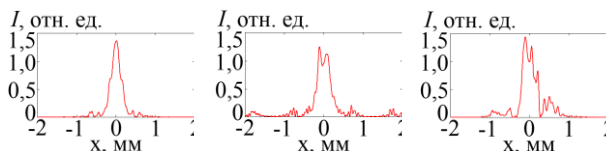
При изменении характеристик рельефа поверхности, а именно увеличении относительного вклада крупномасштабных неоднородностей, существенно меняется огибающая пучка, разрушается его структура увеличивается шумовая компонента (рис.18б).



а) высота неровностей 2 мкм, протяженность от 10 до 30 мкм
б) высота неровностей 2 мкм, протяженность от 10 до 100 мкм

Рис. 18. Огибающая интенсивности отраженного пучка при наличии зеркального участка поверхности.

На рис. 19а представлена огибающая интенсивности отраженного пучка для практически зеркальной поверхности (средняя высота неоднородностей 0,4 мкм).



а) высота неровностей 0,4 мкм
б) высота неровностей 1 мкм
в) высота неровностей 1,7 мкм

Рис. 19. Огибающая интенсивности отраженного пучка при практически зеркальной поверхности.

При относительно небольшой высоте неровностей 1 мкм (рис.19 б) и 1,7 мкм (рис.19 в) огибающая интенсивности уже достаточно сильно изрезана, а при высоте неоднородностей более 2 мкм происходит практически уже разрушение структуры пучка и формирование спекл-структуры в плоскости наблюдения (см. рис.12-13, 15-17).

5. Заключение

Как следует из результатов моделирования, структура пучка практически разрушается уж при средней высоте неровностей поверхности более 2 мкм, крупномасштабные неоднородности приводят к сильной изрезанности огибающей с небольшим (двух-трехкратным) увеличением его радиуса, а мелкомасштабные (менее 10 мкм) к существенному уширению пучка и фактически к образованию спекл-структуры. При наличии спекл-структуры в плоскости наблюдения уровень шумовой компоненты практически равен уровню полезного сигнала. Для увеличения уровня полезного сигнала в отраженном от поверхности пучке обязательно должна присутствовать зеркальная компонента с достаточно большим уровнем интенсивности, что может быть обеспечено зеркально-отражающим участком (риской) с шириной сравнимой с радиусом пучка (порядка 100 мкм). В этом случае погрешность может быть снижена до приемлемых значений порядка 10%. При невозможности обеспечения в отраженном пучке зеркальной компоненты целесообразно для определения амплитуды вибро смещения использовать методы спекл-интерферометрии [1, 10]. Использование информативных фазовых характеристик зеркальной компоненты целесообразно для хорошо отполированных

поверхностей или рисок, обеспечивающих достаточно высокий уровень интенсивности рассеянного поля на фоне шумового облака спекл-поля.

6. Литература

- [1] Базылев Н.Б., Фомин Н.А. Количественная визуализация течений, основанная на спекл-технологиях. Минск: Белорусская наука, 2017, 425 с.
- [2] Гречихин В.А. Оценка относительной амплитуды вибро смещения в лазерном доплеровском виброметре // Автометрия, 2012, Т. 48, № 3, с. 33-38.
- [3] Гречихин В.А., Кугук Ю.Н., Толкачев А.В. Метод оценки пространственного сдвига объекта с использованием высокоскоростной видеокамеры // Измерительная техника, 2017, № 11. С. 32-35.
- [4] Гречихин В.А., Хренникова Т.А. Потенциальная точность оценки информационного параметра сигнала гомодинного лазерного доплеровского виброметра // Автометрия, 2018, Т. 54, № 1, с. 17-23.
- [5] Гречихин В.А., Титов Д.А. Квазиоптимальная нелинейная фильтрация сигнала лазерного доплеровского виброметра // Автометрия, 2014, Т. 50, № 5, с. 99-107.
- [6] Качанов В.К. и др. Ультразвуковая диагностика структуры металла на основе использования метода временной декорреляции сигналов акустической эмиссии, возникающей при кинетическом индентировании // Дефектоскопия, 2008, № 11, с. 47-66.
- [7] Кудряшов Т.В., Гречихин В.А. Исследование погрешностей оценки частоты сигналов ЛДА методом вейвлет-анализа // Измерительная техника, 2002, № 7, с. 38.
- [8] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Экспериментальная визуализация и моделирование микроструктур на поверхности капли жидкости // Труды международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon-2016, (19-23 сентября 2016, ННГАСУ, Нижний Новгород, Россия): ИФТИ, ННГАСУ, 2016, с. 319-322.
- [9] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Восстановление профиля поверхности капли жидкости на основе послыоного лазерного зондирования // ПЖТФ, 2017, т. 43, № 13, с. 19-25.
- [10] Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Структура микрорельефа поверхности испаряющейся с шероховатой подложки капли как возможная причина гистерезиса краевого угла // ЖЭТФ 151:4, 2017, с. 670-681.
- [11] Расковская И.Л. Рефрактометрия оптически неоднородных сред на основе регистрации положения каустик при использовании структурированного лазерного излучения // Автометрия, 2014, Т. 50, № 5, с. 92-98.
- [12] Ульянов С.С. Что такое спеклы // Соросовский образовательный журнал, №6, 1999, с. 112-116.
- [13] Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Structured beams in laser refractography applications In book: Laser Beams: Theory, Properties and Applications 2011, с. 399-413.

Об авторах

Павлов Илья Николаевич, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: inpavlov@bk.ru.

Расковская Ирина Львовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: raskovskail@mail.ru.

Ринкевичюс Бронюс Симвич, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики им. В.А. Фабриканта Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: rinkevbs@mail.ru.

Осязаемые интерфейсы для виртуальных реконструкций музейных экспонатов

К.В. Рябинин¹, А.И. Ахтамзян², М.А. Колесник³, Е.В. Сударикова²

kostya.ryabinin@gmail.com|darnhalm@gmail.com|kolesnik.ma@outlook.com|elsud@darwinmuseum.ru

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;

²Государственный Дарвиновский музей, Москва, Россия;

³Пермский краеведческий музей, Пермь, Россия

В данной статье предлагается подход к созданию киберфизических музейных экспонатов на основе методов и средств научной визуализации, Интернета вещей, аддитивных технологий и онтологического инжиниринга. Киберфизический экспонат включает в себя виртуальную и реальную составляющие, тесно переплетённые друг с другом. Научная визуализация используется как методологическая и технологическая основа наглядного представления виртуальной части экспоната, в роли которой могут выступать релевантный цифровой контент и 3D-реконструкции. Интернет вещей является основой создания осязаемого пользовательского интерфейса к соответствующим программным средствам визуализации. Аддитивные технологии позволяют создавать виртуальные реконструкции и высокоточные реплики музейных экспонатов. Онтологический инжиниринг обеспечивает адаптивные механизмы бесшовного встраивания новых киберфизических экспонатов в существующую цифровую инфраструктуру музеев. Предложенный подход использован на практике при создании киберфизических экспонатов в Государственном Дарвиновском музее (г. Москва) и Музее пермских древностей (г. Пермь).

Ключевые слова: музей, научная визуализация, Интернет вещей, осязаемый интерфейс, киберфизическая система, аддитивные технологии, онтологический инжиниринг.

Tangible Interfaces for the Virtual Reconstructions of Museum Exhibits

K.V. Ryabinin¹, A.I. Akhtamzyan², M.A. Kolesnik³, E.V. Sudarikova²

kostya.ryabinin@gmail.com|darnhalm@gmail.com|kolesnik.ma@outlook.com|elsud@darwinmuseum.ru

¹Perm State University, Perm, Russia;

²State Darwin Museum, Moscow, Russia;

³Perm Regional Museum, Perm, Russia

In this paper we propose an approach to create cyber-physical museum exhibits based on the methods and means of scientific visualization, Internet of things, additive technologies and ontology engineering. Cyber-physical exhibit consists of tightly interconnected virtual and real parts. Scientific visualization is used as methodological and technological basis for presenting the virtual part, which can contain relevant digital content and 3D-reconstructions. Internet of things is a core technology to create tangible interfaces for the corresponding visualization software. Additive technologies allow creating virtual reconstructions and precise copies of museum exhibits. Ontology engineering provides adaptive mechanisms for seamless integration of new cyber-physical exhibits into the existing digital infrastructure of museums. The proposed approach is used in practice to create cyber-physical exhibits in State Darwin Museum (Moscow) and Museum of Permian Antiquities (Perm).

Keywords: museum, scientific visualization, Internet of things, tangible interface, cyber-physical system, additive manufacturing, ontology engineering.

1. Введение

Концепция осязаемых человеко-машинных интерфейсов (англ. Tangible User Interface, TUI), предложенная в 1997 году Хироши Ишии (Hiroshi Ishii) [3], в настоящее время с развитием технологий Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT) [5] выходит на новую элементную базу программируемой микроэлектроники. Симбиоз TUI и IoT открывает возможности организации т. н. киберфизических систем (англ. Cyber-Physical System, CPS) [10] – систем, в которых тесно переплетаются реальный и виртуальный миры. Реальные и виртуальные объекты в таких системах дополняют друг друга, находясь в постоянной взаимосвязи, причём манипуляции над реальными влияют на виртуальные, и наоборот. Концепция CPS подразуме-

вает, что грань между материальным миром и киберпространством делается настолько тонкой, насколько это позволяют используемые программно-аппаратные средства, и в идеале оказывается совершенно незаметной для пользователя. CPS делают возможной четвертую промышленную революцию [4], открывая для человечества качественно новые пути взаимодействия с программным обеспечением вычислительных систем и, как следствие, качественно новые горизонты использования цифровых технологий.

Одним из многочисленных практических применений CPS являются интерактивные экспонаты в музеях. В настоящее время использование технологий IoT в музейном деле с целью мониторинга активности посетителей, организации навигации внутри музейных помещений и создания интерактивных выставок оформ-

милось в концепцию т. н. умных музеев (англ. Smart Museum) [1]. Превращение музейных предметов и соответствующего им цифрового контента в CPS – закономерный шаг в развитии данной концепции.

Организация музейного пространства в виде CPS способна в значительной степени увеличить привлекательность и запоминаемость экспозиции, а также обеспечить посетителей большим разнообразием информации и, как следствие, расширить потенциал музея как научно- и культурно-просветительской площадки.

Однако практическая реализация CPS на базе имеющегося в музеях материала сопряжена с рядом технических трудностей:

1. Встаёт вопрос максимального переиспользования имеющихся в музеях средств: организации TUI на базе предметов из музейных фондов, а также использования имеющегося цифрового контента и средств его отображения (т. н. бесшовное встраивание CPS в инфраструктуру музея).
2. Возникает острая нехватка высокоуровневых средств для развёртывания и последующего управления CPS в условиях небольшого количества IT-специалистов в штате музейных сотрудников.

В рамках предыдущих исследований нами были предложены методы и высокоуровневые средства автоматизации создания аппаратных человеко-машинных интерфейсов на базе онтологического инжиниринга и технологий IoT [7], а также сформулирована концепция применения технологий IoT и научной визуализации для создания интерактивных музейных экспонатов [8]. Целью данной работы является синтез результатов предыдущих исследований и формулирование на их основе общей концепции создания музейных CPS, а также применение этой концепции на практике при создании киберфизических музейных экспонатов в Московском Государственном Дарвиновском музее и Музее пермских древностей.

2. Концепция создания киберфизических музейных экспонатов

Чаще всего музейные экспонаты уязвимы к тактильным взаимодействиям, и музеи находятся в постоянном поиске средства, которое бы «размыло» стекло витрины, отделяющее посетителя от предметов культуры. При этом любая экспозиция «за стеклом», будь то постоянная, или только временная выставка, образует нарратив, который может быть прочитан посетителями на разных уровнях. В некотором смысле экспонат выступает как текст, как часть рассказа. Экспонат музея представляет собой знак, символ, раскрытие которого дает нам наряду с эстетическим переживанием некую информацию. Эта дешифровка текста музейного объекта является своеобразным дополнением к уже имеющимся у нас знаниям.

При этом обычно посетителю доступен только визуальный контакт с предметами в витринах, максимум – аудиальный контакт или оцифрованные версии предметов (с которыми современный уровень учреждений

культуры в России позволяет знакомиться, не выходя из дома). Пространственные ограничения заметно влияют на коммуникативную систему «автор экспозиции – реципиент», и CPS являются способом расширить возможности посетителя по восприятию заложенной в экспозиции информации, добавив к прочим аспектам восприятия тактильный канал.

В контексте музейного дела предлагается следующий состав CPS:

1. Физические объекты: музейные предметы, оснащённые построенными на базе технологий IoT датчиками, способными детектировать то или иное взаимодействие с посетителем, а также актуаторами (исполнительными устройствами: электродвигателями, соленоидами и т. п.), способными при необходимости обеспечить обратную связь с посетителем.
2. Виртуальные объекты: дополняющий музейные предметы цифровой контент, в первую очередь выраженный графическим материалом, отображаемым с использованием методов и средств научной визуализации, чтобы обеспечить необходимый уровень достоверности подаваемой посетителю информации.
3. Дисплейное оборудование, предназначенное для отображения виртуальных объектов. Следует отметить, что в роли такого оборудования могут выступать как стационарные мониторы или проекционные экраны, размещённые в музее, так и личные электронные устройства посетителя: смартфоны или планшеты.

Практическая реализация CPS такого состава сталкивается со следующими проблемами, решение которых предлагается как часть формулируемой концепции.

Во-первых, музейные предметы, ввиду их хрупкости, ветхости и/или уникальности, зачастую недопустимо снабжать какими-либо электронными и электромеханическими устройствами, а также недопустимо организовывать прямое (например, тактильное) взаимодействие с ними посетителей. В такой ситуации в роли физических объектов CPS предлагается использовать не сами фондовые экземпляры, а их высокоточные реплики – реконструкции, выполненные посредством аддитивных технологий [2] с применением 3D-сканеров и 3D-принтеров.

Во-вторых, в настоящее время в музеях зачастую уже присутствует некоторый мультимедийный контент, отображаемый при помощи размещённого в музее электронного оборудования: «живые этикетки» (мониторы с отображаемой на них дополнительной информацией об экспонатах), мультимедийные инсталляции (например, виртуальные экспонаты, интерфейс которых построен на системах оптического распознавания жестов, таких, как MS Kinect), интерактивные киоски (отображающие какой-либо интерактивный тематический материал или организующие мини-игры, соответствующие тематике выставки) и др. Контент и оборудование функционируют внутри некоторой раз-

вёрнутой в музей цифровой инфраструктуры, к которой привыкли и которой умеют пользоваться ответственные за неё музейные сотрудники. При внедрении CPS встаёт вопрос максимального переиспользования имеющейся в музее элементной и контентной базы, чтобы, во-первых, минимизировать финансовые затраты, а во-вторых, снизить порог вхождения сотрудников. Иными словами, внедрение CPS должно происходить на принципах обогащения имеющейся цифровой инфраструктуры музея, а не полной её замены. Это, в свою очередь, требует наличия адаптивных инструментов организации CPS, позволяющих интегрировать различные TUI, системы управления контентом (англ. Content Management System, CMS) и средства его отображения (в частности – средства научной визуализации).

В качестве инструментария, удовлетворяющего указанным требованиям, предлагается использовать разработанную в рамках предыдущих исследований адаптивную мультиплатформенную систему научной визуализации SciVi [7]. Поведение этой системы управляется лежащей в её основе онтологической базой знаний, что обеспечивает её адаптивность и масштабируемость [7]. Возможность использования SciVi в качестве основы превращения существующих цифровых музейных инфраструктур в полноценные CPS обусловлена следующими функциями системы, доступными пользователям посредством высокоуровневого графического интерфейса:

1. Механизмы автоматизированной интеграции (включая прямую и обратную связь) со сторонними источниками данных, включая статические хранилища и динамические генераторы (программно-аппаратные решатели) [9].
2. Пополняемый набор настраиваемых механизмов предобработки данных, подлежащих визуализации [9].
3. Пополняемый набор настраиваемых механизмов, визуальных объектов и графических сцен для рендеринга данных [9].
4. Настраиваемые механизмы взаимодействия с аппаратными человеко-машинными интерфейсами [7].
5. Возможность автоматизированного создания легковесных копий SciVi, работающих в виде прошивок электронных устройств в экосистеме IoT [8].
6. Поддержка работы в режиме промежуточного ПО (англ. Middleware), обеспечивающего взаимодействие (в разных комбинациях) аппаратных устройств из экосистемы IoT, решателей, генерирующих данные, и визуализаторов, отображающих эти данные [7].

Благодаря вышеперечисленным функциям система SciVi может быть использована в роли набора соединительных механизмов для объединения IoT-устройств, хранилищ и генераторов данных, а также средств их визуализации в единую экосистему, в частности – в CPS. Следует отметить, что за счёт адаптивных интеграционных средств SciVi, любые из указанных элементов CPS могут быть как созданы на основе этой

системы с нуля, так и взяты в неизменном виде из существующей цифровой инфраструктуры музея. Тем самым оказывается возможным осуществить бесшовное встраивание CPS в музейную экспозицию.

Предложенная концепция была проверена на практике при создании различных киберфизических музейных экспонатов.

3. Киберфизический экспонат «Бонобо»

Киберфизический экспонат «Бонобо» является частью экспозиции «Бонобо. Фотовыставка о вымирающем виде человекообразных обезьян» в Государственном Дарвиновском музее (г. Москва) [12]. Он основан на 3D-модели черепа обезьяны бонобо (*Pan paniscus* Schwarz, 1929), полученной методом трёхмерного сканирования оригинала и предоставленной бельгийским Королевским музеем Центральной Африки [6]. Доступ к модели и её визуализация осуществляются посредством облачного сервиса Sketchfab [11]. Модель отображается в стандартном программном просмотрщике этого сервиса на установленном в музее терминале (киоске с компьютером и монитором, имеющем доступ в Интернет).

Создание экспоната происходило на принципах обогащения имеющейся в музее цифровой инфраструктуры: киоска с монитором, имеющего доступ к сервису Sketchfab, и беспроводной сети WiFi. Нововведением, превратившим имеющийся экспонат в киберфизический, стало IoT-устройство на базе микроконтроллера ESP8266 с датчиком пространственной ориентации (гиростабилизатором) GY-85 и тактовыми кнопками. Корпусом устройства была сделана распечатанная на 3D-принтере модель черепа бонобо. Устройство используется в качестве джойстика, управляющего отображаемой на мониторе киоска 3D-моделью: гиростабилизатор обеспечивает синхронизацию пространственной ориентации распечатанного черепа и 3D-модели, а нажатия размещённых на распечатанном черепе тактовых кнопок приводят к выводу на экране дополнительной информации о соответствующих зонах черепа. Текстовая информация продублирована аудиогидом.

Схема работы киберфизического экспоната «Бонобо» приведена на рис. 1. При создании данного экспоната система SciVi была использована для генерации прошивки IoT-устройства, обеспечивающего аппаратную часть TUI, и промежуточного ПО для трансляции команд от TUI сервису Sketchfab.

4. Киберфизический экспонат «Титанофон»

В основной экспозиции Музея пермских древностей находится анатомическая отливка титанофона (*Titanophoneus potens* Efremov, 1938), крупного хищного звероящера отряда Dinocerphalia, жившего в середине пермского периода. Для данного отряда характерна очень широкая внутривидовая изменчивость: различия между молодыми и взрослыми особями достаточны, чтобы принять их за разные виды, и даже ро-

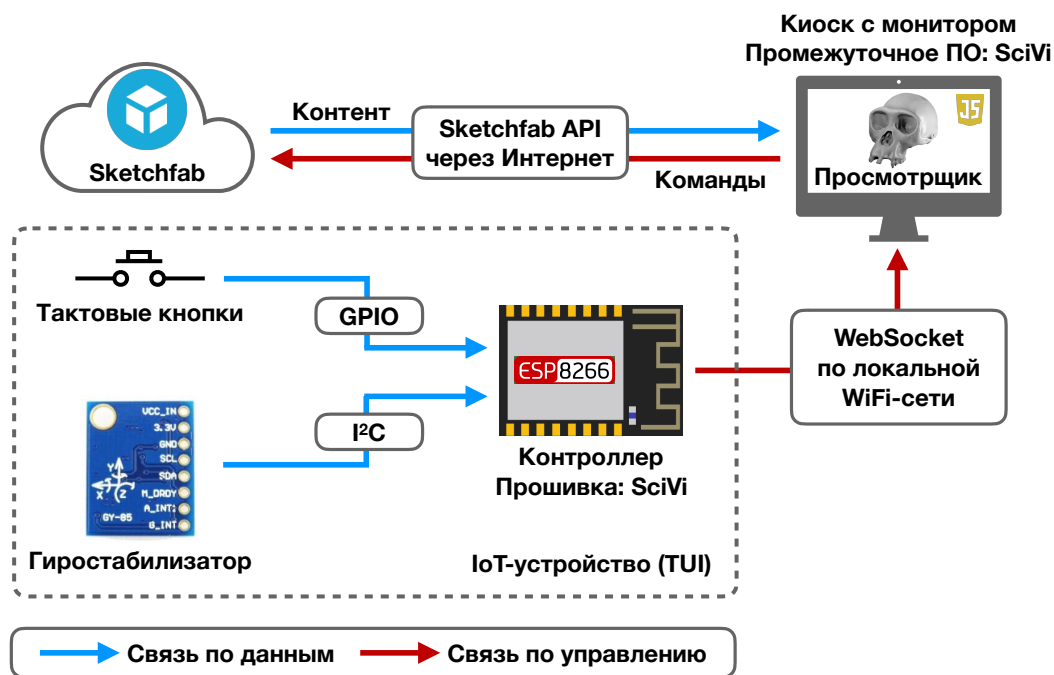


Рис. 1. Принципиальная схема работы киберфизического экспоната «Бонобо».

да. Ефремов в 1938 году описал титанофона по молодой особи (Скелет №157/1, Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН) [13]. В дальнейшем, в 2005 году, Ивахненко показал, что представитель вида *Doliosauriscus adamanteus* Orlov, 1958 является старым титанофоном [14]. Таким образом, имеющийся в Музее пермских древностей экспонат не даёт комплексного представления о морфологии вида.

Для решения данной проблемы было предложено изготовить киберфизический экспонат, состоящий из IoT-устройства и установленного в музее компьютера с монитором. Корпусом IoT-устройства являются две распечатанные на 3D-принтере модели черепов молодого и старого титанофона соответственно. Модели построены в Музее пермских древностей на основе материалов, предоставленных московским Палеонтологическим институтом РАН. Черепа размещены на одной линии, на расстоянии 40 см. В один из черепов вмонтирован датчик расстояния до препятствия VL53L0X, соединённый с микроконтроллером ESP8266. Микроконтроллер передаёт измеренное датчиком расстояние по протоколу WebSocket (посредством беспроводного WiFi-соединения) на компьютер, где это расстояние интерпретируется как параметр морфинга между тремя 3D-моделями черепов: молодого, среднего и старого титанофонов. Посетитель музея, помещая руку между черепами, может наблюдать за возрастными изменениям данного животного.

Схема работы киберфизического экспоната «Титанофон» приведена на рис. 2. При создании данного экспоната система SciVi была использована для генерации прошивки IoT-устройства и визуализации результатов морфинга 3D-моделей черепов титанофона.

5. Заключение

В результате проведённых исследований была предложена концепция развёртывания CPS в музейном пространстве. Ключевой идеей концепции является применение адаптивной мультиплатформенной системы научной визуализации и визуальной аналитики SciVi. Адаптационные механизмы этой системы позволяют использовать её в качестве эффективного связующего программного обеспечения для обогащения имеющейся в музее цифровой инфраструктуры новыми средствами управления мультимедийным контентом. Тем самым достигается бесшовное встраивание новых интерактивных возможностей в имеющуюся музейную экспозицию, например, создание на основе технологий IoT осязаемых интерфейсов к существующим музейным предметам.

Применимость и эффективность предложенной концепции проверена на практике при создании двух киберфизических музейных экспонатов: черепа обезьяны бонобо в Государственном Дарвиновском музее и черепов титанофона в Музее пермских древностей. Использование TUI в данных экспонатах позволило расширить спектр представляемой ими информации, обеспечивая ранее невозможное тактильное взаимодействие посетителя с музейными объектами и необходимую обратную связь при этом взаимодействии.

В будущем планируется изучение вопросов защиты беспроводных киберфизических экспонатов от кражи, а также дальнейшее обогащение цифровой инфраструктуры музеев тактильными пользовательскими интерфейсами.

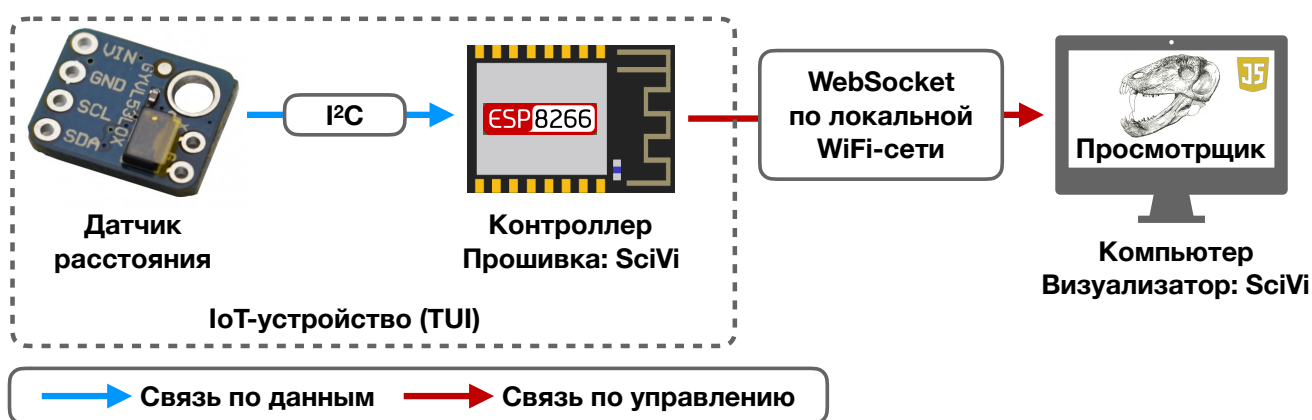


Рис. 2. Принципиальная схема работы киберфизического экспоната «Титанофон».

6. Благодарности

Авторы выражают благодарность Авроре Матис (Aurore Mathys), Королевский музей Центральной Африки, Бельгия, за предоставление 3D-скана черепа обезьяны бонобо.

Авторы выражают благодарность Константину Тарасенко, Валерию Голубеву, Андрею Сенникову, Палеонтологический институт имени А.А. Борисяка РАН, Москва, за предоставление доступа к голотипу звероящера титанофона.

7. Литература

- [1] Chianese, A., Piccialli, F. Designing a Smart Museum: when Cultural Heritage Joins IoT // Third International Conference on Technologies and Applications for Smart Cities (I-TASC'14). – 2014. – 7 p. DOI: 10.1109/NGMAST.2014.21.
- [2] Hassanin, H., Jiang, K. Chapter 10 - Net Shape Manufacture of Freestanding Ceramic Micro-components through Soft Lithography // Micromanufacturing Engineering and Technology (Second Edition). – Elsevier, 2015. – PP. 239–256. DOI: 10.1016/B978-0-323-31149-6.00010-4.
- [3] Ishii, H., Ullmer, B. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms // CHI '97 Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – ACM, 1997. – PP. 234–241. DOI: 10.1145/258549.258715.
- [4] Marr, B. Why Everyone Must Get Ready For The 4th Industrial Revolution // Forbes. – 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2016/04/05/why-everyone-must-get-ready-for-4th-industrial-revolution/> (Дата обращения 17.08.2019).
- [5] Rose, K., Eldridge, S., Chapin, L. The Internet of Things: an Overview // The Internet Society (ISOC). – 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.internetsociety.org/resources/doc/2015/iot-overview> (Дата обращения 17.08.2019).
- [6] Royal Museum for Central Africa [Электронный ресурс]. URL: <https://www.africamuseum.be/> (Дата обращения 17.08.2019).
- [7] Ryabinin, K., Chuprina S., Belousov K. Ontology-Driven Automation of IoT-Based Human-Machine Interfaces Development // Lecture Notes in Computer Science. – Springer, 2019. – Vol. 11540. – P. 110–124. DOI: 10.1007/978-3-030-22750-0_9.
- [8] Ryabinin K., Kolesnik M. Using IoT Devices Powered by Scientific Visualization Tools to Create Interactive Paleontological Museum Exhibitions // Proceedings of 28th International Conference on Computer Graphics and Vision “GraphiCon 2018”. – Tomsk, 2018. – PP. 70–73.
- [9] Ryabinin, K., Chuprina, S. High-Level Toolset for Comprehensive Visual Data Analysis and Model Validation // Procedia Computer Science. – Elsevier, 2017. – Vol. 108. – PP. 2090–2099. DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.050.
- [10] Sanfelice, R. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach // Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice / Rawat D., Rodrigues J., Stojmenovic I. – CRC Press, 2015. – PP. 3–31. DOI: 10.1201/b19290-3.
- [11] Sketchfab [Электронный ресурс]. URL: <https://sketchfab.com/> (Дата обращения 17.08.2019).
- [12] Бонобо. Фотовыставка о вымирающем виде человекообразных обезьян. – 2018 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.darwinmuseum.ru/projects/exhibition/bonobo> (Дата обращения 17.08.2019).
- [13] Ефремов И.А. Некоторые новые пермские рептилии СССР // Докл. АН СССР, отд. геол. – 1938. – Т. 19, № 9. – С. 771–776.
- [14] Ивахненко М.Ф. Тетраподы Восточно-Европейского плакката – позднепалеозойского территориально-природного комплекса. – Пермский областной краеведческий музей, 2001. – 200 с.

Об авторах

Рябинин Константин Валентинович, к.ф.-м.н., доцент кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: kostya.gyabinin@gmail.com.

Ахтамзян Амир Ильдарович, старший научный сотрудник отдела мультимедийных технологий Государственного Дарвиновского музея. E-mail: darnhalm@gmail.com.

Колесник Мария Александровна, магистр палеобиологии, ведущий научный сотрудник отдела природы Пермского краеведческого музея. E-mail: kolesnik.ma@outlook.com.

Сударикова Елена Владимировна, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела Государственного Дарвиновского музея. E-mail: elsud@darwin.museum.ru.

Перцептивно-когнитивный интерфейс для систем визуальной аналитики

К.В. Рябинин¹, К.И. Белоусов¹, С.И. Чуприна¹, Н.Л. Зелянская¹
kostya.ryabinin@gmail.com|belousovki@gmail.com|chuprinasin@inbox.ru|zelyanskaya@gmail.com

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Данная работа посвящена вопросам использования технологий Интернета вещей для разработки аппаратных человеко-машинных интерфейсов, позволяющих расширить возможности систем визуальной аналитики путём задействования в процессе анализа дополнительных модальностей: моторных, аудиальных и т. п. Это, в свою очередь, позволяет ускорить семантическую фильтрацию и интерпретацию анализируемых данных, увеличив тем самым производительность труда эксперта. Предложена концепция унификации и автоматизации процессов программирования и подключения аппаратных человеко-машинных интерфейсов на основе методов и средств онтологического инжиниринга. Концепция проверена на практике при решении задач автоматизированного выявления взаимосвязей между психологическими чертами личности носителей языка и их речевого поведения.

Ключевые слова: визуальная аналитика, Интернет вещей, человеко-машинный интерфейс, онтологический инжиниринг.

Perceptive-Cognitive User Interface for Visual Analytics Systems

K.V. Ryabinin¹, K.I. Belousov¹, S.I. Chuprina¹, N.L. Zelyanskaya¹
kostya.ryabinin@gmail.com|belousovki@gmail.com|chuprinasin@inbox.ru|zelyanskaya@gmail.com

¹Perm State University, Perm, Russia

The paper is devoted to using Internet of Things technologies for hardware human-machine interfaces development. Thanks to these technologies, it may be possible to improve the capabilities of visual analytics systems with multiple modalities: movements, audio, etc. It can speed up semantic data filtering and interpretation, increasing the efficiency of analytics. We suggest using ontology engineering methods and tools to automate both the programming of custom hardware human-machine interfaces and connecting them to the third-party software. The proposed concept is tested by solving the real-world tasks of discovering the relationships between the psychological characteristics of the native speakers and their verbal behavior.

Keywords: visual analytics, Internet of Things, human-machine interface, ontology engineering.

1. Введение

Развитие технологий Интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT) [12] и сопутствующей им парадигмы «туманных вычислений» (англ. Fog Computing) [20] открывает широкие возможности по созданию т. н. киберфизических систем – (англ. Cyber-Physical Systems) – систем с элементами реального и виртуального миров, которые тесно связывают в себе эти две реальности и обеспечивают интеграцию вычислительных ресурсов в физические сущности [17]. Ключевой парадигмой человеко-машинного взаимодействия в контексте киберфизических систем можно считать т. н. осязаемые интерфейсы (англ. Tangible User Interfaces, TUI), концепция которых была предложена Хироши Ишии (англ. Hiroshi Ishii) ещё в 1997 году [7]. Идея TUI заключается в том, что воздействие на виртуальные объекты и обратная связь с ними происходит через их физические «аватары» – объекты реального мира, которые по своей структуре не являются универсальными для всех виртуальных объектов (как, например, клавиатура или мышь), а близки к своим виртуальным прототипам и при этом зачастую имеют какой-то смысл и за пределами виртуального мира (например, могут являться вполне конкретными инструментами, предметами интерьера и т. п.).

По своей природе TUI предполагают мультимодальное взаимодействие с человеком, выходящее далеко за пределы классических кнопочных интерфейсов. Сюда относится, в первую очередь, активное использование тактильного канала (что, в частности, оказывается весьма актуальным для людей с ограниченными возможностями зрения) наряду с классическим аудиовизуальным. В зависимости от характера решаемых задач, могут потребоваться и другие модальности, например, моторная (пространственные жесты), а также различные их комбинации.

На наш взгляд, мультимодальная природа киберфизических систем открывает для человека широкие возможности в области аналитики сложноструктурированных данных. Использование TUI для взаимодействия с системами визуальной аналитики даёт возможность эксперту более эффективно использовать свои перцептивные и когнитивные механизмы для осмысления особенностей анализируемых объектов, и тем самым ускорить процесс и качество анализа.

Для обозначения средств киберфизического взаимодействия человека с системой визуальной аналитики используется термин «перцептивно-когнитивный интерфейс» (англ. Perceptive-Cognitive Interface, PCI) – эргономичный и адаптированный к конкретной решаемой задаче мультимодальный интерфейс, задей-

ствующий сенсорно-моторную сферу человека и способствующий повышению скорости и качества анализа. Целью данной работы является разработка концепции перцептивно-когнитивного интерфейса для задач мультимодальной аналитики, а также реализация соответствующих программно-аппаратных средств для подтверждения на практике жизнеспособности предлагаемой концепции.

2. Концепция перцептивно-когнитивного интерфейса

Создание перцептивно-когнитивных интерфейсов опирается на особенности человеческой психики, которая приспособлена обрабатывать информацию, транслируемую всеми органами чувственного восприятия, и согласовывать эти разнородные мультимодальные сигналы для формирования целостной картины мира. При этом большая часть понимаемой и сознательно обрабатываемой информации передается в процессе вербальной коммуникации, которая в основном осуществляется с помощью естественного языка по аудиальному или визуальному каналам. Однако способность психики структурировать информацию, полученную по разным каналам восприятия, означает, что остальные доступные человеку модусы чувственного бытия также обладают большим потенциалом для понимания и познания. Языковая семантика тесно связана с сенсомоторной сферой человека. Об этом свидетельствуют исследования в области нейронаук и когнитивной психологии (т. н. теории воплощения, англ. Embodiment Theories – теории, подразумевающие рассмотрение сознания человека во взаимосвязи с физическими факторами окружающей среды) [2, 5, 11]. Примерами могут служить выявленные закономерности между произнесением слов с семантикой пищи и слюноотделением [19], реакциями расширения или сужения зрачка на слова со значениями «темноты» и «яркости» [8], проявлениями двигательной активности как реакции на слова со значением действий [1] и др. Кроме того, было установлено, что слова, связанные с активацией согласованного с семантикой слова сенсомоторного опыта, способствуют пониманию сообщений, а слова с семантикой контрастирующего (не согласованного) сенсомоторного опыта, напротив, препятствуют пониманию вербальной информации.

Слова (рассматриваемые в контексте), имеющие несколько сенсомоторных кодов, легче и быстрее опознаются [6], что находит практическое применение в процессе обучения [9] и в технологиях поиска мультимодального (визуального и аудиального) контента [4]. Связь слов абстрактной семантики с сенсомоторной сферой описывается в контексте теорий воплощения иначе: либо посредством введенной Дж. Лакоффом теории концептуальной метафоры [5], либо посредством идеи более тесной связи абстрактных слов с эмоциональной сферой [10].

Идея перцептивно-когнитивных интерфейсов основывается на «теориях воплощения» и технологических

возможностях использования мультимодальных каналов для передачи естественно-языковой информации (ЕЯ-информации). С технологической точки зрения такая возможность обеспечивается системой сенсоров, используемых для активации текстовых фрагментов определенной чувственной (сенсомоторной) семантики. Для активации семантика сенсоров должна быть связана с семантикой языкового контента с помощью общей формальной модели, в качестве которой может выступать онтология, связывающая уровни: а) возможных типов сенсоров (температура, звук, свет, перемещение в пространстве – моторика – и др.) с б) значений сенсоров (цвет – белый, черный и др.; перемещение в пространстве – вверх, вниз, вправо, влево и т.д.) и в) наименованиями семантических полей, состоящих из значений слов/словосочетаний с перцептивной семантикой. Здесь под семантическим полем понимается «совокупность языковых единиц, объединенных общностью содержания и отражающих понятийное, предметное или функциональное сходство обозначаемых явлений» [21].

Перцептивно-когнитивный интерфейс в системах мультимодальной аналитики позволяет эксперту использовать свой перцептивно-когнитивный опыт для поиска нужной ему информации. Стратегия поиска опирается на генеральную гипотезу, в процессе доказательства которой используются многочисленные операциональные гипотезы (например, «Есть ли в анализируемых данных такие сообщения, в которых <условие>»). Операциональные гипотезы возникают благодаря полученным знаниям о наличии взаимосвязей отдельных модальных значений друг с другом и их регулярному присутствию в текстах, т. е. их семантической шаблонизации. В таком контексте перцептивно-когнитивный опыт эксперта и операциональные гипотезы становятся частью человеко-машинного интерфейса.

На рис. 1 представлен фрагмент онтологической модели РС1 для датчиков перемещения в пространстве (для примера описаны только четыре вида перемещения: вверх, вниз, вправо и влево). Данная онтология используется для онтологически управляемого решения задачи определения типа личности носителя языка в зависимости от использования им слов с определенной перцептивной семантикой в рамках государственного задания ПГНИУ на 2017–2019 гг., проект № 34.1505.2017/4.6 «Речевое и неречевое поведение пользователя социальной сети: социокогнитивное моделирование с использованием методов машинного обучения и геоинформационных технологий».

В приведённом фрагменте категориальная семантика (Category) вербальных сообщений представлена **пространственной** (Spatial) и **темпоральной** (Temporal) субкатегориями. Пространственность, в свою очередь, представлена направлением (Direction) и скоростью (Speed) перемещения. Направление перемещения реализуется посредством антонимических пар: **движение вверх** (Moving Up) и **движение вниз**

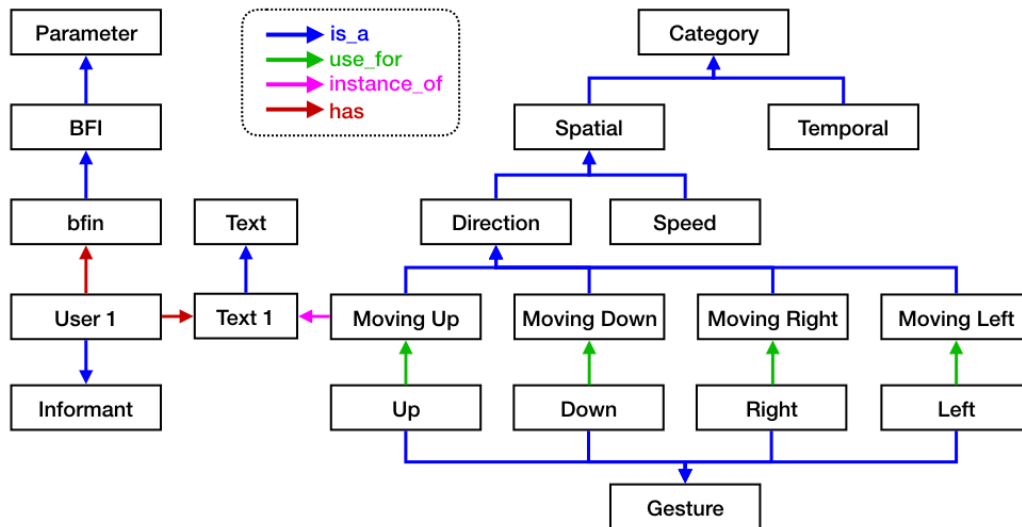


Рис. 1. Фрагмент онтологии перцептивно-когнитивного интерфейса.

(Moving Down), **движение вправо** (Moving Right) и **движение влево** (Moving Left). Заметим, что речь в данном случае идет только о семантике сообщений (например, «он *поднял* руки *над* головой», «*смотри* в *нижнем* левом углу экрана» и т.п.). С семантикой, реализованной в сообщениях, непосредственно связаны детектируемые жесты Up, Down, Left и Right, которые, в свою очередь, могут использоваться для управления процессом визуального анализа семантики сообщений. Например, при осуществлении с помощью РСІ жеста Up должна осуществляться фильтрация контента, в котором есть семантика движения вверх (Moving Up).

Экземпляр Text 1, является с одной стороны представителем класса сообщений (Text), а с другой принадлежит определенному автору (User 1). User 1, в свою очередь, является информантом (Informant), который имеет а) некоторые созданные им тексты и б) набор параметров (Parameter), например, психологических параметров большого пятифакторного опросника личности BFI (и его значений, например, bfin – выраженность нейротизма: черты характера, предрасполагающей к переживанию негативных эмоций) [18].

Таким образом, онтологическая модель позволяет с помощью жеста фильтровать контент в соответствии с семантикой используемого жеста, а далее анализировать статистику параметров личностных характеристик авторов текстов, в которых реализована данная семантика. Представленная онтологическая модель реализована в ИС Семограф [3]. Например, если мы хотим узнать, какой процент информантов с высокими показателями нейротизма, обращается в своих высказываниях к семантике перемещения вверх, нам достаточно в используемом РСІ сделать рукой жест Up.

Аппаратной частью РСІ при решении данной задачи выступает перчатка-манипулятор, детектирующая пространственные жесты человека при помощи электронного гиросtabilизатора (датчика пространственной ориентации) MPU6050 и программируемого мик-

роконтроллера ESP8266. Программной частью выступает система визуальной аналитики SciVi [16], распознающая жесты и использующая их в качестве семантических фильтров для визуального анализа графа, демонстрирующего выявленные с использованием методов машинного обучения взаимосвязи между языковым поведением людей и их психологическими характеристиками [13, 22, 23].

3. Перцептивно-когнитивный интерфейс в системе визуальной аналитики SciVi

Особенностью РСІ для систем визуальной мультимодальной аналитики по сравнению с традиционными человеко-машинными интерфейсами (такими, например, как клавиатура и мышь) является его специализация относительно решаемых задач. В связи с этим появляется острая необходимость в высокоуровневых инструментах создания таких интерфейсов, чтобы аналитик для адаптации к специфике решаемой задачи мог самостоятельно без обращения к ИТ-специалистам конструировать их из некоторых заранее подготовленных программно-аппаратных блоков. Жизненный цикл РСІ на платформе SciVi включает в себя следующие основные этапы:

1. Проектирование.
2. Сборка аппаратной части.
3. Написание и установка программной части (прошивки для устройства и драйвера для компьютера).
4. Калибровка сенсоров аппаратной части.
5. Тестирование и отладка взаимодействия РСІ и ПО, которым он управляет.
6. Использование РСІ для целей аналитики.

Традиционно для каждого этапа используются отдельные, зачастую не связанные между собой инструменты. В рамках данной работы мы предлагаем унифицированный подход к созданию и использованию РСІ с применением легко адаптируемых к специфике решаемой задачи методов и средств системы визуальной

аналитики SciVi [16]. SciVi включает в себя онтологически управляемые высокоуровневые механизмы настройки как на различные источники данных, так и на средства генерации прошивок для легковесных электронных устройств разного типа, а также на способы декларирования алгоритмов фильтрации и визуализации данных. Благодаря этому SciVi обеспечивает единый инструментарий для реализации перечисленных выше этапов 3–6, делая процесс создания и использования PCI максимально прозрачным.

Этапы проектирования и сборки аппаратной части PCI на данный момент не имеют средств высокоуровневой автоматизации, хотя входящая в состав SciVi онтология электронных компонентов [16] выполняет, среди прочего, и рекомендательную функцию, так как содержит описание разнообразных микроконтроллеров, сенсоров, актуаторов и коммутационных компонентов, а также способов их взаимодействия.

Входящий в состав SciVi механизм генерации прошивок функционирует на основе указанной выше онтологии электронных компонентов [15]. Логика работы PCI, а также алгоритм управления процессом визуализации и анализа, декларируются при помощи диаграммы потоков данных (англ. Data Flow Diagram, DFD), составляемой пользователем посредством встроенного в SciVi высокоуровневого графического редактора. Все это в совокупности позволяет практически полностью автоматизировать процесс разработки программной части PCI. На рис. 2 приведена DFD, используемая в задаче генерации прошивки микроконтроллера ESP8266 для перчатки-манипулятора.

Калибровка сенсоров в значительной степени упрощается за счёт возможности визуального мониторинга генерируемых ими данных. Встроенный в SciVi редактор DFD позволяет легко изменять способ отображения данных, подбирая наиболее наглядный и информативный с точки зрения оценки погрешности измерений [14]. Наличие в SciVi возможностей автоматизированной генерации интерфейса для обратной связи с IoT-устройством позволяют осуществлять калибровку не только на аппаратном уровне, но и на программном (например, вводя настраиваемые фильтры данных, поступающих от сенсора, с целью нивелирования погрешности и/или шума в измерениях) [14].

Отладка взаимодействия PCI с конкретной сценой, которую визуализирует SciVi, также основана на возможности быстрой модификации DFD в части выбора нужного алгоритма визуализации, семантических фильтров и способов их комплексирования, а также описания способов взаимодействия с сенсорами PCI. Тем самым можно быстро проверить, насколько конкретный PCI удобен для тех или иных действий, или же улучшить его эргономику за счёт дополнительных фильтров для сигналов с сенсоров (например, оказывается возможным экспериментально подобрать пороговые значения триггеров, управляемых через PCI и т.п.). Принцип управляемости онтологиями делает систему SciVi легко расширяемой и адаптируемой к широко-

му кругу различных задач, для эффективного решения которых эксперты-аналитики могут использовать как традиционный пользовательский интерфейс, так и PCI, а также, если необходимо, их комбинацию.

На рис. 3а показана DFD, описывающая отображение разных жестов на языковую семантику. Вершина «Glove» описывает точку связи с перчаткой-манипулятором. Эта связь устанавливается автоматически на основе онтологического профиля перчатки-манипулятора. Вершины «Gesture Up», «Gesture Down», «Gesture Left» и «Gesture Right» описывают детекторы соответствующих жестов. Ключевым элементом DFD является вершина «Classifier», задающая генератор фильтров данных в соответствии с оповещениями, поступающими от детекторов жестов. Алгоритм работы этого генератора управляется онтологией, фрагмент которой был представлен на рис. 1. Вершина «BFI Graph» задаёт способ отображения результата – круговой граф, показанный на рис. 3б. В соответствии с приведённой выше DFD, фильтрация данных в круговом графе управляется перчаткой-манипулятором.

Благодаря интеграции методов онтологического инжиниринга и IoT, в рамках данной работы удалось расширить возможности системы визуальной аналитики SciVi перцептивно-когнитивным человеко-машинным интерфейсом. Тем самым в рамках этой системы был осуществлён переход от традиционной визуальной аналитики к мультимодальной, задействующей одновременно визуальный и моторный каналы эксперта. С использованием предложенных методов и средств была решена практическая задача, связанная с выявлением и анализом зависимостей между психологическими параметрами и речевым поведением пользователей социальных сетей. Разработанный в соответствии с предложенным подходом PCI позволяет при помощи пространственных жестов человека автоматизировать поиск в анализируемых данных языковых средств, выражающих определённую пространственную семантику. Жесты детектируются специальной перчаткой-манипулятором, функционирующей на основе датчика пространственной ориентации, по которым генерируются поисковые фильтры. Такой способ поиска ускоряет процесс анализа и делает его более интуитивно понятным.

В дальнейшем планируется расширить набор поддерживаемых PCI модальностей тактильным каналом, используя различные виды сенсоров и различные способы их комплексирования в сенсорные сети на принципах технологий IoT. Кроме того предстоит исследовать, в какой мере перцептивно-когнитивный опыт эксперта является частью PCI, ведь в процессе мультимодальной аналитической деятельности использование такого типа интерфейса может качественно трансформировать перцептивно-когнитивный опыт самого эксперта вследствие возможного образования дополнительных нейронных связей между зрительными, слуховыми, моторными и др. центрами. Исследования подобного рода будут проводиться с использовани-

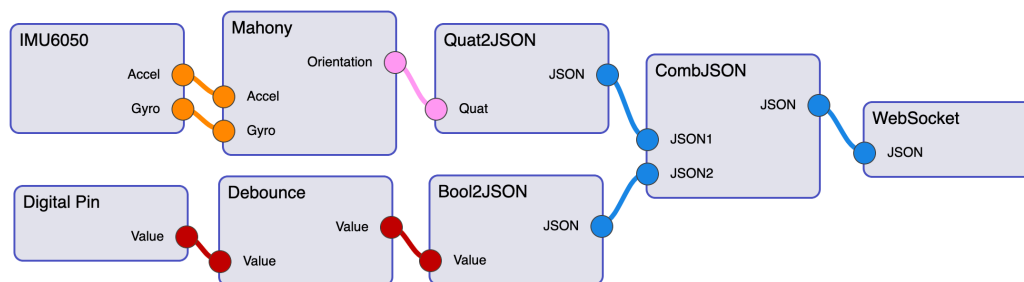


Рис. 2. Диаграмма потока данных для задачи генерации прошивки.

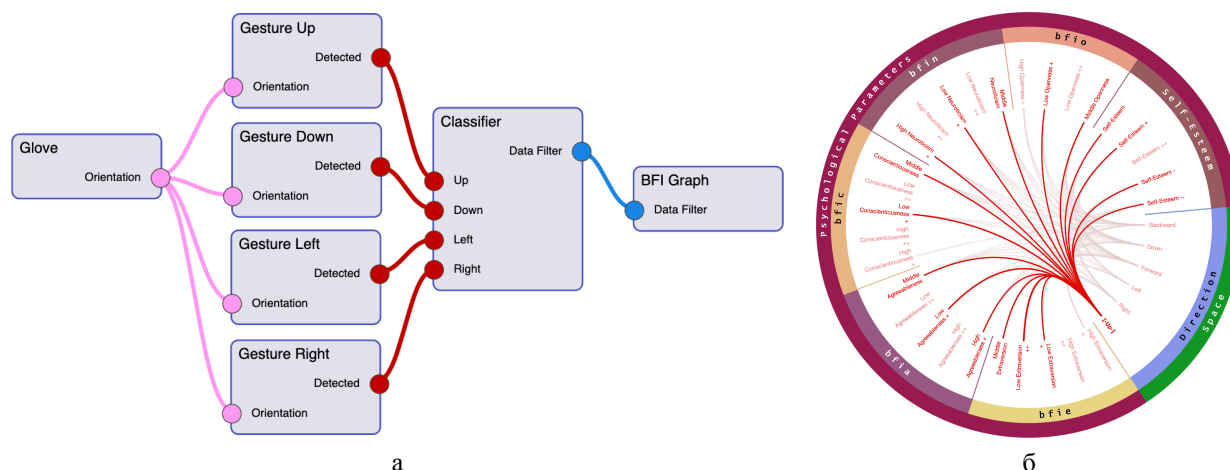


Рис. 3. Диаграмма потока данных (а) и построенный на её основе круговой граф (б) в среде системы SciVi

ем возможностей 128-канального нейровизора BE Plus LTM. В перспективе это может позволить значительно усовершенствовать методы и средства автоматизированной трансформации IoT-систем класса машинно-машинного взаимодействия в человеко-центричные.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект 34.1505.2017/4.6).

5. Литература

- [1] Aravena P., Delevoye-Turrell Y., Deprez V., Cheylus A., Paulignan Y., Frak V., Nazir T. Grip Force Reveals the Context Sensitivity of Language-Induced Motor Activity during «Action Words» Processing: Evidence from Sentential Negation // PLoS ONE. – 2012. – V. 7, I. 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0050287
- [2] Barsalou L. Perceptual Symbol Systems // Behavioral and Brain Sciences. – 1999. – V. 22. – PP. 577–609.
- [3] Belousov K., Erofeeva E., Leshchenko Y., Baranov D. «Semograph» Information System as a Framework for Network-Based Science and Education // Smart Education and e-Learning. – Springer, 2017. – PP. 263–272. DOI: 10.1007/978-3-319-59451-4_26.
- [4] Chang Sh.-F., Ellis D., Jiang W., Lee K., Yanagawa A., Loui A., Luo J. Large-Scale Multimodal Semantic Concept Detection for Consumer Video // Multimedia Information Retrieval. – 2007. – P. 255–264. DOI: 10.1145/1290082.1290118.
- [5] Gallese V., Lakoff G. The Brain Concepts: the Role of the Sensorymotor System in Conceptual Structure // Cognitive Neuropsychology. – 2005. – V. 22, I. 3. – PP. 455–479. DOI: 10.1080/02643290442000310.
- [6] Hoffman P., Lambon Ralph M. Shapes, Scents and Sounds: Quantifying the Full Multi-Sensory Basis of Conceptual Knowledge // Neuropsychologia. – Elsevier, 2013. – V. 51, I. 1. – PP. 14–25. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.009.
- [7] Ishii H., Ullmer B. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms // CHI '97 Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – ACM, 1997. – PP. 234–241. DOI: 10.1145/258549.258715.
- [8] Laeng B., Sulutvedt U. The Eye Pupil Adjusts to Imaginary Light // Psychological Science. – 2013. – V. 25, I. 1. – PP. 188–197. DOI: 10.1177/0956797613503556.
- [9] Lockwood G., Hagoort P., Dingemans M. How Iconicity Helps People Learn New Words: Neural Correlates and Individual Differences in Sound-Symbolic Bootstrapping // Collabra: Psychology. – 2016. – V. 2, I. 1. – PP. 1–15.

- DOI: 10.1525/collabra.42.
- [10] Meteyard L., Cuadrado S., Bahrami B., Vigliocco G. Coming of Age: a Review of Embodiment and the Neuroscience of Semantics // *Cortex*. – Elsevier, 2012. – V. 48, I. 7. – PP. 788–804. DOI: 10.1016/j.cortex.2010.11.002.
- [11] Pulvermüller F. Words in the Brain's Language // *Behavioral and Brain Sciences*. – 1999. – V. 22. – PP. 253–279.
- [12] Rose K., Eldridge S., Chapin L. The Internet of Things: an Overview // *The Internet Society (ISOC)*. – 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.internetsociety.org/resources/doc/2015/iot-overview> (Дата обращения 17.07.2019).
- [13] Ryabiniin K.V., Belousov K.I., Chuprina S.I., Shchebetenko S.A., Permyakov S.S. Visual Analytics Tools for Systematic Exploration of Multi-Parameter Data of Social Web-Based Service Users // *Scientific Visualization*. – M.: National Research Nuclear University “MEPhI”, 2018. – Q. 3, V. 10, No. 4. – PP. 82–99. DOI: 10.26583/sv.10.4.07.
- [14] Ryabiniin K., Chuprina S. High-Level Toolset For Comprehensive Visual Data Analysis and Model Validation // *Procedia Computer Science*. – Elsevier, 2017. – V. 108. – PP. 2090–2099. DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.050.
- [15] Ryabiniin K., Chuprina S., Belousov K. Ontology-Driven Automation of IoT-Based Human-Machine Interfaces Development // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, 2019. – V. 11540. – PP. 110–124. DOI: 10.1007/978-3-030-22750-0_9.
- [16] Ryabiniin K., Chuprina S., Kolesnik M. Calibration and Monitoring of IoT Devices by Means of Embedded Scientific Visualization Tools // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, 2018. – V. 10861. – PP. 655–668. DOI: 10.1007/978-3-319-93701-4_52.
- [17] Sanfelice R. Analysis and Design of Cyber-Physical Systems. A Hybrid Control Systems Approach // *Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice* / Rawat D., Rodrigues J., Stojmenovic I. – CRC Press, 2015. – PP. 3–31. DOI: 10.1201/b19290-3.
- [18] Shchebetenko S. Reflexive Characteristic Adaptations Explain Sex Differences in the Big Five: but not in Neuroticism // *Personality and Individual Differences*. – 2017. – V. 111. – PP. 153–156. DOI: 10.1016/j.paid.2017.02.013.
- [19] Staats A., Hammond O. Natural Words as Physiological Conditioned Stimuli: Food-Word-Elicited Salivation and Deprivation Effects // *Journal of Experimental Psychology*. – 1972. – V. 96, I. 1. – PP. 206–208. DOI: 10.1037/h0033508.
- [20] Zhang P., Zhou M., Fortino G. Security and trust issues in Fog computing: A survey // *Future Generation Computer Systems*. – Elsevier, 2018. – V. 88. – PP. 16–27. DOI: 10.1016/j.future.2018.05.008.
- [21] Дуров А.В. Конспект лекций по курсу «Теоретическая и прикладная лингвистика» / А. В. Дуров. – 2018 [Электронный ресурс]. – URL: www.durov.com/study/bilety-1718.docx (Дата обращения 17.07.2019).
- [22] Рябинин К.В., Баранов Д.А., Белоусов К.И. Интеграция инструментария научной визуализации SciVi с информационной системой Семограф // *Труды 27-й Международной конференции GraphiCon 2017*. – Пермь, 2017. – С. 138–141.
- [23] Рябинин К.В., Чуприна С.И., Белоусов К.И., Пермяков С.С. Методы визуальной аналитики вариативности речевого поведения пользователей социальных сетей в зависимости от психологических черт личности // *Труды 28-й Международной конференции GraphiCon 2018*. – Томск, 2018. – С. 163–167.

Об авторах

Рябинин Константин Валентинович, к.ф.-м.н., доцент кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: kostya.gyabiniin@gmail.com.

Белоусов Константин Игоревич, д.ф.н., профессор кафедры теоретического и прикладного языкознания Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: belousovki@gmail.com.

Чуприна Светлана Игоревна, к.ф.-м.н., доцент кафедры математического обеспечения вычислительных систем Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: chuprinass@inbox.ru.

Зелянская Наталья Львовна, д.ф.н., доцент кафедры журналистики и массовых коммуникаций Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: zelyanskaya@gmail.com.

Моделирование индикатрис рассеяния лазерного излучения малыми сферическими поглощающими частицами

М.В. Сапронов¹, Н.М. Скорнякова¹

maks-sapronov@yandex.ru|nmskorn@mail.ru

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия;

Рассмотрены явление упругого рассеяния света на сферических поглощающих частицах и способ его количественного описания в рамках теории Г. Ми. Разработан алгоритм расчета величины относительной интенсивности рассеянного излучения в произвольном направлении и получена программа моделирования 3D-индикатрис рассеяния. Представлены модели 3D-индикатрис рассеяния лазерного линейно поляризованного излучения на прозрачных и поглощающих сферических частицах. Проведен анализ влияния поглощения света на форму относительного углового распределения интенсивности рассеянного излучения на частицах различного размера. Визуализирована динамика формы 3D-индикатрисы рассеяния на поглощающей частице при изменении ее радиуса. Определены потенциальные области практического применения программы и выявлены факторы, ограничивающие ее использование для расчета рассеяния на системах реальных частиц.

Ключевые слова: рассеяние Рэлея, индикатриса рассеяния, компьютерное 3D-моделирование, визуализация динамики.

The Laser Radiation Scattering by the Small Spherical Absorbing Particles Modelling

M.V. Sapronov¹, N.M. Skornyakova¹

maks-sapronov@yandex.ru|nmskorn@mail.ru

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia;

The paper deals with the elastic light scattering on spherical absorbing particles phenomenon and the method of its quantitative description in the framework of the theory of G. Mi. An algorithm for calculating the scattered radiation relative intensity in an arbitrary direction has been developed and a modeling 3D scattering indicatrices program has been obtained. The models of 3D indicatrix scattering laser linearly polarized radiation on transparent and absorbing spherical particles are presented. The analysis of the light absorption effect on the relative angular distribution shape of the scattered radiation intensity on particles of various sizes has been carried out. The dynamics of the scattering 3D indicatrix shape on an absorbing particle as its radius changes has been visualized. The potential areas of the program practical application have been identified. The factors limiting to use program for calculations of scattering on real particles systems has been revealed.

Keywords: Rayleigh scattering, scatter indicatrices, computer 3D modeling, dynamics visualization.

1. Введение

Эффект рассеяния света на молекулах и атомах вещества до сих пор мало изучен и не имеет завершеного теоретического описания несмотря на его повсеместность и фундаментальную значимость в оптике. Для строго теоретического анализа этого явления требуется использовать квантово-волновой подход, что является весьма трудоемкой задачей, которая до настоящего времени осложнялась еще и тем, что экспериментальное исследование рассеяния Рэлея не представлялось возможным по технологическим причинам [3].

Улучшение параметров компонентов оптико-электронной базы в результате ее непрерывного технического развития, в частности, величины энергии, переносимой импульсом излучения современных твердотельных лазеров, и чувствительности приемников оптического излучения, делает возможным экспериментальное исследование рассеяния Рэлея и открывает широкое поле для научной деятельности [5].

Практический интерес к упругому молекулярному рассеянию обоснован перспективами создания оптического метода диагностики потоков плазмы и разогретого газа с целью определения полей концентрации вещества и температуры. Доступные средства подобных измерений в газовых средах при высокой температуре сильно ограничены или вовсе отсутствуют. Высокий потенциал идеи использования эффекта Рэлеевского рассеяния в основе принципа работы метода диагностики связан главным образом с существованием прямой

пропорциональной зависимости между относительной интенсивностью рассеянного излучения и температурой рассеивающего центра, возведенной в 4-ую степень [2]. Столь резкая температурная зависимость ведет к увеличению точности количественной диагностики, в то время как точность существующих методов уменьшается. К остальным преимуществам метода можно отнести дифференциальный характер измерений, отсутствие необходимости искусственного ввода рассеивающих центров в измерительный объем и простую оптическую схему.

Оптическая диагностика процессов тепло- и массообмена применяется для анализа и повышения эффективности работы, например, двигателей сгорания, реактивных двигателей, сжигающих топливо установок и прочих систем, в работе которых предусмотрено наличие высоких температур. Все вышеперечисленное показывает актуальность исследований в области упругого рассеяния света на молекулах и атомах.

В данной работе представлены модели 3D-индикатрис рассеяния света на резких сферических неоднородностях среды, малых или сравнимых по размеру с длиной волны зондирующего излучения. Выполнение моделирования, как правило, является предварительным этапом экспериментального исследования, позволяет оценить результаты измерений и выбрать наиболее оптимальную конфигурацию экспериментальной установки, при которой вероятность успешного завершения планируемой научно-исследовательской работы самая высокая.

2. Физические основы расчета интенсивности рассеянного излучения

Для правильного понимания представленных в следующих главах результатов моделирования целесообразно раскрыть физическую суть процесса рассеяния оптического излучения на малых частицах, что и сделано в данной главе. Дальнейшие рассуждения являются в большей степени качественными, стоит оговорить, что хотя они и основаны на классическом представлении о строении вещества и природе света, но не имеют логических противоречий с квантовым подходом.

Физические причины рассеяния связаны с наличием зарядов в атомах и молекулах, которые под действием внешнего переменного электромагнитного поля совершают колебательное движение. Осцилляции зарядов приводят к тому, что они излучают вторичные электромагнитные волны, причем даже при небольших расстояниях от поверхности частицы можно приближенно считать форму их фронта сферической.

Часть падающей электромагнитной энергии преобразуется в другие формы энергии, например, в энергию теплового движения молекул. Такое преобразование энергии называется поглощение и имеет место всегда, даже если доля поглощенной энергии ничтожно мала. Если частота вторичных световых волн совпадает с частотой зондирующего излучения, то рассеяние света называется упругим, а если не совпадает – неупругим.

Физика процесса рассеяния света отдельной частицей проиллюстрирована на рис. 1. Частица мысленно разбита на множество областей, в каждой из которых падающая электромагнитная волна наводит диполь, излучающий вторичную волну. Все источники вторичных волн излучают когерентно по отношению друг к другу. Суммарное поле рассеянной волны определяется суперпозицией вторичных волн, причем сложение необходимо проводить с учетом фазово-амплитудных соотношений. Это означает, что интенсивность рассеянного излучения зависит от направления рассеяния [1].

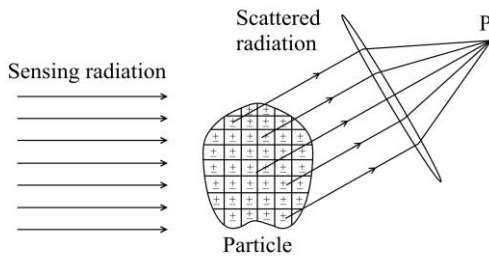


Рис. 1. Рассеяние света отдельной частицей [1].

Характер рассеяния сильно зависит от соотношения размера частицы и длины волны падающего излучения. Если частица очень мала по сравнению с длиной волны, то суммарное поле определяется суперпозицией вторичных волн с учетом только их амплитудных соотношений, а фазовый сдвиг между осцилляциями любых двух вторичных источников ничтожно мал. При таких условиях говорят о рассеянии в приближении Рэлея.

Если размер частицы сопоставим с длиной волны излучения, то рассеяние соответствует приближению Рэлея-Ганса. В этом приближении колебания вторичных источников сдвинуты по фазе друг относительно друга в общем случае, причем величина сдвига тем больше, чем больше проекция расстояния между двумя вторичными источниками на направление распространения волны. Влияние фазовых эффектов на результат суперпозиции вторичных волн приводит к асимметрии относительного

углового распределения интенсивности рассеянного излучения, в частности, рассеяние в направлении распространения зондирующей волны сильно преобладает над обратным рассеянием.

Рассеяние соответствует приближению больших частиц, если на оптический путь зондирующего излучения в частице умещается значительное количество длин волн. Отличительной особенностью такого рассеяния является наличие выраженных максимумов и минимумов в относительном угловом распределении интенсивности рассеянного излучения, которые образуются вследствие интерференции вторичных волн [8].

В основу расчета интенсивности рассеянного излучения в заданном направлении положена теория Г. Ми, разработанная голландским физиком в 1908 г. Модели индикатрисы рассеяния линейно поляризованной волны [7] и визуализация их динамики на прозрачных сферических частицах при изменении их радиуса представлены в работе [6].

Схема единичного акта рассеяния электромагнитной волны изображена на рис. 2. Для определенности на рисунке введена система координат x, y, z , начало отсчета которой связано с рассеивающей частицей. Волновой вектор \mathbf{k} падающей волны направлен вдоль оси Oy , комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля \mathbf{A} направлена вдоль оси Oz . Волновой вектор рассеянного излучения \mathbf{k}_s направлен к точке наблюдения M , A_s – комплексная амплитуда напряженности электрического поля рассеянной волны. Плоскость P , которая образована прямой, содержащей вектор \mathbf{k} , и точкой M , называется плоскостью рассеяния, а угол θ – углом рассеяния.

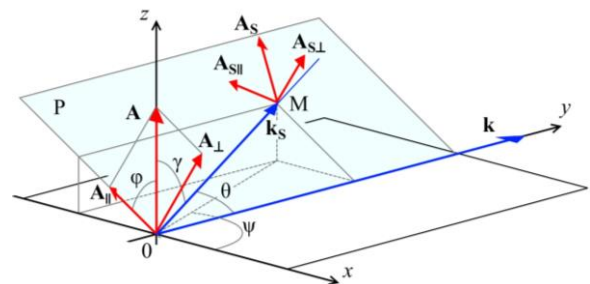


Рис. 2. Схема элементарного акта рассеяния.

Амплитуда A_s определяется по принципу суперпозиции (1) как геометрическая сумма комплексных амплитуд компонент напряженности поля рассеянной волны $A_{s||}$ и $A_{s\perp}$, параллельной и перпендикулярной плоскости рассеяния соответственно.

$$A_s = \sqrt{A_{s||}^2 + A_{s\perp}^2}, \quad \varphi_s = \frac{A_{s\perp}}{A_{s||}}, \quad (1)$$

где φ_s – угол между A_s и $A_{s||}$.

Величину каждой из компонент $A_{s||}$ и $A_{s\perp}$ возможно найти, используя выражение (2), по известным значениям комплексных амплитуд аналогичных компонент напряженности поля падающей волны $A_{||}$ и A_{\perp} и безразмерных комплексных амплитудных функций рассеяния $S_{||}$ и S_{\perp} .

$$\begin{bmatrix} A_{s\perp} \\ A_{s||} \end{bmatrix} = \frac{\exp\{ikR\}}{ikR} \cdot \begin{bmatrix} S_{\perp} & 0 \\ 0 & S_{||} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{\perp} \\ A_{||} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где R – расстояние от центра рассеяния до точки наблюдения.

Общие выражения для S_{\parallel} и S_{\perp} (3), (4) получены Г. Ми в виде суммы бесконечного ряда членов, которые показывают, что S_{\parallel} и S_{\perp} зависят от приведенного радиуса частицы $x = 2\pi r/\lambda$, ее комплексного показателя преломления m и угла рассеяния θ .

$$S_{\perp} = S_{\perp}(m, x, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \cdot (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \quad (3)$$

$$S_{\parallel} = S_{\parallel}(m, x, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \cdot (b_n \pi_n + a_n \tau_n). \quad (4)$$

Формулы для расчетов n -ых коэффициентов Ми a_n и b_n , а также угловых коэффициентов π_n и τ_n приведены в монографии [4].

Рассеяние принято описывать безразмерными функциями, показывающими относительное угловое распределение интенсивности рассеянного света [8], – индикатрисами $\xi(\vartheta, \varphi)$ или $Y(\vartheta, \varphi)$ в обычном (5) или логарифмическом (6) масштабах соответственно:

$$\xi(\vartheta, \varphi) = S_{\perp} S_{\perp}^* \cdot \sin^2(\varphi) + S_{\parallel} S_{\parallel}^* \cdot \cos^2(\varphi), \quad (5)$$

$$Y(\vartheta, \varphi) = \lg(S_{\perp} S_{\perp}^* \cdot \sin^2(\varphi) + S_{\parallel} S_{\parallel}^* \cdot \cos^2(\varphi)). \quad (6)$$

Поскольку формулы (3), (4) включают сумму бесконечного ряда, то редко представляется возможным получить аналитическое выражение, описывающее индикатрису рассеяния. Поэтому сумму ряда принято искать, используя рекурсию и ограничившись конечным числом членов при достижении заданной точности ϵ . Для построения алгоритмов рекурсии используются рекуррентные формулы расчета коэффициентов a_n , b_n , π_n и τ_n [4].

Для построения моделей 3D-индикатрис рассеяния необходимо охватить весь диапазон возможных направлений наблюдения и, следовательно, использовать трехмерную систему координат. Весьма удобной для представления индикатрис является сферическая система координат (ξ, ψ, γ) или (Y, ψ, γ) , где широта ψ – угол, отсчитываемый от оси x в плоскости xOz , долгота γ – угол, отсчитываемый от оси z , а ξ или Y – относительное значение интенсивности в заданном направлении в прямом и логарифмическом масштабе соответственно.

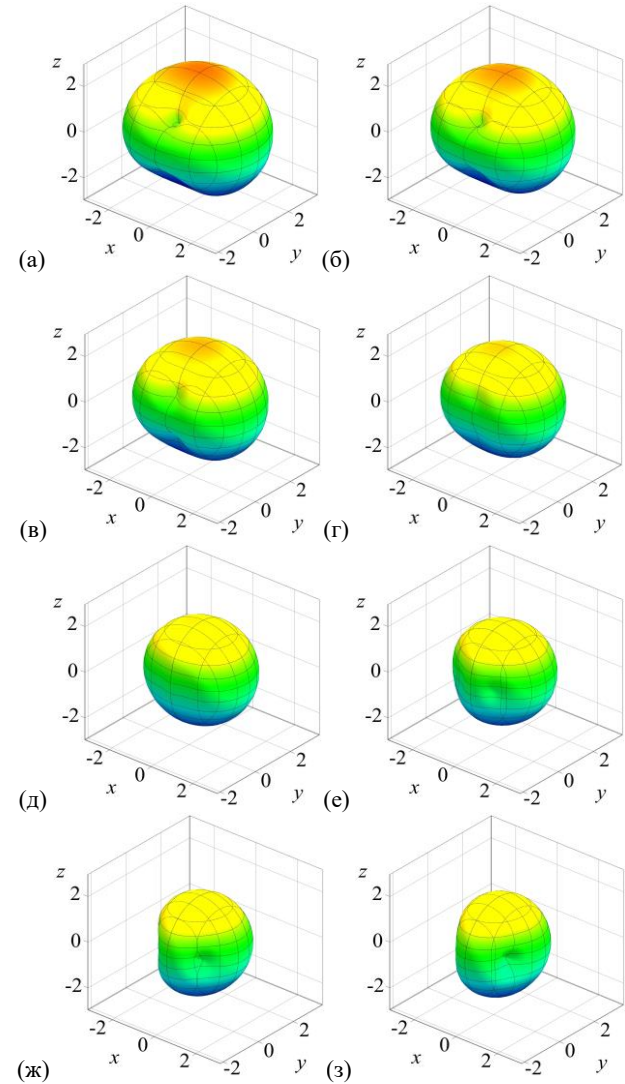
3. Динамика 3D-моделей индикатрис при увеличении поглощающих свойств рассеивающих центров

Для теоретического описания распространения света в поглощающих средах используют комплексный показатель преломления m . Действительная часть показателя преломления $Re(m)$ определяет во сколько раз скорость распространения света в среде меньше, чем в вакууме, мнимая часть показателя преломления $Im(m)$ определяет уменьшение интенсивности световой волны. Для демонстрации отличительных особенностей рассеяния излучения на поглощающих и прозрачных частицах получены модели 3D-индикатрис, при расчете которых величина $Re(m)$ сохранялась постоянной, а величина $Im(m)$ увеличивалась.

На рис. 3 представлены модели 3D-индикатрис в логарифмическом масштабе (6) рассеяния света с длиной волны $\lambda = 355$ нм на изотропных сферических частицах радиусом $r = 30$ нм и с действительной частью показателя преломления $Re(m) = 1,6$, комплексная часть показателя преломления $Im(m)$ изменяется в диапазоне $[0; 1,4]$ с шагом 0,2.

Значения Y относительной интенсивности рассеяния в логарифмическом масштабе были увеличены на 3, чтобы все

они были положительны. Такой прием использован исключительно для удобства графического представления результатов. Логарифмический масштаб выбран исходя из того, что при заданном соотношении радиуса частицы и длины волны относительная интенсивность рассеяния принимает значения, которые отличаются на несколько порядков в зависимости от направления. Центр рассеяния находится в начале координатной сетки. Зондирующее излучение распространяется вдоль оси Oy и поляризовано в плоскости yOz .



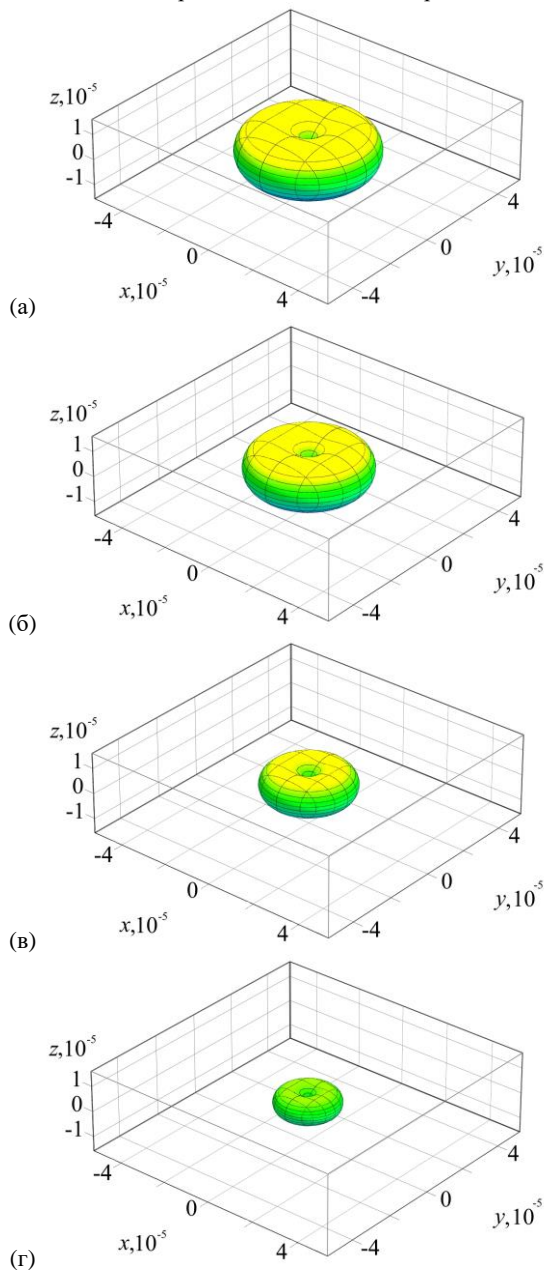
(а) $m = 1,6 - 0i$; (б) $m = 1,6 - 0,2i$; (в) $m = 1,6 - 0,4i$; (г) $m = 1,6 - 0,6i$; (д) $m = 1,6 - 0,8i$; (е) $m = 1,6 - 1,0i$; (ж) $m = 1,6 - 1,2i$; (з) $m = 1,6 - 1,4i$.

Рис. 3. Модели 3D-индикатрис рассеяния излучения с длиной волны $\lambda = 355$ нм на сферических частицах радиусом $r = 30$ нм.

Рассеяние, для которого представлены модели на рис. 3, соответствует приближению Рэлея-Ганса. В случае с диэлектрическими частицами [6] особенность такого рассеяния заключается в значительном преобладании рассеяния вперед (в направлении падающего излучения) над обратным рассеянием (в направлении противоположном направлению падающего излучения), при этом стоит отметить, что амплитуда волны одинакова в каждой точке внутри частицы. С увеличением значения $Im(m)$ форма индикатрисы изменяется. Несмотря на то, что действительная часть показателя преломления, следовательно, и распределение фазы волны внутри частицы

одинаковы для всех моделей на рис. 3, амплитуда волны уменьшается по мере ее распространения в поглощающем веществе частицы. Это приводит к изменению результата суперпозиции вторичных волн и объясняет изменение формы моделей на рис. 3. Кроме того, затухание амплитуды колебаний волны объясняет также уменьшение среднего размера 3D-индикатрисы как стереометрической фигуры.

На рис. 4 представлены модели 3D-индикатрис в прямом масштабе (5) рассеяния света с длиной волны $\lambda = 355$ нм на изотропных сферических частицах радиусом $r = 0,3$ нм и с действительной частью показателя преломления $\text{Re}(m) = 1,6$. Комплексная часть показателя преломления $\text{Im}(m)$ изменяется в диапазоне $[0; 0,6]$ с шагом 0,2. Положение центра рассеяния, направление распространения и ориентация вектора напряженности электрического поля падающей волны выбраны такими же, как на рис. 3.



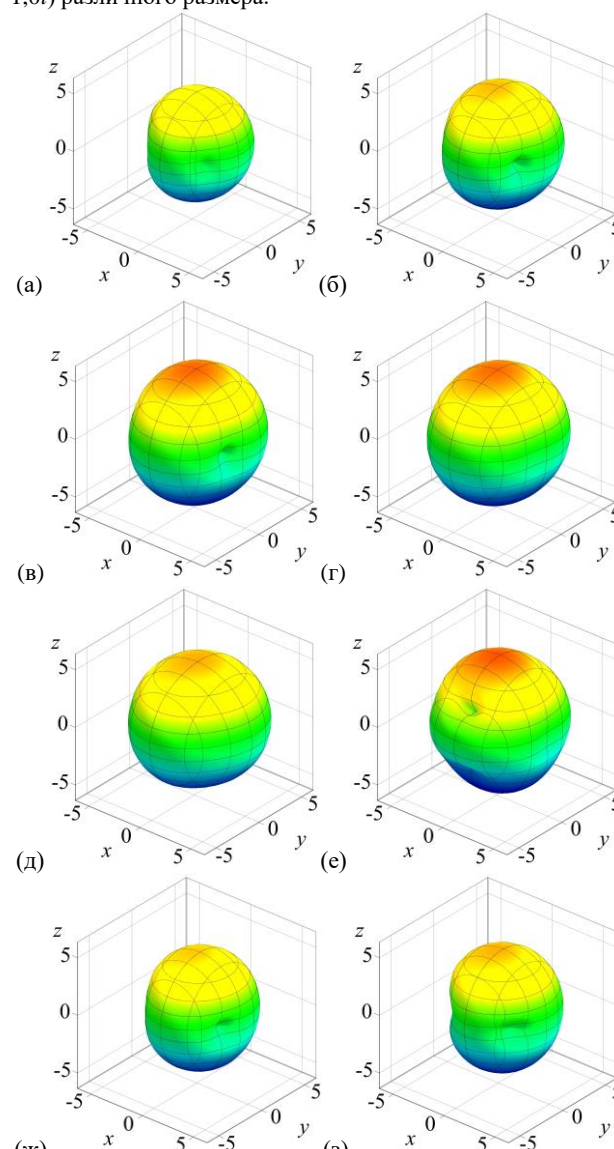
(а) $m = 1,6 - 0i$; (б) $m = 1,6 - 0,2i$;
 (в) $m = 1,6 - 0,4i$; (г) $m = 1,6 - 0,6i$;

Рис. 4. Модели 3D-индикатрис рассеяния излучения с длиной волны $\lambda = 355$ нм на сферических частицах радиусом $r = 0,3$ нм.

В данном случае характер рассеяния соответствует приближению Рэля. Фаза волны внутри частицы практически не изменяется, и при расчете поля рассеянной волны учитываются только амплитудные соотношения между вторичными колебаниями наведенных диполей. По этой причине, во-первых, форма представленных на рис. 4 моделей симметрична относительно центра рассеяния, а, во-вторых, она остается постоянной с увеличением мнимой части показателя преломления. Затухание колебаний падающей волны внутри частицы проявляется лишь в пропорциональном уменьшении 3D-индикатрисы.

4. Динамика 3D-моделей индикатрис при увеличении радиуса рассеивающего центра

Изменение формы 3D-индикатрисы рассеяния излучения на прозрачной частице с увеличением ее радиуса продемонстрировано в работе [6]. На рис. 5 представлены модели 3D-индикатрис рассеяния света длиной волны $\lambda = 355$ нм на сферических поглощающих частицах ($m = 1,6 - 1,0i$) различного размера.



(а) $r = 32,5$ нм; (б) $r = 35$ нм; (в) $r = 37,5$ нм;
 (г) $r = 40$ нм; (д) $r = 42,5$ нм; (е) $r = 45$ нм;
 (ж) $r = 47,5$ нм; (з) $r = 50$ нм.

Рис. 5. Модели 3D-индикатрис рассеяния излучения с длиной волны $\lambda = 355$ нм на сферических частицах с показателем преломления $m = 1,6 - 1,0i$.

Радиус центров рассеяния изменяется в диапазоне [32,5; 50] нм, индикатрисы рассеяния представлены в логарифмическом масштабе, значения Y относительной интенсивности рассеяния были увеличены на 5 для удобства графического представления 3D-моделей. Положение центра рассеяния, направление распространения и ориентация вектора напряженности электрического поля падающей волны выбраны такими же, как на рис. 3.

Индикатрисы на рис. 5 а соответствует рассеянию в приближении Рэлея-Ганса. Средний геометрический размер 3D-индикатрисы при увеличении радиуса сначала увеличивается (рис. 5 а – d), а затем уменьшается (рис. 5 е – h), аналогичный характер имеет изменение доли рассеиваемой интенсивности падающего излучения или, по-другому, коэффициента рассеяния при увеличении радиуса частиц. Анализ 3D-индикатрис, соответствующих частицам более широкого диапазона размеров, показал, что в общем случае зависимость коэффициента рассеяния от радиуса частицы имеет осциллирующий характер для приближения Рэлея-Ганса [6]. Кроме того, относительное угловое распределение интенсивности приобретает осциллирующий характер. Так проявляется интерференция вторичных волн при суперпозиции.

5. Заключение

Получена программа, позволяющая рассчитывать модели 3D-индикатрис рассеяния на однородных и изотропных сферических частицах. Форма центров рассеяния является единственным ограничивающим фактором ее применения для расчета интенсивности рассеянного излучения на реальных системах частиц, несмотря на это результаты работы программы могут быть напрямую использованы для оценки величины интенсивности, которую стоит ожидать, например, в результате экспериментального исследования рассеяния света. Избавиться от данного ограничения возможно путем внесения поправки в результаты расчета интенсивности рассеянного излучения по формулам Г. Ми. Величина поправки зависит от отличия формы реальных рассеивателей от сферической [4].

С точки зрения допустимых вариаций входных данных программа является универсальной, поскольку позволяет рассчитывать модели 3D-индикатрис рассеяния излучения произвольной длины волны на частицах, радиус которых может быть как много больше или много меньше заданной длины волны, так и сопоставим с ней. Широкий спектр значений действительной и мнимой части комплексного показателя преломления, при которых могут быть получены трехмерные модели, также указывает на универсальность программы. На примере моделей индикатрис, представленных на рис. 3 – 5, а также моделей, представленных в работе [6], в частности, демонстрируется возможность проследить динамику формы индикатрисы рассеяния и величины относительной интенсивности рассеянного излучения с изменением оптической плотности и поглощающих свойств частицы, ее размера и длины волны падающего излучения. На основе динамики моделей возможно сделать вывод о диапазонах размеров рассеивателей, в котором рассеяние соответствует приближению Рэлея, Рэлея-Ганса или больших частиц.

Более важным практическим применением программы является моделирование результатов экспериментального исследования рассеяния лазерного излучения при его распространении в газообразных средах, в частности, на частицах продуктов горения, плазмы, молекулах и атомах высокотемпературных газов. Подобное моделирование является необходимым этапом исследований, целью которого является подбор оптимальных параметров

экспериментальной установки и поиск оптимальных условий проведения эксперимента.

6. Благодарности

Работа выполнялась при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 3.8009.2017/БЧ).

7. Литература

- [1] Борен К., Хафмен Г. Поглощение и рассеяние света малыми частицами (перевод) / М.: «Мир». – 1986. – 331 с.
- [2] Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ.: Главная редакция физико-математической литературы. – М.: Изд-во «Наука», 1973. – 716 с.
- [3] Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ.: Под ред. В.В. Соболева. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 536 с.
- [4] Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / Пер. с англ.: Под ред. К.Н. Кондратьева. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
- [5] Коломиец С.Ф. Современное состояние моделей рассеяния электромагнитных волн на частицах разреженных сред // Научный вестник МГТУ ГА, 2013. – №189. – С. 104 – 109.
- [6] Сапронов М.В., Скорнякова Н.М. Компьютерная визуализация индикатрис рассеяния Рэлея в динамике // Научная визуализация. – М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2017. – Т. 9. – № 3. – С. 42 – 53.
- [7] Сапронов М.В., Скорнякова Н.М. Программа моделирования трехмерных индикатрис рассеяния света на сферических прозрачных или слабо поглощающих частицах / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612144.
- [8] Смирнов В.И., Янина Г.М. Сапронов М.В. Расчет и проектирование лазерных доплеровских анемометров: учеб. пособие / М.: Изд-во МЭИ, 2018. – 52 с.

Об авторах

Скорнякова Надежда Михайловна, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта института радиотехники и электроники Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: nmskorn@mail.ru.

Сапронов Максим Васильевич, аспирант кафедры физики им. В.А. Фабриканта института радиотехники и электроники Национального исследовательского университета «МЭИ». E-mail: maks-sapronov@yandex.ru.

Визуализация в социально-гуманитарных дисциплинах

Ю.Т. Трифанков¹, Д.М. Кошлаков¹

trifankov.yury@yandex.ru|dmkosh2012@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, Россия

В статье обсуждается феномен визуализации в социально-гуманитарных исследованиях, а также в преподавании социально-гуманитарных дисциплин. Рассматриваются два приема визуализации в социально-гуманитарных дисциплинах. Первый основан на привлечении готовых визуальных документов (фотографий, кадров кинохроники и т.п.). В качестве второго приема визуализации рассматривается визуальное представление знаний. Приводятся примеры визуального представления знаний, связанные с анализом процессов перевооружения армии и причин поражения Красной армии на начальном этапе Великой Отечественной войны.

Ключевые слова: визуализация знаний, визуализация, визуальная модель, визуальная эпистемология, социально-гуманитарное знание.

Visualization in socially-humanitarian disciplines

Yu.T. Trifankov¹, D.M. Koshlakov¹

trifankov.yury@yandex.ru|dmkosh2012@yandex.ru

¹Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

The paper studies some methods of visualization in socially-humanitarian studies and teaching of socially-humanitarian disciplines. Two methods of visualization in social and humanitarian disciplines are considered. The first trick is based on the involvement of visual documents (photographs, newsreels, etc.). As a second method of visualization, a visual representation of knowledge is considered. Informative examples of knowledge visualization are reported. The first example is concerned with army rearmament. The second and third part is concerned with Second World War.

Keywords: knowledge visualization, socially-humanitarian knowledge, visual epistemology, visual model, visualization.

1. Введение

Не вызывает никакого сомнения то обстоятельство, что стиль мышления современных молодых людей, в том числе тех, кто составляет сегодняшнюю студенческую аудиторию, за последние несколько десятилетий претерпел существенные изменения. Одно из произошедших изменений состоит в том, что большинство молодых людей схватывают информацию не с помощью «больших текстов», а с помощью своего рода визуальных клипов. Сверх того, практически все современное человечество находится в условиях «информационного взрыва»; разнородной и взаимопротиворечивой информации столь много, что утрачивается возможность ее элементарно осмыслить, извлечь из нее смыслы, сделать на ее основе рациональные выводы, сформировать адекватное реальности мировоззрение.

Подобное положение вещей оказывает существенное влияние на характер научных исследований социально-гуманитарной реальности, а также на процесс преподавания социально-гуманитарных дисциплин (в том числе в системе высшего образования). Новая социально-культурная ситуация, некоторыми из проявлений которой являются происходящий «информационный взрыв» и ускоряющееся наращивание объемов визуальной информации, требуют от научно-педагогического сообщества определенных изменений в научно-исследовательском и учебном процессах. Некоторый скромный шаг в этом направлении призвана сделать предлагаемая вниманию читателя статья.

2. Визуальная составляющая в социально-гуманитарном знании

В современном научном знании с некоторых пор весьма активно развиваются такие визуальные дисциплины, как визуальная социология и визуальная антропология. По всей видимости, со временем в социально-гуманитарном знании сформируется кластер визуальных дисциплин, в который

помимо уже названных дисциплин, войдут, например, визуальная историография, визуальная политология, визуальная педагогика и т.п.

Одно из центральных мест в этом кластере, по всей видимости, займет визуальная эпистемология. С некоторых пор данная дисциплина интенсивно развивается на Западе. В своем существе, данная дисциплина призвана осмыслить феномен визуальных знаний, включая социальные практики их трансляции и производства, а также такие феномены, как визуальное мышление, визуальная составляющая научно-исследовательского текста и т.п. [8].

Значимым импульсом к развитию этой дисциплины послужило осмысление того факта, что успехи естественно-научного и технического знания имеют в качестве одного из своих значимых источников использование визуальных (графических) построений и обеспечиваемую ими наглядность и соответственно удобоваримость знания. В этой связи в качестве некоторого примера сошлемся на часть историко-научных исследований [4–7], посвященных творчеству Г.Галилея, М.Фарадея, Дж.К. Максвелла.

Признав значимость визуальных (графических) построений в научной деятельности, в научном и техническом знании, следует признать, пожалуй, и то, что формирование продуктивного визуального стиля научного и научно-технического мышления должно быть предметом полноценного внимания высшей школы. Информационно-графическая (визуальная) культура будущего выпускника высшего учебного заведения должна стать предметом целенаправленного формирования, по сути одной из базовых компетенций будущего выпускника. Само собой, все это налагает на систему высшего образования дополнительные требования, расширяет круг решаемых ею задач. Не в последнюю очередь это касается преподавания социально-гуманитарных дисциплин.

В данной статье мы рассмотрим два актуальных приема визуализации в социально-гуманитарных дисциплинах. При этом памятуя о том тезисе, согласно которому образование и наука плотно связаны, оба приема будем рассматривать в

качестве значимых как для научно-исследовательской деятельности, так и для учебной деятельности; в качестве актуальных как для практикующего ученого или аналитика, так и для практикующего преподавателя. Оба приема при этом, как мы уже отметили, будут касаться социально-гуманитарного знания.

3. Визуализация, основанная на привлечении визуальных источников

Первый прием визуализации в социально-гуманитарных дисциплинах, который мы рассмотрим, связан со всё более интенсивным использованием в этих дисциплинах кино-, фото- и им подобных документов, включая произведения визуального искусства. Такого рода документы могут быть **предметом** социально-гуманитарного исследования (исторического, социологического, философского, культурологического, искусствоведческого и т.д. и т.п.), равно как и в некотором смысле (при всех необходимых оговорках) **средством** социально-гуманитарного исследования. Так, предметом социологического (да и исторического) исследования могут служить как фотографии прошлых лет, так и сама реальность, на них запечатленная. В первом случае фотографии являются предметом исследования, а во втором – средством исследования, точнее одним из таких средств. В принципе, то же самое касается кино, – прежде всего документального, но в какой-то мере и художественного, трактуемого как средство репрезентации реальности, пусть даже эта репрезентация и одобрена той или иной долей художественного вымысла, а также зависит от авторского видения отражаемой ситуации. В этой связи в качестве интересного примера можно указать на такой подход к анализу социокультурной реальности, который находит выражение в рамках cinema studies [2].

Естественно, визуальные документы (картины, фотографии, кадры кинохроники и т.п.) способны интенсифицировать не только научно-исследовательский, но и учебный процесс. Интересным примером здесь может служить подготовка студентами при изучении истории эссе на тему «История моей семьи в фотографиях», в котором бы с привлечением и глубоким осмыслением некоторого небольшого количества фотографий анализировалась бы семейная история в ее неразрывной связи с макроисторией. Само собой, спектр тем такого рода может быть расширен. Так, возможны темы такого рода: «Историческое событие в фотографиях», «Отражение исторического события в кинематографе» и т.п.

Разнообразные аналитические приемы, разработанные в рамках visual studies, представляют весьма широкое поле для всевозможных научно-исследовательских и учебно-исследовательских разработок. Практика показывает, что анализ визуального материала, в том числе сосредоточенного в произведениях художественного искусства, обладает мощным эвристическим потенциалом.

4. Визуализация знаний

Второй прием визуализации в социально-гуманитарных дисциплинах, который мы рассмотрим, связан с осуществлением ученым, аналитиком, преподавателем или обучающимся в своей деятельности графических (визуальных) построений, нацеленных на представление проблемной ситуации или фрагмента познаваемой реальности в графическом виде. Здесь можно использовать ставший довольно популярным термин «инфографика», понимая при этом, что инфографика бывает весьма разнообразной и что она сильно различается по реализуемым ею целям и используемым средствам.

В данной статье мы представим несколько примеров визуализации знаний, ориентированной на цели описания социально-гуманитарных систем, процессов и явлений. При этом отметим, что, вообще говоря, следует различать визуализацию знаний и визуализацию информации. Мы остановимся только на визуализации знаний, полагая, что приемы визуализации информации и используемые в ее рамках средства (графики, диаграммы и т.п.) достаточно широко освоены.

Визуализацию знаний мы представим с помощью двух примеров. Первый будет связан с анализом факторов, влияющих на процесс перевооружения, а второй – с анализом некоторых причин поражения Красной армии на начальном этапе Великой Отечественной войны.

Пример 1. Допустим, перед нами стоит задача проанализировать, какие факторы оказывают влияние на процесс перевооружения армии. Решая эту задачу, имеет смысл рассматривать процесс перевооружения армии как перевод армии из одного состояния в другое, в частности, из исходного состояния в необходимое [3], что, в принципе, можно схематично изобразить с помощью рис. 1.

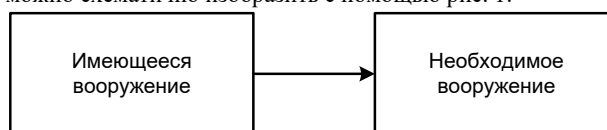


Рис. 1. Визуальная модель процесса перевооружения армии

Далее последовательно имеет смысл рассмотреть те факторы, которые влияют на процесс перевооружения: факторы военного, военно-политического и экономического характера. В конечном счете, можно получить следующую схему (рис. 2). Более детально процесс получения аналогичной схемы описан в [1].

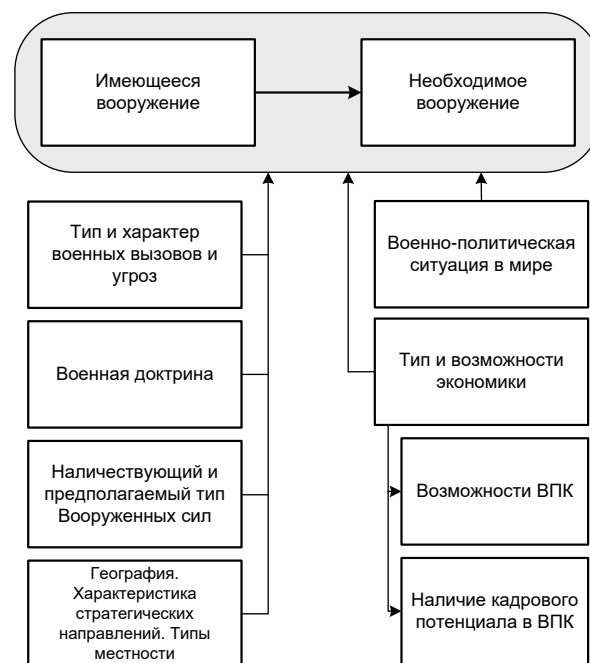


Рис. 2. Развернутая визуальная модель процесса перевооружения армии

Факторы, оказывающие влияние на процесс перевооружения армии, вообще говоря, взаимозависимы, то есть определенным образом связаны между собой, в силу чего имеет смысл отразить эти связи на схеме (рис. 3).

В принципе, руководствуясь полученной схемой, отражаемый ею процесс можно попытаться в той или иной

мере описать математически, опереть на ту или иную эмпирическую основу, перейти тем самым к математическому моделированию процесса перевооружения армии.

Пример 2. Довольно удобно визуализировать причинно-следственные (каузальные) связи. Покажем это на примере анализа некоторых причин поражения Красной армии на начальном этапе Великой Отечественной войны.

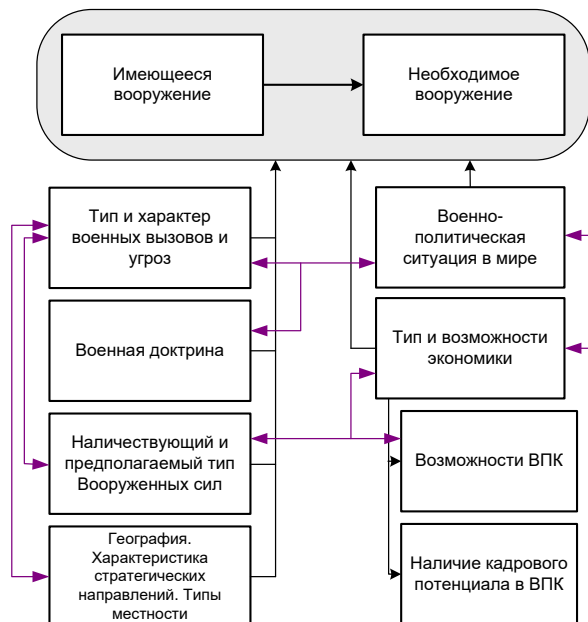


Рис. 3. Визуальная модель процесса перевооружения армии (с указанием основных межфакторных связей)

Широко распространенная, стереотипическая точка зрения по поводу причин поражения Красной армии на начальном этапе войны состоит в том, что в качестве основных причин называются (рис. 4):

- 1) внезапность нападения немецко-фашистских захватчиков (гитлеровской Германии и целого ряда ее союзников) на Советский Союз;
- 2) просчеты и ошибки высшего военно-политического руководства СССР в оценке ситуации перед войной и в ходе войны;
- 3) политические репрессии в отношении командного состава Красной армии.

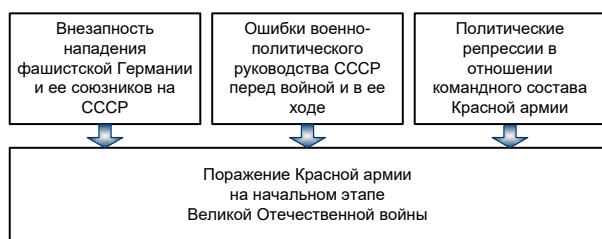


Рис. 4. Стереотипная позиция по поводу причин поражения Красной армии на начальном этапе войны

При этом об этих причинах весьма сложно говорить, ибо часть из них субъективны, часть из них являются предметом острых (в том числе политических) дискуссий, а влияние этих причин на ход войны весьма сложно оценить без тех или иных субъективных допущений.

Анализ показывает, что были и иные причины поражения Красной армии на начальном этапе войны, которые, с одной стороны, ничуть не менее значимы, а с другой стороны, поддаются более рациональному учету и

анализу [1]. Одна из основных причин такого рода состоит в том, что Красная армия изначально обладала недостаточной боеспособностью, что, вообще говоря, продемонстрировала уже финская кампания 1939–1940 годов.

Недостаточная боеготовность Красной армии проявлялась в факторах, часть из которых представлена на рис. 5. Каждый из представленных факторов можно проанализировать и, в свою очередь, выявить факторы, влияющие на него. Так, неполная укомплектованность войск командным составом основной причиной имела стремительно идущий количественный рост личного состава Красной армии в условиях подготовки к войне, а позднее – в условиях начавшейся войны.



Рис. 5. Факторы недостаточной боеготовности Красной армии к началу Великой Отечественной войны

Более подробно вопрос о поражении Красной армии на начальном этапе войны рассмотрен в [1].

По всей видимости, недооцененным ныне является и тот фактор, что Советский Союз практически в одиночку сражался с армиями и экономиками нескольких промышленно развитых стран мира. Несмотря на все это, Красная армия и вообще советский народ выстояли в этой схватке и одержали в ней Победу. О причинах Победы тоже можно говорить детально и подробно, тем более что эпоха оставяла Советскому Союзу крайне мало шансов на выживание. Победа советского народа в войне – результат огромного воинского и трудового подвига, совершенного советским народом.

Визуальный метод помогает структурировать причины любого исторического события (или вообще социально-гуманитарного явления) и визуализировать сложную структуру связей, существующую между этими причинами. В этой статье мы ограничились очень небольшим количеством довольно простых визуальных схем (по сути – моделей), однако реальный научно-исследовательский, аналитический или учебный процесс нередко требует последовательного разворачивания целого ансамбля сложных и многоаспектных визуальных схем (моделей). При этом сами эти визуальные схемы (модели) помогают не только структурировать описываемую ситуацию, но и с привлечением эффекта наглядности воспринять эту ситуацию с системных позиций.

Надо сказать, что визуальное представление знаний имеет существенное значение не только для социально-гуманитарных исследований, но и для математического моделирования процессов самой различной природы (включая процессы социально-гуманитарные).

5. Заключение

Как видим, в социально-гуманитарных дисциплинах возможны различные приемы визуализации. Сами эти приемы могут с тем или иным успехом применяться в научно-исследовательской, аналитической и преподавательской (да и вообще учебной) деятельности.

В статье мы рассмотрели два приема визуализации. Первый основан на привлечении готовых визуальных

документов (источников), к коим можно отнести фотографии, кадры кинохроники, произведения визуального искусства и т.п. Второй прием связан с визуализацией знаний. При его применении формируются некоторые визуальные (графические) схемы, построение и применение которых призвано системно (с системных позиций) описать сложные процессы, явления, закономерности и т.п. По сути, визуализация знаний должна рассматриваться не только как средство представления знаний, но и как средство их системного описания и в какой-то мере анализа.

6. Литература

- [1] Кошлаков Д.М. Визуализация знаний в анализе перевооружения армии с позиции военной эргономики (содержательные примеры) // Эргодизайн. 2019. № 3 (5). С. 127–137.
- [2] Самутина Н. Реальный фантастический вариант, или Что хотел сказать редактор-составитель // Фантастическое кино. Эпизод первый: сб. ст. / Сост. и науч. редактор – Н.Самутина. М.: НЛЮ, 2006. С. 19–31.
- [3] Сторонин В.В. Аналитика и техническая оснащенность военной организации России // Будущее аналитики: От азбучных истин к системе аналитических центров. М.: Научный эксперт, 2013. С. 78–85.
- [4] Bredekamp H. Gazing Hands and Blind Spots: Galileo as Draftsman // Science in Context. 2000. Vol. 13. № 3–4. P. 423–462.
- [5] Cat J. On Understanding: Maxwell on the Methods of Illustration and Scientific Metaphor // Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2001. Vol. 32. № 3. P. 395–441.
- [6] Gooding D. Visualisation, inference and explanation in the sciences // Studies in Multidisciplinarity. 2004. Vol. 2. P. 1–25.
- [7] Gooding D.C. From Phenomenology to Field Theory: Faraday's Visual Reasoning // Perspectives on Science. 2006. Vol. 14. № 1. P. 40–65.
- [8] Klinke H. Introduction: the Image and the Mind // Art Theory as Visual Epistemology, ed. by H.Klinke. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing, 2014. P. 1–10.

Об авторах

Трифанков Юрий Трофимович, д.и.н., профессор кафедры «Гуманитарные и социальные дисциплины» Брянского государственного технического университета, почетный работник средней и высшей школы РФ. E-mail: trifankov.yury@yandex.ru.

Кошлаков Дмитрий Михайлович, старший преподаватель кафедры «Гуманитарные и социальные дисциплины» Брянского государственного технического университета, соискатель сектора социальной эпистемологии Института философии РАН. E-mail: dmkosh2012@yandex.ru.

Восстановление поля локальных температур пламени с применением томографического подхода с помощью пирометра спектрального отношения

В.С. Фланден^{1,2}, А.Ю. Поройков², Д.А. Голенцов¹
bossbosskama3@mail.ru|poroykovay@gmail.com|dgoldan-00@mail.ru
¹ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия;
²НИУ «МЭИ», Москва, Россия

В работе представлен подход к восстановлению поля температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения. Прибор регистрирует интенсивность излучения от измеряемого пламени в нескольких спектральных диапазонах с использованием интерференционных фильтров и фотодиодов. Усиление сигнала происходит с помощью разработанного трансимпедансного усилителя. Пирометр определяет температуру путем измерения отношения интенсивности излучения в двух различных спектральных диапазонах. Амплитуда сигнала определяется путем интегрирования интенсивности излучения пламени по лучу зрения оптической системы пирометра. Измерение пламени с нескольких ракурсов позволяет получить преобразование Радона для этой области. Расчет обратного преобразования позволяет получить поле локальных температур пламени. В работе представлена экспериментальная установка по измерению локальных температур пламени и программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс измерения и восстанавливать томограммы температурных полей.

Ключевые слова: измерение высоких температур газа, пирометр спектрального отношения, томография температурных полей, преобразование Радона.

Reconstruction of Flame Local Temperature Field Using Tomographic Approach by Spectral Ratio Pyrometer

V.S. Flanden^{1,2}, A.Yu. Poroykov², D.A. Golentsov¹
bossbosskama3@mail.ru|poroykovay@gmail.com|dgoldan-00@mail.ru
¹Central institute of aviation motors, Moscow, Russian;
²National research university "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian

The paper presents an approach to the reconstruction of the flame temperature field using a spectral ratio pyrometer. The device registers the intensity of the radiation from the measured flame in several spectral ranges using interference filters and photodiodes. Signal amplification occurs using the developed transimpedance amplifier. The pyrometer determines the temperature by measuring the ratio of the radiation intensity in two different spectral ranges. The signal is determined by integrating the intensity of the flame radiation along the optical system line of sight. Measurement of flame from several angles allows to get the Radon transform for this area. Calculation of the inverse transformation allows to obtain the field of local flame temperatures. The work presents an experimental setup for measuring flame local temperatures and software that allows to automate the measurement process and restore tomograms of temperature fields.

Keywords: high gas temperatures measurement, spectral ratio pyrometer, tomography of temperature, Radon transform.

1. Введение

Измерения температур элементов авиадвигателей и температур газового потока являются важной задачей при доводке разрабатываемых и эксплуатации промышленно выпускаемых агрегатов [1, 3, 5, 7, 14]. Такие измерения позволяют получить информацию о состоянии элементов двигателя и его важной характеристике – тяге. Эта задача может быть решена при помощи контактных методов измерения с использованием термопарных зондов. Однако использование контактных методов измерения приводит к внесению возмущений в исследуемую среду. А применение термопар затруднительно при достаточно высоких температурах (выше 2000 К) в связи с ограничением по рабочему диапазону. Для решения этой задачи широко применяются методы оптической пирометрии, так как они обладают двумя достоинствами: бесконтактностью и быстродействием [4, 10, 12].

Сложная структура газового потока влияет на точность интегрального способа (по лучу зрения) измерений из-за сложных соотношений спектральной излучательной и спектральной поглощательной способностей различных слоев газа с разными температурами. Использование метода измерения температуры по отношению интегральных

интенсивностей излучения в двух узких спектральных диапазонах (метод спектральных отношений) [9] позволяет избежать большого количества трудностей.

Среди оптических методов измерения температуры газа можно выделить наиболее простые: эмиссионный и абсорбционный. Второй метод является более сложным из-за необходимости установки дополнительного оборудования, что не всегда возможно [15, 18-19].

Одним из эмиссионных методов является метод измерения температуры газового потока по отношению спектральных линий двух компонентов его излучения. В этом случае отношение интенсивностей излучения не зависит от концентрации частиц, что и позволяет определять температуру. Такой метод реализован в виде компактного прибора, названного пирометром спектрального отношения (ПСО) [2, 8], который позволяет измерять температуру газа в диапазоне 1000-2500 К.

Важной задачей при доводке разрабатываемых и эксплуатации промышленно выпускаемых элементов авиадвигателей является проведение их испытаний с визуализацией получаемых результатов в виде температурного поля. Переход от локальных измерений к полевому позволяет получить специалистам качественно новую картину, выявить особенности исследуемых

процессов, которые могут быть использованы для усовершенствования конструкции авиадвигателей. Сравнение картин визуализации по сохраненным экспериментальным данным, полученным при различных вариантах исполнения агрегатов, позволяет легко определить оптимальный вариант.

Для измерения локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения был выбран томографический подход. Это объясняется принципом работы пирометра, основанном на измерении интегральной интенсивности излучения по лучу зрения. Томография – совокупность методов, позволяющих по нескольким измерениям одной размерности восстановить распределение физической величины в размерности, на единицу больше.

Математической основой томографических методов является преобразование Радона [6]. Обратное преобразование Радона является сложным с вычислительной точки зрения и практически невозможным с точки зрения экспериментальных измерений, так как количество слоев и ракурсов, по которым происходит интегрирование, ограничено. Поэтому для расчета обратного преобразования Радона используются другие методы и алгоритмы. Одним из наиболее распространенных является алгоритм, основанный на использовании Фурье-преобразования (метод Фурье-синтеза) [16-17].

2. Пирометр спектрального отношения

В пирометре световой сигнал от измеряемого объекта через объектив фокусируется на входной торце коллекторного волоконного световода, разделяющего сигнал на три части, которые через интерференционные фильтры подаются на фотоприемники (рис. 1). Фототоки с фотоприемников проходят через усилители, выходные напряжения с которых подаются в блок сбора и обработки данных. Обработка полученных данных проводится на компьютере в реальном времени. Для ПСО выбраны интерференционные фильтры 1,38 мкм и 1,48 мкм с полушириной 0,025 мкм.

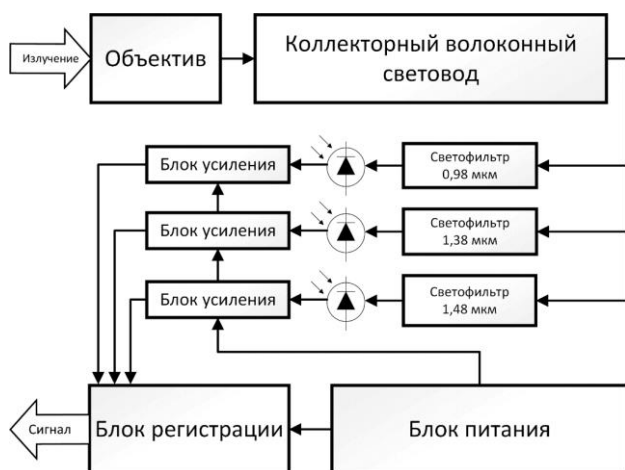


Рис. 1. Схема пирометра спектрального отношения.

Усиление сигнала с фотоприемников в пирометре проводится с помощью специально разработанного блока усиления. Именно он отвечает за величину отношения сигнал/шум, во многом определяющую погрешность измерений всего прибора. В приборе используются фотодиоды Hamamtsu G10899, работающие в фотогальваническом режиме. В качестве операционных усилителей в блоке усиления использованы микросхемы: Texas Instrumentals OPA2140 и Burr Brown PGA204.

В каждом канале сигнал с фотодиодов поступает на два трансимпедансных усилителя. С их выходов сигнал подается на операционный усилитель с программируемым коэффициентом усиления. В итоге блок усиления представляет собой инструментальный усилитель с дополнительным усилением на выходе.

Итоговый коэффициент преобразования ток-напряжение составляет от 0,94 МОм до 940 МОм в разных режимах усиления. Полоса пропускания от 11 кГц до 10 кГц. Максимальное выходное напряжение $\pm 13,7$ В.

3. Измерение температуры

При измерении температуры газового потока в газотурбинном двигателе основным компонентом в потоке сгоревшего углеводородного топлива является водяной пар, который удобно использовать в качестве тестового. Однако зарегистрировать излучение одной спектральной линии в колебательно-вращательном спектре водяного пара даже при использовании спектральных приборов высокой разрешающей силы для практического применения не представляется возможным ввиду того, что структура этой линии крайне сложна. Поэтому предложен другой метод регистрации излучения, основанный на регистрации группы линий, которые можно выделить с помощью узкополосных интерференционных фильтров.

Температура газового потока с помощью ПСО определяется по отношению интенсивностей излучения пламени в двух спектральных окнах. Спектральная интенсивность излучения, попадающего на фотоприемник пирометра и определяющая электрический сигнал одного канала пирометра, дается выражением

$$I(\lambda, T) = \int_{\lambda} \tau_i(\lambda) N_0(\lambda, T) k(\lambda, T) d\lambda,$$

где $N_0(\lambda T)$ – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела,

$k(\lambda, T)$ – коэффициент поглощения водяного пара,

$\tau_i(\lambda)$ – спектральная чувствительность i -го канала пирометра, складывающаяся из коэффициента пропускания интерференционного фильтра, используемого для выделения спектральной полосы излучения водяного пара, и спектральной чувствительности фотоприемника. Для оптического тонкого слоя отношение спектральных интенсивностей излучения по двум каналам определяет градуировочную характеристику пирометра $\beta = I_{\lambda 1}/I_{\lambda 2}$, которая не зависит от характерного размера исследуемого потока и концентрации излучающих молекул, что и дает возможность измерять температуру. Пример сигнала, регистрируемого пирометром, и соответствующей ему температуры приведен на рис. 2.

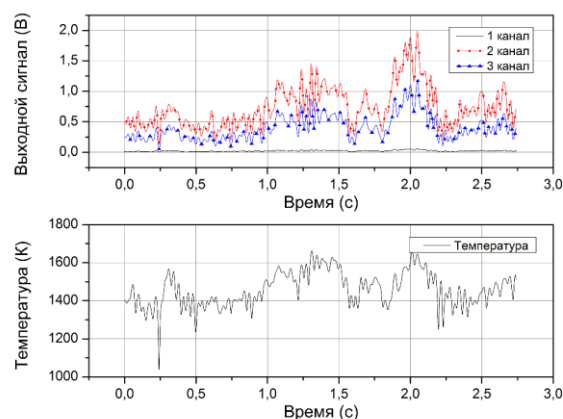


Рис. 2. Пример сигнала, регистрируемого пирометром, и соответствующей ему температуры.

4. Томографическая система измерений

Для построения системы измерений локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения предлагается использовать схему, основанную на нескольких поворотных зеркалах (рис. 3) [9]. Одно зеркало является мультиплексирующим. Другие зеркала сканирующими – поворачиваясь вокруг своей оси, они производят сканирование лучом зрения пирометра по измеряемому полю температур. Мультиплексирующее зеркало стоит непосредственно на пути луча зрения и направляет его на одно из сканирующих зеркал.

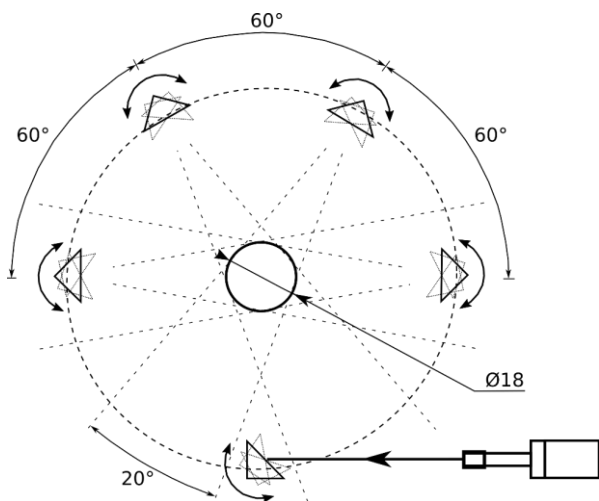


Рис. 3. Геометрическая схема построения томографической системы.

Для каждого положения зеркал в эксперименте измеряются значения сигналов с фотодиодов для двух длин волн: 1,38 мкм и 1,48 мкм. Локальные температуры рассчитываются с помощью томографического подхода.

Диаметр измеряемого поля составляет 100 мм, диаметр окружности, на которой расположены зеркала – 700 мм. Четыре сканирующих зеркала расположены примерно под углами 0°, 60°, 120° и 180° к оси абсцисс с одной стороны от исследуемого объекта и образуют трапецию.

Пятое зеркало играет роль мультиплексора, передавая оптический сигнал с одного из сканирующих зеркал на ПСО. Все зеркала расположены на окружности, центр которой лежит на оси исследуемого пламени. Разность оптического хода между верхним и нижним сканирующим зеркалом



Рис. 4. Газовая горелка на смеси изобутан/пропан (75/25), используемая в качестве объекта исследования.

составляет 180 мм. Угол сканирования каждого зеркала составляет около 20°.

Для управления системой было разработано специализированное программное обеспечение PyroTOMometer. Оно обеспечивает контроль над всеми компонентами системы и позволяет максимально автоматизировать процесс эксперимента и получения результатов измерения. Расположение сканирующих и мультиплексирующего зеркал, а также пирометра в пространстве на реальной установке задается с помощью графического интерфейса. Все результаты измерения автоматически сохраняются при помощи программного обеспечения, а графический интерфейс позволяет визуализировать сохраненные данные.

PyroTOMometer также обладает возможностью моделировать измерения. Для этого в графическом интерфейсе на схему добавляется температурное поле заданного распределения. Программа рассчитывает интегральный сигнал исходя из пространственного положения пирометра, зеркал и температурного поля. Изменение положения зеркал и расчет сигнала для каждого положения дает набор смоделированных экспериментальных измерений. На их основе рассчитываются температурные томограммы с помощью алгоритма фурье-синтеза. Такой подход позволяет оценить результат измерений, меняя положения зеркал и шаг их поворота.

Другая возможность PyroTOMometer – проведение автоматической калибровки системы. На основе предварительных данных о положении элементов системы алгоритм рассчитывает оценочные углы поворота мультиплексирующего и измерительных зеркал. Далее измеряется сигнал пирометра во время сканирования измерительным зеркалом при нескольких значениях угла поворота мультиплексирующего зеркала. По максимуму сигнала пирометра определяется оптимальное положение мультиплексирующего зеркала относительно измерительного и диапазон углов для измерения последнего.

Эти две особенности PyroTOMometer позволяют оценить взаимное положение элементов системы в пространстве до проведения экспериментальных измерений, а также провести настройку системы в автоматическом режиме, без присутствия человека в непосредственной близости от испытуемого агрегата. Это позволяет снизить расходы во время проведения стендовых испытаний.

5. Экспериментальные исследования

В эксперименте использовался длиннофокусный объектив с расстоянием от объектива до зеркала 60 мм. Режим микрошага контроллера шаговых двигателей для мультиплексирующего зеркала равен 1/8, для сканирующих зеркал – 1/32.

В качестве объекта исследования была использована газовая горелка (рис. 4) на смеси изобутан/пропан (75/25). Горелка имеет частоту колебания несколько герц, из-за чего возникает колебание величин измеряемых сигналов. Для борьбы с этим негативным эффектом использовалось многократное сканирование одним зеркалом пламени с последующим усреднением измеренных значений и применением фильтра скользящего среднего к итоговому результату. Измерения проводились в плоскости, расположенной в 5-10 мм над верхней точкой горелки.

Для улучшения качества рассчитываемых томограмм проводилось их сглаживание и усреднение по нескольким измерениям. Пример томограммы первого канала после усреднения по 15-ти измерениям приведен на рис. 5.

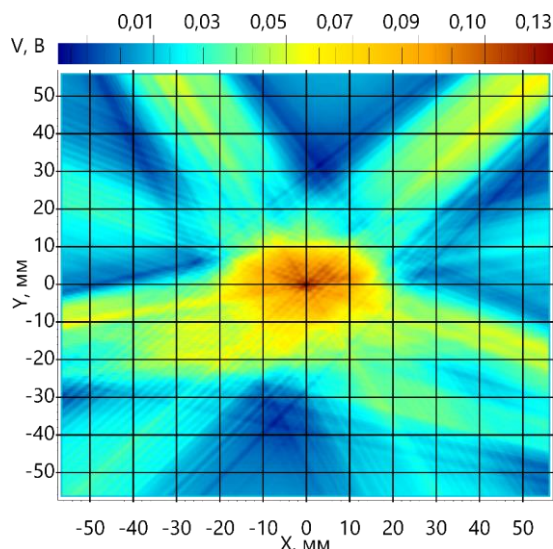


Рис. 5. Пример томограммы первого канала после усреднения по 15-ти измерениям.

Результат обработки имеет физический смысл: томограмма повторяет форму горелки с ярко выраженным максимумом, сдвинутым относительно центра. Этот сдвиг виден на рис. 4 и 5 и подтвержден визуальным наблюдением за пламенем горелки во время проведения эксперимента. Пример полученного температурного поля представлен на рис. 6.

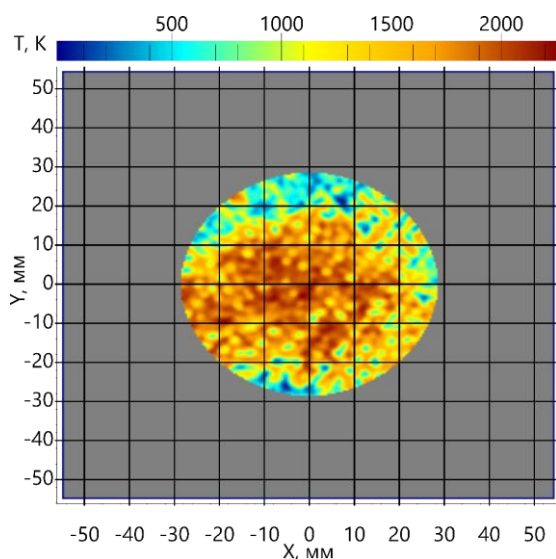


Рис. 6. Восстановленная томограмма распределения температуры в пламени горелки по результатам экспериментальных измерений.

6. Заключение

С помощью экспериментальных исследований была продемонстрирована возможность создания томографической системы измерений локальных температур пламени на основе пирометра спектрального отношения. Рассматриваемая система состоит из нескольких сканирующих зеркал, одно из которых является мультиплексирующим, передающим оптический сигнал с одного из сканирующих зеркал на ПСО, и самого пирометра. Все зеркала расположены на окружности, центр которой лежит на оси исследуемого пламени. Предложенная схема позволяет использовать всего один пирометр для визуализации поля температур пламени размером 50×50 мм. Размер визуализируемой области может быть легко

увеличен с помощью добавления зеркал и изменения геометрии их расположения.

Проведены экспериментальные исследования с помощью разработанной томографической системы на пламени газовой горелки. Измеренные температуры пламени лежат в диапазоне 1500-2300°K, что согласуется с теоретическими температурами горения изобутан-пропановой смеси [13]. Полученные результаты обработки качественно совпадают с ожидаемыми от конструкции газовой горелки температурными полями.

7. Литература

- [1] Авиационные правила - 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории – Межгосударственный авиационный комитет, ОАО «АВИАИЗДАТ», 2009. 274 с.
- [2] Алиходжина Н.В., Фланден В.С., Аникин К.А. Пирометр и пламя // Наука сегодня: фундаментальные и прикладные исследования. Материалы международной науч.-практ. конференции. В двух частях. 2017. С. 24-26.
- [3] Бакулев В.И., Голубев В.А., Нечаев Ю.Н. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. М.: МАИ, 2003. 688 с.
- [4] Голенцов Д.А., Романов В.Б., Сахаров В.Б. Пирометр спектрального отношения для определения температуры газовых потоков // Оптические методы исследования потоков: Труды VIII Межд. науч.-технич. конференции. М.: Изд-во ЗАО Фирма «Знак», 2005. С. 178-181.
- [5] Дьяченко Н.Х., Батурин С.А., Ложкин В.Н. Метод высокотемпературной пирометрии пламени в дизеле // Двигатели внутреннего сгорания. М.: НИИинформтяжмаш, 1977. № 4-77-14. С. 12-14.
- [6] Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь 1989. 224 с.
- [7] Новиков В.Н., Сахаров В.Б., Смирнов Л.И. Пирометр спектрального отношения // Измерительная техника. 1987. № 12. С. 42-43.
- [8] Поройков А.Ю., Сахаров В.Б. Пирометр спектрального отношения для измерения высоких температур в газовых потоках // Приборы и техника эксперимента. №6, 2016. С. 131-132.
- [9] Поройков А.Ю., Фланден В.С., Лапицкий К.М. Томографическая система измерения локальных температур пламени с помощью пирометра спектрального отношения // Приборы и техника эксперимента. № 1, 2019. С. 110-116.
- [10] Похлебаев Д.В., Саенко Г.И., Клевцев К. В. Пирометр спектрального отношения // Информационные и измерительные системы и технологии. Сборник научных статей по материалам Международной научно-технической конференции. 2016. С. 83-87.
- [11] Сахаров В.Б., Садовин М.А., Поройков А.Ю. Особенности определения высокой температуры газового потока пирометром спектрального отношения // АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА. Москва 24-27 ноября 2015 г. Сборник тезисов докладов. М.: ЦИАМ, 2015. С. 813-815.
- [12] Сеньков А.Г., Фираго В.А. Оптимизация характеристик пирометров спектрального отношения // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. 2009. № 1. С. 47-54.
- [13] Фролов Ю.В. (ред.) Теория горения и взрыва. Т. 1. М.: Наука, 1981. 412 с.
- [14] Фрунзе, А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения // Фотоника, 2009. № 4 -С. 32-37.
- [15] Cai W., Kaminski C. F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows// Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 59. P. 1-31.

- [16] Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE, 2009. 562 pp.
- [17] Kak A. C., Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001. 329 pp.
- [18] Kranendonk L.A., Caswell A.W., Hagen C.L., Neuroth C.T., Shouse D.T., Gord J.R., Sanders S.T. Temperature measurements in a gas-turbine-combustor sector rig using swept-wavelength absorption spectroscopy // Journal of Propulsion and Power. 2009. Vol. 25. №. 4. P. 859-863.
- [19] Wang F., Wu Q., Huang Q., Zhang H., Yan J., Cen K. Simultaneous measurement of 2-dimensional H₂O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using TDLAS-based tomography technology // Optics Communications. 2015. Vol. 346. P. 53-63.

Об авторах

Фланден Вячеслав Сергеевич, ассистент кафедры основ радиотехники НИУ «МЭИ», младший научный сотрудник отдела «Измерительной техники и метрологии» ЦИАМ им. П.И. Баранова. E-mail: bossboskama3@mail.ru.

Поройков Антон Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры физики им. В.А. Фабриканта НИУ «МЭИ». E-mail: rogoukovay@gmail.com.

Голенцов Дмитрий Анатольевич, к.ф.-м.н, начальник сектора отдела «Измерительной техники и метрологии» ЦИАМ им. П.И. Баранова E-mail: dgoldan-00@mail.ru.

Математическое моделирование контактного взаимодействия пластинки и балки в поле цветного шума

Т.В. Яковлева^{1,2}, В.Г. Баженов¹, В.А. Крысько²
yan-tan1987@mail.ru | bazhenov@mech.unn.ru | tak@san.ru

¹ Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

В работе построена математическая модель и визуализация данных контактного взаимодействия пластинки и балки, находящихся под действием внешней поперечной нагрузки и внешнего аддитивного цветного шума. Конструкция находится в стационарном температурном поле, воздействие которого учтено по теории Дюамеля–Неймана путем решения трехмерного и двумерного уравнений теплопроводности методом конечных разностей, теплообмен между пластинкой и балкой не учитывается. Пластинка подчинена модели Кирхгофа, а балка – Эйлера–Бернулли. Математическая модель учитывает физическую нелинейность упруго деформируемого материала. Контактное взаимодействие учтено по теории Б.Я.Кантора. Система дифференциальных уравнений сведена к задаче Коши методом Бубнова–Галеркина в высших приближениях по пространственным переменным. Задача Коши решена методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности. Для решения физически нелинейной задачи на каждом шаге по времени применена итерационная процедура И.А. Биргера. Визуализация результатов численного эксперимента проведена методами нелинейной динамики и с применением вейвлет-анализа. Приведены численные результаты влияния цветного шума на контактное взаимодействие пластинки и балки. Установлено, что красный аддитивный шум оказывает более существенное влияние на характер колебаний пластинчато-балочной структуры по сравнению с розовым и белым шумом.

Ключевые слова: визуализация данных, пластинка, балка, контактное взаимодействие.

Mathematical Modeling of the Contact Interaction of Plate and Beam in Color Noise Field

T.V. Yakovleva^{1,2}, V.G. Bazhenov¹, V.A. Krysko²
yan-tan1987@mail.ru | bazhenov@mech.unn.ru | tak@san.ru

¹Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia;

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

A mathematical model and data visualization of contact interaction between a plate and a beam under the action of external transverse load and external additive color noise is constructed. The construction is in a stationary temperature field, the effect of which is taken into account according to the theory of Duhamel Neumann by solving the three-dimensional and two-dimensional heat conduction equations by the finite difference method, the heat exchange between the plate and the beam is not taken into account. The plate is subject to the Kirchhoff model, and the beam to the Euler- Bernoulli model. The mathematical model takes into account the physical nonlinearity of the elastically deformable material. Contact interaction is taken into account according to the theory of Kantor. The system of differential equations is reduced to the Cauchy problem by the Bubnov-Galerkin method in higher approximations in spatial variables. The Cauchy problem is solved by the Runge-Kutta method of the fourth order of accuracy. To solve the physically nonlinear problem, at each time step, an Birger iterative procedure was applied. The visualization of the results of a numerical experiment was carried out using the methods of nonlinear dynamics and using wavelet analysis. The numerical results of the effect of color noise on the contact interaction between the plate and the beam are given. It has been established that red additive noise has a more significant effect on the oscillation pattern of the lamellar-beam structure in comparison with pink and white noise.

Keywords: data visualization, plate, beam, contact interaction.

1. Введение

Визуализация задач нелинейной динамики позволяет нам произвести качественную оценку поведения сложных механических конструкций на новом уровне. Составные элементы современной техники подвержены внешнему динамическому воздействию силового и шумового характера. Этот факт обуславливает необходимость комплексного исследования [3] поведения конструкций и определения их предельных состояний. Для описания случайных во времени воздействий внешней среды на конструкцию часто используется модель цветного шума. Теория индуцированных шумом реакций в области физики, химии и биологии представлена в работе В. Хорстхемке и Р. Лефевра [8]. В области механики тонкостенных конструкций такие исследования в достаточной степени не проведены. Цветовые соответствия для различных видов шумового сигнала определяются по графикам спектральной плотности, то есть через распределение мощности сигнала

по частотам. Различают белый, розовый (фликкер-шум), красный (броуновский) шумы. В известной литературе рассматривается влияние шумов на механические распределенные конструкции, но без учета тепловых полей [1-2]. В статьях [10, 12] рассмотрено влияние температурного поля на механические конструкции. Важным вопросом являются методы научной визуализации результатов. Настоящая статья направлена на построение математической модели и визуализации контактного взаимодействия пластинки и балки с учетом влияния физической нелинейности, цветного шума и температурного поля.

2. Математическая модель контактного взаимодействия пластинки и балки

Построена математическая модель контактного взаимодействия механической двухслойной конструкции, состоящей из пластинки и балки (рис. 1), с использованием кинематических моделей для пластинки – Кирхгофа, а для

балки – Эйлера–Бернулли [6]. Механическая конструкция находится в поле внешнего цветного шума и под действием внешней поперечной распределенной знакопеременной нагрузки, приложенной к пластинке.

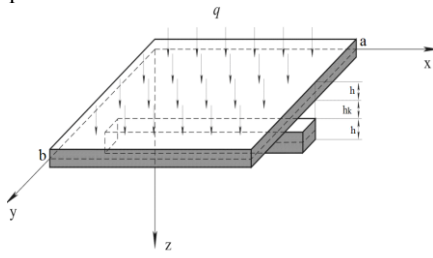


Рис. 1. Двухслойная пластинчато-балочная структура.

При этом конструкция находится в стационарном температурном поле. Связь между напряжениями и деформациями в пластинке ($\beta_1 = 1$) и балке ($\beta_1 = 0$) записана в форме:

$$\varepsilon_1^z = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \beta_1 \nu \sigma_2) + \alpha_T \theta, \quad (1.2), \quad \varepsilon_{12}^z = \beta_1 2 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{12}, \quad (1.2),$$

где E – модуль Юнга и ν – коэффициент Пуассона являются функциями: $E = E(x, \beta_1 y, z, \varepsilon_0, \varepsilon_i, \theta)$, $\nu = \nu(x, \beta_1 y, z, \varepsilon_0, \varepsilon_i, \theta)$; ε_0 – объемная деформация; ε_i – интенсивность деформации; α_T – коэффициент линейного теплового расширения; $\theta(x, \beta_1 y, z)$ – приращение температуры (для пластинки ($\beta_1 = 1$) и для балки ($\beta_1 = 0$)). На таком представлении базируется метод переменных параметров упругости Биргера И.А. [5]

Уравнения движения элемента пластинки и уравнения движения элемента балки, а также граничные и начальные условия получены из вариационного принципа Остроградского–Гамильтона [11, 7].

Для моделирования контактного взаимодействия применена теория Кантора Б.Я. [9], согласно которой в уравнения движения элементов конструкции необходимо добавить слагаемое $q_k = (-1)^i K_i (w_1 - h_k - w_2) \Psi$, где $i = 1, 2$ – индекс элемента в конструкции (1– пластинка, 2–балка), K_i – коэффициент жесткости трансверсального обжатия конструкции в зоне контакта, h_k – зазор между элементами конструкции. Функция Ψ определена формулой $\Psi = \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(w_1 - h_k - w_2)]$ (если $w_1 > h_k + w_2$, то между элементами конструкции есть контакт и $\Psi = 1$; в случае отсутствия контакта $\Psi = 0$). С учетом всех предположений система уравнений пластинчато-балочной конструкции записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [-C_{1x} - C_1] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} [-C_{1y} - C_1] - 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y} C_{1xy}) + q_1 + q_{noise} + q_k - \\ - \frac{\gamma}{g} h \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\gamma}{g} h \frac{\partial w_1}{\partial t} = 0, \\ - \frac{\partial^2}{\partial x^2} (C_2 \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}) - \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + q_2 - \frac{\gamma}{g} h \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\gamma}{g} h \frac{\partial w_2}{\partial t} + q_k = 0, \\ \nabla^2(\theta_1) = 0 \quad (\beta_1 = 1), \quad \nabla^2(\theta_2) = 0 \quad (\beta_1 = 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad M_1 &= \alpha_2 \int_{-h/2}^{h/2} E_2 \theta_2 z dz, & C_1 &= \alpha_1 \int_{-1/2}^{1/2} \theta_2 (1 + \nu) dz, \\ C_{1x} &= \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{E_1 z^2}{1 - \nu^2} dz + \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{E_1 z^2 \nu}{1 - \nu^2} dz, & C_{1xy} &= \int_{-1/2}^{1/2} \frac{E_1 z^2}{1 + \nu} dz, \\ C_{1y} &= \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{E_1 z^2}{1 - \nu^2} dz + \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{E_1 z^2 \nu}{1 - \nu^2} dz, & C_2 &= \int_{-1/2}^{1/2} E_2 z^2 dz \end{aligned}$$

$e_1 = \varepsilon_{11}^z + \beta_1 \varepsilon_{22}^z, \nabla^2(\theta_1)$ – трехмерный ($\beta_1 = 1$) и $\nabla^2(\theta_2)$ – двумерный ($\beta_1 = 0$) операторы Лапласа, ε – коэффициент диссипации. Никаких ограничений на распределение температуры по толщине пластинки и высоте балки не делается. Имеется возможность рассматривать разные диаграммы $\sigma_i(\varepsilon_i, \theta)$, описывающие зависимость напряжения для ряда материалов от деформации и температуры.

К пластинке приложена внешняя распределенная нагрузка вида $q_1 = q_0 \sin \omega_p t$, где q_0 – ее амплитуда и ω_p – частота. Аддитивный цветной шум добавлен в систему (1) в форме случайного слагаемого с постоянной интенсивностью q_{noise} [4]. Цветной шум сгенерирован средствами MathLab. Спектральная плотность мощности избыточных (технических) шумов подчинена степенному закону $S(\omega) = h_\gamma \omega^\gamma, -2 \leq \gamma \leq 2$, где h_γ – масштабный коэффициент, определяющий уровень шума. Традиционно с каждым целочисленным значением γ связан определенный цвет: $\gamma = 0$ для белого шума, $\gamma = +2$ для броуновского (красного) шума, $\gamma = +1$ для розового шума.

3. Методы решения

Рассматриваемая механическая конструкция (рис. 1) помещается в температурное поле, интенсивность которого в процессе динамического воздействия остается постоянной. Для оценки распределения температуры в пластинке и балке решается трех- (для пластинки) и двумерное (для балки) уравнения теплопроводности при соответствующих граничных условиях 1-го, 2-го, 3-го рода. Стационарные уравнения теплопроводности для пластинки и балки решаются методом конечных разностей второго и четвертого порядка точности. Система уравнений (1) сводится к задаче Коши методом Бубнова–Галеркина в высших приближениях. Задача Коши решается методом Рунге–Кутты. На каждом временном шаге строится итерационная процедура метода переменных параметров упругости Биргера И.А. Проведенные исследования дают возможность рассматривать конструкцию (рис. 1) как систему с «почти» бесконечным числом степеней свободы.

Дальнейшая визуализация исследования контактного взаимодействия и характера колебаний пластинки и балки проводилась методами нелинейной динамики с построением сигналов, фазовых портретов, спектров мощности Фурье и использованием вейвлет-анализа. Для достоверности визуализации данных в качестве материнского вейвлета были использованы вейвлеты Морле, Гаусса 8 - Гаусса 32 и Хаара.

4. Численный эксперимент

Приведем результаты численного эксперимента для контактного взаимодействия пластинки и балки, шарнирно опертых на краях. Амплитуда внешней поперечной нагрузки $q_0 = 10$, частота внешнего возбуждения $\omega_p = 5$, зазор между пластинкой и балкой $h_k = 0.01$, коэффициент диссипации $\varepsilon = 1$. Изучим влияние цветного шума различной природы и интенсивности на характер колебаний пластинчато-балочной конструкции. При отсутствии шумового поля ($q_{noise} = 0$) характер колебаний пластинки гармонический на частоте внешнего возбуждения $\omega_p = 5$. Балка в этом случае находится в покое, т.к. контактного взаимодействия не происходит. При добавлении к внешней нагрузке белого шума ($\gamma = 0$) интенсивностью $q_{noise} = 1$ колебания пластинки осуществляются на двух основных частотах: $\omega_p = 5$ и $\omega_1 = \omega_p / 3 \approx 1.6$. При $q_{noise} = 5$ колебания пластинки осуществляются на трех основных частотах: $\omega_p = 5, \omega_1 = \omega_p / 3 \approx 1.6$ и $\omega_2 = 2\omega_p / 3 \approx 3.3$. При

$q_{noise} = 100$ колебания пластинки становятся хаотическими. Первоначальное контактное взаимодействие пластинки и балки происходит при $q_{noise} = 244$, колебания пластинки носят хаотический характер. В таблице 1 приведены графики совместных колебаний пластинки (w_1) и балки (w_2), 2D вейвлет-спектры Морле $\omega(t)$ и спектры мощности Фурье. При добавлении к внешней нагрузке красного шума ($\gamma = +2$) первоначальное контактное взаимодействие пластинки и балки наступает при $q_{noise} = 7$. В случае добавления розового шума ($\gamma = +1$) контактное взаимодействие пластинки и балки наступает при $q_{noise} = 43$.

Таблица 1.
Влияние шума на контактное взаимодействие пластинки и балки

	без шума $q_{noise} = 0$	белый шум ($\gamma = 0$) $q_{noise} = 244$
Сигнал $w(t)$		
2D вейвлет-спектр Морле $\omega(t)$		
Спектр мощности		

5. Заключение

В работе посредством визуализации научных данных изучено контактное взаимодействие пластинки и балки, находящихся в аддитивном цветном шуме и температурном поле, с учетом физической нелинейности. Проведенный анализ показал, что по сравнению с розовым и белым шумами более существенное влияние на характер колебаний пластинчато-балочной конструкции оказывает красный шум. Научная визуализация результатов проведена на основе построения сигналов, фазовых портретов, спектров мощности Фурье и использования вейвлет-преобразований. Установлено, что вейвлет Морле является наиболее информативным для рассматриваемой задачи, так как он дает лучшую частотную локализацию в каждый момент времени.

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 15-19-10039-П.

7. Литература

- [1] Awrejcewicz J., Krysko A.V., Erofeev N.P., Dobriyan V., Barulina M.A., Krysko V.A. Quantifying chaos by various computational methods. Part 2: Vibrations of the Bernoulli-Euler beam subjected to periodic and colored noise. *Entropy*. 2018. Vol. 20. No 3. 170.
- [2] Awrejcewicz J., Krysko A.V., Papkova I.V., Zakharov V.M., Erofeev N.P., Krylova E.Yu., et al. Chaotic dynamics of flexible beams driven by external white noise. *Mech. Syst. Signal Process.* 2016. No 79. P. 225–253.

[3] Awrejcewicz, J., Krysko, V.A., Yakovleva, T.V., Pavlov, S.P., Krysko-jr., V.A. Nonlinear dynamics of contact interaction of a size-dependent plate supported by a size-dependent beam. *Chaos*. 28, 053102 (2018).

[4] Баженов В.Г., Крылова Е.Ю., Яковлева Т.В. Нелинейные колебания пластины, подкрепленной локальным набором ребер, в условиях аддитивного белого шума. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. № 3. С. 259–266.

[5] Биргер И.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности. *ПММ*. 1951.

[6] Вольмир А.С. *Нелинейная динамика пластинок и оболочек*. М.: Наука, 1972. 432 с.

[7] Hamilton W. *Report of the Fourth Meeting of the British Association for the Advancement of Science*. London, 1835.

[8] Horsthemke W., Lefever R. Noise-Induced Transitions. Theory and Applications in Physics, Chemistry, and Biology. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. 1984. P. 107

[9] Кантор Б.Я. *Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения*. Киев: Наукова думка, 1990. 100 С.

[10] Krysko A.V., Awrejcewicz J., Kutepov I.E., Krysko V.A. Stability of curvilinear Euler-Bernoulli beams in temperature fields. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2017. No 94. P. 207–215.

[11] Ostrogradsky M. *Memoires de l'Academie imperiale des sciences de St. Petersburg*. 1850, vol. 8, no. 3, pp. 33–48.

[12] Яковлева Т.В., Крыско В.А.-мл. Контактное взаимодействие физически нелинейной трехслойной пластинчато-балочной конструкции в температурном поле. *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 6. С. 9–14.

Об авторах

Яковлева Татьяна Владимировна, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Математика и моделирование» физико-технического института Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.; Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, E-mail: yan-tan1987@mail.ru.

Баженов Валентин Георгиевич, д.ф.-м.н. профессор, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. E-mail: bazhenov@mech.unn.ru.

Крыско Вадим Анатольевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Математика и моделирование» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. E-mail: tak@san.ru.



Компьютерное зрение

Computer Vision

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Palm Vein Recognition Algorithm using Multilobe Differential Filters

E. I. Safronova¹, E. A. Pavelyeva¹
 katyasafit@gmail.com|paveljeva@yandex.ru

¹Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

In this article the new algorithm for palm vein recognition using multilobe differential filters is proposed. After palm vein image preprocessing vein structure is detected based on principal curvatures. The image is considered as a surface in a three-dimensional space. Some vein points are selected using the maximum principal curvature values, and the other vein points are found from starting points by moving along the direction of minimum principal curvature. Multilobe differential filters are used to extract feature maps for vein images. These filters are flexible in terms of basic lobe choice and spatial configuration of lobes. The multilobe differential filters used in the article simulate vein branch points, and Gaussian kernel is used as the basic lobe. The normalized root-mean-square error is applied for image matching. Experimental results using CASIA multi-spectral palmprint image database demonstrate the effectiveness of the proposed method. The value of EER=0.01693 is obtained.

Keywords: biometrics, palm vein recognition, principal curvatures, multilobe differential filters

1. Introduction

Biometrics recognizes individuals based on the characteristics, known as modalities, that uniquely identify a person from an entire population based on intrinsic physical or behavioral traits [8]. Each biometric modality has its advantages.

Palm vein recognition is an emerging personal identification technology. Since veins are usually not visible to others, they can be used for personal identification purposes at low risk of forgery or theft. Veins are captured by infrared camera since deoxygenated hemoglobin in the vein blood absorbs near infrared light. Among other important advantages vein patterns are quite unique to the owners, image acquisition does not require physical contact, and the system can be made compact. Extracting vein structure at their accurate positions regardless of their thickness and brightness is necessary for accurate personal identification.

Ordinarily, palm vein recognition algorithm consists of three steps (Fig. 1). The first one, region of interest (ROI) extraction, includes properly extraction and image preprocessing.

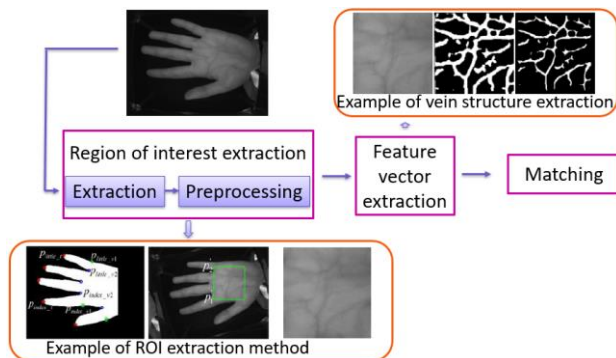


Fig. 1. The scheme of palm vein recognition algorithm.

The second step, feature vector extraction, represents the main difference between existing approaches. Some methods could be derived from other biometric recognition algorithms: for example, methods that employ statistical information (such as local binary patterns, local derivative patterns) [12, 21], methods that extract feature points and then match them [11, 14, 26], subspace-based methods [25], phase based methods [7, 17, 18] and etc. Some approaches were developed specifically for vein recognition [5, 15].

The last algorithm step, image matching, is based on feature vector type. At this stage the distance between palm vein images is calculated.

Much recent work has been focused on employing deep convolutional neural networks in various domains, and the field

of biometrics is not an exception. Consider some examples of applying deep learning methods to different steps of palm vein recognition algorithm. To perform the first algorithm step and to extract the palm vein ROI's, the region-based convolution neural network that localize the region of interest might be used. The reference article [9] gives an example of successful realization. Deep convolution neural network could be trained as feature extractor. Authors of [25] proposed to use the pre-trained DCNN model trained on large-scale database like ImageNet. They described a novel global max-pooling of preserving spatial position information that is applied for the feature maps of convolutional layer to localize vein minutiae features. As for matching, the last step of recognition algorithm, we can consider [24]. The proposed biometric authentication approach is based on Siamese convolution neural network framework with a triplet loss function, that enables an idea to learn the distance metric between positive, anchor, and negative embeddings.

In this article we propose the use of multilobe differential filters (MLDF) for palm vein recognition. Recently, ordinal measures have achieved promising performance in different biometric tasks [4, 22, 23]. Ordinal measures represent a general concept of image analysis with numerous variants of different parameter settings such as location, scale, orientation etc. They are defined as the relative ordering of a set of regional image features (e.g. average intensity, Gabor wavelet coefficients, etc.). The main idea of ordinal measures is to distinguish the image structures with specific texture. MLDF can represent ordinal features. MLDF is a general concept of differential and bandpass filters and is flexible in terms of basic lobe choice, spatial configuration of lobes, etc. [22]. In this article the positive and negative lobes are represented by Gaussian filters.

The rest of this paper is organized as follows: in Section 2 the vein image segmentation and ROI extraction algorithms are described. Our ROI image preprocessing approach is given in Section 3. The main steps of the proposed vein structure extraction algorithm are introduced in Section 4. Feature extraction and feature matching methods are presented in Sections 5 and 6, respectively. The experimental results for images from CASIA multi-spectral palmprint image database [3] are given in Section 7. Finally, Section 8 concludes this paper.

2. Region of interest extraction

The proposed palm vein ROI segmentation scheme is illustrated in Fig. 2. Gaussian blur is first adopted for smoothing the images (Fig. 2 a). Then OTSU algorithm [16] is applied to extract hand contours from grayscale palm vein images (Fig. 2 b). Since the lighting provides poor contour segmentation performance at the wrist section of the image [10], the

coordinates of the centroid $C(X_c, Y_c)$ of the binary image are calculated:

$$X_c = \frac{1}{|O|} \sum_{i \in O} X_i, Y_c = \frac{1}{|O|} \sum_{i \in O} Y_i,$$

where O is the set of object point on the binary image and $|O|$ is the power of this set. Then the lower part of image close to wrist is filled line by line with zeros until the distance from the filled area to C is equal to $L = 125$. (Fig. 2 c). Taking the midpoint of upper line of the filled area as the reference point W , the Euclidean distances between W and all points on the hand contour are calculated to obtain the radial distance function (RDF), as shown in Fig. 2(e). We can see that the minima in the RDF correspond to the finger valleys of the final binary image. The points between index and middle fingers, P_1 (Fig. 2 d), and forth and little fingers, P_2 , can be taken as landmarks for extraction of square ROI [13].

To eliminate the influence of palm rotation, the image is rotated to the angle θ which is the angle between the line P_1P_2 and the horizontal line:

$$\theta = \arctg((Y_{P_1} - Y_{P_2}) / (X_{P_1} - X_{P_2})),$$

where (X_{P_1}, Y_{P_1}) and (X_{P_2}, Y_{P_2}) are the coordinates of P_1 and P_2 , respectively.

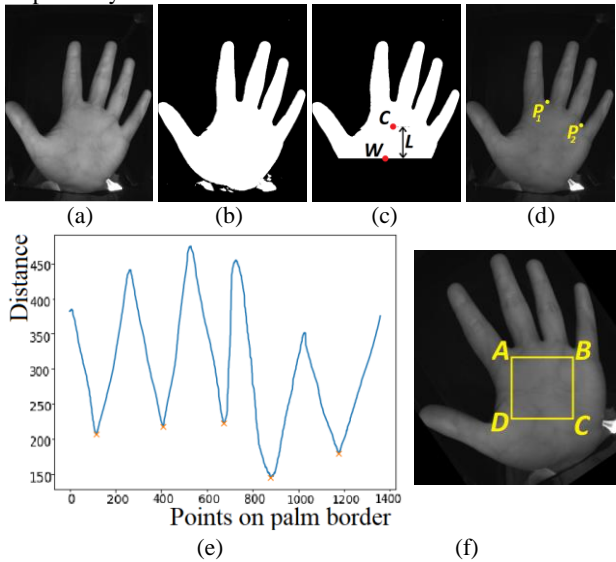


Fig. 2. Illustration of palm vein ROI extraction: (a) original palm image, (b) binary hand image, (c) reference point W and centroid C , (d) two landmark points P_1 and P_2 , (e) RDF, (f) the square region of interest $ABCD$ on the rotated image.

We denote the distance between P_1 and P_2 as d . Then the square region $ABCD$ with side d is extracted (Fig. 2 f), where the top side AB is lower by $d/6$ and parallel to P_1P_2 [7]. Then $ABCD$ is rescaled by bilinear interpolation to the square size 128×128 which is called as ROI.

To reduce the non-uniform illumination appearing in palm vein images the background brightness is found as convolution of ROI image with box filter size 17×17 . Then the background is subtracted and the histogram is stretched (Fig. 3).

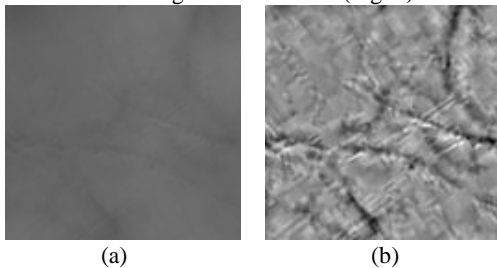


Fig. 3. (a) original ROI image, (b) ROI image with uniform illumination.

3. Image preprocessing

The following scheme of palm vein images preprocessing is used to emphasize veins structure (Fig. 4).

At first, contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE) technique [29] is used to improve contrast of images. After contrast enhancement all image details including noise and glares are sharper. In order to smooth the undesirable details, non-local means (NLM) algorithm [2] is used to reduce noise. NLM smoothies also veins a little so CLAHE is applied again to obtain distinguishable veins.

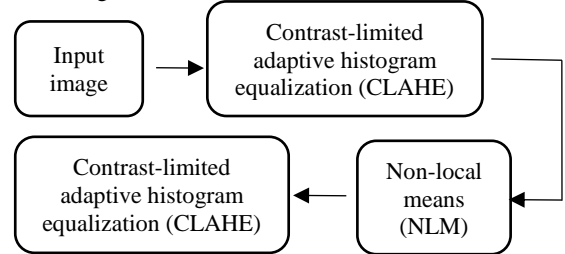


Fig. 4. The scheme of vein image preprocessing algorithm.

Fig. 5 shows the ROI of palm vein image and the results of preprocessing algorithm. After preprocessing veins become sharper and more distinguishable.

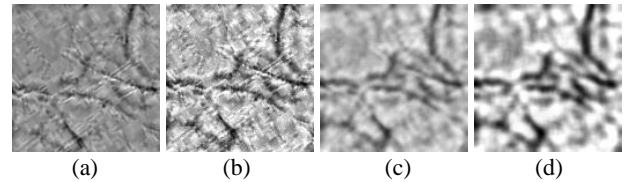


Fig. 5. The results of image preprocessing: (a) ROI, (b) ROI after the first step of preprocessing – CLAHE, (c) ROI after the second step of preprocessing – NLM, (d) ROI after the third step of preprocessing – CLAHE.

4. Vein structure extraction

The next step is vein structure extraction. Consider an image as a surface in a three-dimensional space, where the brightness value of the pixels is the z -coordinate. We are going to calculate the values of the principal curvatures and principal directions at each point by the following algorithm.

Let $L(x, y)$ denote the image intensity field at the pixel position. The gradient $G(x, y)$, which is a vector field of $L(x, y)$, is defined as follows:

$$G(x, y) = \left(\frac{\partial L(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial L(x, y)}{\partial y} \right).$$

Then the normalized gradient after hard thresholding is defined as:

$$G_\gamma(x, y) = \begin{cases} \frac{G(x, y)}{\|G(x, y)\|}, & \|G(x, y)\| \geq \gamma \\ 0, & \|G(x, y)\| < \gamma \end{cases},$$

where γ is a threshold level. In the experiments we use $\gamma = 4$. The normalized gradient field contains noisy components so we smooth it. Let $G_\gamma(x, y) = (g_x(x, y), g_y(x, y))$. Then smoothed normalized gradient components, h_x and h_y , are defined as:

$$h_x(x, y) = g_x(x, y) * H(x, y), \quad h_y(x, y) = g_y(x, y) * H(x, y),$$

where $H(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ is a Gaussian function.

The local shape characteristics of an image $L(x, y)$ at a point (x, y) can be described by the Hessian matrix:

$$H_S(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_x(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial h_x(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial h_y(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial h_y(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix}.$$

Let λ_1, λ_2 be the eigenvalues and v_1, v_2 be the corresponding eigenvectors of $H_S(x, y)$, $|\lambda_1| > |\lambda_2|$. Then the two principal directions, the directions of the maximum and minimum curvature, are determined by two eigenvectors, v_1, v_2 . Consequently, two eigenvalues λ_1, λ_2 represent the principal curvatures (the curvatures along the principal directions) [5] (Fig. 6).

In order to catch veins of different widths, consider the set of parameters σ for the Gauss function: $\sigma_0, \dots, \sigma_{n-1}$, where $n = 10$, $\sigma_i = \sigma_0 \cdot \sqrt[4]{2^i}$, $\sigma_0 = 2$, $i = 0, 1, \dots, 9$. For each value of σ the Hessian matrix is constructed, at each point the maximum positive eigenvalue λ_1 and an eigenvector v_2 of the minimum eigenvalue are calculated. Then, at each point of the image, the largest value of λ_1 over all σ and the corresponding vector v_2 are taken.

In Fig. 6 the surface with a tubular shape like veins in infrared images is shown. At a point (x, y) , λ_1, λ_2 represent the maximum and the minimum principal curvature, vectors v_1, v_2 – the direction of them. Note that tubular-shaped regions have maximum principal curvature λ_1 higher than other regions. Next, mention that vector v_1 is directed across tubular direction and vector v_2 – along tubular direction [20] (Fig. 7). According to this we select points with highest maximum principal curvature values as points that certainly belong to veins (Fig. 8 b). So, the other vein points can be found from starting points by moving along direction of vector v_2 by $|\lambda_1|$. The extracted vein structures are shown in Fig. 8.

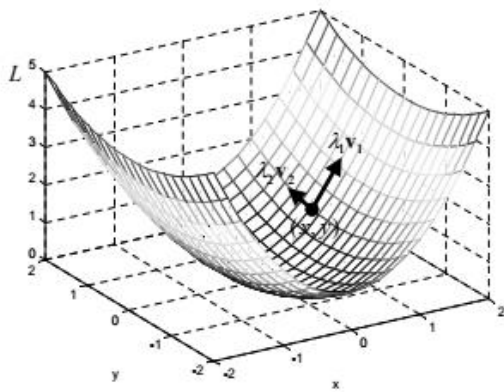


Fig. 6. Concept of the principal direction and the principal curvature: λ_1, λ_2 represent the maximum and the minimum principal curvature, v_1, v_2 – the direction of them.

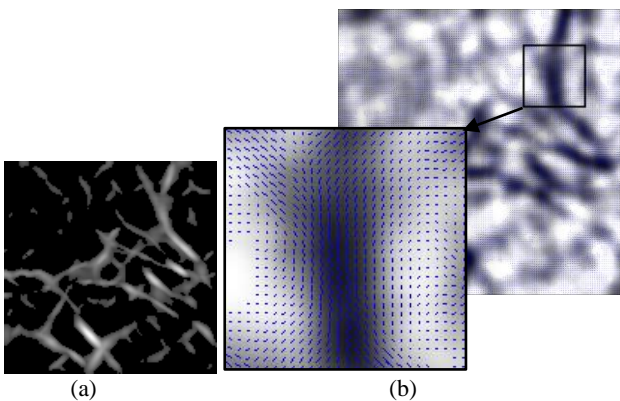


Fig. 7. (a) The computed positive maximum principal curvatures, λ_1 , of ROI image (Fig. 5d), (b) Vector field of direction for the minimum principal curvature v_2 with length in proportion to λ_1 .

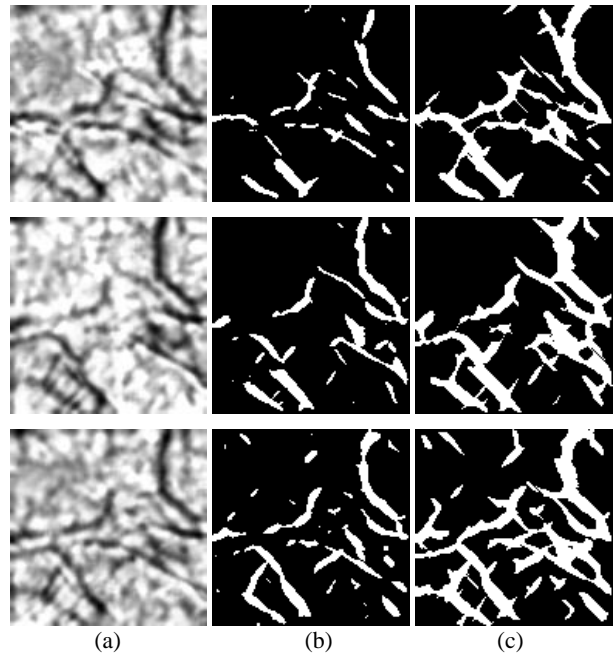


Fig. 8. Vein structures extraction: (a) ROI for different palm vein images of one person, (b) starting points with highest λ_1 belonging to veins, (c) found vein structure.

5. Feature extraction

The palm vein structure images after previous stage are not accurate enough so we will use them as a mask. We invert preprocessed ROI images so that vein pixels have higher values than background pixels and apply masks (Fig. 9).

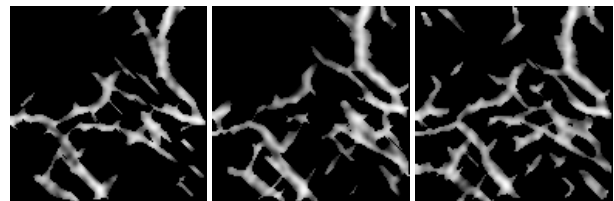


Fig. 9. The mask of ROI for different palm vein images of one person.

In this paper we propose the use of multilobe differential filters (MLDF) [22] for palm vein feature extraction, aiming to highlight vein branch points. We use the Gaussian kernel as the basic lobe, so mathematically the MLDFs are given as follows:

$$MLDF = C_p \sum_{i=1}^{N_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{pi}}} e^{-\frac{(x-\mu_{pi})^2}{2\sigma_{pi}^2}} - C_n \sum_{i=1}^{N_n} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{ni}}}$$

where the variables μ and σ denote the central positions and the scales of a 2D Gaussian filters respectively, N_p denote the number of positive lobes, and N_n denote the number of negative lobes. Constant coefficients C_p and C_n are used to ensure zero sum of the MLDF.

The most compelling feature of MLDF compared with traditional differential filters is that it decouples the settings of intralobe (scale) and interlobe (distance) parameters. Some examples of MLDF with different settings of parameters (distance, scale, orientation, number, and location) are illustrated in Fig. 10 a. MLDF can have visual meaning, for example, MLDF can represent point, line, edge, ridge, corner, slope (Fig. 10 b) [22].

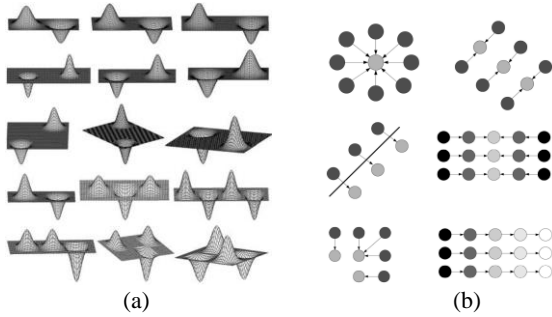


Fig. 10. (a) Some examples of multilobe differential filters. (b) Visual meanings of MLDF.

In order to select the points of interest, consider MLDF that simulate vein branch points (Fig. 11). We take the convolution results of the ROI images with the proposed MLDF kernels to obtain the feature maps of vein images. Compared with the previous approach [22], the convolution results are not binarized. It enables us to use more information and to achieve higher accuracy.

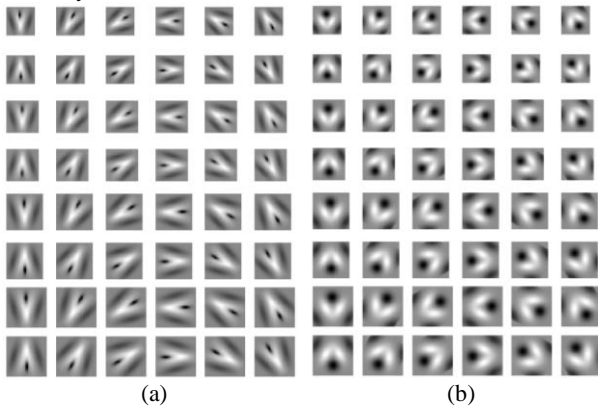


Fig. 11. Illustration of proposed multilobe differential filters for vein image analysis: (a) the first group: with 30 degree angle between two positive lobes; (b) the second group: with 60 degree angle between two positive lobes.

6. Feature matching

In order to provide slight translation and rotation invariance matching, the normalized root-mean-square error (NRMSE) is proposed for feature maps matching [6]:

$$E(f(x, y), g(x, y))^2 = \min_{\alpha, x_0, y_0} \frac{\sum_{x,y} |\alpha g(x - x_0, y - y_0) - f(x, y)|^2}{\sum_{x,y} |f(x, y)|^2}$$

$$= 1 - \frac{\max_{x_0, y_0} |r_{fg}(x_0, y_0)|^2}{\sum_{x,y} |f(x, y)|^2 \sum_{x,y} |g(x, y)|^2},$$

where the summation is over all the pixels (x, y) in the image;

$$r_{fg}(x_0, y_0) = \sum_{x,y} f(x, y) g^*(x - x_0, y - y_0)$$

$$= \sum_{u,v} F(u, v) G^*(u, v) e^{i2\pi(\frac{ux_0}{M} + \frac{vy_0}{N})}$$

is the cross correlation of $f(x, y)$ and $g(x, y)$; N and M are the image dimensions; $*$ denotes complex conjugation; uppercase letters represent the DFT of their lowercase counterparts, as given by the relation

$$F(u, v) = \sum_{x,y} \frac{f(x, y)}{\sqrt{MN}} e^{-i2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}.$$

7. Experimental results

In our research CASIA Multi-Spectral Palmprint Image Database [3] was used. It contains 7200 palm images captured from 100 different people using a self-designed multiple spectral imaging device. Each sample contains six palm images which are

captured at the same time with six different electromagnetic spectrums.

Given the intra and interclass vein matching results, the recognition performance is measured by the following indicators.

- 1) False Acceptance rate (FAR): the probability that the system incorrectly matches the input pattern to a non-matching template in the database.
- 2) False Reject Rate (FRR): the probability that the system fails to detect a match between the input pattern and a matching template in the database.
- 3) Equal error rate (EER), i.e., the cross-over error rate when FAR is equal to the FRR. Lower EER means higher accuracy of a biometric matcher.
- 4) The distribution of genuine and impostor scores.

In our study the part of the images from CASIA database obtained at 850 nm are taken. In Fig. 12 the results of the proposed algorithm are presented. We applied the first MLDF kernels group (Fig. 11 a) and both MLDF kernels group (Fig. 11 a, b). The EER results are 0.01693 in the first case and 0.01862 in the second case.

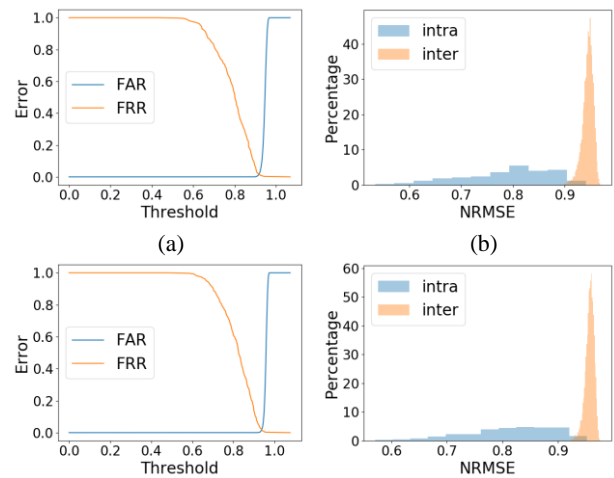


Fig. 12. Illustrations of the distribution of genuine and impostor scores, FAR and FRR curves: (a), (c) FAR and FRR curves; (b), (d) the distribution of genuine and impostor scores. The top row (a–b) corresponds to the first MLDF kernels group (Fig. 10 a), the bottom row (c–d) corresponds to both MLDF kernels group (Fig. 10 a, b).

A comparison of EERs derived from different approaches for CASIA database is given in Table 1. It shows the good performance of the proposed method. As an improvement of the proposed method, multilobe differential filters selection using machine learning techniques can be applied [23].

Reference	Method	EER
Kang W., Wu Q [10]	Improved LBP	0.00267
Zhou Y., Kumar A. [28]	NMRT	0.0051
	Hessian phase	0.0144
Thapar D., Jaswal G., Nigam A., Kanhangad V. [24]	PVSNet	0.0371
Bhilare S., Jaswal G., Kanhangad V., Nigam A. [1]	Deep matching	0.0261
Raghavendra R., Busch C. [19]	LD-KDA-SRC	0.1010±0.0102
Proposed method	MLDF	0.01693

Table 1. Summary of related approaches for palm vein verification using CASIA database.

8. Conclusion

In this paper the new palm vein recognition method based on multilobe differential filters is proposed. Palm vein image preprocessing and palm vein structure extraction are described. The points with high maximum principal curvature values are selected as starting points, and the other vein points are calculated using the direction of minimum principal curvature. Feature extraction is based on MLDF where the Gaussian kernel is used as the basic lobe. NRMSE is used for image matching. Experimental results demonstrate that the proposed approach gives good recognition accuracy.

9. References

- [1] Bhilare S., Jaswal G., Kanhangad V., Nigam A. Single-sensor hand-vein multimodal biometric recognition using multiscale deep pyramidal approach //Machine Vision and Applications. – 2018. – Vol. 29. – №. 8. – Pp. 1269-1286.
- [2] Buades A., Coll B., Morel J. M. A non-local algorithm for image denoising //Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on. – IEEE, 2005. – Vol. 2. – Pp. 60-65.
- [3] CASIA Multi-Spectral Palmprint Image Database <http://biometrics.idealtest.org/>
- [4] Chai Z., Sun Z., Mendez-Vazquez H., He R., Tan T. Gabor ordinal measures for face recognition //IEEE transactions on information forensics and security. – 2013. – Vol. 9. – №. 1. – Pp. 14-26.
- [5] Choi J. H., Song W., Kim T., Lee S. R., Kim H. T. Finger vein extraction using gradient normalization and principal curvature //Image Processing: Machine Vision Applications II. – International Society for Optics and Photonics, 2009. – Vol. 7251. – Pp. 725111.
- [6] Fienup J. R. Invariant error metrics for image reconstruction //Applied optics. – 1997. – Vol. 36. – №. 32. – Pp. 8352-8357.
- [7] Han W. Y., Lee J. C. Palm vein recognition using adaptive Gabor filter //Expert Systems with Applications. – 2012. – Vol. 39. – №. 18. – Pp. 13225-13234.
- [8] Jain A. K., Bolle R., Pankanti S. (ed.). Biometrics: personal identification in networked society. – Springer Science & Business Media, 2006. – Vol. 479.
- [9] Jha R. R., Thapar D., Patil S. M., Nigam A. Ubsegnet: Unified biometric region of interest segmentation network – IEEE, 2017.
- [10] Kang W., Wu Q. Contactless palm vein recognition using a mutual foreground-based local binary pattern //IEEE Transactions on information forensics and security. – 2014. – Vol. 9. – №. 11. – Pp. 1974-1985.
- [11] Ladoux P. O., Rosenberger C., Dorizzi B. Palm vein verification system based on SIFT matching //International Conference on Biometrics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – Pp. 1290-1298.
- [12] Lee E. C., Jung H., Kim D. New finger biometric method using near infrared imaging //Sensors. – 2011. – Vol. 11. – №. 3. – Pp. 2319-2333.
- [13] Lin C. L., Chuang T. C., Fan K. C. Palmprint verification using hierarchical decomposition //Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 38. – №. 12. – Pp. 2639-2652.
- [14] Matsuda Y., Miura N., Nagasaka A., Kiyomizu H., Miyatake T. Finger-vein authentication based on deformation-tolerant feature-point matching //Machine Vision and Applications. – 2016. – Vol. 27. – №. 2. – Pp. 237-250.
- [15] Miura N., Nagasaka A., Miyatake T. Feature extraction of finger-vein patterns based on repeated line tracking and its application to personal identification //Machine vision and applications. – 2004. – Vol. 15. – №. 4. – Pp. 194-203.

- [16] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms //IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. – 1979. – Vol. 9. – №. 1. – Pp. 62-66.
- [17] Pavelyeva, E. A. Image processing and analysis based on the use of phase information //Computer Optics. – 2018. – Vol. 42. – №. 6. – Pp. 1022-1034.
- [18] Protsenko M. A., Pavelyeva E. A. Iris image key points descriptors based on phase congruency //ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – Vol. 42. – №. 2/W12. – Pp. 167-171.
- [19] Raghavendra R., Busch C. Novel image fusion scheme based on dependency measure for robust multispectral palmprint recognition // Pattern recognition. – 2014. – Vol. 47. – №. 6. – Pp. 2205-2221.
- [20] Renault C., Desvignes M., Revenu M. 3D curves tracking and its application to cortical sulci detection //Image Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on. – IEEE, 2000. – Vol. 2. – Pp. 491-494.
- [21] Rosdi B. A., Shing C. W., Suandi S. A. Finger vein recognition using local line binary pattern //Sensors. – 2011. – Vol. 11. – №. 12. – Pp. 11357-11371.
- [22] Sun Z., Tan T. Ordinal measures for iris recognition //IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2008. – Vol. 31. – №. 12. – Pp. 2211-2226.
- [23] Sun Z., Wang L., Tan T. Ordinal feature selection for iris and palmprint recognition //IEEE Transactions on Image Processing. – 2014. – T. 23. – №. 9. – C. 3922-3934.
- [24] Thapar D., Jaswal G., Nigam A., Kanhangad V. PVSNet: Palm Vein Authentication Siamese Network Trained using Triplet Loss and Adaptive Hard Mining by Learning Enforced Domain Specific Features – arXiv, 2018.
- [25] Wang J., Yang K., Pan Z., Wang G., Li M., Li Y. Minutiae-Based Weighting Aggregation of Deep Convolutional Features for Vein Recognition – IEEE, 2018.
- [26] Wang L., Leedham G., Cho D. S. Y. Minutiae feature analysis for infrared hand vein pattern biometrics //Pattern recognition. – 2008. – Vol. 41. – №. 3. – Pp. 920-929.
- [27] Wu J. D., Liu C. T. Finger-vein pattern identification using principal component analysis and the neural network technique //Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38. – №. 5. – Pp. 5423-5427.
- [28] Zhou Y., Kumar A. Human identification using palm-vein images //IEEE transactions on information forensics and security. – 2011. – Vol. 6. – №. 4. – Pp. 1259-1274.
- [29] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization //Graphics gems. – 1994. – Pp. 474-485.

10. About authors

Ekaterina I. Safronova, master student at the Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Chair of Mathematical Physics. E-mail: katyasafit@gmail.com.

Elena A. Pavelyeva, PhD, assistant professor at the Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Chair of Mathematical Physics. E-mail: paveljeva@yandex.ru.

Разработка приложения «умная библиотека» с использованием Intel Distribution of OpenVINO toolkit

Е.П. Васильев¹, В.Д. Кустикова¹, И.Б. Вихрев¹, К.Д. Уткин¹, А.В. Дудченко¹

eugene.unn@gmail.com|valentina.kustikova@gmail.com|laind4471@gmail.com|megarungle@gmail.com|da394372@gmail.com

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Рассматривается разработка автоматизированной “умной библиотеки” с использованием глубокого обучения и алгоритмов компьютерного зрения на основе открытой библиотеки методов искусственного интеллекта OpenVINO toolkit. Общая схема работы приложения предполагает регистрацию читателя – добавление информации и фото нового пользователя; обновление модели машинного обучения, описывающей особенности лиц пользователей системы; авторизацию читателя посредством распознавания лица; получение и возврат книг посредством сопоставления изображения обложки с базой плоских изображений, доступных в библиотеке книг. Исходный код приложения выложен в открытый доступ на GitHub: <https://github.com/itlab-vision/openvino-smart-library>. Разработанное приложение планируется опубликовать в составе пакета примеров OpenVINO toolkit.

Ключевые слова: распознавание лиц, ИИ, компьютерное зрение, глубокое обучение, машинное обучение, умная библиотека, OpenVINO.

Development of the “smart library” application using the Intel Distribution of OpenVINO toolkit

E.P. Vasiliev¹, V.D. Kustikova¹, I.B. Vihrev¹, K.D. Utkin¹, A.V. Dudchenko¹

eugene.unn@gmail.com|valentina.kustikova@gmail.com|laind4471@gmail.com|megarungle@gmail.com|da394372@gmail.com

¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

We represent a case study of using deep learning and computer vision library - the Intel Distribution of OpenVINO toolkit. We develop the automated “smart library” using DL and computer vision methods implemented in OpenVINO toolkit. The application involves the registration of the reader (adding information and photos of the new user); updating the machine learning model that describes the face features of the library users; authorization of the reader through face recognition; receiving and returning books by comparing the cover image with the database of flat images available in the library of books. The source code of the application is free available on GitHub: <https://github.com/itlab-vision/openvino-smart-library>. The developed application is planned to be published as a sample of the OpenVINO toolkit.

Keywords: face recognition, AI, computer vision, deep learning, machine learning, smart library, OpenVINO.

1. Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к области интернета вещей (Internet of Things, IoT). С развитием концепции граничных вычислений (edge-computing) устройства интернета вещей становятся все более “умными” за счет возможности применения машинного обучения и глубоких нейронных сетей [2, 10]. Рост производительности конечных устройств и появление специализированного аппаратного обеспечения для запуска нейронных сетей способствует расширению множества решаемых задач, в которых невозможны длительные задержки при обработке данных. К таковым, в частности, относятся задачи, возникающие при разработке систем безопасности, автопилотов и медицинских приборов [8].

Создание приложений видеоанализа с применением методов компьютерного зрения, машинного и глубокого обучения является трудоемким с точки зрения программной реализации, тестирования и интегрирования в существующие системы. Intel Distribution of OpenVINO toolkit – набор библиотек, средств оптимизации и информационных ресурсов для разработки программного обеспечения, использующего машинное зрение и глубокое обучение. OpenVINO предназначен для ускорения процесса создания систем компьютерного зрения и оптимизации вычислений под разнообразные аппаратные платформы компании Intel (Intel CPUs, Intel Processor Graphics, Intel Vision Processing Units, Intel FPGAs и Intel Gaussian Mixture Model).

Цель данной работы состоит в том, чтобы продемонстрировать пример решения задачи из области

интернета вещей с использованием OpenVINO. Работа построена следующим образом. Вначале дается краткий обзор возможностей OpenVINO. Далее ставится задача разработки приложения “умная библиотека”, анализируются требования и рамки приложения. Разрабатывается архитектура приложения, приводится общая схема его функционирования, описывается программная реализация. Рассматривается пример использования приложения, анализируются показатели производительности и качества работы системы.

2. Intel Distribution of OpenVINO toolkit

OpenVINO [5] состоит из нескольких основных частей.

1. **Deep learning for computer vision.** В состав входит инструмент Deep learning deployment toolkit для эффективного применения предварительно обученных глубоких нейронных сетей с использованием высокоуровневого программного интерфейса.
2. **Traditional computer vision.** Обеспечивает поддержку разработки и оптимизации приложений компьютерного зрения, реализованных с использованием библиотеки OpenCV [6] или программного интерфейса OpenVX [7].
3. **Additional packages** для Intel FPGAs, Intel Movidius Neural Compute Stick, Intel Gaussian Mixture Model, а также функции кодирования и декодирования медиафайлов.

3. Разработка требований к приложению

Выделяется две категории пользователей приложения «умная библиотека» с разным уровнем привилегий.

1. **Читатель.** Читателю предоставляется возможности регистрации в библиотеке посредством получения изображения лица и внесения личных данных, входа в личный кабинет с помощью распознавания лица, получения и возврата книг.
 2. **Администратор.** При наделении читателя правами администратора дополнительно появляются возможности получения информации о всех читателях и всех книгах в библиотеке, получения информации о книгах, выданных читателям, пополнения библиотеки новой книгой.
- Таким образом, необходимо разработать приложение, обеспечивающее поддержку приведенных типов пользователей и реализующее требуемый функционал.

4. Архитектура приложения

Приложение состоит из нескольких основных компонент (рис. 1).

1. **Model.** Данный компонент содержит основные алгоритмы, используемые в процессе разработки системы. В состав компонента входят два основных модуля: BookRecognition и FaceRecognition. Модуль BookRecognition обеспечивает распознавание книг посредством сопоставления (matching) плоских объектов. В качестве дескриптора ключевых точек используется ORB [3] (также возможно использование SIFT или SURF). Модуль FaceRecognition обеспечивает распознавание лиц с использованием библиотеки Photography Vision Library (PVL), содержащей реализацию современных алгоритмов компьютерного зрения для поиска лиц. Библиотека разработана для оптимизированного выполнения на процессорах Intel [4, 11]. При регистрации нового пользователя модель дополняется новым классом лиц, при входе пользователя выполняется распознавание и идентификация пользователя. Остальные модули, входящие в состав компонента и приведенные на диаграмме, являются служебными.
2. **Infrastructure.** Компонент отвечает за организацию доступа к данным. Он предоставляет набор интерфейсов для доступа к связанным таблицам, содержащим информацию о пользователях и книгах. Схема базы данных доступна в репозитории проекта на GitHub [9].
3. **GUI.** Данный компонент содержит реализацию графического интерфейса. В базовой версии интерфейс состоит из нескольких графических окон: окно регистрации нового читателя, окно входа в личный кабинет читателя/администратора, окно личного кабинета читателя/администратора.
4. **Application.** Компонент обеспечивает создание всех объектов приложения и координирует их работу.

Общая схема взаимодействия компонент “умной библиотеки” выглядит следующим образом.

1. **Application** создает рабочие объекты системы, включая объекты компонента **GUI**.
2. Пользователь инициирует действие на **GUI**.
3. **GUI** обращается к компонентам **Model** и **Infrastructure** для обработки инициированного действия.

5. Программная реализация

Приложение “умная библиотека” реализуется на языке Python 3 с применением инструментов, входящих в состав OpenVINO, в частности, библиотек OpenCV [6] и PVL [11].

OpenCV – широко известная библиотека алгоритмов компьютерного зрения. При разработке приложения используется реализация методов сопоставления плоских объектов и выделения дескрипторов, входящие в состав

модуля 2D Features Framework [1], являющегося составной частью OpenCV.

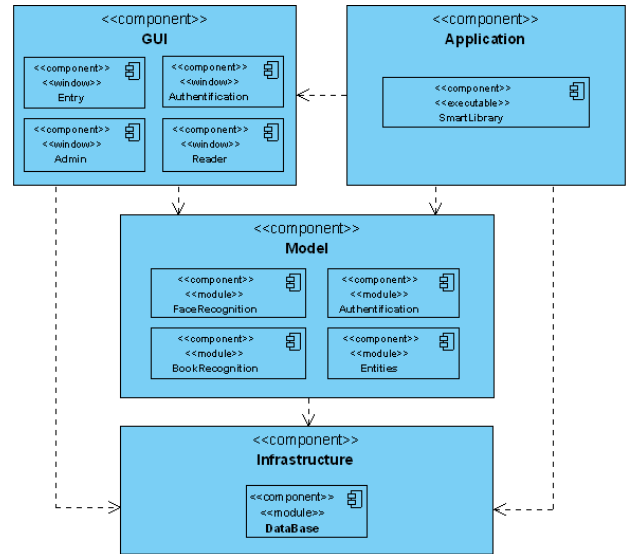


Рис. 1. Архитектура приложения.

PVL является частью OpenVINO используется для быстрого и качественного поиска лиц. Данная библиотека не имеет открытого исходного кода. Программный интерфейс PVL разработан на языке C++, поэтому функции для работы с PVL реализованы на C++. Вызов функций из кода на языке Python обеспечивается при помощи модуля ctypes. Для построения графического интерфейса используется библиотека PyQt [12].

Информация о пользователях и книгах хранится в виде csv-таблиц, работа с которыми организована посредством использования стандартных пакетов Python.

Исходный код приложения выложен в открытый доступ на GitHub [9].

6. Эксперименты

6.1 Тестовая инфраструктура

В качестве тестовой системы используется ноутбук MSI со следующими характеристиками:

- CPU: Intel Core i7-4710HQ, 2.50GHz, 4 cores, 8 threads.
- RAM: 16Gb.
- OS: Windows 8.1.
- Библиотеки: Intel Distribution of OpenVINO toolkit 2018 R5.0.1

6.2 Распознавание лиц

Данные. Для измерения производительности подготовлен набор видео с 6 пользователями. Каждое видео соответствует пользователю, снятому в определенных условиях: темная/светлая одежда, хорошее/плохое освещение лица, удаленность от камеры (рис. 2). Всего 12 видео на пользователя длительностью 2 секунды каждое.

Показатели качества и производительности. Классификатор обучается на различном количестве изображений лица человека из видео от 1 до 8. В процессе обучения классификатора определяется *среднее время обновления классификационной модели*, которое отражает среднее время регистрации нового пользователя в системе. Также определяется *среднее количество пользователей, обрабатываемых за секунду FPS (register)*.

В процессе тестирования вычисляется *среднее время детектирования лица* и *среднее количество кадров, обрабатываемых классификатором за секунду FPS*

(*recognition*). Данный показатель отражает скорость распознавания пользователя.



Рис. 2. Пример лица при хорошем и плохом освещении.

Точность распознавания лица вычисляется по формуле:

$$p = \frac{N_{\text{true}}}{N_{\text{all}}}$$

где N_{true} - количество правильно распознанных лиц к общему количеству изображений, которые были поданы на вход классификатору.

Результаты. Ниже (таблица 1) приведены полученные результаты качества и производительности детектирования лиц. Мы видим что решение быстро работает на обычном ноутбучном процессоре без привлечения графических ускорителей, главным ограничением системы является максимальное количество запоминаемых лиц в 32 пользователя. При проведении тестирования классификатор распознавал лица с высокой степенью точности. Отдельно стоит отметить, что во всех случаях ошибок классификатора он возвращал результат о том, что лицо не известно, во время тестирования не возникло ситуаций, что один пользователь был признан за другого, возможно для детектирования таких ошибок требуется значительно увеличить тестировочную базу.

Распознавание лиц при помощи библиотеки PVL не требует мощной вычислительной системы, установка и настройка программы является простой операцией, что позволяет быстро добавлять качественное распознавание лиц в уже существующее программное обеспечение.

Таблица 2. Средние показатели FPS и точности предсказания в зависимости от количества изображений каждого пользователя для обучения детектора.

Количество фотографий лица для обучения	1	2	4	8
Среднее время регистрации лица, с	0.042	0.048	0.059	0.078
FPS (register)	21.59	18.90	15.18	12.42
Среднее время детектирования лица, с	0.0064	0.0070	0.0079	0.0083
FPS (recognition)	146.43	135.15	119.2	112.41
Точность	0.915	0.925	0.928	0.980

Также измерения скорости были произведены на данных из датасета YouTube Faces DB [13]. Данный набор является достаточно сложным для алгоритма классификации лиц,

поскольку на значительной части изображений люди находятся далеко от камеры, с плохим освещением, а также сами изображения низкого разрешения (320*240 или 480*360). Библиотека PVL не всегда могла найти лица на изображении, поэтому для измерения производительности были выбраны первые 32 видео, на которых библиотека PVL распознала лицо.

Таблица 2. Средние показатели FPS и точности предсказания в зависимости от количества изображений пользователя для обучения детектора на наборе данных YouTube Faces DB.

Количество фотографий лица для обучения	1	2	4	8
Среднее время регистрации лица, с	0.039	0.053	0.079	0.136
FPS (register)	24.32	19.45	13.39	7.28
Среднее время детектирования лица, с	0.0052	0.0055	0.0057	0.0061
FPS (recognition)	194.01	177.45	172.76	156.65
Точность	0.7685	0.784	0.784	0.784

6.3 Распознавание книг

Данные. Для измерения производительности собран набор данных из 5 книг (плоское изображение обложки + фронтальное видео обложки). Фотография обложки представляет собой изображение с разрешением 3120×4160 пикселей (рис. 3). Видео обложки записано в разрешении 1920×1080 пикселей.

Показатели качества и производительности. В процессе работы классификатора на фотографии вычисляются ключевые точки и их дескрипторы при помощи алгоритма ORB, в таблице приводится среднее время, за которое происходит вычисление данных признаков для эталонных изображений 3120×4160 (время, затраченное на чтение изображений и видео из файлов не учитывается).

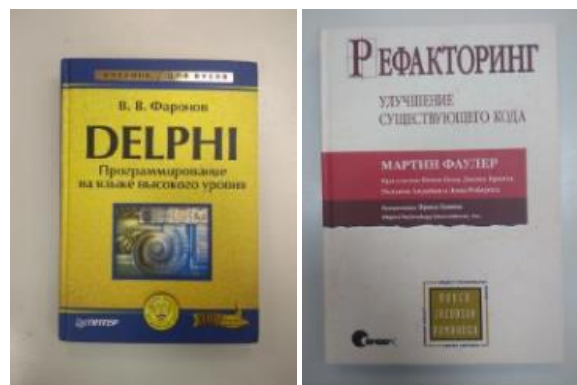


Рис. 2. Пример плоских изображений книг.

В процессе тестирования вычисляется среднее время, за которое будет произведено вычисление особых точек на кадре видео 1920×1080. Далее приводится время, затраченное на сопоставление ключевых признаков шаблонного изображения и кадра из видео при помощи алгоритма сопоставления BFMatcher, входящего в состав библиотеки OpenCV. Последней строкой таблицы приводится среднее время, которое требуется для распознавания книги (вычисление признаков + сопоставление со всеми шаблонами) по одному видео (состоящему из 40 кадров).

Результаты. Ниже (таблица 2) приведены полученные результаты производительности сопоставления. Из данной

таблицы можно увидеть, время одной операции сравнения сопоставления эталонного изображения и кадра видео очень маленькое, но распознавание книги занимает много времени. Зависимость времени распознавания книги от количества эталонных изображений книг в базе является линейной, поэтому при большом количестве изображений распознавание будет занимать большее время, при таком подходе трудно повысить отзывчивость системы.

Поскольку для распознавания используется детектирование и сравнение ключевых точек, то это накладывает ограничение на книги, обложки должны быть контрастными, чтобы детекторы точек могли найти находить на изображении книги ключевые точки.

Алгоритм распознавания книг, основанный на вычислении ключевых точек при помощи детектора ORB и сравнении с шаблонами, работает очень медленно на больших изображениях. Для распознавания книг перспективным кажутся алгоритмы, основанные не поиске ключевых точек, а основанные на сравнении изображений, например перцептивный хэш.

Таблица 2. Средние показатели производительности и точности предсказания книг.

Среднее время расчета признаков на эталонном изображении книги, с	0.120
Среднее время расчета признаков по видео, с	0.023
Среднее время одной операции сопоставления шаблонов, с	0.003
Среднее время сопоставления и выбора правильной книги, с	0.719

У алгоритма распознавания книг, работающего на поиске ключевых точек, фундаментальный недостаток в том, что система не может распознать несколько экземпляров одной и той же книги. Для распознавания конкретных экземпляров предлагается использовать систему штрихкодов или QR-кодов, а алгоритм поиска ключевых точек использовать как дополнительный шаг, например решающий проблему копирования штрихкода и нанесения на другую книгу.

7. Заключение

В ходе исследования разработано программное приложение “умная библиотека” на основе инструмента OpenVINO. Отличительной особенностью приложения является детектирование и распознавание пользователей и книг с применением алгоритмов машинного обучения и компьютерного зрения. Приведены результаты анализа производительности модулей системы в задачах распознавания лиц пользователей и книг. Исходный код приложения выложен в открытый доступ на GitHub [9].

8. Благодарности

Работа выполнена при поддержке компании Intel. Авторы благодарят сотрудников компании за внимание к работе.

9. Литература

- [1] 2D Features Framework. OpenCV documentation. URL: https://docs.opencv.org/4.1.0/da/d9b/group__features2d.html
- [2] Bharath Raj. Deep Learning on the Edge. URL: <https://www.kdnuggets.com/2018/09/deep-learning-edge.html>.
- [3] Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary R. Bradski: ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. ICCV 2011: 2564-2571

- [4] Intel Computer Vision SDK Developer Guide. URL: <https://www.codeproject.com/Articles/1212075/Intel-Computer-Vision-SDK-Developer-Guide>
- [5] Intel Distribution of OpenVINO Toolkit. URL: <https://software.intel.com/en-us/openvino-toolkit>
- [6] OpenCV (Open Source Computer Vision Library). URL: <https://opencv.org>
- [7] OpenVX. Portable, Power-efficient Vision Processing. URL: <https://www.khronos.org/openvx>
- [8] Satyanarayanan, M. (2017). The Emergence of Edge Computing. *Computer*, 50(1), 30–39. doi:10.1109/mc.2017.9
- [9] Smart library based on OpenVINO toolkit. URL: <https://github.com/itlab-vision/openvino-smart-library>
- [10] This Affordable Device From Intel Brings Computer Vision To IoT And Edge Computing. URL: <https://www.forbes.com/sites/janakirammsv/2018/11/19/th-is-affordable-device-from-intel-brings-computer-vision-to-iot-and-edge-computing/>
- [11] Using the Intel OpenVINO Photography Vision Library. URL: <https://github.com/hybridgroup/gocv/tree/master/openvino/pvl>
- [12] PyQt Documentation. URL: <https://wiki.python.org/moin/PyQt>
- [13] Wolf Lior, Tal Hassner and Itay Maoz. Face Recognition in Unconstrained Videos with Matched Background Similarity. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011.

Идентификация отпечатков пальцев по типу контрольных точек

В.Ю. Гудков¹
diana@sonda.ru

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

В работе предлагается метод идентификации изображений отпечатков пальцев, устойчивый к шуму и дефектам изображений. Метод опирается на контрольные точки, разветвления и окончания, которые под воздействием помех могут изменить свой тип. Такие нежелательные изменения влияют на величину гребневого счета, на топологические и другие характеристики изображений, что может снизить надежность их идентификации. Для компенсации эффекта влияния помех вводится топологический вектор и правила его нумерации для разветвлений и окончаний. Предлагается способ приведения топологических векторов от одного типа контрольной точки к другому. В результате приведения топологические векторы для разветвлений и окончаний нумеруются подобно. Это обеспечивает устойчивость измерения гребневого счета, надежность сопоставления различных топологических векторов и, как следствие, минимальные ошибки идентификации. Приводятся результаты тестирования предлагаемого метода, реализованного в алгоритме.

Ключевые слова: идентификация отпечатков пальцев, топологический вектор, мутация, контрольная точка.

Fingerprints Identification by Minutiae Types

V.J. Gudkov¹
diana@sonda.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

The paper proposes a method for identifying fingerprints that is resistant to noise and image defects. The method relies on minutiae, bifurcations and endings, which, under the influence of defects, can change their type. Such undesirable changes affect the ridge counting, the topological and other characteristics of the images. It can reduce the reliability of their identification. To compensate for the effect of interference, a topological vector is introduced and its numbering rules for bifurcations and endings are described. A method is proposed for converting topological vectors from one type of minutiae to another. As a result of the cast, topological vectors for bifurcations and endings are numbered alike. This ensures the stability of the ridge counting, the reliability of matching of various topological vectors and, consequently, the minimal identification errors. The method is implemented in the algorithm. The results of testing the proposed method are given.

Keywords: fingerprint identification, topological vector, mutation, minutia.

1. Введение

В настоящее время отпечатки пальцев (ОП) широко используются для идентификации личности [11]. Они применяются в дактилоскопических информационных системах, системах контроля доступа и др. Идентификация опирается на свойства самих ОП [1, 12]. Особо выделяют контрольные точки (КТ), под которыми обычно понимают окончания и разветвления папиллярных линий [9], а также отношения между ними. Процедуру идентификации выполняют компьютерные системы, взаимодействующие с большими базами данных (БД), а личность в БД распознают не по изображениям ОП человека, а по шаблонам изображений, как их моделям [1, 3]. При этом могут возникнуть ошибки распознавания: ложного признания (false accepted rate, FAR) и ложного отказа (false rejected rate, FRR) [1, 11]. Уменьшение величины этих ошибок является сложной задачей, которую возможно решить с помощью новых подходов, моделей, методов и алгоритмов [3, 4]. В этой статье рассматривается новый метод надежного распознавания шаблонов ОП.

Статья организована следующим образом. Во введении рассматривается текущее состояние задачи распознавания личности по ОП. Во второй главе делается обзор предшествующих работ, нацеленных на снижение ошибок распознавания. В третьей главе излагаются топологические векторы и их свойства. В четвертой главе обсуждается алгоритм идентификации ОП на основе топологических векторов. В пятой главе демонстрируются преимущества нового метода идентификации на основе результатов международного тестирования. Выводы и дальнейшие направления исследований приводятся в заключении.

2. Обзор предшествующих работ

Известны методы, повышающие надежность сравнения изображений ОП [11]. Как правило, верный выбор похожих пар КТ на запросном изображении и изображении из БД имеет решающее значение [3, 5]. В то же время дескрипторы КТ, как и отношения между ними, могут сохраняться в шаблоне различными способами. Например, гребневый счет [1, 8] или Евклидово расстояние [3, 7]. Согласно стандарту [9] гребневый счет определяют как число гребней, пересекаемых отрезком, проводимым между двумя различными КТ на изображении одного ОП.

В работе [8] предложены локальные топологические структуры (local minutiae topological structures, LMTS), устойчивые к шумам и искажениям на основе дескрипторов, инвариантных к повороту и переносу изображений. В их состав входит гребневый счет и геометрические отношения между различными КТ. Позже, Y. Feng усовершенствовал метод комбинирования LMTS по двое в пары [7], а J. Cao – в звездные структуры [3]. В целом подход на основе LMTS подобен методу комбинирования других подобных структур для окрестностей КТ по двое, по трое и по другому целому числу k [12].

В работе [5] для каждой КТ и ее окрестности рассмотрены структуры, называемые k -plet. На их основе как для верификации, так и для идентификации, авторы предлагают модифицированный поиск в ширину (coupled breadth first search, CFBS). Алгоритм CFBS сравнивает два графа, которые построены на основе скелетов соответствующих изображений. Сами структуры типа k -plet строят, прослеживая скелетные линии узора. Этим обеспечивают инвариантность структур k -plet к повороту, переносу и ограниченным деформациям ОП. Та же идея, но

несколько позже, развита в работе [4]. В целом сопоставление двух изображений ОП выполняется сравнением их моделей – ориентированных графов.

Кроме того, в той же работе [4] представлен граф смежности [2] для КТ (minutiae adjacency graph, MAG). Каждая КТ снабжается структурой MAG, которая учитывает ближайшие другие КТ в соответствии с заданным допуском на расстояние. Каждое ребро графа MAG представлено номерами двух КТ, образующих вершины ребра, расстоянием и гребневым счетом между ними, а также ориентацией ребра.

В работе [10] авторы расширили подход с применением графа MAG. Они предложили построение этого графа не только для КТ, но и для петель, дельт, завитков и вообще для сколь-нибудь устойчивых и значимых признаков изображений.

Общим для этих работ является то, что они нацелены на изображения ОП среднего и хорошего качества, которое оценивается по критерию, изложенному в докладе [13]. Предложенные структуры, графы и, в целом, шаблоны однозначно определяются множеством КТ. В процессе идентификации изображений ОП их графы сравнивают и рассчитывают степень подобия графов. Причем сравнение развивается от тех пар КТ двух изображений, подграфы которых наиболее похожи. Поэтому первоначальный выбор пар КТ как затравок для развития фрагментов узоров очень важен.

Однако помехи и искажения изображений могут изменить структуру и содержание графов. Например, преобразование разветвления в окончание может существенно изменить значение гребневого счета, а деформация зон высокой кривизны изображений ОП – тоже [1, 8]. В упомянутых работах эти недостатки, увеличивающие ошибки распознавания, не освещены. Поэтому задача повышения надежности идентификации ОП остается актуальной.

3. Топологические векторы

В большинстве известных подходов КТ определяют по скелетным линиям узора, которые строят на этапе обработки изображения [9, 11, 12]. В описании каждой КТ m_i входят ее координаты (x_i, y_i) , ориентация α_i , причем $\alpha_i \in [0; 2\pi)$, и, для полноты представления, тип $t_i \in \{0,1\}$ со значением $t_i = 1$ для окончания и $t_i = 0$ для разветвления [1]. Таким образом, множество всех КТ записывают в виде

$$\{m_i\} = \{(x_i, y_i), \alpha_i, t_i\}, i \in 1..n, \quad (1)$$

где n – число КТ, детектированных на изображении.

Проведем проекции от каждой КТ перпендикулярно ее ориентации вправо и влево на смежные скелетные линии (далее, просто линии). Зафиксируем проекции. Тогда, на линии могут располагаться окончания, разветвления и их проекции [1].

От каждой КТ проведем сечение вправо и влево перпендикулярно нескольким линиям. Сечение изгибается параллельно направлению кривизны линий. Это свойство стабилизирует сечение. Оно разрезает каждую пересекаемую линию на две части, которые назовем связями. Число связей зависит от типа КТ. Тип КТ может изменить мутация.

Определение 1. Мутацией первого рода называют замыкание окончания в разветвление на смежную линию или разрыв разветвления в окончание.

Определение 2. Мутацией второго рода называют переход окончания через линию в окончание или разветвления на смежную линию в разветвление.

Реализация мутации, если смотреть по направлению ориентации КТ, может быть выполнена вправо или влево.

Для окончания 220 в сечении, показанном точками на рис. 1, связи пронумерованы 0–12, а другие КТ имеют номера 110, 330, 440, 550. От них же пунктиром проведены проекции на смежные линии перпендикулярно им. Для разветвления 220 в сечении, показанном точками на рис. 2, связи пронумерованы 0–12, а другие КТ, отображенные в сечении, имеют те же номера. Разветвление получено как результат мутации первого рода окончания, которое замыкается на смежную линию влево. Направление ориентации каждой КТ показано стрелкой.

Связи нумеруют по спирали по часовой стрелке, как показано на рис. 1 и рис. 2. При мутации КТ, очевидно, изменение ориентации КТ не происходит. Глубина сечения, которое обычно симметрично в обе стороны, выбирается разработчиком произвольно. Число связей в сечении определяют в виде

$$w_i = 4x + 2 + (-1)^{t_i},$$

где t_i – тип КТ m_i , x – число пересекаемых линий.

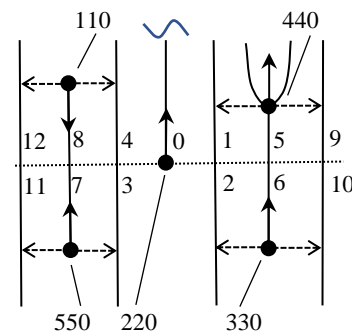


Рис. 1. Сечение для окончания.

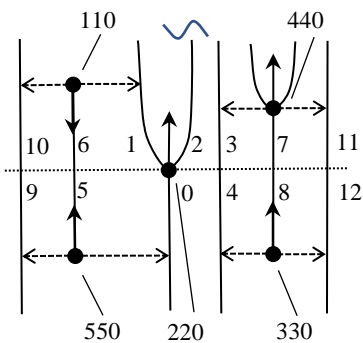


Рис. 2. Сечение для разветвления.

Каждую связь, полученную в сечении, прослеживают по линии от точки сечения до встречи с КТ или с проекцией от КТ. Направление хода связи определяется направлением движения по линии. При движении детектируют события. Состав события в байте следующий. В битах 0–1 записывают значения: 1 – проекция от КТ справа, 2 – проекция от КТ слева, 3 – КТ расположена на связи, 0 – связь обрывается на границе узора или замыкается, не встречая ни КТ, ни проекции от КТ. В бите номер 2 записывают значение 0, если КТ ориентировано по ходу связи, иначе 1. В бите номер 3 записывают значение 1, если событие сгенерировано окончанием, и 0 в противном случае. Событие ассоциируют с номером КТ.

Обозначим символом j номер связи в сечении для КТ m_i , $i \in 1..n$ по формуле (1), $j \in 0..w_i$. Пусть на связи обнаружено событие e_j , ассоциированное с КТ номером n_j .

Определение 3. Базовым топологическим вектором V_i называют нумерованный набор связей с заданной упорядоченной парой (e_j, n_j) на каждой j -й связи в сечении для m_i .

Если в сечении для КТ m_i обнаружена другая КТ, то можно измерить расстояние l_j от m_i до КТ номером n_j , а также азимут как угол поворота β_j вектора α_i по (1) до луча, ориентированного от m_i на КТ номером n_j .

Определение 4. Расширенным топологическим вектором V_i называют нумерованный набор связей с заданной упорядоченной четверкой (e_j, n_j, l_j, β_j) на каждой j -й связи в сечении для m_i .

Топологический вектор для окончания на рис. 1 представлен в табл. 1, а для разветвления на рис. 2 – в табл. 2.

Таблица 1.

Связь	КТ	Событие	Расстояние	Азимут
0	-	0000	-	-
1	440	0001	l_1	β_1
2	330	1110	l_2	β_2
3	550	1101	l_3	β_3
4	110	1110	l_4	β_4
5	440	0011	l_1	β_1
6	330	1111	l_2	β_2
7	550	1111	l_3	β_3
8	110	1111	l_4	β_4
9	440	0010	l_1	β_1
10	330	1101	l_2	β_2
11	550	1110	l_3	β_3
12	110	1101	l_4	β_4
...

Таблица 2.

Связь	КТ	Событие	Расстояние	Азимут
0	550	1101	l_3	β_3
1	110	1110	l_4	β_4
2	-	0000	-	-
3	440	0001	l_1	β_1
4	330	1110	l_2	β_2
5	550	1111	l_3	β_3
6	110	1111	l_4	β_4
7	440	0011	l_1	β_1
8	330	1111	l_2	β_2
9	550	1110	l_3	β_3
10	110	1101	l_4	β_4
11	440	0010	l_1	β_1
12	330	1101	l_2	β_2
...

Отметим свойства топологических векторов.

Свойство 1. Непрерывная спиралевидная нумерация связей сохраняет монотонность роста номеров связей при увеличении глубины сечения.

Свойство 2. Сечение изгибается параллельно направлению кривизны линий.

Свойство 3. Так как события представлены наиболее полно за счет проекций, то влияние мутаций ограничено.

Свойство 4. Базовый топологический вектор инвариантен к масштабным преобразованиям изображения, к переносу и повороту изображения.

Свойство 5. Расширенный топологический вектор инвариантен к переносу и повороту изображения.

Свойство 6. Существует единственное правило перенумерации связей, однозначно устанавливающее соответствие между топологическими векторами для окончания и разветвления.

Свойства 1–5 очевидны и известны [1, 5]. Они следуют из способа проведения сечения для КТ и построения топологического вектора. Неочевидным является шестое свойство.

Пусть окончание 220, показанное на рис. 1, замыкается влево с образованием разветвления 220 на рис. 2. Тогда, с целью сохранения топологической одноименности связей, для связи номер 0 в сечении для окончания необходимо рассматривать связь номер 2 в сечении для разветвления, для связи номер 1 в сечении для окончания – связь номер 3 в сечении для разветвления и т.д. Это ясно при сопоставлении сечений на рис. 1 и рис. 2.

Для мутаций первого рода можно вывести следующие четыре правила преобразования номеров связей.

Если окончание замыкается влево на смежную линию, то связи после мутации перенумеровывают по формуле $H_1(j) = \{2,3,4, 0,1,7,8, (5,6,11,12), (9,10,15,16)\}$. (2)

Если окончание замыкается вправо на смежную линию, то связи после мутации перенумеровывают по формуле $H_2(j) = \{1,2,0, 5,6,3,4, (9,10,7,8), (13,14,11,12)\}$. (3)

Если разветвление разрывается влево, то связи после мутации перенумеровывают по формуле $H_3(j) = \{2,0,1, 5,6,3,4, (9,10,7,8), (13,14,11,12)\}$. (4)

Если разветвление разрывается вправо, то связи после мутации перенумеровывают по формуле $H_4(j) = \{3,4,0, 1,2,7,8, (5,6,11,12), (9,10,15,16)\}$. (5)

Если мутация КТ отсутствует, то номера связей не изменяют.

Каждую формулу можно рассматривать как таблицу, номер ячейки которой (начиная с нулевой) есть номер связи в сечении для КТ со стороны запросного шаблона, а значение в этой ячейке – номер связи в сечении для КТ со стороны шаблона из БД.

В формулах для мутаций в скобках указаны номера связей, которые подчиняются закону периодичности. Так для связи номер 7 в сечении для окончания топологически одноименной является связь номер 5 в сечении для разветвления. Поэтому в ячейке номер 7 записано значение 5 по (2). А для связи номер 11 в сечении для окончания топологически одноименной является связь номер 9 в сечении для разветвления. Поэтому в ячейке номер 11 записано значение 9 по (2). Каждую последующую четверку значений можно вычислить добавлением числа 4 к значениям в текущей скобке (см. рис. 1 и рис. 2). Поэтому эти четыре таблицы можно продолжить до произвольной глубины сечения.

Мутации второго рода встречаются значительно реже мутаций первого рода [1]. Поэтому аналогичные четыре формулы преобразований номеров связей для них не представлены.

4. Сравнение топологических векторов

При идентификации дескрипторы каждой КТ со стороны запросного шаблона сравнивают с дескрипторами каждой КТ со стороны шаблона из БД. При этом выбирают наиболее похожие пары КТ, которые служат затравками для развития фрагментов соответствующих изображений. Ошибки на этом шаге идентификации критичны.

Выполним сравнение КТ m_q из запросного шаблона, $q \in 1..n_1$, с КТ m_r из шаблона БД, $r \in 1..n_2$, где n_1 – число детектированных КТ на запросном изображении, а n_2 – на изображении из БД. Для сравнения воспользуемся соответствующими расширенными топологическими векторами V_q и V_r (определение 4). Вычислим оценку степени подобия очередной j_q -й связи, $j_q \in 0..w_q$, со связью $j_r, j_r \in 0..w_r$, перебирая все связи в топологическом векторе V_q по порядку, в виде

$$f^{qr}(j_q, j_r) = f(T_d - \Delta d(j_q, j_r), T_\beta - \Delta \beta(j_q, j_r)), \quad (6)$$

где $\Delta d(j_q, j_r) = \|l_{j_q} - l_{j_r}\|$ – норма разности расстояний для связи номер j_q вектора V_q и связи номер j_r вектора V_r ;

$\Delta\beta(j_q, j_r) = \|\beta_{j_q} - \beta_{j_r}\|$ – норма разности азимутов для тех же связей; T_d – допуск на расстояние, T_β – допуск на азимут.

Обозначим особенности функции f по (6). Она, как правило, полином степени не выше второй. Допуски T_d и T_β на разность расстояний и азимутов настраивают на этапе обучения алгоритма. Чем меньше значения норм разностей, тем большее значение возвращает функция f . Если хотя бы один из допусков превышен, то значение функции равно нулю. Кроме того, события влияют на возвращаемое значение функции. Так, если значение события хоть для одной связи равно нулю (обрыв связи), то значение функции равно нулю. Наконец, если значения во втором бите двух событий для сравниваемых связей не совпадают (КТ ориентированы противоположно), то функция тоже возвращает ноль. Таким образом, функция f по (6) учитывает не только геометрическое подобие расширенных топологических векторов, но и топологическое подобие структуры линий.

Для оценки степени подобия ψ^{qr} векторов V_q и V_r в целом сравнивают все их одноименные связи, находят наилучшую оценку связи в виде

$$f_{max} = \max_{j_q, j_r} f^{qr}(j_q, j_r), \quad (7)$$

и рассчитывают подобие векторов по формуле

$$\psi^{qr} = \frac{1}{w_{q+1}} \sum_{j_q=0}^{w_q} f^{qr}(j_q, j_r) / f_{max}. \quad (8)$$

Очевидно, что $0 \leq \psi^{qr} \leq 1$. Кроме того, в общем случае, сравнение несимметрично: $\psi^{qr} \neq \psi^{rq}$.

Если КТ одного типа, то мутаций нет и $j_q = j_r$. В этом случае, если две КТ действительно истины, оценка по (8) тяготеет к величине 1. Например, сравнивая окончание с окончанием по табл. 1 получаем нулевые разности и наибольшую степень похожести векторов.

Если КТ разного типа, то выдвигают гипотезу о мутации. Остановимся на мутации первого рода. Для окончания – замыкание вправо или влево, а для разветвления – разрыв вправо или влево.

Пусть окончание на рис. 1 сравнивается с разветвлением на рис. 2. Выполняя сравнение одинаково пронумерованных связей по табл. 1 и табл. 2 видим, что расстояния и азимуты, как правило, различны. Поэтому оценка степени подобия векторов по (8) без учета мутаций близка к нулю.

Пусть выдвинута гипотеза H_2 по (3), $j'_q = H_2(j_q)$. Тогда связь номер 0 для окончания сравнивается со связью номер 1 для разветвления, связь номер 1 со связью номер 2, связь номер 2 со связью номер 0 и т.д. (не показано). Для неверной гипотезы параметры расстояний и азимутов на связях, как правило, сильно расходятся и оценка по (8) тоже близка к нулю.

Пусть выдвинута гипотеза H_1 по (2), $j'_q = H_1(j_q)$. Тогда связь номер 0 для окончания сравнивается со связью номер 2 для разветвления, связь номер 1 со связью номер 3, связь номер 2 со связью номер 4 и т.д. (см. рис. 1 и рис. 2). Фактически из табл. 1 при применении гипотезы H_1 получают табл. 2. Ясно, что в этом случае оценка по (8) близка к единице.

Таким образом, для преобразования окончания при мутации первого рода выдвигают гипотезу H_1 по (2) и H_2 по (3). Финальная степень похожести векторов рассчитывается по формуле

$$\lambda^{qr} = \max_{H_1, H_2} \psi^{qr}. \quad (9)$$

Для преобразования разветвления при мутации первого рода выдвигают гипотезу H_3 по (4) и H_4 по (5). Финальная степень похожести векторов рассчитывается по формуле

$$\lambda^{qr} = \max_{H_3, H_4} \psi^{qr}. \quad (10)$$

Если мутаций нет, то номера связей $j_q = j_r$ и

$$\lambda^{qr} = \psi^{qr}. \quad (11)$$

Введем следующие стадии идентификации.

1) *Инициализация*. Создадим список L и очистим его.

2) *Затравка*. Применяя формулы (6)–(11) с учетом выдвигаемых гипотез сравнивают каждую КТ со стороны запросного шаблона с каждой КТ со стороны шаблона из БД и выбирают те пары КТ, которым соответствуют наилучшие оценки, и помещают их в список L . Обычно выбирают от трех до семи пар КТ. Далее для простоты рассмотрим вариант с единственной затравкой.

2) *Упорядочивание*. Список L упорядочивают по степени похожести λ по (9)–(11).

3) *Расщепление*. Из списка L выбирают лучшую пару КТ с номерами q и r . Для нее на соответствующих связях в расширенных топологических векторах с учетом мутации КТ набирают другие возможные пары КТ (на рис. 1 и рис. 2 это КТ с одинаковыми номерами). Новые набранные пары КТ помещают в список L и оценивают их степень подобия. Если в том же списке находятся пары КТ, для которых номера КТ совпадают с номерами q или r , то их удаляют из списка. Также из списка удаляют ту пару КТ, для которой выполнено расщепление.

4) *Проверка*. Если список L не пуст и степень похожести λ_k лучшей k -й пары КТ больше заданного порога, идти к п.2.

5) *Результат*. Строят набор оценок $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, где m – число расщепленных пар КТ из списка L . Конец.

Сделаем некоторые замечания.

Поскольку пары КТ набирают на связях в сравниваемых векторах, автоматически выполняется консолидация дескрипторов. Для улучшения результата консолидации пары КТ набирают на стадии расщепления только в том случае, если формула по (6) возвращает значение, превышающее заданный порог, который настраивается при обучении. При консолидации фрагменты изображений развиваются, начиная от затравки.

Финальную степень подобия запросного шаблона и шаблона из БД на основе (9)–(11) находят в виде

$$\lambda = \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sqrt{m * \min(n_1, n_2)} + 1, \quad (12)$$

где m – число расщепленных пар КТ из списка, n_1 и n_2 – число КТ из запросного шаблона и шаблона из БД по (6).

В случае нескольких затравок от каждой из них развивается свой путь по изображениям. В таком варианте можно выбрать наилучший путь по (12).

5. Результаты экспериментов

Метод идентификации отпечатков пальцев с применением топологических векторов реализован в алгоритме PPM на языке C++. Мутации КТ компенсируют выдвижением гипотез о направлении мутации и выбирают лучшую оценку сравнения векторов. В отличие от других подходов, здесь тип КТ играет ведущую роль. В оценке степени подобия шаблонов участвуют не только геометрические, но и топологические характеристики узоров.

В зависимости от качества изображения, мутации возникают чаще или реже. Частотность мутаций второго рода значительно меньше частотности мутаций первого рода. Этот факт определил объем статьи.

Для сравнения с разработками других авторов алгоритм протестировали на сайте FVC OnGoing на базе изображений ладоней PV-FULL-1.0. Учет мутаций КТ требует дополнительного времени сравнения. Возникает опасность, что при допустимых ошибках идентификации время станет неприемлемым. Особенно для больших изображений, таких как отпечатки ладоней. Однако, как показали эксперименты, это не так.

В табл. 3 показаны результаты экспериментов на 6 мая 2019 года, которые опубликованы на сайте FVC OnGoing. Выбрано шесть лучших результатов. В ней представлены

имена алгоритмов, среднее время сравнения одной пары шаблонов, средний размер шаблона и ошибка FNMR@FMR₁₀₀₀₀ [6]. Такая ошибка выбрана потому, что она характеризует вероятность пропуска на охраняемый объект террориста.

Метод идентификации отпечатков пальцев непрерывно развивается. В табл. 4 показаны ошибки распознавания для FNMR@FMR₁₀₀₀₀, FNMR@FMR₁₀₀₀ и равные ошибки EER, достигнутые в 2017 и 2018 годах соответственно алгоритмом PPM. Видно, что величины ошибок уменьшаются на 16–37% по сравнению с предшествующим годом. Эти данные опубликованы на том же сайте.

Таблица 3.

Алгоритм	Время, ms	Шаблон, байты	FMR ₁₀₀₀₀
PPM	51	36922	6,179
M3gl	911	88958	9,643
MinutiaeCluster	86	3344160	10,214
HXKJ	705	12288	17,536
DMC	809	191289	19,393
MCC-Based (Baseline)	241	214629	20,107

Таблица 4.

Алгоритм	EER	FMR ₁₀₀₀	FMR ₁₀₀₀₀
PPM – 2018	1.355	2,250	6,179
PPM – 2017	2.170	2.679	7.357

6. Заключение

В статье предлагается метод идентификации отпечатков пальцев, опирающийся на топологические векторы для КТ. Структура и состав вектора зависят от типа КТ: окончание или разветвление. Сам метод идентификации состоит из нескольких стадий, одна из которых является расщеплением. Она определяет направление развития фрагментов изображений и одновременно консолидацию дескрипторов КТ. В методе явно учитывается тип КТ и это играет решающую роль в оценке степени подобия различных шаблонов.

Метод, реализованный в алгоритме, показывает неплохие величины ошибок распознавания изображений отпечатков пальцев и ладоней (см. табл. 3). К тому же алгоритм демонстрирует хорошую производительность идентификации и сохраняет баланс скорость-качество.

Дальнейшее направление исследований планируется в расширении области применения мутаций; использовании мутаций второго рода; перестройке всего связанного графа, узлами которого являются топологические векторы, с учетом предполагаемых мутаций КТ; увеличении стадий идентификации с включением перестроенных связанных графов; использовании изображений ОП с их постобработкой в процессе идентификации, если изображения плохого качества; повышении производительности метода за счет введения специальных ускорителей и отбраковки явно не совпадающих пар КТ.

7. Литература

- [1] Гудков В.Ю. Модель гребневого счета на основе топологии дактилоскопического изображения // Вестник ЧелГУ, 2011. Вып. 13. С. 99-108.
- [2] Новиков Ф.А. Дискретная математика: Учебник для вузов. 2-е изд. Стандарт третьего поколения. Издательский дом "Питер", 2012 г. 400 с.

- [3] Cao J., Feng J., A Robust Fingerprint Matching Algorithm Based on Compatibility of Star Structures. Proceedings of the Sixth International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition (MIPPR 2009), vol. 7498, Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications, pp.74983X, 2009.
- [4] Chen X., Wang L., Li M. An Efficient Graph-Based Algorithm for Fingerprint Representation and Matching, Proceedings of the 3rd International Conference on Multimedia Technology (ICMT 2013), pp. 1019-1029, 2013.
- [5] Chikkerur S., Cartwright A., Govindaraju V. K-plet and cbfs: A graph based fingerprint representation. International Conference on Biometrics ICB 2006: Advances in Biometrics, pp. 309-315.
- [6] Dorizzi B., Cappelli R., Ferrara M., et al. Fingerprint and On-Line Signature Verification Competitions at ICB 2009 // International Conference on Biometrics ICB 2009 (Alghero, Italy, June 2-5, 2009). pp. 725-732.
- [7] Feng Y., Feng J., Chen X., et al. A Novel Fingerprint Matching Scheme Based on Local Structure Compatibility, International Conference on Pattern Recognition, pp. 374-377, 2006.
- [8] Jiang X., Yau W. Y. Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures. International Conference on Pattern Recognition, vol. 2(1): pp. 1038–1041, 2000.
- [9] ISO/IEC 19794-2:2011. Information technology – Biometric data interchange formats – Part 2: Fingerprint minutiae data.
- [10] Leslie S., Sumathi C. P. A Robust Hierarchical approach to Fingerprint matching based on Global and Local Structures. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Vol. 13, N. 7, pp. 4730-4739, 2018.
- [11] Maltoni D., Maio D., Jain A. K., et al. Handbook of Fingerprint Recognition. London, Springer-Verlag, 2009.
- [12] Ratha N. K., Pandit V. D., Bolle R. M., et al. Robust fingerprint authentication using local structure similarity. In Workshop on applications of Computer Vision, p. 29–34, 2000.
- [13] Tabassi E., Wilson C., Watson C. Fingerprint Image Quality. NIST Internal Report 7151, National Institute for Standards and Technology, 2004.

Об авторах

Гудков Владимир Юльевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры электронных вычислительных машин высшей школы электроники и компьютерных наук Южно-Уральского государственного университета. E-mail: diana@sonda.ru.

Область интересов: обработка и распознавание изображений, искусственный интеллект.

Сегментация изображений трещин дорожного покрытия

И.А. Канаева¹, Ю.А. Иванова¹
iap15@tpu.ru|jbolotova@tpu.ru

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия;

Вследствие развития потребностей дорожной отрасли в компьютерной обработке высококачественных видеоданных автомобильных дорог возникает необходимость в разработке алгоритма автоматической оценки качества дорожного покрытия на изображениях. Разработан метод нейросетевого выделения трещин покрытия автомобильных дорог по изображению общего вида сцены, соответствующей виду водителя. Также представлен способ генерации синтетической обучающей выборки и оценена его применимость к данной задаче. Подчеркнута актуальность исследования по сегментации дефектов, что остается сложной задачей из-за неоднородной интенсивности пикселей, сложной топологии трещин, различного освещения и зашумленной текстуры покрытия.

Ключевые слова: синтетическая выборка, сверточные нейронные сети, пиксельная сегментация, трещины покрытия, автомобильные дороги.

Instance Segmentation of Road Pavement Cracks

I.A. Kanaeva¹, Yu.A. Ivanova¹
iap15@tpu.ru|jbolotova@tpu.ru

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;

Robust automatic pavement crack detection is critical to automated road condition evaluation. Manual crack detection is extremely time-consuming. Therefore, an automatic road crack detection method is required to boost this progress. This study makes literature review of road damage detection issues. The paper considers the existing datasets for detection and segmentation distress of road and asphalt pavement. A CNN for pavement cracks instance segmentation has been developed with the use of images from the driver's seat view. A method for generating a synthetic dataset is also presented, and effectiveness of its applicability to the current problem is evaluated. The relevance of the study is emphasized by research on pixel-level automatic damage detection remains a challenging problem, due to heterogeneous pixel intensity, complex crack topology, poor illumination condition, and noisy texture background.

Keywords: synthetic dataset, CNNs, instance segmentation, pavement's crack, autoroad.

1. Введение

На сегодняшний день прогресс в компьютерном зрении в значительной степени обусловлен появлением огромного количества размеченных данных. Активно развиваются системы автономного вождения, связанные с анализом изображений окружающей среды, обнаружением и отслеживанием движущихся объектов. Для обучения используются такие наборы данных семантической сегментации, как Cityscapes [1], Wilddash [16] и KITTI [4]. Разметка таких выборок производится вручную и является дорогой и трудозатратной. Выборки в основном содержат в себе экземпляры таких классов, как дорожное полотно, пешеход, транспортное средство, небо, дорожный знак и другие характерные, общие элементы автомобильной дороги.

В настоящее время в Российской Федерации принят и активно развивается национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги», целью которого является приведение автомобильных дорог регионального значения и дорожной сети городских агломераций в нормативное состояние.

Вследствие развития потребностей дорожной отрасли в компьютерной обработке высококачественных видеоданных автомобильных дорог возникает необходимость в разработке алгоритма автоматического детектирования дефектов дорожного полотна по изображению.

Разработка эффективного алгоритма детектирования дефектов дорожного полотна на изображениях является актуальной задачей, так как его результаты могут быть использованы как в дорожных организациях, так и в беспилотных автомобилях.

2. Аналитический обзор

За последнее десятилетие был проведен ряд исследований в области автоматического обнаружения и классификации дефектов дорожного покрытия методами машинного обучения и технического зрения. Большое количество работ используют разнообразные методы анализа изображений, подробный анализ предложенных методов представлен в обзоре [9].

В работе [3] при проведении анализа существующих подходов к распознаванию трещин выделяют следующие две общие группы методов: фильтрация изображений и создание классификаторов.

К первой группе методов относится обработка изображений для обнаружения текстур повреждений, которые впоследствии могут быть выделены на дороге путем пороговой фильтрации. Вначале применяются алгоритмы предварительной обработки изображения для уменьшения артефактов, вызванных освещением. Основываясь на том, что пиксели трещин на изображении покрытия сверху принадлежат локальным минимумам интенсивности, применяется пороговая фильтрация. Полученное изображение трещины дополнительно уточняется с помощью морфологических операций и поиском компонент связности. Подходы, принадлежащие к вышеупомянутой группе, представлены в работах [2,7,15]. В [10] результаты исследования реализованы в виде программного инструмента CrackIT для сегментирования трещин по изображению, снятому непосредственно над покрытием. Инструмент CrackTree [18] основан на построении карты вероятности принадлежности к трещине по предварительно очищенному от теней изображению покрытия. В статье [7] предложен метод детектирования трещин на серии изображений, сглаженных

разномасштабными фильтрами Гаусса, с последующим объединением результирующих масок. В работе [12] используются фильтры Габора для поиска кандидатов-трещин. Российские ученые в работе [19] реализовали интерактивный алгоритм для выделения дефекта на изображении покрытия, в основе которого лежит использование метода активных контуров.

Алгоритмы второй группы применяют различные типы классификаторов к участкам изображения для определения, относится ли участок к повреждениям покрытия или нет. Одна часть исследователей [5,14] первоначально выделяет некоторый вектор признаков с рассматриваемого участка, а затем его подает на вход классификатору. В данном подходе достоинством является то, что размер выделяемого участка не является четко фиксированным, но при этом первоначально нужно выделить и разбить исходное изображение на регионы-кандидаты. В работе [14] области определяются с помощью суперпиксельной сегментации, а в качестве бинарного классификатора использовались машины опорных векторов. Несмотря на то, что метод не обладает высокой точностью, он позволяет легко рассчитать соотношение поврежденного и неповрежденного дорожного покрытия и может быть дополнен для выделения разных дефектов: выбоин, люков, разметки.

С появлением свободно распространяемых наборов изображений дефектов автомобильных дорог, таких как GAPs [3] и CRACK500 [17], многие исследователи использовали глубокое обучение для детектирования дефектов дорожного полотна. Например, для извлечения вектора признаков из входного изображения в работе [5] используется усеченная SNC VGG16, а в качестве классификатора обучают нейронную сеть с одним скрытым слоем из 256 нейронов.

3. Наборы данных и типы задач

Рассмотрим наиболее известные доступные наборы данных, связанные с дефектами дорог:

1. Набор данных GAPs [3]: 1969 изображений покрытия в оттенках серого из трех городов Германии разрешением 1920×1080 пикселей, разделенные на фрагменты 64×64 пикселя, которые имеют бинарный признак наличия трещин.
2. CRACK500 [15]: 500 изображений RGB асфальтового покрытия с трещинами, разрешением примерно 2000 x 1500 пикселей, полученные с помощью смартфона на территории кампуса Темплского университета. Каждое изображение снабжено попиксельной бинарной маской принадлежности к трещине.
3. Набор данных CrackTree200 [18]: 206 изображений покрытия размером 800×600 пикселей с различными типами трещин, содержащий не только однородную текстуру фона, но и тени. Каждое изображение снабжено попиксельной разметкой.
4. Набор данных CFD [13]: 118 изображений трещин размером 480×320, семантически сегментированных, снятых по виду сверху на городских дорогах Пекина. Имеют тени, масляные пятна и водяные разводы.
5. Набор данных RoadDamageDataset [8]: 9053 изображений со смартфона, закрепленного у лобового стекла автомобиля и направленного на съемку общего вида впереди автомобиля. Данный набор имеет восемь типов разрушений дорожного покрытия, выделенных ограничивающими рамками прямоугольной формы. Всего выделено 15457 экземпляров разрушений, а сам набор данных имеет структуру PASCAL VOC.

Набор данных RoadDamageDataset записывался в семи городах Японии, и включает восемь типов разрушений дорожного покрытия: пять классов для трещин, два класса

для износа разметки и один класс для выбоин и просадок. Набор данных имеет структуру PASCAL VOC и был представлен на форуме «IEEE Big Data Cup» в 2018 году.

Набор данных японских ученых возродил интерес к решению задачи автоматического детектирования дефектов с помощью методов машинного обучения и, в частности, к использованию сверточных нейронных сетей. Достоинством выборки является её солидный размер, а также наличие других типов разрушений покрытия, а не только трещин. Недостатком же является способ выделения дефектов – ограничивающая рамка, т.к. ввиду разнообразных форм и размеров дефектов с помощью ограничивающие рамки можно лишь судить о его наличии на изображении. Для целей оценки качества автомобильной дороги наилучшим вариантом является попиксельное выделение с помощью маски, что позволяет не только точно локализовать дефект, но и оценить его площадь.

Создание описанного набора данных является трудозатратным и длительным процессом, так как требует кропотливого ручного выделения дефектов на изображении. Однако существует и другой подход к данной проблеме – искусственная генерация данных. Метод генерации синтетических изображений для обучения нейросетей активно развивается в настоящее время. Он позволяет получить как труднодоступные данные, так и размножить существующие.

Наиболее простым и часто используемым способом создания синтетических данных является применение случайных преобразований к исходным изображениям: обрезка, сдвиг, поворот, масштабирование, гауссово размытие, изменение контраста и цветности.

Ввиду значительных успехов, достигнутых в компьютерной графике, одним из популярных направлений создания данных является моделирование 3D сцены и рендеринг фотореалистичных изображений. Этот подход позволяет создавать большие наборы данных для семантической сегментации, как показано в исследовании [11] с использованием Unity платформы.

В статье [20] генерация обучающих изображений дорожных знаков производилась с помощью порождающих конкурирующих нейронных сетей. Авторы показали, что порождающие сети способны генерировать реалистичные изображения, однако достигаемое качество обучения на этих данных классификатора немного уступает классификатору, обученному на реальных данных.

Еще одним способом создания данных является метод извлечения объекта из одного изображения и вставка его в другое. Данный подход продемонстрирован в данной работе для создания синтетической трещины на дороге. Для этого предлагается использовать наборы данных со съемкой сверху и попиксельной разметкой и такие общеизвестные коллекции с выделенным дорожным полотном, как KITTI [7] и Cityscapes dataset [1].

4. Алгоритм создания синтетической выборки

На данном этапе развития машинного обучения формирование множества обучающих данных имеет первостепенное значение для успешного решения задач детектирования и сегментирования. Однако кропотливая ручная разметка нескольких тысяч изображений является долгим и трудозатратным процессом, вследствие чего разработка методов получения репрезентативной синтетической выборки является актуальной задачей.

Синтетический набор данных – это набор обучающих данных, которые генерируются программным путем, т.е. такие данные нельзя получить в реальном исследовании.

Для создания синтетической выборки дефектов автомобильных дорог было решено использовать три

общедоступных набора: KITTI и Cityscapes dataset в качестве изображений дорожной сцены, CFD как источник трещин, размеченных на уровне пикселей (рис. 1).

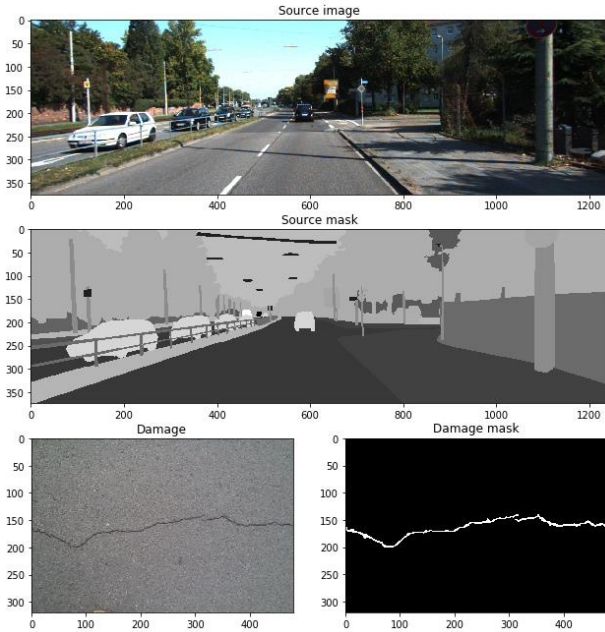


Рис. 1. Размеченные изображения дороги и трещины.

Для определения части изображения, соответствующей проезжей части, выделяются все пиксели маски дороги. Затем к полученной бинарной маске применяется алгоритм поиска 8-ми связанных областей. В результате за маску покрытия принимается область, максимальная по количеству пикселей (на рис. 2 выделена серым цветом).

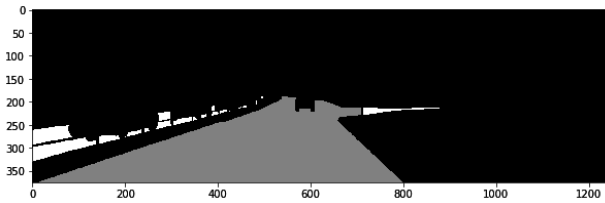


Рис. 2. Максимальная область проезжей части

Затем производится подготовка трещины – для уменьшения вычислений исходное изображение трещины и её маска обрезаются по минимальной ограничивающей прямоугольной рамке. Затем изображение трещины вместе с маской масштабируются и поворачиваются случайным образом. В результате получается изображение трещины D и его маска D^{mask} (рис. 3).

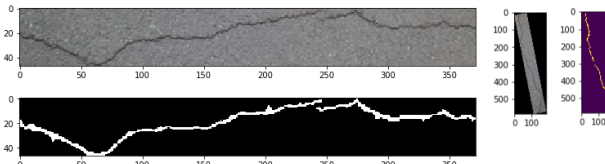


Рис. 3. Обрезка, поворот и масштабирование трещины

На следующем шаге внутри маски базовой области дороги выбирается точка, являющаяся центром накладываемой области, и вырезается область S^{mask} из маски исходного изображения, равная по размеру D^{mask} . Для смещения двух изображений в области масок рассчитываются средние значения \bar{D}_c в каждом канале c по изображению трещины, не лежащему под маской:

$$\bar{D}_c = \frac{1}{k} \sum_p D_c(p) \cdot (1 - D^{mask}(p)), c \in \{R, G, B\},$$

где $D_c(p)$ – значение пикселя p изображения трещины D в канале c , $D^{mask}(p)$ – значение пикселя p в бинарной маске

трещины, а k – количество пикселей, для которых $D^{mask}(p) = 0$.

Проведение данного вычисления возможно ввиду однородности текстуры асфальта на изображении дефекта. Затем при наложении трещины на изображение дороги рассматриваются только значения, лежащие под маской проезжей части и трещины:

$$M(p) = D^{mask}(p) \cdot S^{mask}(p)$$

Нанесение трещины осуществляется путем изменения значений пикселей исходного изображения S , находящихся под общей маской M , пропорционально отношению вычисленных средних значений асфальта к самим значениям пикселей трещины:

$$S_c(p) = S_c(p) \cdot M(p) \cdot \frac{D_c(p)}{\bar{D}_c}$$

Результат работы алгоритма представлен на рис. 4.



Рис. 4. Результат программной генерации трещин

Для увеличения информативности обучающей выборки на одном изображении генерировалось от 1 до 5 трещин, которые могли пересекаться. В результате обучающая выборка содержала 1524 изображения, а тестовая 505.

5. Модель СНС

Для одновременного решения задачи детектирования трещин и их попиксельного выделения решено было использовать современную архитектуру сверточной сети Mask R-CNN [6]. Рассмотрим ее строение и принцип работы.

Архитектура Mask R-CNN (рис. 5) исторически имеет следующий ряд предшественников, основывающихся на идее обработки небольших областей: R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN.

Архитектура Mask R-CNN имеет сложную блочную структуру. Вначале изображение подается на вход нейросети для выделения карты признаков, в качестве которой часто используются VGG16, ResNet50 и ResNet101 с исключенными слоями, отвечающими за классификацию. Одним из улучшений данной архитектуры по сравнению с предшественниками является использование подхода Feature Pyramid Network (FPN), который извлекает разномасштабные карты признаков. Последовательные слои СНС с уменьшающейся размерностью рассматриваются как иерархическая «пирамида», в которой карты нижних уровней имеют высокое разрешение, а карты верхних уровней – высокую обобщающую, семантическую способность.

Полученные карты признаков обрабатываются в блоке Region Proposals Network (RPN), задачей которого является генерация предполагаемых регионов на изображении, которые содержат объекты. Для этого по карте признаков скользят нейросеть с окном 3x3 и формируют выход на основе k анкоров – рамках заданной размерности и положения. Для каждого анкера RPN формирует предсказание наличия объекта, и уточнение координат ограничивающей рамки объекта, если он был обнаружен.

Назначение данного этапа – выделить регионы интереса, которые могут содержать объекты. В конце дублирующиеся регионы отбрасываются благодаря операции не-максимального подавления.

Далее с помощью операции ROIAlign происходит выделение соответствующих регионам значений из карт

признаков и приведение их к одному размеру. По ним осуществляется финальные операции классификации, уточнения координат ограничивающей рамки и предсказания маски. Маска на выходе имеет сильно

уменьшенный размер, но содержит в себе вещественные значения, с помощью которых при масштабировании маски до размера выделяемого объекта удастся получить достаточную точность.

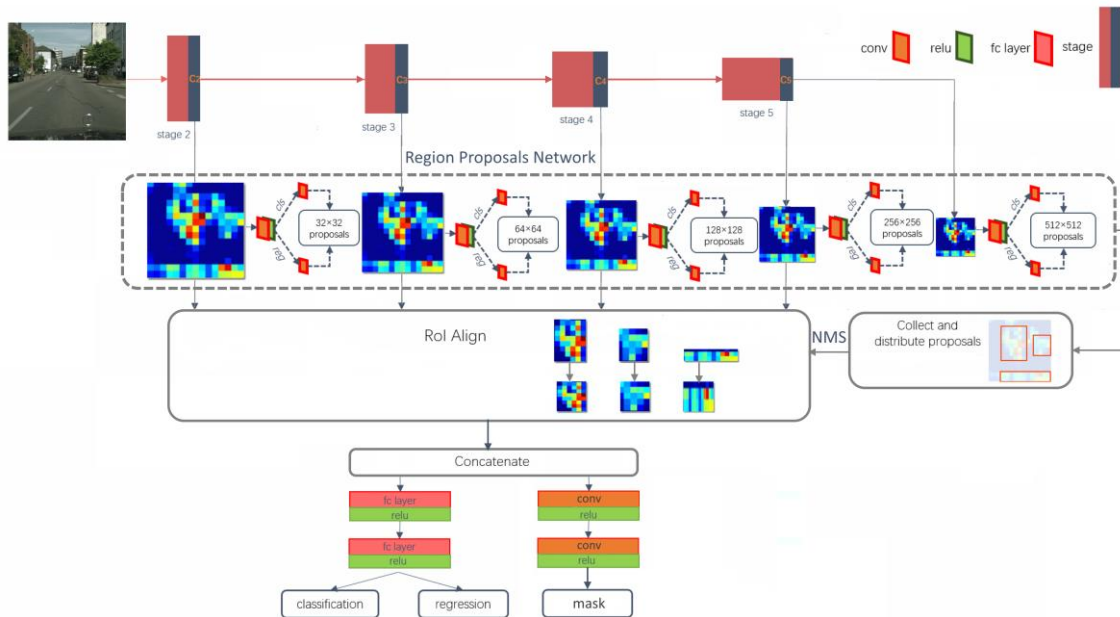


Рис. 5. Архитектура Mask R-CNN

6. Результаты обучения

На полученном синтетическом наборе изображений с попиксельно размеченными трещинами дорожного полотна производилось обучение СНС современной архитектуры Mask R-CNN. В качестве входной нейросети для построения карт признаков использовалась ResNet101. Ввиду того, что синтетический набор данных не может в полной мере отразить все характеристики реальных разрушений асфальта, использовалось технология переноса обучения (transfer learning) с помощью предварительно обученной модели ResNet101 на наборе данных MS-COCO.

На вход СНС подаются RGB изображения размера 1024×1024, а в качестве масштабов анкоров используются следующие значения: 0.33, 0.5, 1, 2, 3.

Обучение производилось на протяжении 40 эпох по 400 итераций с использованием мини-масок размером 56×56 пикселей для оптимизации используемой памяти компьютера. Наилучшие результаты по метрике средней точности AP при значении IoU = 0.5 при тестировании на синтетическом наборе составили 78,1%.

Метрика пересечения по объединению (IoU) является методом количественного определения процентного перекрытия между целевой маской и результатами выделения. Результат обучения по IoU составил 59,17%.

Для оценки эффективности разработанного подхода к выделению дефектов был вручную подготовлен небольшой набор данных из 50 реальных изображений с трещинами на дороге. На рисунке 6 приведены результаты выделения трещин человеком вручную и нейросетевое попиксельное выделение на реальном изображении.

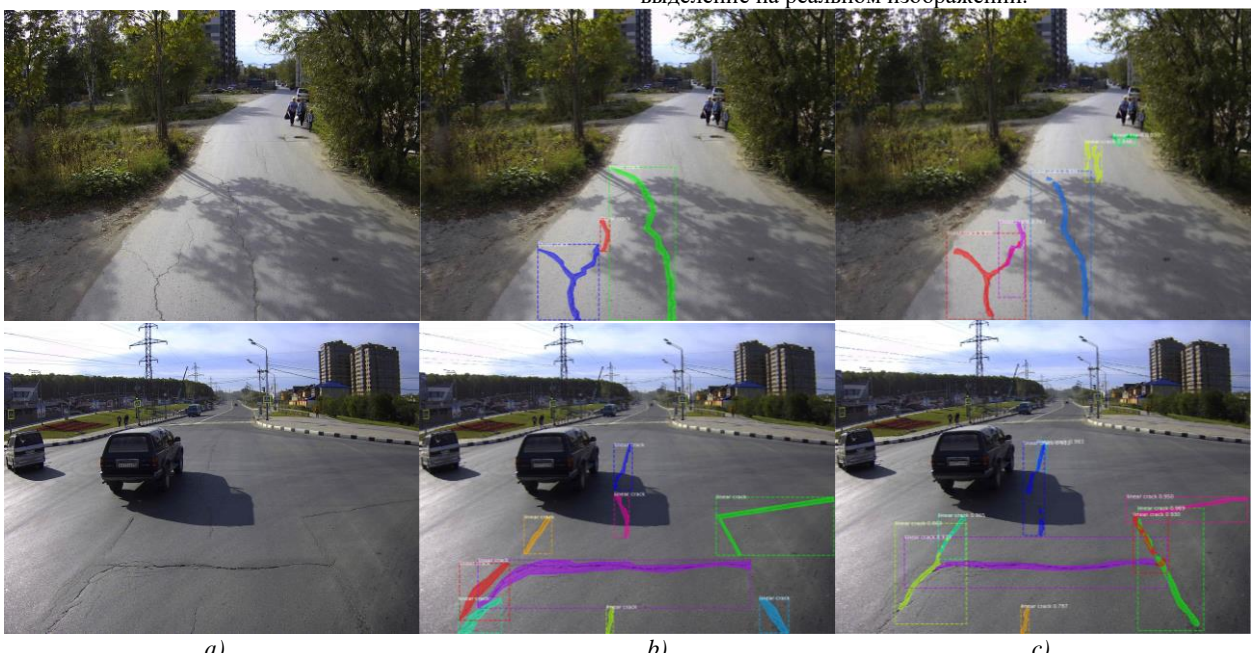


Рис. 6. Сравнение результатов: a) исходное изображение, b) ручное выделение, c) нейросетевое выделение

Ввиду сложной топологии и пересечений, объединений разрушений асфальтового покрытия возможны различные варианты сегментации по экземплярам, что приводит к низкой точности детектирования ограничивающих рамок на реальных изображениях $AP[IoU = 0.5] = 10.98\%$. Однако, оценка качества попиксельной сегментации без привязки к экземплярам составляет $IoU = 46\%$.

Анализ конкретных результатов нейросетевого выделения позволяет судить о том, что обучение на синтетических данных является применимым к данной задаче и позволяет получить приемлемые по точности результаты. Обученная предложенным способом СНС хорошо справляется с выделением небольших дефектов покрытия, мало чувствительна к теням и дорожной разметке. Улучшение результатов детектирования возможно при дополнительном обучении СНС с уделением внимания к дорожным техническим сооружениям, таким как решетки ливневых канализаций и люки колодцев.

7. Заключение

В рамках задачи автоматического детектирования дефектов дорожного полотна был представлен алгоритм генерации синтетической выборки данных. С помощью полученного набора данных происходило обучение СНС Mask R-CNN для детектирования трещин и их сегментации на уровне пикселей.

Аналитический обзор данной области показал, что исследования по обнаружению трещин являются ограниченными, так как автоматическое обнаружение трещин на уровне пикселей остается сложной задачей из-за неоднородной интенсивности пикселей, сложной топологии трещин, различного освещения и зашумленной текстуры покрытия.

Полученные результаты позволяют судить о применимости подхода обучения на синтетической выборке, что позволяет получить лучшие результаты по сравнению с использованием небольшого набора данных, размеченного вручную.

8. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00977 А.

9. Литература

- [1] Cordts M. [и др.]. The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding.
- [2] Danilescu D. [и др.]. Road Anomalies Detection Using Basic Morphological Algorithms // Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering. 2015. № 2(8). С. 15-18.
- [3] Eisenbach M. [и др.]. How to get pavement distress detection ready for deep learning? A systematic approach IEEE, 2017. 2039–2047 с.
- [4] Fritsch J., Kuhn T., Geiger A. A new performance measure and evaluation benchmark for road detection algorithms // IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC. 2013. С. 1693–1700.
- [5] Gopalakrishnan K. [и др.]. Deep Convolutional Neural Networks with transfer learning for computer vision-based data-driven pavement distress detection // Construction and Building Materials. 2017. (157). С. 322–330.
- [6] He K. [и др.]. Mask R-CNN.
- [7] Li H. [и др.]. Automatic Pavement Crack Detection by Multi-Scale Image Fusion // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018. С. 1–12.
- [8] Maeda H. [и др.]. Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with

- Smartphone Images // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2018. № 12 (33). С. 1127–1141.
- [9] Mohan A., Poobal S. Crack detection using image processing: A critical review and analysis // Alexandria Engineering Journal. 2018. № 2 (57). С. 787–798.
- [10] Oliveira H., Correia P.L. CrackIT - An image processing toolbox for crack detection and characterization // 2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP. 2014. С. 798–802.
- [11] Ros G. [и др.]. The SYNTHIA Dataset: A Large Collection of Synthetic Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes // IEEE Conference on CVPR, Proceedings, NV. 2016. С. 3234–3243.
- [12] Salman M. [и др.]. Pavement crack detection using the Gabor filter // IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC. 2013. № October. С. 2039–2044.
- [13] Shi Y. [и др.]. Automatic Road Crack Detection Using Random Structured Forests // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. № 12 (17). С. 3434–3445.
- [14] Varadharajan S. [и др.]. Vision for road inspection // 2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2014. 2014. С. 115–122.
- [15] Yang F. [и др.]. Feature Pyramid and Hierarchical Boosting Network for Pavement Crack Detection 2019. С. 1–11.
- [16] Zendel O. [и др.]. WildDash - Creating Hazard-Aware Benchmarks.
- [17] Zhang L. [и др.]. Road crack detection using deep convolutional neural network // Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP. 2016. № October 2017 (2016-Augus). С. 3708–3712.
- [18] Zou Q. [и др.]. CrackTree: Automatic crack detection from pavement images // Pattern Recognition Letters. 2012. № 3 (33). С. 227–238.
- [19] Судаков С. [и др.]. Алгоритмы детектирования разметки и дефектов дорожного покрытия 2008.
- [20] Шахуро, В.И. Синтез обучающих выборок для классификации дорожных знаков с помощью нейросетей / В.И. Шахуро, А.С. Конушин // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 105-112.

Об авторах

Канаева Ирина Александровна, 1994 года рождения, в 2018 окончила магистратуру Томского политехнического университета по направлению «Информатика и вычислительная техника», специализация «Компьютерный анализ и интерпретация данных». Обучается в аспирантуре Томского политехнического университета. Область научных интересов: обработка и анализ изображений и видео, рекуррентные нейронные сети. E-mail: iap15@tpu.ru.

Иванова Юлия Александровна, 1986 года рождения, в 2009 году окончила Томский политехнический университет по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», к.т.н., доцент отделения информационных технологий. Область научных интересов: обработка изображений, распознавание образов, биологически-подобные алгоритмы. E-mail: jbolotova@tpu.ru.

Структурный подход к классификации букв в изображениях

А.Л. Липкина¹, Л.М. Местецкий¹
lipkina96@mail.ru|mestlm@mail.ru

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе предлагается математическая модель понятия графемы, основные цели которой — сформулировать строгое определение понятия «графема» и выделить общую структуру изображений одинаковых символов. Построение графемы основано на непрерывном скелетном подходе, который подразумевает построение скелета бинарного изображения символа с последующей его регуляризацией. Также в работе производится применение построенной модели для задачи распознавания текста на цифровом изображении. Для этой цели из модели выделяются признаки, основанные на положениях вершин в модели графемы, и на этих признаках обучается классификатор. Он определяет, к какому классу относится графема, выделенная из бинарного изображения одного символа. Рассматривается также метод обработки входного изображения с текстом для более качественного выделения символов, строк и слов. Проведенные эксперименты показывают работоспособность предлагаемой модели графемы. Алгоритм классификации показывает сравнимые с современными методами распознавания текста результаты.

Ключевые слова: оптическое распознавание символов, цифровое изображение текста, цифровой шрифт, графема, математическая модель, медиальное представление, агрегированный скелетный граф.

A Structural Approach to the Classification of the Letters in the Images

A.L. Lipkina¹, L.M. Mestetskiy¹
lipkina96@mail.ru|mestlm@mail.ru

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper proposes a mathematical model of the concept of grapheme, the main purposes of which are to formulate a strict definition of the concept of «grapheme» and to highlight the overall structure of images of the same characters. The construction of the grapheme is based on a continuous skeletal approach, which involves the construction of the skeleton of a binary image of the symbol with its subsequent regularization. We also use the constructed model for the problem of text recognition on a digital image. For this purpose, features based on vertex positions in the grapheme model are extracted from the model, and the classifier is trained on these features. It determines which class the grapheme selected from the binary image of one symbol belongs to. We also consider the method of processing the input image with text for better selection of characters, lines and words. The experiments show the performance of the proposed grapheme model. The classification algorithm shows results comparable with modern methods of text recognition.

Keywords: optical character recognition, digital text image, digital font, grapheme, mathematical model, medial representation, aggregated skeleton graph.

1. Введение

Методы оптического распознавания символов (Optical Character Recognition, OCR) активно развиваются с 1950-х годов. Одним из подходов к распознаванию символов вне зависимости от шрифта и размера [8] является метод, основанный на выделении **графемы** [12], [11] из изображения символа. Впервые строгая формализация понятия графемы и применение структуры графемы для классификации букв в изображениях текстов были предложены в [11].

Предлагаемый в [11] метод обладает следующими **недостатками**: наличие отказов от классификации, многоступенчатая структура алгоритма распознавания, сложная система генерации признаков, необходимость большого обучающего корпуса шрифтов для достижения приемлемого качества распознавания.

В данной работе осуществляется попытка улучшения математической модели графемы, упрощение генерации признаков и алгоритма классификации, избавление от отказов классификации, возможность уменьшения обучающего множества шрифтов.

2. Постановка задачи

1. Построение математической модели графемы.
2. Выделение из нее признаков для возможности классификации букв на изображениях текстов.

Основа математической модели графемы — построение *непрерывного представления* скелетного графа бинарного изображения буквы с последующим удалением некоторых рёбер.

Интуитивное понятие графемы

В данном разделе приводятся основные определения, необходимые для введения математической модели графемы. Более подробно они изложены в [11].

Определение 2.1. Графема — графический примитив, имеющий вид геометрического графа и изображающий канонические начертания буквы. Графему можно представить как начертание букв в тонком шрифте. Графемы обладают следующими свойствами:

1. Любые две графемы хорошо *отличимы*.
2. Если два изображения представляются одной графемой, то *различия между изображениями несущественны* (по структуре графемы).

Определение 2.2. Вписанный пустой круг фигуры — круг, целиком лежащий в фигуре и не содержащий-ся ни в каком другом лежащим в фигуре круге фигуры.

Определение 2.3. Скелетное представление фигуры — множество центров всех вписанных пустых кругов.

Скелетное представление фигуры представляет из себя граф \mathcal{S} , называемый **скелетом (скелетным графом)** фигуры. Вершинами графа являются центры вписанных пустых кругов, имеющих либо одну, либо три общих точки с границей фигуры, а рёбрами — линии из центров вписанных пустых кругов, касающихся границы ровно в 2 точках. Более подробно см. в [14].

Определение 2.4. Силуэт скелетного графа \mathcal{V}_S — фигура, состоящая из объединения всех вписанных пустых кругов, центры которых лежат в \mathcal{S} .

Определение 2.5. Стрижка скелетного графа (с параметром α) — процесс регуляризации скелетного графа \mathcal{S} , основанный на удалении несущественных рёбер из скелетного графа. В процессе такого удаления возникает минимальный подграф \mathcal{S}' исходного скелетного графа, для которого выполняется

$$H(\mathcal{V}_S, \mathcal{V}_{S'}) \leq \alpha,$$

где $H(\mathcal{V}_S, \mathcal{V}_{S'})$ — хаусдорфово расстояние [1] между силуэтами скелетных графов \mathcal{S} и \mathcal{S}' .

3. Метод решения

Выделение графемы

Пусть на вход подается бинарное изображение одного символа. Тогда алгоритм выделения модели графемы заключается в следующем:

1. Построение непрерывного представления скелетного графа из изображения буквы.
2. Агрегирование скелетного графа.
3. Регуляризация агрегированного графа, то есть удаление шумовых рёбер.

Построение скелетного графа

Построение скелетного графа фигуры подробно описывается в [14]. Основные шаги приведены ниже:

1. Аппроксимация исходной фигуры F многоугольником минимального периметра M .
2. Построение диаграммы Вороного [14] для вершин и сторон многоугольника M .
3. Удаление некоторых отрезков из диаграммы [14].
4. Аппроксимация параболических рёбер диаграммы Вороного прямолинейными рёбрами.

После получения скелетного графа производится операция стрижки с параметром α .

Агрегация скелета

Полученный скелетный граф содержит только следующие типы вершин: *вершины степени 1 (листья)*, *вершины степени 2* и *вершины степени 3 (развилки)*.

Основную информацию о скелетном графе несут листья и развилки, а также виды связей между ними. Чтобы выделить эти связи, производится операция *агрегирования скелетного графа*: «склеивание» в одну цепь всех таких последовательных рёбер, инцидентные вершины которых имеют степень либо 1, либо 2.

После такой «склейки» в качестве вершин остаются только листья и развилки (см. рис. 1).

После агрегации скелетный граф представляет собой гиперграф $\mathcal{S}_{agg,1}$, вершинами которого являются листья и развилки, а рёбрами — выделенные в процессе агрегирования цепочки.

Обозначения и понятия

Все необходимые обозначения приведены в [11]. Кратко приведем их:

1. \mathcal{R} — минимальная по площади прямоугольная рамка с горизонтальными и вертикальными сторонами, ограничивающая бинарное изображение символа. \mathcal{R}_h и \mathcal{R}_w — высота и ширина рамки \mathcal{R} .
2. $v_1(e), v_2(e)$ — концевые вершины этого ребра e .
3. $l(e)$ — длина ребра e .
4. Ребро e_{agg} обозначенного гиперграфа \mathcal{S}_{agg} состоит из n последовательных рёбер исходного графа \mathcal{S} , попавших в данную цепочку e_{agg} :

$$\{e_{agg}^1, e_{agg}^2, \dots, e_{agg}^n\}.$$
5. $l(e_{agg})$ — длина цепочки e_{agg} .
6. $\deg v$ — степень вершины v .

Определение 3.1. Обозначим отрезок $[v_1(e_{agg}), v_2(e_{agg})]$ через d . Среди всех вершин цепочки e_{agg} находится вершина v_h , наиболее удалённая от отрезка d . По трём точкам $v_1(e_{agg}), v_2(e_{agg}), v_h$ строится окружность. Тогда **аппроксимирующей дугой** называется дуга наименьшей длины, ограниченная точками $v_1(e_{agg}), v_2(e_{agg})$.

Определение 3.2. Пусть ω — окружность, L — некоторая дуга окружности, концами которой являются точки A и B . Пусть O — центр окружности ω . Тогда $\angle BOA$ — **центральный угол** дуги L .

Определение 3.3. Угол кривизны цепочки — центральный угол её аппроксимирующей дуги.

Регуляризация графемы

Наличие или отсутствие засечек не мешает человеку понять, какая именно буква изображена. То есть, модель графемы у буквы в шрифтах с засечками или без должна быть одинаковой. Поэтому следующий этап построения математической модели графемы — удаление из $\mathcal{S}_{agg,1}$ рёбер, являющихся засечками (см. рис. 1). Множество рёбер гиперграфа $\mathcal{S}_{agg,1}$, являющихся засечками, обозначим через \mathcal{E}_S .

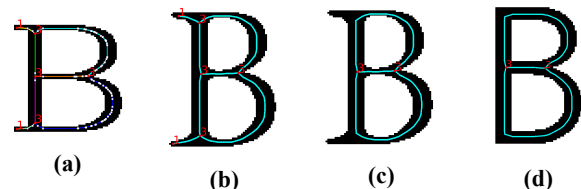


Рис. 1. 1а: Агрегированный скелетный граф; 2а: Скелет буквы в шрифте с засечками; 2б: Скелет после регуляризации; 2с: Скелет буквы в шрифте без засечек.

Ниже описывается одно из ключевых отличий от метода регуляризации графемы в [11].

Построение множества \mathcal{E}_S происходит в 2 этапа. На первом этапе в множество добавляют те ребра e_{agg} , для которых можно быть уверенным, что они являются засечками. В таком случае ребро e_{agg} попадает в множество \mathcal{E}_S , если выполнены *все* следующие свойства:

- 1) ровно одна из вершин $\{v_1(e_{agg}), v_2(e_{agg})\}$ — листовая, и ровно одна из них является развилкой;
- 2) длина ребра $l(e_{agg})$ не превышает порога $\mathcal{L}(\mathcal{R})$;
- 3) центральный угол 2β аппроксимирующей e_{agg} дуги не меньше некоторого порога A .

На втором этапе происходит расширение множества \mathcal{E}_S по следующему правилу: для всех вершин степени 3, для которых одно из смежных ребер было добавлено в \mathcal{E}_S , проделывается:

1. Ищется смежное ребро e'_{agg} , второй конец которого имеет степень 1 и которое не было добавлено в \mathcal{E}_S . Если таких ребер несколько, то выбирается кратчайшее из них.
2. Если длина выбранного $l(e'_{agg})$ не превосходит порога $\mathcal{L}(\mathcal{R})$, то ребро e'_{agg} добавляется в \mathcal{E}_S .

Идея такого добавления в том, что, как правило, засечки имеют парную структуру, то есть из одной вершины степени 3 выходят 2 ребра-засечки.

Алгоритм удаления шумовых ребер из $\mathcal{S}_{agg,1}$:

1. Определение множества \mathcal{E}_S .
2. Удаление из $\mathcal{S}_{agg,1}$ всех ребер из \mathcal{E}_S .

Так как после удаления могут возникнуть вершины степени 2, необходимо провести повторное агрегирование скелета. Гиперграф, полученный после удаления ребер и повторной агрегации, обозначим через $\mathcal{S}_{agg,2}$. Этот гиперграф и является предлагаемой **математической моделью графемы**.

Построение признаков из графемы

Второе ключевое отличие от [11] состоит в упрощенном способе генерации признаков из графемы. Идея извлечения признаков состоит в выделении ключевых вершин степени 1 и 3, а также промежуточных вершин степени 2. Вершины степени 2 ищутся следующим способом: для каждого ребра из $\mathcal{S}_{agg,2}$ отмечается середина ребра и она объявляется вершиной степени 2.

Далее используется идея *зонирования* [5, 9]. Для этого рамка изображения \mathcal{R} разбивается на n частей горизонтальными прямыми и m частей — вертикальными. В каждой из получившихся областей отдельно считается количество вершин степени 1, степени 3 и степени 2 (см. рис. 2).

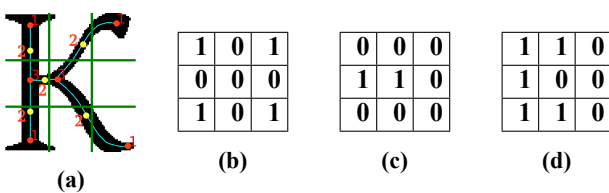


Рис. 2. 2a: графема $\mathcal{S}_{agg,2}$ буквы «К» и разбиение рамки на 9 прямоугольников ($n = m = 3$); 2b: количества листьев в каждом из прямоугольников; 2c: количества развилок; 2d: количества середин ребер.

Такая генерация признаков производится для N_Z различных масок разбиения на зоны \mathcal{Z} . Полученные признаки объединяются в один признаковый вектор, и к ним добавляется признак «число компонент связности на изображении в рамке \mathcal{R} ».

$$\mathcal{Z} = \{(n_i, m_i)\}_{i=1}^{N_Z}.$$

4. Обработка входного изображения

На вход метод получает цветное изображение X^{RGB} сканированного текста на кириллице. Для возможности выделения текста, входное изображение должно быть бинаризовано и очищено от шумов. Пусть значения пикселей лежат на отрезке $[0, 1]$.

Сначала изображение приводится в серые тона X^{Grey} . Так как фон может быть неравномерно освещен, то для выравнивания освещения из X^{Grey} вычитается фон B^{Grey} . Фон считается при помощи **фильтра Гаусса** [3] с большой дисперсией σ_1 .

$$\begin{cases} B^{Grey} = \text{Gaussian_filter}(X^{Grey}, \sigma_1) \\ f(X^{Grey}) = \frac{X^{Grey}}{B^{Grey}}, \end{cases}$$

где деление является попиксельным.

После этого контраст полученного изображения увеличивается при помощи **линейного растяжения** с квантилями q^{bl}, q^{wh} . Для повышения интенсивности пикселей темных оттенков производится нелинейное изменение значения пикселей операцией **гамма-коррекции**. Для улучшения качества изображения за счет фильтрации шумов используется **фильтр Винера** [6]. Далее изображение бинаризуется при помощи метода Оцу [7] и из полученного изображения удаляются объекты меньшей площади s . Получается бинарное изображение X^{BW} .

Выделение символов

На изображении X^{BW} выделяются связные компоненты черных пикселей по системе 4-соседства. В такой системе соседними считаются 2 пикселя, если они граничат по одной из сторон пикселя. Далее, для каждой связной компоненты ищется минимально содержащий её прямоугольник R .

Не все найденные компоненты связности являются буквами, так как на бинарном изображении все еще могут присутствовать посторонние шумы. Для их фильтрации считаются следующие статистики: m_{sq}, m_h, m_w — медианы распределения площадей, высот и широт прямоугольников соответственно.

Пусть \mathcal{R} — текущий прямоугольник, $\mathcal{R}_h, \mathcal{R}_w, \mathcal{R}_{sq}$ — его высота, ширина и площадь соответственно. Шумовым прямоугольником считается хотя бы в одном из следующих случаев:

1. $\mathcal{R}_{sq} \leq \kappa_1 m_{sq}$ и $|\mathcal{R}_h - m_h| > \kappa_2 m_h$.
2. $\mathcal{R}_w \geq \kappa_3 m_w$ или $\mathcal{R}_h \geq \kappa_3 m_h$.

После такой фильтрации из кандидатов на буквы исчезают диакритические знаки (для букв ё и й). Чтобы объединить букву и диакритический знак, производится увеличение высоты прямоугольника:

Если $|\mathcal{R}_h - m_h| < \kappa_4 m_h$, то
высота увеличивается на κ_5 процентов.

После увеличения высоты в рамках каждого прямоугольника заново производится поиск минимального содержащего символ прямоугольника.

Выделение строк

Предполагаем, что текст на изображении представлен в виде горизонтальных (возможно, с небольшими отклонениями) строк с текстом. Пусть $\mathcal{R}_{la,x}, \mathcal{R}_{la,y}$ — левая верхняя x - и y -координаты прямоугольника \mathcal{R} .

Строки выделяются по следующему правилу: два символа с ограничивающими их рамками \mathcal{R}^1 и \mathcal{R}^2 входят на одной строке тогда и только тогда, когда:

$$|\mathcal{R}_{la,x}^1 - \mathcal{R}_{la,x}^2| < \frac{\kappa_6}{2} (\mathcal{R}_h^1 + \mathcal{R}_h^2)$$

Далее, в рамках одной строки символы упорядочиваются по возрастанию координаты $\mathcal{R}_{la,y}$.

Выделение слов

Для возможности выделения слов считается медиана распределения m_b ширин зазора между рамками букв, лежащими на одной строке. Далее используется следующее правило: два последовательных символа с ограничивающими их рамками \mathcal{R}^1 и \mathcal{R}^2 разделяются пробелом тогда и только тогда, когда:

$$\mathcal{R}_{ra,y}^2 - \mathcal{R}_{ra,y}^1 > \kappa_7 m_b,$$

где $\mathcal{R}_{ra,y}$ — y -координата верхнего правого угла \mathcal{R} .

5. Алгоритм классификации

После обработки входного изображения, выделения символов и разбиения на строки слова производится этап классификации каждого символа. Для этого нужно проделать следующие шаги:

1. Для каждого символа выделить графему.
2. Из каждой модели графему выделить признаки.
3. Применить обученный классификатор.

Данная задача классификации является *многоклассовой*. Пусть в задаче C классов и классификатор a выдает вероятности принадлежности объекта x к классу c_i , $i \in [1, C]$:

$$a(x) = \{\mathbb{P}(x \in c_i)\}_{i=1}^C.$$

Тогда класс для объекта x согласно классификатору a определяется по следующей формуле:

$$class(x) = \arg \max_{c_i} \mathbb{P}(x \in c_i).$$

6. Метрики качества

Этап обучения

Для подбора параметров модели используется метод кросс-валидации. Пусть $(\mathbb{X}_{val}, \mathbb{Y}_{val}) = \{(x_{val}^i, y_{val}^i)\}_{i=1}^{n_{val}}$ — валидационная выборка. Тогда метрика качества Q модели a измеряется при помощи **точности классификации (accuracy_score)**:

$$Q(a, (\mathbb{X}_{val}, \mathbb{Y}_{val})) = \frac{1}{n_{val}} \sum_{i=1}^{n_{val}} \mathbb{I}[y_{val}^i = class(a(x_{val}^i))].$$

Этап тестирования

На этапе тестирования в качестве исследуемых метрик используются *точность классификации* и **редакторское расстояние (расстояние Левенштейна)** [13] $L(s_1, s_2)$ между двумя строками s_1, s_2 . $L(s_1, s_2)$ считается как минимальное количество замен, вставок и удаления букв из s_1 , необходимое для превращения строки s_1 в строку s_2 . Также считается **относительное расстояние Левенштейна** $L'(s_1, s_2)$, равное:

$$L'(s_1, s_2) = \frac{L(s_1, s_2)}{length(s_2)},$$

где $length(s)$ — длина строки s .

7. Вычислительные эксперименты

Обучающая выборка

1. Выбирается количество шрифтов N_f , в данной работе — до 116 видов, включая различные стили написания (bold, condensed, normal, light и др.), а также с засечками или без (serif/sans) [8].
2. Выбираются размеры шрифта, с которыми будет генерироваться выборка (всего N_s размеров). Предложенный классификатор *может обучаться на изображениях разного размера*.
3. Программно генерируются бинарные изображения букв *без опции сглаживания*. Выборку, сгенерированную таким способом, назовём **оригинальной**.
4. Программно генерируются бинарные изображения букв *без опции сглаживания*, затем они зашумляются при помощи фильтра Гаусса с дисперсией σ_2 , и после этого заново бинаризируются методом Оцу [7].
5. Генерируются программно бинарные изображения букв *с опцией сглаживания*, затем применяется фильтр Гаусса с дисперсией σ_2 , и заново бинаризируются методом Оцу [7]. Выборку, сгенерированную тремя вышеописанными способами (3–5) будем называть **зашумленной**.
6. Каждый раз генерируется по 68 букв из каждого шрифта и размера: 34 строчные и 34 прописные. Буква **Ы** может состоять из 2 графем: **Ь** и **И**. Поэтому к набору из 33 букв добавляется еще одна графема, отвечающая букве **И**.
7. В качестве истинного класса изображения буквы используется *строчное написание буквы*, то есть число классов $C = 34$. Приведение к нижнему регистру обосновано тем, что существует ряд букв (например, **С** и **с**), заглавное и строчное написание которых представляют собой одну графему. В этом случае классификатор может сделать ошибку.
8. Размер выборки составляет $3 \cdot 68 \cdot N_f \cdot N_s$ объектов.

Значения параметров

$$\alpha = \max(0.06 \cdot \mathcal{R}_h, 1), \quad \mathcal{A} = \frac{\pi}{5}, \quad \mathcal{L}(\mathcal{B}) = \frac{2}{7} \max(\mathcal{R}_h, \mathcal{R}_w),$$

$$\kappa_1 = 0.3, \quad \kappa_2 = 0.3, \quad \kappa_3 = 5, \quad \kappa_4 = 0.5$$

$$\kappa_5 = 35, \quad \kappa_6 = 0.7, \quad \kappa_7 = 3,$$

$$\sigma_1 = 50, \quad \sigma_2 = 1, \quad q^{bl} = 0.03, \quad q^{wh} = 0.97, \quad s = 10,$$

$$\mathcal{Z} = \{(3, 3), (2, 2), (2, 3), (3, 2), (4, 4),$$

$$(4, 3), (3, 4), (3, 8), (4, 8), (5, 3), (3, 5)\}.$$

Классификатор a — случайный лес [4].

Базовый алгоритм

В качестве базового алгоритма выбрана свободно распространяемая OCR-система **tesseract** [10]. В её основе — **рекуррентная нейронная сеть LSTM** [2].

Эксперимент 1

Исследуется зависимость качества распознавания от размера и качества обучающей выборки.

Фиксируются количества шрифтов для обучения: **10, 20, 30** размера **50pt**. Для каждого набора шрифтов генерируется 2 обучающие выборки: *оригинальная (original)* и *зашумленная (noisy)*. На каждой из выборок обучается своя модель классификации. Для теста:

1. Генерируются выборки-дублиеры обучающего множества, но в другом размере шрифта (**30pt**).
2. Генерируется выборка из 50 шрифтов размера **30pt**, не участвующих во всех обучающих множествах.
3. Выборки — в *оригинальной* и *зашумленной* формах. Результаты приведены в таблице 2.

Эксперимент 2

В данном эксперименте проводится анализ ошибок обученных выше классификаторов. Исследуется, для каких букв классификаторы чаще всего ошибаются. В таблице 3 представлен топ-3 по убыванию ошибок классификатора в формате:

$p(\text{предсказанная буква} | \text{правильная буква}) =$ процент случаев, в котором классификатор ошибся для данной правильной буквы.

Эксперимент 3

В данном эксперименте исследуется качество предложенного метода в сравнении с базовым алгоритмом **tesseract** на *реальных данных*.

Для тренировочной выборки фиксируется 116 шрифтов. Выборка генерируется в зашумленном варианте. Тестовая выборка состоит из размеченных скриншотов, сканов и фотографий реальных текстов. Её объем — около 40 изображений. Метрики качества — *расстояние Левенштейна L* и *относительное расстояние Левенштейна L'* . В относительном деление происходит на длину текста-ответа *без учета знаков пунктуации*. Результаты эксперимента приведены в таблице 4. Примеры распознанного текста — на рис. 1.

Исходное изображение	Train fonts:116 noisy	Tesseract

Таблица 1. Результаты распознавания текста двумя методами

Test \ Train	duplicate orig	duplicate noisy	other orig	other noisy
fonts:10 orig	0.936	0.88	0.9	0.82
fonts:20 orig	0.96	0.913	0.925	0.855
fonts:30 orig	0.953	0.9	0.93	0.859
fonts:10 noisy	0.93	0.9	0.895	0.84
fonts:20 noisy	0.966	0.92	0.92	0.86
fonts:30 noisy	0.954	0.92	0.94	0.87

Таблица 2. Точность классификации. Размер шрифта на обучении — 50pt, на тесте — 30pt.

Test \ Train	duplicate orig	duplicate noisy	other orig	other noisy
fonts 10 orig	p(э з)=0.2 p(л п)=0.15 p(і т)=0.15	p(з э)=0.28 p(о д)=0.2 p(а д)=0.18	p(а д)=0.44 p(з э)=0.3 p(ч ц)=0.27	p(а д)=0.5 p(з э)=0.49 p(ч ц)=0.33
fonts 20 orig	p(л п)=0.1 p(з э)=0.1 p(о д)=0.1	p(з э)=0.31 p(о д)=0.14 p(п л)=0.13	p(з э)=0.29 p(а д)=0.17 p(п л)=0.16	p(з э)=0.51 p(а д)=0.24 p(п л)=0.21
fonts 30 orig	p(з э)=0.2 p(л п)=0.1 p(п л)=0.1	p(з э)=0.35 p(л п)=0.14 p(а д)=0.13	p(з э)=0.29 p(а д)=0.21 p(п л)=0.14	p(з э)=0.51 p(а д)=0.29 p(п л)=0.19
fonts 10 noisy	p(і т)=0.45 p(л п)=0.25 p(з э)=0.2	p(з э)=0.28 p(л п)=0.22 p(о д)=0.2	p(і т)=0.44 p(а д)=0.36 p(з э)=0.3	p(з э)=0.49 p(а д)=0.48 p(ч ц)=0.32
fonts 20 noisy	p(з э)=0.25 p(л п)=0.125 p(о д)=0.1	p(з э)=0.39 p(л п)=0.15 p(п л)=0.125	p(з э)=0.36 p(а д)=0.19 p(п л)=0.16	p(з э)=0.57 p(а д)=0.25 p(п л)=0.22
fonts 30 noisy	p(з э)=0.26 p(п л)=0.12 p(л п)=0.1	p(з э)=0.36 p(л п)=0.14 p(о д)=0.12	p(з э)=0.34 p(а д)=0.17 p(п л)=0.14	p(з э)=0.5 p(а д)=0.2 p(п л)=0.16

Таблица 3. Топ-3 ошибок. Размер шрифта на обучении — 50pt, на тесте — 30pt.

	L	L'
Train fonts:116 noisy	7.625	0.0753
Tesseract	2.125	0.015

Таблица 4. Средние расстояния Левенштейна и относительного Левенштейна

Анализ результатов

Из *экспериментов 1 и 2* видно:

1. Больше шрифтов в обучающей выборке \Rightarrow качество распознавания выше.
2. Добавление зашумленных объектов в выборку увеличивает качество классификации.
3. Для успешного распознавания букв в каких-то шрифтах необязательно, чтобы в обучающей выборке были примеры букв из этого шрифта. Это подтверждает свойство графемы быть инвариантной к стилю начертания букв.
4. Чаще всего путаются буквы, схожие по скелетной структуре, например **з** и **э**, **і** и **т**, **п** и **м**, **А** и **Д** и др.
5. Чем больше в выборке шрифтов, тем процент ошибок классификации становится меньше.

В эксперименте 3 предложенный метод немного проигрывает tesseract. Но результаты являются приемлемыми: среднее относительное редакторское расстояние порядка 0.07. На редакторское расстояние сильно влияет плохая сегментация букв: случается так, что две буквы, стоящие рядом, могут при бинаризации образовывать одну компоненту связности. Тогда два символа будут считаться за один, и распознавание предложенным методом может иметь ошибочные результаты.

8. Выводы

Эксперименты показали, что предложенная математическая модель является работоспособной: из нее можно выделить признаки, необходимые для качественного распознавания букв в изображениях.

Достоинства предлагаемого подхода:

1. Независимость от размера и шрифта буквы.
2. Выделение общей структуры (математической модели графемы) букв, которой достаточно для распознавания букв в новых шрифтах.
3. Интерпретируемые признаки и отсутствие отказов от классификации.
4. Интуитивно понятные построение признакового пространства и алгоритм классификации.
5. Наличие методов предобработки изображения с целью улучшения качества бинаризации.
6. Необязательно обучаться на большой выборке.

Недостатки предлагаемого подхода:

1. Зависимость качества распознавания от качества бинаризации и сегментации изображения.
2. Наличие ошибок классификации схожих по графемному представлению букв.

9. Заключение

В данной работе предложена улучшенная формализация понятия «графема» [11], а именно: новый способ построения математической модели графемы, удовлетворяющей свойствам графемы. На основе этой модели построен легко интерпретируемый метод генерации признаков, используемых для применения алгоритма классификации букв в изображениях. То есть, определяется мера сходства между математическими моделями графем. Также предложен подход к предобработке и бинаризации цветных изображений и извлечения из него символов, строк и слов. Алгоритм показывает сравнимые с современными методами результаты, что подтверждают проведенные эксперименты.

10. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 17-01-00917.

11. Литература

- [1] *Felix Hausdorff*. Grundzüge der mengenlehre. — 1914.
- [2] Hochreiter, S. Lstm can solve hard long time lag problems / Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber //

Advances in neural information processing systems. — 1997. — P. 473–479.

- [3] Ito, K. Gaussian filter for nonlinear filtering problems / Kazufumi Ito // Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 00CH37187) / IEEE. — Vol. 2. — 2000. — P. 1218–1223.
- [4] Kam, H. T. Random decision forests / Ho Tin Kam // Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition, Montreal, QC. — 1995.
- [5] Kimura, F. Handwritten numerical recognition based on multiple algorithms / Fumitaka Kimura, Malayappan Shridhar // Pattern recognition. — 1991. — Vol. 24, no. 10. — P. 969–983.
- [6] Orioux, F. Bayesian estimation of regularization and point spread function parameters for wiener-hunt deconvolution / François Orioux, Jean-François Giovannelli, Thomas Rodet // JOSA A. — 2010. — Vol. 27, no. 7. — P. 1593–1607.
- [7] Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber. — 1979.
- [8] *ParaType*. Цифровые шрифты. — ParaType. — 2008.
- [9] Takahashi, H. A neural net ocr using geometrical and zonal pattern features / Hiroyasu Takahashi // Proc. 1st Intl. Conf. on Document Analysis and Recognition. — 1991. — P. 821–828.
- [10] Tesseract. — <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>.
- [11] *A. Lipkina, L. Mestetskiy*. Grapheme approach to recognizing letters based on medial representation / *A. Lipkina, L. Mestetskiy*. — 2019. — 01. — P. 351–358.
- [12] *О. В. Осетрова*. СЕМИОТИКА ШРИФТА. — Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Филология. Журналистика. — 2006.
- [13] Yujian, L. A normalized levenshtein distance metric / Li Yujian, Liu Bo // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. — 2007. — Vol. 29, no. 6. — P. 1091–1095.
- [14] *Л. М. Местецкий*. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 2009.

Об авторах

Липкина Анна Львовна, магистр 1 года обучения кафедры математических методов прогнозирования факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета. lipkina96@mail.ru.

Местецкий Леонид Моисеевич, д.т.н., профессор кафедры математических методов прогнозирования факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета. mestelm@mail.ru.



Обработка и анализ
биомедицинских изображений

Biomedical Image Processing
and Analysis

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Сравнительный анализ методов сегментации фМРТ изображений, основанных на марковских случайных полях

С. Д. Черняев¹, О. В. Лукашенко^{1,2}

schernyae@gmail.com | lukashenko-oleg@mail.ru

¹Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия;

²Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Рассматривается задача сегментации трехмерных фМРТ изображений на основе байесовского подхода, где в качестве априорного распределения используется марковское случайное поле (Markov Random Field), а в качестве модели наблюдения – распределение фон Мизеса-Фишера. Основная проблема при применении данного подхода на практике состоит в оценке параметров модели. В статье рассматриваются алгоритмы HMRF-MCEM, HMRF-EM и GrabCut, использующие данную статистическую модель и оценивающие параметры модели без использования заранее размеченных данных. Методы HMRF-EM и GrabCut изначально были предложены в связке с другими статистическими моделями, однако после некоторых модификаций могут быть использованы с распределением фон Мизеса-Фишера. Проведен сравнительный анализ результатов работы алгоритмов на основе экспериментов с использованием синтетических данных, сгенерированных в соответствии со статистической моделью, и реальных фМРТ данных.

Ключевые слова: фМРТ, сегментация, марковское случайное поле, распределение фон Мизеса-Фишера, байесовский вывод

Comparative Analysis of Methods for Segmentation of fMRI Images Based on Markov Random Fields

S. D. Chernyayev¹, O. V. Lukashenko^{1,2}

schernyae@gmail.com | lukashenko-oleg@mail.ru

¹Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia;

²Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

The problem of segmentation of three-dimensional fMRI images based on the Bayesian approach is considered, where Markov Random Field is used as the prior distribution, and von Mises-Fisher distribution is used as the observation model. The main problem when applying this approach in practice is an estimation of the model parameters. In this paper, we review algorithms HMRF-MCEM, HMRF-EM and GrabCut, which implement this statistical model and estimate parameters without the usage of the labeled training data. The methods HMRF-EM and GrabCut were introduced in conjunction with other statistical models, but after a small modification, they can be used with the von Mises-Fisher distribution. A comparative study was carried out by performing experiments on both synthetic, generated from the statistical model, and real fMRI data.

Keywords: fMRI, segmentation, Markov random field, von Mises-Fisher distribution, Bayesian inference.

1. Введение

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) является важным средством диагностики различных заболеваний, таких, например, как шизофрения, болезнь Альцгеймера и аутизм. Результатом фМРТ является трехмерное изображение, при этом каждому вокселю соответствует вектор значений измеренного сигнала, размерность которого зависит от параметров фМРТ. Сегментация такого рода изображений является важной задачей, так как позволяет автоматически выявлять зоны функциональной активности головного мозга. Как показывают исследования [1], существующие методы иногда приводят к некорректным результатам. Поэтому развитие методов сегментации такого рода изображений, в том числе учитывающих пространственную конфигурацию, является актуальной проблемой.

Стандартным подходом к анализу фМРТ изображений является выбор интересующей области и кор-

реляционный анализ сигналов, соответствующим выделенной области и другим областям мозга. Заданием порогового значения выделяют области с высокой корреляцией. Другие алгоритмы позволяют производить сегментацию без выделения области интереса, используя методы кластерного анализа, например анализ независимых компонент и метод k-средних. Недостатком такого подхода является игнорирование пространственной связи между компонентами, тогда как в реальности функциональные нейронные сети объединены в пространственно согласованные области. Методы, учитывающие пространственную структуру, были предложены в работах [2–4]. Отличительной особенностью этих работ является использование марковских случайных полей (MRF – Markov Random Field) в качестве априорной информации, описывающей пространственные связи между нейронами. Задача сегментации в этом случае сводится к нахождению байесовских оценок. Настоящая работа основана на методе, разрабо-

танном в [3, 4], где используется специфическая модель наблюдения, основанная на распределении фон Мизеса-Фишера. Для оценки параметров модели была разработана итеративная процедура HMRF-МСЕМ (Hidden Markov Random Field – Monte Carlo EM) на основе EM-алгоритма, где математическое ожидание на шаге E аппроксимируется с помощью методов Монте-Карло, что, как правило, приводит к большому объему вычислений. В данной работе предпринята попытка адаптировать для рассматриваемой задачи сегментации фМРТ изображений два других алгоритма: HMRF-EM [5] и GrabCut [6], изначально разработанные для решения других задач и не использующие потенциально затратные в вычислительном плане методы Монте-Карло.

2. Скрытые марковские случайные поля

В данном разделе кратко представлен байесовский подход к анализу изображений, где в качестве априорного распределения выступает марковское случайное поле [7, 8].

Пусть задан граф $G = (V, \mathcal{E})$, вершины которого соответствуют вокселям изображения, а множество дуг характеризует систему соседства. Рассмотрим многомерную случайную величину $\mathbf{X} = (X_i, i \in V)$, у которой элементы X_i принимают значения из множества меток $\Lambda = \{1, \dots, L\}$, где L – число классов сегментации. Пусть совместное распределение случайного вектора \mathbf{X} определяется следующим образом:

$$P(\mathbf{x}) = \frac{1}{Z} \exp \left(- \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} V_{i,j}(x_i, x_j) \right), \quad \mathbf{x} \in \Lambda^{|V|}, \quad (1)$$

где Z – нормировочная константа, а функции $V_{i,j}$ называются потенциалами дуг. Отметим, что в силу известной теоремы Хаммерслея-Клиффорда [7, 8], случайный вектор, совместное распределение которого задано таким образом, будет марковским случайным полем. Выбор потенциалов зависит от решения конкретной задачи обработки изображений. В данной работе используется стандартная модель Поттса, для которой

$$V_{i,j} = \beta \cdot I(x_i \neq x_j), \quad (2)$$

где $\beta > 0$, I – индикатор.

Наблюдаемому фМРТ изображению соответствует другой случайный вектор $\mathbf{Y} = (Y_i, i \in V)$, элементы которого, в свою очередь, также являются векторами размерности p (зависит от параметров фМРТ). Условное распределение $P(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ принято называть функцией правдоподобия, для которой выполняется стандартное предположение об условной независимости:

$$P(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \prod_{i \in V} P(y_i|x_i) = \exp \left(- \sum_{i \in V} h_i(x_i, y_i) \right), \quad (3)$$

где $y_i \in \mathbb{R}^p$, $x_i \in \Lambda$, $h_i(x_i, y_i) = -\ln P(y_i|x_i)$.

Тогда апостериорное распределение выражается через формулу Байеса:

$$P(\mathbf{x}|\mathbf{y}) \propto P(\mathbf{y}|\mathbf{x})P(\mathbf{y}),$$

и с учетом сделанных предположений окончательно примет следующий вид

$$P(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \frac{1}{Z} \exp(-E(\mathbf{x}|\mathbf{y})),$$

где так называемая энергия изображения определяется следующим образом

$$E(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \sum_{i \in V} h_i(x_i, y_i) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} V_{i,j}(x_i, x_j). \quad (4)$$

Такая конструкция получила в литературе название скрытое марковское случайное поле.

Решением задачи сегментации будет являться такая конфигурация \mathbf{x} , при которой достигается максимум апостериорного распределения (maximum a posterior):

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{MAP}} = \arg \max_{\mathbf{x}} P(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \arg \min_{\mathbf{x}} E(\mathbf{x}|\mathbf{y}). \quad (5)$$

Таким образом, задача нахождения оптимальной сегментации сводится к задаче минимизации энергии, решение которой теоретически может быть найдено с помощью методов дискретной оптимизации. Существует много методов решения оптимизационной задачи (5). В данной работе используются методы, основанные на разрезах графа (Graph Cut), которые в случае бинарной сегментации ($L = 2$) дают точное решение [9], когда функции $V_{i,j}$ удовлетворяют условию субмодулярности (выполнено для модели Поттса). В случае произвольной сегментации ($L > 2$) существуют итерационные процедуры, сходящиеся к близкому к глобальному оптимуму значению [9], при условии, что функции $V_{i,j}$ являются метриками на множестве меток Λ (что также имеет место для рассматриваемой в работе модели Поттса).

3. Модель наблюдения

Выбор подходящей модели наблюдения является, пожалуй, самым важным фактором при применении байесовского подхода для обработки изображений. Моделью наблюдения является предположение о распределении вероятностей данных Y_i при фиксированной скрытой переменной:

$$P(y_i|x_i = \ell), \quad \ell = 1, \dots, L, \quad i \in V. \quad (6)$$

Следуя работам [3, 4], все данные (наблюдаемые реализации случайных величин $Y_i, i \in V$) проецируются на гиперсферу единичного радиуса

$$\mathbb{S}^{p-1} = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p : \|\mathbf{x}\| = 1\}.$$

После такой нормировки можно использовать известные распределения статистики направленных значений (directional statistics), которые с успехом применяются для некоторых задач машинного обучения, таких, например, как кластеризация наблюдений [10].

В данной работе предполагается, что при фиксированном значении метки наблюдаемая случайная величина $Y_i|_{X_i=\ell}$, соответствующая вокселю $i \in V$, имеет распределение фон Мизеса-Фишера с плотностью распределения

$$f(y_i; \mu_\ell, \kappa_\ell) = C_p(\kappa_\ell) \exp(\kappa_\ell \mu_\ell^T y_i), \quad y_i \in \mathbb{S}^{p-1}, \ell \in \Lambda, \quad (7)$$

где $\mu_\ell \in \mathbb{S}^{p-1}$ – среднее направление, $\kappa_\ell > 0$ – параметр концентрации. Данное распределение является аналогом нормального распределения на гиперсфере.

Нормировочная константа $C_p(\kappa_\ell)$ в (7) определяется следующим выражением

$$C_p(\kappa_\ell) = \frac{\kappa_\ell^{p/2-1}}{(2\pi)^{p/2} I_{p/2-1}(\kappa_\ell)},$$

где I_ν – модифицированная функция Бесселя первого рода.

4. Оценка параметров

Качество полученной сегментации в рамках предлагаемой модели будет существенно зависеть от того, насколько хорошо значения параметров согласуются с наблюдаемыми данными. Поэтому особенно важной является задача оценки параметров.

Модель имеет следующие параметры:

- Параметр β в модели Поттса;
- Параметры модели наблюдения, т. е. параметры распределения фон Мизеса-Фишера: $\Theta_\ell = \{\mu_\ell, \kappa_\ell\}$, $\ell = 1, \dots, L$.

В случае наличия обучающих размеченных данных можно получить оценку неизвестного параметра модели Поттса, например, с помощью метода максимального правдоподобия [7, 8].

С практической точки зрения гораздо более важной задачей является оценка параметров модели наблюдения. В случае наличия тренировочных размеченных данных искомые параметры оцениваются стандартным образом. Пусть $\mathbf{y}^{(\ell)} = \{(y_1^{(\ell)}, \dots, y_N^{(\ell)}) | y_i^{(\ell)} \in \mathbb{S}^{p-1}\}$ – данные, отвечающие фиксированному классу $\ell \in \Lambda$, рассматриваемые как выборка из распределения фон Мизеса-Фишера. Тогда оценки параметров могут быть найдены с помощью метода максимального правдоподобия (см. подробности в [10]). Так, оценка среднего направления находится в явном виде:

$$\hat{\mu}_\ell = \frac{\sum_{i=1}^N y_i^{(\ell)}}{\left\| \sum_{i=1}^N y_i^{(\ell)} \right\|}, \quad (8)$$

а оценка параметра концентрации κ_ℓ находится как корень следующего уравнения

$$\frac{I_{p/2}(\kappa_\ell)}{I_{p/2-1}(\kappa_\ell)} - \frac{\left\| \sum_{i=1}^N y_i^{(\ell)} \right\|}{N} = 0, \quad (9)$$

которое решается численно.

К сожалению, во многих прикладных задачах обработки изображений размеченные обучающие данные могут отсутствовать. Поэтому рядом исследователей были разработаны процедуры, позволяющие оценивать параметры непосредственно на основе обрабатываемых изображений. В этом смысле такого рода методы можно рассматривать как обучение без учителя. Основная идея заключается в построении итеративной процедуры, на каждой итерации которой сначала заново оценивается набор параметров, а затем находится оптимальная сегментация как решение задачи минимизации энергии (5). Таким образом, одновременно с

оцениваемыми параметрами находится и решение задачи. Проведем краткий обзор некоторых методов, которые были использованы в данной работе.

Одним из самых популярных является алгоритм HMRF-EM (Hidden Markov Random Field – Expectation maximization), предложенный в работе [5]. Данный метод был разработан для сегментации МРТ изображений головного мозга. В качестве модели бралось гауссовское распределение, при этом алгоритм не претерпит значительных изменений, если будет использоваться другое распределение, в том числе рассматриваемое в настоящей работе. Идея основана на EM-алгоритме [11], который позволяет находить оценки максимального правдоподобия при наличии скрытых (ненаблюдаемых) переменных. Структура алгоритма HMRF-EM выглядит следующим образом:

1. $t = 0$; задается начальный набор параметров: $\Theta^{(0)} = \{(\mu_\ell, \kappa_\ell), \ell \in \Lambda\}$.
2. Находится оптимальная конфигурация $\mathbf{x}^{(t)}$ как решение задачи (5) с текущим набором параметров $\Theta^{(t)}$.
3. Пусть $N_i = \{j \in V : (i, j) \in \mathcal{E}\}$. Для всех $\ell \in \Lambda$ и $i \in V$ рассчитываются следующие выражения:

$$P^{(t)}(\ell | y_i) = \frac{f(y_i; \mu_\ell^{(t)}, \kappa_\ell^{(t)}) P(\ell | x_j^{(t)}, j \in N_i)}{\sum_{\ell \in \Lambda} f(y_i; \mu_\ell^{(t)}, \kappa_\ell^{(t)}) P(\ell | x_j^{(t)}, j \in N_i)};$$

$$P(\ell | x_j^{(t)}, j \in N_i) = \exp \left(- \sum_{j \in N_i} V_{i,j}(x_i^{(t)}, x_j^{(t)}) \right).$$

4. Обновление параметров:

$$\mu_\ell^{(t+1)} = \frac{R_\ell}{\|R_\ell\|}, \quad R_\ell = \sum_{i \in V_\ell} P^{(t)}(\ell | y_i) y_i, \quad (10)$$

где $V_\ell = \{j \in V : x_j = \ell\}$.

$\kappa_\ell^{(t+1)}$ находится как решение уравнения:

$$\frac{I_{p/2}(\kappa_\ell)}{I_{p/2-1}(\kappa_\ell)} \sum_{i \in V_\ell} P(\ell | y_i) y_i = \|R_\ell\|; \quad (11)$$

$$\Theta^{(t+1)} = \{(\mu_\ell^{(t+1)}, \kappa_\ell^{(t+1)}), \ell \in \Lambda\}.$$

5. $t = t + 1$; если не достигнуто предельное число итераций, то возврат к шагу 2.

В отличие от оригинальной работы, оптимальная конфигурация на шаге 2 находится с помощью методов, основанных на разрезах графа [9].

В работах [3, 4] используется своего рода модификация предыдущего метода (HMRF-MSEM), которая состоит в том, что в EM-алгоритме математическое ожидание на шаге E аппроксимируется с помощью методов Монте-Карло по схеме марковских цепей (MCMC) [11]. Для этого генерируется реализации $\{\mathbf{x}^1, \dots, \mathbf{x}^M\}$ из апостериорного распределения $P(\mathbf{x} | \mathbf{y})$. В этом случае шаг 3 будет отсутствовать, а на шаге 4 формулы (10), (11) заменятся соответственно на

$$\mu_\ell = \frac{R_\ell}{\|R_\ell\|}, \quad R_\ell = \sum_{m=1}^M \sum_{i \in V_\ell} x_i; \quad (12)$$

$$\frac{1}{M} \frac{I_{p/2}(\kappa_\ell)}{I_{p/2-1}(\kappa_\ell)} |V_\ell| = \frac{\|R_\ell\|}{M}. \quad (13)$$

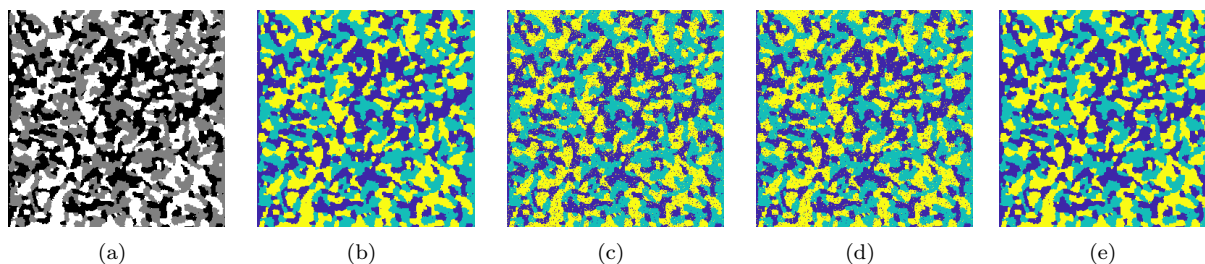


Рис. 1. (a) Искомая сегментация (Ground truth), результаты сегментации: (b) HMRF-EM; (c) метод k-средних; (d) GrabCut; (e) HMRF-MCEM.

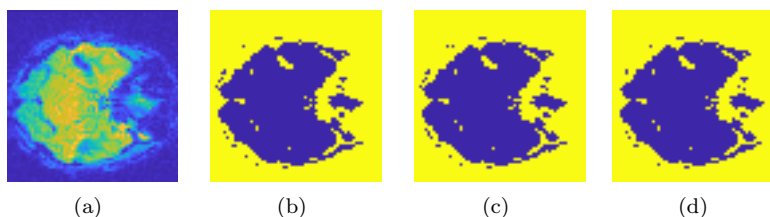


Рис. 2. (a) Наблюдаемое фМРТ-изображение (в поперечном сечении), результаты применения методов: (b) HMRF-MCEM (c) GrabCut (d) HMRF-EM

Наконец, третий из рассмотренных методов построен на той же самой процедуре, что используется в известном алгоритме GrabCut [6] для бинарной сегментации RGB изображений. Итеративная процедура состоит в том, что стартуя с некоторой начальной сегментации, сначала по данным $V_\ell = \{j \in V : x_j = \ell\}$ с помощью формул (8), (9) оцениваются параметры (μ_ℓ, κ_ℓ) для каждого класса $\ell \in \Lambda$, а затем находится MAP-оценка (5).

5. Эксперименты

В ходе работы были проведены эксперименты по сегментации синтетических данных. В начале генерируются изображения из априорного распределения (MRF с прямоугольной решеткой 300x300 и стандартной системой соседства первого порядка) с помощью схемы Гиббса (Gibbs sampling). При генерации были использованы следующие значения параметров: $L = 3; \beta = 2$. Эти изображения соответствуют искомой сегментации (Ground truth). Затем для каждого пикселя генерируется вектор наблюдений размерности $p = 10$ с распределением фон Мизеса-Фишера. Таким образом, размерность сгенерированного наблюдаемого изображения 300x300x10. После этого данные изображения подавались на вход алгоритмам с заданным числом классов сегментации $L = 3$. Результатом работы алгоритмов является сегментированное изображение размерности 300x300, которое затем сравнивается с Ground truth. Для того чтобы оценить качество полученной сегментации, рассчитывался так называемый простой коэффициент сходства J_1 , равный отношению числа совпавших пикселей полученной сегментации к общему числу пикселей, а также обобщенный коэффи-

циент Жаккара для многоклассовой сегментации [12]:

$$J_2 = \frac{\sum_{l \in \Lambda} TP_l}{\sum_{l \in \Lambda} TP_l + FN_l + FP_l}, \tag{14}$$

где TP_l – количество правильно сегментированных пикселей класса l , FN_l – количество пикселей класса l ошибочно отнесенных к другому классу, FP_l – количество пикселей ошибочно отнесенных к классу l .

Полученные сегментированные изображения представлены на рис. 1, где разные цвета соответствуют разным классам сегментации. Всего было проведено 100 идентичных экспериментов с синтетическими данными. Средние значения показателей представлены в таблице 1.

Стоит отметить, что, как показали эксперименты, результаты существенно зависят от начальных значений параметров, при произвольном выборе которых количественные показатели могут быть значительно ниже тех, что представлены в таблице 1. Начальные параметры могут быть оценены на основе начальной сегментации, найденной с помощью альтернативных методов, например алгоритма k-средних. По мнению авторов, можно с осторожностью утверждать, что рассмотренные методы, основанные на байесовском подходе с априорным распределением в виде марковских случайных полей, могут потенциально улучшать работу некоторых стандартных алгоритмов сегментации.

Метод	J_1	J_2
HMRF-MCEM	0.9923	0.9847
HMRF-EM	0.9910	0.9822
GrabCut	0.9605	0.9241
K-Means	0.9493	0.9035

Таблица 1. Сравнение методов сегментации

Также был проведен эксперимент с реальными данными фМРТ изображений из публично доступного набора репозитория NYU test–retest (TRT) [13, 14]. Данные представлены в виде четырехмерной матрицы размером $64 \times 64 \times 39 \times 197$, где первые три значения соответствуют пространственным координатам, а последнее – числу проведенных измерений (параметр p). Целью эксперимента было показать, что результат метода HMRF-МСЕМ незначительно отличается от результатов двух других методов (HMRF-EM и GrabCut), которые являются более быстрыми. В ходе эксперимента была произведена сегментация изображения на два класса. Одно из поперечных сечений исходного изображения и соответствующие результаты сегментации представлены на рис. 2. Результаты оказались близкими, что дает основания полагать, что вместо вычислительно затратного алгоритма HMRF-МСЕМ, который был использован авторами для выделения зон функциональной активности головного мозга на основе фМРТ изображений после некоторой предварительной предобработки [3, 4], потенциально можно использовать и два других алгоритма.

6. Заключение

В работе исследуется задача сегментации многомерных фМРТ изображений на основе марковских случайных полей и моделей наблюдения специального вида. Проведен сравнительный анализ некоторых известных в литературе методов сегментации многомерных изображений, не предполагающих предварительное обучение на размеченных данных. В дальнейшем планируется провести большее количество экспериментов на реальных фМРТ изображениях. В качестве возможного будущего направления исследований предполагается провести эксперименты с иными моделями наблюдения, основанными на других распределениях статистики направленных значений.

7. Благодарности

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН) и при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-07-00187, 18-07-00147).

8. Литература

- [1] A. Eklund, T. E. Nichols, and H. Knutsson. Cluster failure: Why fmri inferences for spatial extent have inflated false-positive rates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(28):7900–7905, 2016.
- [2] X. Descombes, F. Kruggel, and D. Y. Von Cramon. Spatio-temporal fmri analysis using markov random fields. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17(6):1028–1039, Dec 1998.

- [3] W. Liu, S. P. Awate, J. Anderson, and P. Thomas Fletcher. A functional networks estimation method of resting-state fmri using a hierarchical markov random field. *NeuroImage*, 100:520–534, 2014.
- [4] W. Liu, S. P. Awate, J. Anderson, D. Yurgelun-Todd, and P. Thomas Fletcher. Monte carlo expectation maximization with hidden markov models to detect functional networks in resting-state fmri. In *Machine Learning in Medical Imaging*, pages 59–66, 2011.
- [5] Y. Zhang, M. Brady, and S. Smith. Segmentation of brain mr images through a hidden markov random field model and the expectation-maximization algorithm. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 20(1):45–57, 2001.
- [6] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake. Grabcut – interactive foreground extraction using iterated graph cuts. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH)*, 23(3):309–314, 2004.
- [7] P. Perez. Markov random fields and images. *CWI Quarterly*, pages 413–437, 1998.
- [8] M. A. Hurn, O. K. Husby, and H. Rue. A tutorial on image analysis. In *Spatial Statistics and Computational Methods*, pages 87–141. Springer New York, 2003.
- [9] Y. Boykov, O. Veksler, and R. Zabih. Fast approximate energy minimization via graph cuts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(11):1222–1239, Nov 2001.
- [10] A. Banerjee, I. S. Dhillon, J. Ghosh, and S. Sra. Clustering on the unit hypersphere using von mises-fisher distributions. *J. Mach. Learn. Res.*, 6:1345–1382, 2005.
- [11] C. M. Bishop. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [12] W. R. Crum, O. Camara, and D. L. G. Hill. Generalized overlap measures for evaluation and validation in medical image analysis. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 25(11):1451–1461, Nov 2006.
- [13] X. Zuo, C. Kelly, J. S. Adelstein, D. F. Klein, F. X. Castellanos, and M. P. Milham. Reliable intrinsic connectivity networks: Test–retest evaluation using ica and dual regression approach. *NeuroImage*, 49(3):2163 – 2177, 2010.
- [14] NITRC. Nyu csc testretest dataset was obtained from www.nitrc.org, 2009 (accessed August 26 2019).

Об авторах

Черняев Сергей Дмитриевич, магистрант института математики и информационных технологий Петрозаводского государственного университета. E-mail: schernyae@gmail.com.

Лукашенко Олег Викторович, к.ф.-м.н., научный сотрудник института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН; доцент Петрозаводского государственного университета. E-mail: lukashenko-oleg@mail.ru.



Цифровая Земля и Большие Данные

Digital Earth and Big Data

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Creation of Geodistributed SCADA-System

P.A. Kabanov¹, M.S. Sukhodoev¹
Peter96pv1@gmail.com|smike@tpu.ru

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

This article shows the possibility of combining modern software development technologies. SCADA systems usually do not use the full power of modern visualization technologies (rendering of three-dimensional objects, spatial transformation, etc.). In addition to graphics, users of these systems have a question about the possibility of using GIS systems to facilitate the determination of the location of objects (on global, local, and other maps). Using all the technologies described in this article, a system was developed that meets the basic requirements of the SCADA system. The developed system perfectly combines three-dimensional visualization and support of the GIS system. These implementations showed excellent results and feedback from users (with the test and final versions of the program).

Keywords: development, programming, SCADA systems, GIS, computer graphics, C#, ESRI, 3D, ArcGIS, SQL.

1. Introduction

Currently, in addition to the typical tasks carried out by the SCADA-systems, such as maintaining history, continuous monitoring and control of remotely connected equipment, there was a need to create geographic schemes with the image of engineering objects on the map. In some cases, it is required that the engineering objects on the map are not just pictures, but selectable 3D objects that have their properties, functions of interaction with the user and support for opening mimic diagrams of substations traditional for SCADA systems.

The scientific novelty of the development is that the combination of GIS, SCADA and 3D visualization technologies positively affects the perception of user information, improves overall performance, and also allows you to solve a wider range of tasks that a specialist faces.

The combination of three technologies allows you to solve various engineering problems that are associated with these technologies. Thus, you can accurately know the location of the equipment, its configuration and instrument reading. There is an opportunity to consider problem areas on a large and small scale. It also allows you to use the program not only for a certain circle of specialists, but also for demonstration and reporting to people who have less competence.

Actual now, the development of software complexes for remote monitoring and dispatching equipment control at geographically remote sites is needed. Which represents an integrated solution that combine the capabilities of several systems – Geoinformation System (GIS), SCADA and ACS. The most promising, in this case, is the implementation of the SCADA-system interface based on web technologies.

During the development and testing of the program, it was revealed:

A better perception of information and understanding of the problem area when combining instrument readings with their 3D models.

Performance improvement in reporting, which includes the geographical data of the location of the equipment, as well as a description of this equipment.

The main idea of this article is to develop a system that will meet the requirements, which will be discussed later in this article.

2. Main tasks

The development task was the creation of a Windows desktop application with 3D graphics and online viewing of maps support, as well as images on the map, their location, information and support for a quick jump to the overview of objects.

SCADA is a software package designed to develop or provide a real-time operation of systems for collecting,

processing, displaying and archiving information about object monitoring or control [1, 10]. This software is installed on computers and uses I/O drivers or OPC / DDE servers for communication with the object. The program code can be either written using one of the programming languages, or is generated by the design environment.

The main tasks [4, 10] solved by SCADA-systems are:

1. Data exchange between the "communication devices and the object" (with industrial controllers and I/O cards) in real time via drivers.
2. Real time data processing.
3. Logical control.
4. Display information on the monitor screen in a convenient and human-readable form.
5. Maintenance of a real-time database with technological information.
6. Alarm and alarm management.
7. Preparation and generation of reports on the progress of the technological process.
8. The introduction of network communication between the SCADA and PC.
9. Providing communication with external applications (DBMS, spreadsheets, word processors, etc.).

GIS – is a system for collecting, storing, analyzing and graphically visualizing spatial data and associated information about the required objects. Geoinformation system can include in its composition spatial databases (including under the control of universal DBMS), editors of raster and vector graphics, and various means of spatial data analysis, which are applied in cartography, geology, meteorology, land management, ecology, municipal administration, transport, economy, defense and many other areas. Scientific, technical, technological and applied aspects of designing, creating and using geoinformation systems are studied by geoinformatics.

3. Development

One of the most powerful GIS-systems – "ArcGIS" was chosen for the SCADA system development. ArcGIS is the family of geoinformation software products of the American company ESRI. They are applied for land cadasters, land management, accounting of real estate objects, engineering communications systems, geodesy, subsoil use and other areas.

Next, we will consider the architecture of the developed SCADA system. The application itself consists of three main windows in each of which there are basic modules and submodules. The application is connected directly to the SQL database, from which it takes all the necessary information about the objects. It also interacts with ArcGIS-online to correctly display geo-information on the map.

The application was created as an alternative SCADA system for gas transmission system facilities. As an example, one of several objects was taken.

The main development environment was Microsoft Visual Studio Enterprise. The main programming language (C#) and the markup language (<XAML>) were used, since the application was made on the WPF platform (Windows Presentation Foundation) [2, 7, 9].

This application is an example of the possibilities of modern development of SCADA-systems in the current programming languages using all the newest technologies. All the features that are implemented in the application can be transferred, improved and used in various industries, or on other similar objects.

The application consists of three windows, which we consider below.

The first window consists of two main modules, one submodule and control buttons (Fig. 1).

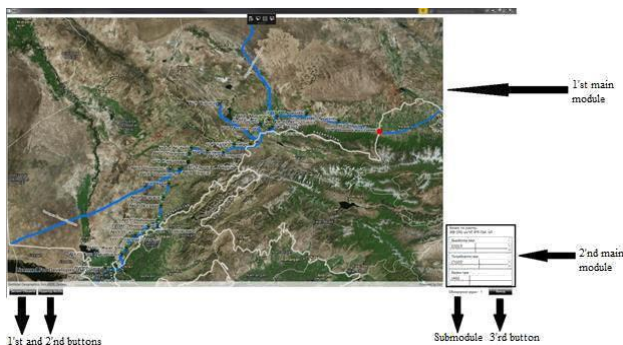


Fig. 1. Scheme of application's main window.

First button (name: "detail view") – is the button for detailed consideration of the object (this will be described below in a note). That button can move user to the next level of the program (2nd window).

Second button (name: "run ArcGIS") – is the button that enables the ArcGIS editor [3]. It allows you to open the GIS system editor and make the necessary adjustments if ArcGIS Desktop is installed on PC (the package consists of ArcGlobe, ArcCatalog, ArcMap, ArcScene) and the application package has been updated.

Third button (Name: quick exit) closes the user's environment.

First main module is an online map [5, 6, 8]. It is a display module with information about objects from the database (see Fig. 1). The mode and color scheme of the map is configured directly in ArcGIS-online, so that the user with the account can easily customize everything. The map itself contains a part of Kazakhstan's gas transmission system; objects located on this system; information about objects; names and signatures of objects; built-in event handler for the user's work with the mouse (full interactivity: scrolling by scrolling, movement on the map and response to pressing the left mouse button); button that is located on the selected object and serves for a quick transition to the next level of the program (this will be described below in a note). All objects and elements were located by exact geodata and coordinates.

Second module (see Fig. 1) is the module for calculating balances on the selected section of the gas transportation system. Balances are displayed on the sections indicated on the map.

Single submodule (see Fig. 1) updates information that are coming from the database every 10 seconds (this time was chosen for complete synchronization of incoming information). For convenience, the time until the update is displayed on the display, and the user knows when the actual information will arrive.

Note – this feature was displayed both as a button on the map, and as a control button, for adaptation and convenience to the user of the program.

The second window consists of one main module, a submodule and two control buttons (see Fig. 2).



Fig. 2. Scheme of application's second window.

First button (name: "to map view") moves back to the previous window.

Second button (name: "to detailed view") moves to the next window.

First main module (see Fig. 2) was created using the technology Viewport3D, built-in WPF. This technology allows you to work, demonstrate and edit 3D objects in a desktop application. With this technology, the selected object can be recreated, with the ability to view it. The arrangement of all elements is the same as in the real world. This realism was achieved by digitizing images from the satellite and photos in 3Ds Max with further transfer to Viewport3D. This module is fully interactive and responds to mouse clicks (moving behind the cursor), and scrolls the mouse wheel (zooms in and out of the camera).

Single submodule (see Fig. 2) contains two scrollbars, which are responsible for controlling the camera in the main module. The first reacts the same way as on the mouse wheel (bring closer and detaches the camera). The second submodule allows to rotate the entire object around its axis and consider all the elements at different angles.

The third window consists of one main module, four submodules and three control buttons (see Fig. 3).

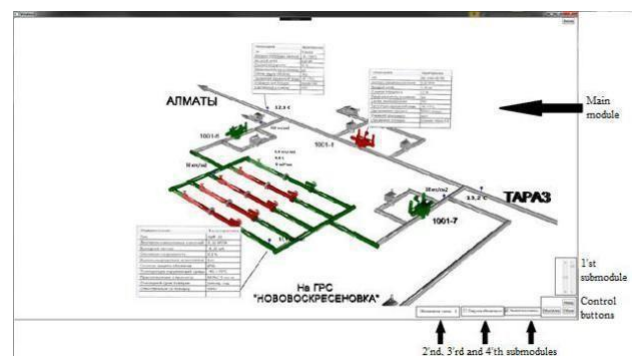


Fig. 3. Scheme of application's third window.

First button (name: "to previous view") returns the user to the previous window.

Second button (name: "to map view") returns the user to the main screen.

Third button (name: "quick exit") closes the program.

One main module – is a 3D scheme of the object with all the elements displays the state of the cranes in real time (on / off), and this object accordingly changes color when updating the database (green / red). In addition, the branches of the gas pipelines depend on the state of the cranes and change the indicators (active / inactive) and the color (green / red), when the state of the cranes changes and the database is updated. Some elements of the scheme are interactive. When you click them, the windows with the passport data for the item are displayed, the second time they disappear.

Next to certain sensors, digital data on temperature, pressure and other information are displayed. If sensors or gas lines are not active, no data is displayed. There are corresponding signatures of sensors, elements, threads of directions, as well as units of measurement. This module is completely dependent on the submodules of this window, and shows all the most basic functions when working with the application.

First submodule (see Fig. 3) consists of a checkbox that allows you to enable or disable freezing (the ability to work) cameras (it is enabled by default). When the freeze is turned off – it is possible to work with the camera as on the second window (the camera scales, reaction to pressing the left mouse button). It is also interconnected with the 2 submodules. Second submodule (see Fig. 3) consists of two scrollbars, which allow working with the camera of the main module. The first rotates the object around its axis and makes it possible to view

About the authors it at various angles. The second shows the five main camera positions (1 is the top-to-right position, 2 is the central-top position, 3 is the left-top position, 4 is the top-down or 2D-view, position "detailed consideration of the element"). Interconnected with first submodule: if the camera is unfrozen, the first scroller of camera rotation works; if the camera is frozen, then the second scrollbar of the camera's main positions is operating.

Third submodule (see Fig. 3) is the submodule for updating values from the database. It operates the same as the first window. It displays the count until all values are updated.

Fourth submodule consists of a checkbox that allows you to enable or disable the voice notification of a change in the state of the element. When enabled, it notifies the user about updating the database, or about changing the state of certain items. It works with a script for Speech Application Programming Interface or Microsoft Speech API.

The C# was used to write the logic of interaction between windows, their elements and event handling.

The <XAML> was used to design the external user interface and 3D-graphics.

This application is supported on Windows (7, 8.1, and 10) with the .Net Framework 4.6.1 and higher.

4. Conclusion

The developed demo version of the application meets the following main requirements [4, 10] of the SCADA system:

1. Data exchange with "communication devices with the object" (with industrial controllers and I/O cards) in real time via drivers.
2. Real time data processing.
3. Display information on the monitor screen in a convenient and human-readable form.
4. Maintenance of a real-time database with technological information.
5. Alarm and alarm management.
6. Realization of network interaction between SCADA PC.

5. Literature

- [1] Abbas Hosny and Mohamed Ahmed. Efficient Web-Based SCADA system. M.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 124 c.
- [2] Albahari Joseph, Albahari Ben. C# 5.0 in a Nutshell: The Definitive Reference. – M.: O'Reilly Media, 2012. – 1068 c.
- [3] Bondalapati Prasanth. ArcGIS and Databases. – M.: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 80 c.

- [4] Clarke Gordon. Practical Modern SCADA Protocols. – 2010. – 544 c.
- [5] Developer documentation for the ArcGIS Platform (<https://developers.arcgis.com/documentation/>)
- [6] Harder Christian. ArcView GIS Means Business.
- [7] Microsoft Developer Network (MSDN) (<https://msdn.microsoft.com/en-us/>)
- [8] Peters Dave. Building a GIS: System Architecture Design Strategies for Managers. – 2008. – 292 c.
- [9] Richter Jeffrey. CLR via C#, Fourth Edition (October, 2012)
- [10] Zahid Asghar Muhammad. Industrial Automation Using SCADA Based System. – M.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 72 c.

About Authors

Kabanov Peter Alexandrovich, student master information technology departments at the National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: Peter96pvl@gmail.com.

Sukhodoev Mikhail Sergeevich, candidate of Technical Sciences, associate professor of Automation and Robotics at the National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: smike@tpu.ru.

Регулярные методы кодирования растровых изображений дистанционного зондирования Земли

Д.Ю. Васин¹
dm04@list.ru

¹ ИТММ, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Работа посвящена рассмотрению вопросов устранения информационной избыточности растровых данных дистанционного зондирования Земли (РДЗЗ), включая новейшие гиперспектральные данные (ГСД). Перечислены характерные свойства растровых гиперспектральных изображений (РГСИ), приводится краткая характеристика существующих методов компрессии РДЗЗ. Рассматривается возможность применения локальных, однородных «хорошо приспособленных» базисных функций (ЛОХПБФ) для устранения информационной избыточности и адаптивного сжатия РДЗЗ. Предложен алгоритм построения системы ЛОХПБФ для РГСИ, основанной на чебышевском приближении. Приведены результаты вычислительных экспериментов. Показана эффективность предлагаемого метода адаптивного сжатия РГСИ.

Ключевые слова: растровые изображения, адаптивное сжатие данных, конструктивные методы формирования базисных функций, дистанционное зондирование Земли, растровые данные ДЗЗ, гиперспектральные растровые изображения ДЗЗ.

Regular methods for coding of raster images of remote sensing of Earth

D. Yu. Vasin¹
dm04@list.ru

¹ ITMM, National research Lobachevsky state university of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

The work is devoted to the consideration of the issues of eliminating information redundancy of raster data of remote sensing of the Earth (RDRSE), including the latest hyperspectral data (HSD). The characteristic properties of raster hyperspectral images (RHSI) are listed, a brief description of the existing methods of RDRSE compression is given. The possibility of using local, homogeneous "well-adapted" basic functions (LHWABF) to eliminate information redundancy and adaptive compression of RDRSE is considered. An algorithm for constructing a LHWABF system for the RHSI based on the Chebyshev approximation is proposed. The results of computational experiments are given. The effectiveness of the proposed method of adaptive compression RHSI is shown.

Keywords: raster images, adaptive data compression, constructive methods for the formation of basic functions, remote sensing of the Earth, raster data of remote sensing, hyperspectral raster images of remote sensing.

1. Введение

Бесспорно, что растровым изображениям (РИ) соответствуют огромные объемы данных. В свою очередь, это ставит перед разработчиками программно-аппаратных средств обработки изображений целый ряд серьезных проблем. Требования быстрой передачи данных или их полной регистрации вступают в противоречие с техническими характеристиками используемой аппаратуры: ограниченной пропускной способностью каналов передачи данных, недостаточной емкостью запоминающих устройств, недостаточным быстродействием собственно вычислительных систем. В подобных ситуациях актуальна задача кодирования (компрессии) исходных экспериментальных видеоданных. Эффект от использования компрессии данных обусловлен множеством факторов. При передаче данных компрессия позволяет разгрузить канал, повысить его пропускную способность, достоверность полученной информации, снизить мощность и вес передающей аппаратуры, что особенно важно для бортовой аппаратуры, размещаемой непосредственно на космических аппаратах (КА). При регистрации РИ компрессия позволяет уменьшить необходимую емкость запоминающих устройств или улучшить использование существующих архивов данных (АД), благодаря чему сокращаются расходы на хранение и поиск информации в АД. При создании систем распознавания компрессия позволит получать более оптимальные и достоверные решающие правила. При компьютерной обработке компрессия дает возможность

сократить ее время, использовать компьютер меньшей вычислительной мощности и пр. [16].

Принципиальная возможность сокращения объема данных заключается в достаточно высокой степени информационной избыточности, присущей экспериментальным РИ, в частности, данным ДЗЗ, получаемым с различных КА. Это связано с двумя причинами: 1) между соседними точками поля яркости РИ имеется сильная статистическая зависимость, что приводит к уменьшению количества информации в изображении при сохранении его объема; 2) значения яркости распределены в диапазоне их возможного изменения существенно неравномерно.

Разделяют статистическую и психофизическую избыточность РИ. Для неподвижных РИ статистическая избыточность обусловлена наличием сильных статистических связей между его смежными пикселями, а также тем, что различные уровни яркостей пикселей имеют разную вероятность. Непосредственно на РИ это проявляется в том, что соседние пиксели имеют одинаковые или близкие яркость и цветовой тон. Резкие скачки этих параметров наблюдаются только при наличии контуров. Психофизическая избыточность РИ обусловлена особенностью зрительной системы человека не одинаково воспринимать различные детали РИ [12]. Например, элементы РИ, имеющие одновременно и малые размеры, и слабый контраст, не видны человеку, поэтому без какого-либо ущерба качеству РИ могут не передаваться по каналам связи.

К настоящему времени разработано достаточное количество методов компрессии РИ, но работы по поиску

новых и дальнейшему развитию существующих методов интенсивно продолжают.

Мировой тренд развития средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – использование гиперспектральных систем (ГСС), обладающих непревзойденными возможностями по обнаружению и анализу детальных свойств наблюдаемых объектов. ГСС «перекрывают» оптический и ближний инфракрасный диапазоны электромагнитных волн с высоким спектральным разрешением (порядка единиц нанометров) и хорошим пространственным разрешением (от единиц до десятков метров) [2], формируя одновременно сотни практически совмещенных между собой изображений. Примерами таких систем и гиперспектральных сенсоров являются AVIRIS, HYDICE, Hyperion, CASI, CHRIS-PROBA и др. Таким образом, съемочная аппаратура ГСС позволяет одновременно получать РИ одного и того же участка земной поверхности в десятках и сотнях очень узких спектральных зонах – растровые гиперспектральные изображения (РГИ). Это способствует повышению эффективности и точности решения широкого круга задач оперативного мониторинга земной поверхности в различных областях человеческой деятельности [2, 15]. При передаче ГСД на Землю и пользователям, при обработке гиперспектральных изображений (ГСИ) и извлечении из них полезной информации, а также хранении возникает ряд проблем [2, 6, 15], при этом, одной из центральных является огромный объем информационных данных, которые необходимо передавать по каналам связи и обрабатывать [2, 4 – 6, 7, 9]. Поэтому актуальна задача развития существующих и поиска новых методов сжатия ГСИ.

2. Характерные свойства РГИ ДЗЗ

РГИ ДЗЗ характеризуются рядом специфических свойств, отличающих их от обычных черно-белых и цветных оптических изображений:

- 1) РГИ обладают высокой степенью избыточности, поскольку изображения в двух соседних спектральных каналах обычно имеют коэффициент корреляции, близкий к единице [2, 5, 8], в то время, как коэффициенты корреляции цветовых компонент R, G и B цветных изображений обычно порядка 0,8, то есть заметно меньше [10]. Такое отличие связано с тем, что для соседних каналов ГСИ отличия длин волн гораздо меньше, чем длин волн при RGB представлении цветных оптических изображений;
- 2) для RGB цветных изображений отношения сигнал-шум (ОСШ) в компонентных изображениях обычно полагают идентичными или достаточно близкими [10]. Для компонент РГИ ОСШ обычно существенно различаются. Из практики, для относительно небольшого числа спектральных каналов ОСШ находится в пределах единиц дБ, но для большинства спектральных каналов ОСШ порядка 20...30 дБ. Это связано, прежде всего, с существенным различием динамических диапазонов данных и с отличием уровня помех в разных спектральных каналах [2, 3];
- 3) динамический диапазон для каждого n-го спектрального канала можно характеризовать разностью максимального $R^{\max}(n)$ и минимального $R^{\min}(n)$ значений. Значения $R^{\max}(n)$ могут варьироваться от нескольких десятков до десятков тысяч, а значения $R^{\min}(n)$ имеют порядок единиц и десятков, причем они могут быть как положительными, так и отрицательными в связи с особенностями используемых сенсоров. Поэтому для представления

РГИ ДЗЗ обычно используют 2 байта на отсчет, где один из битов – знаковый.

Показатели, характеризующие методы компрессии

В [16] вводятся показатели эффективности, точности и системотехнические показатели, характеризующие методы компрессии.

Эффективность – оценивается коэффициентом сжатия (компрессии): $K_{сж} = \frac{I_0}{I} > 1$, где I_0, I – объемы

данных до и после компрессии соответственно. Показатель является относительным, характеризует эффективность метода в сравнении с некоторым «эталонным» способом цифрового представления данных, который может быть выбран достаточно произвольно. Для РИ в качестве эталонного представления используют матрицы отсчетов с известным форматом данных. Для РГИ это чаще всего 16 бит/отсчет.

Абсолютную эффективность метода характеризует коэффициент эффективности: $K_{эф} = \frac{I}{I_{\min}} > 1$, где I_{\min} –

минимально достижимый объем данных, т.е. случай полного устранения избыточности гипотетическим «оптимальным» методом. На практике данный показатель используется редко из-за сложности определения I_{\min} .

При реализации процедуры компрессии данных стремятся обеспечить по возможности большее значение коэффициентов $K_{сж}$ и $K_{эф}$ и, следовательно, меньшее значение потока данных. Однако, эта оптимизация ограничивается рядом объективных факторов, в частности, тем, что компрессия, как правило, искажает обрабатываемое РИ.

Точность. Для оценки точности восстановления ранее закодированного РИ используют среднеквадратический и минимаксный критерии. Если считать отсутствующими посторонние шумы, то погрешности (ϵ) обусловлены дискретизацией поля яркости по пространственным координатам (ϵ_x), квантованием по уровню (ϵ_f) и погрешностью, возникающей в процессе обработки ($\epsilon_{обр}$). Поскольку компрессии подвергается уже сформированное РИ, то ϵ_x и ϵ_f заранее известны и неизменны, а метод компрессии характеризуется третьей составляющей – $\epsilon_{обр}$.

Функция $K_{сж}(\epsilon_{обр})$ определяет рост $K_{сж}$ с ростом $\epsilon_{обр}$ для любого разумного метода компрессии. На практике требуют, чтобы $\epsilon_{обр} \leq \epsilon_0$, где ϵ_0 – предельное допустимое значение погрешности компрессии.

По способу управления показателями эффективности и точности все методы компрессии разделяются на компрессию с *фиксированной и переменной скоростями*. В методах первой группы $K_{сж}$ является фиксированным, наперед заданным. При этом, для разных РИ получается различная погрешность их восстановления. Достоинство методов данной группы – простота, т.к. информационный поток на выходе блока компрессии имеет постоянную скорость, при условии постоянства входного потока.

В другом классе допустимая погрешность восстановления задается, но при этом $K_{сж}$ является переменной величиной. Методы более сложны по сравнению с методами первой группы, но потенциально более эффективны в смысле устранения избыточности данных.

Системотехнические показатели. Этих показателей достаточно много, но главные среди них – сложность, в смысле быстродействия вычислительных процедур, реализующих методы компрессии и необходимые затраты памяти компьютера. Данные показатели применяют отдельно к процедурам компрессии и процедурам

восстановления. Единицы измерения этих показателей зависят от конкретной реализации процедур обработки.

3. Методы сжатия без потерь и с потерями

В монографии [17] приведен достаточно полный обзор существующих методов компрессии изображений в системах оперативного ДЗЗ, отражена специфика задачи обработки РИ в таких системах и вытекающие из нее требования к методам бортовой обработки получаемых видеоданных. Среди них выделим задачи обеспечения высокой степени сжатия данных и низкой вычислительной и структурной сложности используемых методов компрессии. В то же время, проблема сжатия РГСИ актуальна при организации хранилищ и передаче по каналам связи между различными пользователями.

При проведении различных исследований рассматриваемые методы компрессии позволяют наиболее полно и в сжатом виде сохранить все характеристики исходного процесса и в дальнейшем либо пользоваться, либо изучать любую из них.

По способу сжатия все существующие методы компрессии РИ разделяются на две группы, обеспечивающие сжатие без потерь и с потерями.

Компрессия без потерь. При обработке РГСИ коэффициент сжатия (КС), формируемый методами данной группы, порядка 3 – 4 при учете межканальной корреляции и около 1.5 – 2 при сжатии каждого изображения отдельно [5]. Это не всегда удовлетворяет требованиям практики, но несомненным преимуществом методов данной группы является тот факт, что при их использовании после выполнения цикла компрессия/декомпрессия выходное РГСИ не содержит никаких искажений, привнесенных процедурой компрессии.

В работе [1] был предложен контекстный метод сжатия без потерь RGB- и мультиспектральных растровых изображений ДЗЗ (РИДЗЗ). В основе метода разделение каналов, формирующих изображение, на две группы: основные и дополнительные. Основные каналы отличает значительная коррелированность соседей. Рассмотрены варианты предсказания по соседнему каналу для основных и дополнительных каналов для сжатия изображений без потерь. Представленный в работе алгоритм показал в эксперименте на серии изображений разного содержания выигрыш до 40% в величине коэффициента сжатия по сравнению с популярными архиваторами WinRar, 7z, PNG, для всех вариантов предсказания.

Компрессия с потерями. В основе данных методов лежат идеи разложения исходных сигналов по той или иной системе базисных функций (СБФ) с заданной точностью приближения ε [11, 13, 14]. Тогда процесс $f(t)$ ($t_1 \leq t \leq t_2$) приближенно представим в виде линейной комбинации:

$$\tilde{f}(t) = \sum_{k=1}^m C_k \varphi^k(t) \text{ базисных функций}$$

$\varphi^1(t), \varphi^2(t), \dots, \varphi^m(t)$. Коэффициенты C_1, C_2, \dots, C_m при этом рассматривается как код кривой $f(t)$, позволяющий приближенно восстановить экспериментальную функцию $f(t)$. Погрешность приближения при этом:

$$\varepsilon(t) = f(t) - \sum_{k=1}^m C_k \varphi^k(t).$$

Общепринятой оценкой качества приближения является относительная среднеквадратическая ошибка:

$$\delta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \varepsilon^2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} f^2(t) dt} * 100\% . \text{ Количество } m \text{ кодовых чисел } C_k$$

($k=1, 2, \dots, m$), необходимых для описания $f(t)$ с заданной точностью δ , зависит от конкретного выбора СБФ $\varphi^k(t)$. Чем лучше выбранная система функций $\varphi^k(t)$, тем меньше требуется слагаемых в выражении для $\tilde{f}(t)$ при одной и той же величине ошибки приближения ε .

Таким образом, проблема оптимального кодирования непрерывной экспериментальной информации сводится к оптимальному поиску такой СБФ $\varphi^1(t), \varphi^2(t), \dots, \varphi^m(t)$, которая при заданной точности приближения δ обеспечивает минимальное, либо близкое к нему, число m базисных функций $\varphi^k(t)$. Очевидно, что для различных видов получаемых РГСИ потребуются и различные оптимальные СБФ.

В разное время для кодирования экспериментальных данных с потерями были предложены различные СБФ на основе тригонометрических, экспоненциальных функций, функций Лагерра и др. [13, 14].

Отметим, что основной шаг при аппроксимации исходного сигнала – выбор информативной СБФ ведется полуэмпирически с использованием опыта и интуиции исследователя, либо исходя из внешнего сходства исходного сигнала и СБФ. Это может приводить к тому, что оптимальная, либо близкая к ней, СБФ может быть не найдена, особенно в случае сложной формы первоначального сигнала.

В этом плане более интересны объективные методы выбора СБФ, в которых не опираются на знания человека, а исходят лишь из свойств совокупности исходных непрерывных данных. Одной из таких оптимальных СБФ является система собственных векторов матрицы ковариации, вычисленной для заданного множества исходных данных, а соответствующие им собственные значения характеризуют точность приближения [11]. Однако, данный метод достаточно громоздкий в вычислительном плане, кроме того, получаемая таким способом СБФ, позволяет с заданной точностью кодировать не каждую функцию исходного набора сигналов, а только в среднем по множеству. При этом основная часть данных будет кодироваться с заданной точностью приближения, однако кодирование экстремальных данных может происходить со значительной ошибкой. Очевидно, что при кодировании ГСИ это является нежелательным свойством получаемой СБФ.

Отметим, что методы компрессии с потерями способны обеспечить несколько большие значения КС по сравнению с методами первой группы, но после выполнения цикла компрессия/декомпрессия в выходное РГСИ вносятся те или иные искажения.

Таким образом, можно заключить, что выбор хороших СБФ $\varphi^k(t)$ основан на опыте и интуиции исследователя, а классический метод объективного отбора нужной ортогональной СБФ (метод главных компонент – МГК) обладает достаточной вычислительной сложностью, что ограничивает сферу его применения. Поэтому актуальна задача поиска других «хорошо приспособленных» СБФ для кодирования экспериментальной информации.

При разработке методов сжатия РГСИ с потерями возникает ряд практических моментов:

целью получения РГСИ является решение конечных задач распознавания и классификации (классификации

типов земных покровов, обнаружение и локализация загрязненных участков местности, и т.д.). При этом часто нет необходимости обрабатывать данные во всех каналах РГСИ, достаточно использовать весьма ограниченный набор наиболее информативных, в смысле решения данной тематической задачи, каналов [15]. В каждом конкретном случае набор этих каналов может быть различным, но однозначно, что пользователю необходимо передавать не полный массив РГСИ, а лишь его часть (обычно не более 8...12 каналов), что уже эквивалентно сжатию.

применение сжатия с потерями не всегда безусловно приводит к ухудшению эффективности решения конечных задач. При определенных условиях эффективность решения конечных задач на сжатых с потерями РГСИ может оставаться практически такой же, как и при использовании исходных (несжатых или сжатых без потерь) РГСИ [17].

С целью уменьшения вычислительной сложности алгоритма формирования оптимальной СБФ, был предложен алгоритм построения системы «хорошо приспособленных» базисных функций (СХПБФ) [14].

4. Алгоритм построения СХПБФ, основанный на чебышевском приближении

Изначально, кодирование по СХПБФ, основанной на чебышевских приближениях, было предложено в задачах обработки медицинских кривых (ЭКГ, энцефалограмм и др.) [13, 14]. Исходные данные в этих задачах представлялись в виде одномерных сигналов (векторов). Представим исходные РГСИ в виде векторов, получаемых в результате последовательного, построчного сканирования исходных растров. Тогда на конечном интервале обработки исходные дискретные данные $x^j = \{x_1^j, x_2^j, \dots, x_n^j\}$, $j = 1, 2, \dots, N$ можно представить как точки в n -мерном пространстве R_n , с координатами $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Следовательно, некоторому набору экспериментальных кривых будет соответствовать множество X точек $x^j = \{x_1^j, x_2^j, \dots, x_n^j\}$, $j = 1, 2, \dots, N$ в пространстве R_n [14].

При такой геометрической интерпретации разработан алгоритм построения СХПБФ, основанный на экспериментально обнаруженном, но достаточно общем факте сравнительно малой размерности множеств, отвечающих первоначальному описаниям экспериментальных данных.

Если исходить из того факта, что множество X в пространстве R_n имеет малую размерность, то аппроксимируем множество X некоторым линейным многообразием L_m размерности $m < n$ и выберем ортонормированный базис линейного многообразия L_m за СХПБФ для кодирования точек множества X .

Задачу сокращения избыточности в исходном описании экспериментальных данных сформулируем следующим образом [13, 14]. В n -мерном пространстве R_n с координатами $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ задано множество точек $x^j \in X$, $j = 1, 2, \dots, N$. Требуется найти ортонормированный базис u_1, u_2, \dots, u_m некоторого подпространства R_m , в котором с заданной точностью ε , в смысле некоторой заданной метрики ρ , лежат все точки $x^j \in X$, $j = 1, 2, \dots, N$. Как только указанный базис найден, любая точка $x \in X$ может быть представлена с заданной точностью ε при помощи m новых признаков C_k , вычисляемых согласно

формуле $C_k = \sum_{i=1}^n x_i u_i^k$, $k = 1, 2, \dots, m$. Ординаты

декодированной точки: $\tilde{x}_i = \sum_{k=1}^m C_k u_i^k$, $k = 1, 2, \dots, m$.

Заметим также, что при кодировании обычно важна не столько возможно большая точность приближения ε с заданным числом m базисных векторов, сколько минимизация самого числа базисных векторов m при заданной точности приближения ε . Доказано, что при заданной точности ε , в предлагаемый «хорошо приспособленный базис» не входит самое большее три последних орта по сравнению с оптимальным кодированием в среднем [14].

Рассматриваемый в статье способ сжатия, основанный на чебышевских приближениях, обеспечивает ошибку кодирования, не большую заданной для всех точек выпуклой оболочки исходного множества векторов, в то время как методы кодирования, опирающиеся на МГК, обеспечивают достаточную малость ошибки в среднем по всему исходному множеству.

Рассматриваемый метод кодирования является квазиоптимальным, его достоинство заключается в том, что он допускает достаточно простую практическую реализацию для больших размерностей исходных данных.

Это и послужило отправной точкой для исследования возможности сжатия РГСИ по СХПБФ, основанной на чебышевских приближениях.

Пусть $x^j \in X$, $j = 1, 2, \dots, N$ – множество исходных точек, N – мощность множества X , δ – требуемая точность приближения (в %) и максимально допустимое количество L^{\max} базисных ортов СХПБФ ($L^{\max} \leq P$), L – число сформированных ортов СХПБФ после выполнения очередной итерации алгоритма, N_L – число точек множества X , которые к данному моменту уже разложены с заданной точностью ε по уже сформированным базисным ортам U^L , \bar{N} – число непомяченных точек множества, участвующих в формировании очередного базисного орта.

Шаг 1. Инициализируем счетчики: $L=0$, $N_L=0$, $\bar{N} = N - N_L$.

Шаг 2. Линейно просматриваем \bar{N} непомяченных точек $x^j \in X$ и находим точку $x^{jL} \in X$ такую, что $\lambda_L = \max_j \|x^j\|$, $j = 1, 2, \dots, \bar{N}$.

Шаг 3. Если $L = 0$, то формируем ошибку разложения $\varepsilon = \delta * \lambda_0$, иначе **Шаг 4**.

Шаг 4. Увеличиваем счетчик L на единицу и находим очередной базисный орт U^L : $U^L = \frac{x^{jL}}{\lambda_L}$.

Шаг 5. Линейно просматриваем все непомященные точки $x^j \in X$ и выполняем их кодирование по только что построенному орту U^L , т.е. для каждой такой точки получаем значение коэффициента $C^j = \sum_{i=1}^L (x_i^j, u_i^L)$, $j = 1, 2, \dots, \bar{N}$ и восстанавливаем координаты точек x^j по построенному орту U^L : $\tilde{x}_i^j = C^j u_i^L$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, \bar{N}$.

Шаг 6. Корректируем метрику точек: $x_i^j = x_i^j - \tilde{x}_i^j$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, \bar{N}$.

Шаг 7. Линейно просматриваем все непомеченные точки $x^j \in X$ и помечаем те из них, для которых выполняется условие $\|x^j\| < \varepsilon, j = 1, 2, \dots, \bar{N}$; корректируем значение счетчика N_L , увеличивая его на число точек K , помеченных на данном шаге (разложенных по текущему орту U^L с требуемой точностью ε), $N_L = N_L + K$, и счетчика $\bar{N} = N - N_L$.

Шаг 8. Если $\bar{N} = 0$, т.е. в наборе не осталось непомеченных точек $x^j \in X, j = 1, 2, \dots, \bar{N}$ или число построенных ортов $L > L^{max}$, то **КОНЕЦ АЛГОРИТМА**, иначе переход на **Шаг 2**.

Исключение на каждом последующем шаге алгоритма тех точек x^j , которые к данному моменту уже представляются с заданной точностью ε , позволила существенно снизить вычислительную сложность алгоритма, что особенно важно на последних итерациях, когда производится достаточно много вычислений.

5. Результаты практических экспериментов

Практические эксперименты по кодированию ГСИ ДЗЗ проводились на выборке из 360 полутоновых растровых изображений (данных спектральных каналов гиперспектрометра SPECTIR, полученные из открытых источников) с геометрическими размерами каждого растра $\sim 10^3 \times 10^3$ пикселей и глубиной цвета 16 бит/пикс. Растровое изображение каждого канала путем построчного сканирования превращалось в одномерный сигнал, размерности $\sim 10^6$ отсчетов. Таким образом, на входе алгоритма построения СХПБФ размерность исходного пространства $R_n \sim 10^6$, а мощность множества исходных векторов $V: H(V) = 360$.

Для каждого n – спектрального канала экспериментально определялся его динамический диапазон: $D(n) = 10 \lg \frac{P^{max}(n)+1}{P^{min}(n)+1}$ (дБ), где $P^{max}(n)$ и

$P^{min}(n)$ максимальное и минимальное значения яркости пикселей в канале $n, n=1, 2, \dots, H(V)$. Минимальное и максимальное значение яркостей по всем каналам:

$D^{min} = 4 \text{ дБ}, D^{max} = 24 \text{ дБ}$. Полученный интервал

$I = D^{max} - D^{min} = 20 \text{ дБ}$ был равномерно разбит на 10 групп. Распределение каналов по группам приведено в таблице 1 и на рисунке 1.

Разбиение на группы представляется необходимым по следующим соображениям: в случае построения СХПБФ по исходным данным с принципиально различными динамическими диапазонами каналов $D(n)$, ошибка разложения ε не способна адекватно описывать искажения, вносимые при сжатии с потерями изображения в n -м спектральном канале.

Одно и то же значение ε в канале с малым $D(n)$ приведет к явной деградации качества изображения, а в канале с большим динамическим диапазоном внесенные искажения будут незаметны. Разбиение на группы нивелирует различие каналов по динамическому диапазону.

Далее для каждой группы каналов строилась СХПБФ для разных значений требуемой точности приближения δ , а коэффициент сжатия $K_{сж}(\delta)$ определялся для каждого значения δ по формуле $K_{сж}(\delta) = \left(1 - \frac{N_{ort}(\delta)}{P}\right) * 100\%$, где

Табл. 1 Распределение каналов по группам в зависимости от динамического диапазона

Группа	Динамический диапазон, дБ	Количество каналов	Номера каналов
1	4–6	2	4, 5
2	6–8	0	–
3	8–10	42	3, 6, 16 – 27, 38 – 65
4	10–12	5	2, 34 – 37
5	12–14	11	1, 7, 12 – 15, 28 – 30, 66, 67
6	14–16	4	31 – 33, 68
7	16–18	4	8 – 11
8	18–20	40	103, 199 – 203, 256 – 282, 329, 331 – 335, 338
9	20–22	126	69 – 71, 185 – 198, 204 – 255, 283 – 328, 330, 336, 337, 339 – 346
10	22–24	126	72 – 102, 104 – 184, 347 – 360



Рис. 1 Гистограмма распределения числа спектральных каналов от номера группы

$N_{ort}(\delta)$ – число сформированных ортов СХПБФ по всем группам для фиксированного значения δ . Зависимость суммарного Ксж от точности приближения δ приведена на рисунке 2. Фактические значения в таблице 2.

Таблица 2 Зависимость числа сформированных ортов ХПБФ от номера группы и точности приближения

Группа	Точность приближения δ (%)						
	1	1,5	2	3	5	7	15
	Число сформированных ортов СХПБФ						
1	2	2	2	2	2	2	2
2	–	–	–	–	–	–	–
3	42	42	42	31	8	3	2
4	5	5	5	4	3	2	1
5	11	11	11	10	6	5	1
6	4	4	4	4	3	2	1
7	4	4	4	4	4	4	1
8	37	31	25	10	4	3	3
9	126	99	69	16	6	5	2
10	121	80	43	13	7	4	3
Σ	352	278	205	94	43	30	16
$K_{сж}(\delta)$ (в %)	2	23	43	74	88	92	96

Рисунок 3 содержит фрагменты изображений 107-го частотного канала и гистограммы распределения яркостей пикселей в нем.

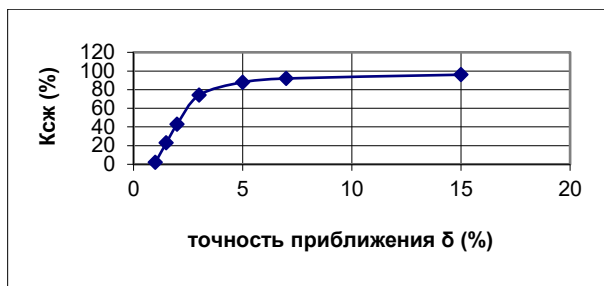


Рис. 2 Зависимость Ксж от точности приближения δ (%)

Рис. 3а – фрагмент исходного изображения, рис. 3б – восстановленное изображение с $\delta=3\%$ по 94 ортам СХПБФ, рис. 3с – ошибка восстановления с $\delta=3\%$ по 94 ортам СХПБФ, рис. 3д – восстановленное изображение с $\delta=7\%$ по 30 ортам СХПБФ, рис. 3е – ошибка восстановления с $\delta=7\%$ по 30 ортам СХПБФ.

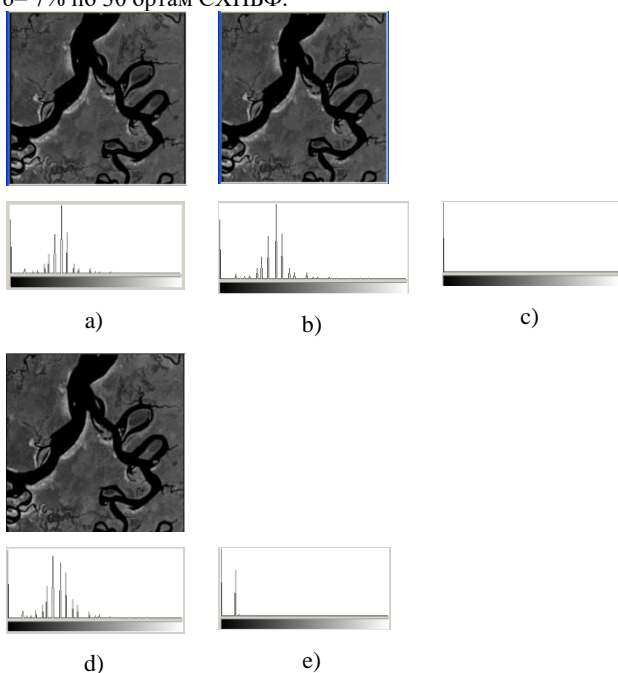


Рис. 3 а) фрагмент исходного изображения 107 частотного канала; б) восстановленное изображение 107 частотного канала с $\delta=3\%$ по 94 ортам СХПБФ; в) структура ошибки восстановления; д) восстановленное изображение 107 частотного канала с $\delta=7\%$ по 30 ортам СХПБФ; е) структура ошибки восстановления

Как видно из рисунка 3с, восстановление изображения канала по 94 ортам не содержит никаких искажений по сравнению с исходным, на рисунке 3е результат декодирования исходного сигнала по 30 ортам СХПБФ, Анализ гистограммы восстановленного сигнала, показывает наличие искажения в восстановленном сигнале, которое, однако, визуально никак не определяется. При значении $\delta=15\%$ на данном комплекте растровых изображений был получен коэффициент сжатия – 96%, поскольку с помощью 16 ортов СХПБФ удалось закодировать 360 растровых изображений каналов. Гистограмма распределения яркостей ошибки восстановления приведена на рисунке 3е.

6. Выводы

В работе рассмотрена проблема сокращения информационной избыточности растровых ГСИ ДЗЗ. Отмечено, что использование для этих целей традиционных СБФ (тригонометрические,

экспоненциальные системы, системы функций Лагера и пр.) не всегда оправдано, поскольку тогда выбор информативной СБФ ведется чаще всего исходя из внешнего сходства исходного сигнала и СБФ, что может приводить к тому, что оптимальная, либо близкая к ней, СБФ может быть не найдена, особенно в случае сложной формы первоначального сигнала. Разработаны объективные методы выбора СБФ, опирающиеся лишь на свойства совокупности исходных данных. К числу таких методов относится кодирование исходной информации по СХПБФ. В работе приведено описание адаптированного к обработке ГСИ алгоритма формирования СХПБФ, и показана его достаточно высокая эффективность (до 90–96%) устранения информационной избыточности на растровых ГСИ при низком уровне вносимых в сигнал искажений на этапе декодирования.

7. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, Грант РФФИ № 18-07-00715.

8. Литература

- [1] Borusyak, A.V. Context - based method for lossless compression of RGB and multispectral images / Borusyak, A.V., Pakhomov, P.A., Vasin, D.Yu., Turlapov, V.E. // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – V. 2210. – p. 323 - 329.
- [2] Chang Chein-I. Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification / Chang Chein-I. // Plenum Publishers. – N.Y.: Kluwer Academic. – 2003. – 370 p.
- [3] Christophe E. Hyperspectral Image Compression: Adapting SPIHT and EZW to Anisotropic 3D Wavelet Coding / E. Christophe, C. Mailhes, P. Duhamel // IEEE Transactions on Image Processing. — 2008. – Vol. 17, No 12. – P. 2334-2346.
- [4] G. Yu. Image compression systems on board satellites / G. Yu, T. Vladimirova, M.N. Sweeting // Acta Astronautica. – 2009. – Vol. 64. – P. 988-1005.
- [5] Kaarna A. Compression of Spectral Images / A. Kaarna // Vision Systems: Segmentation and Pattern Recognition Ed. By G. Ohinata and A. Dutta. – Vienna: I-Tech, 2007. – P. 269-298.
- [6] Lukin V. Processing of Multichannel RS data for Environment Monitoring, Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Geographical Information / V. Lukin // Processing and Visual Analytics for Environmental Security. – Trento, Italy, Springer Netherlands. – July 2009. – P. 129-138.
- [7] Motta G., Compression of hyperspectral imagery / G. Motta, F. Rizzo, and J.A. Storer // Proceedings of Data Compression Conference. – 2003. – P. 333-342.
- [8] Ponomarenko N.N. Preliminary automatic analysis of characteristics of hyperspectral AVIRIS images, / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, A. Kaarna // Proceedings of MMET. – Kharkov, Ukraine, 2006. – P. 158-160.
- [9] Ponomarenko N.N., Automatic Approaches to OnLand/OnBoard Filtering and Lossy Compression of AVIRIS Images / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, M.S. Zriakhov, A. Kaarna, J. Astola // Proceedings of IGARSS. – Boston, 2008. – Vol. III. – P. 254-257.
- [10] Pratt W.K. Digital Image Processing. Fourth Edition / W.K. Pratt. – NY, USA, Wiley-Interscience. – 2007. – 807 p.
- [11] Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. / Т. Андерсон. – М.: Физматгиз, 1963. – 500 с.
- [12] Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D и 3D – изображений: учеб. пособие. – СПб.: БХВ–Петербург, 2011. – 608 с.: ил. – (Учебная литература для вузов) – 784 с.
- [13] Неймарк Ю.И. Кодирование больших массивов информации в связи с задачами распознавания образов. /

Ю.И. Неймарк, Ю.Г. Васин // Изв. Высш. уч. зав. – Радиофизика. – 1968. – №7. – с. 1081 – 1086.

[14] Неймарк Ю.И. Распознавание образов и медицинская диагностика. / Ю.И. Неймарк, З.С. Баталова, Ю.Г. Васин, М.Д. Брейдо. – М.: Наука, 1972. – 328 с.

[15] Попов М.А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / М.А. Попов, С.А. Станкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН, 2006. – Вып. 3, Т. 1. – С. 106-112.

[16] Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.

[17] Сойфер В.А. Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли: моногр./ под ред. В.А. Сойфера. – Самара: Новая техника, 2015. – 256 с.

Об авторе

Васин Дмитрий Юрьевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник Центра информатики и интеллектуальных информационных технологий Института Информационных технологий, математики и механики Нижегородского Государственного университета им. Н.И. Лобачевского (ИТММ ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

E-mail: dm04@list.ru

Интеллектуальный формат сжатого представления цветных графических изображений

Л.И. Лебедев¹, М.С. Вирясов¹, В.П. Громов¹
 lebedev@pmk.unn.ru|mich3mix@mail.ru|GVP1941@bk.ru
¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

В работе описывается интеллектуальный формат CIFc сжатого представления цветных графических изображений (ГИ). Предлагаемый формат является расширением эффективного формата IFc, базирующегося на корреляционно-экстремальных контурных методах (КЭКМ) распознавания символьно-текстовой информации. Технология получения описания в формате CIFc основана на декомпозиции исходного ГИ с выделением текстового слоя и цветового слоя. Текстовый слой представлен черно-белым изображением, полученным в результате бинаризации обесцвеченного ГИ, и является маской переднего плана. Цветовой слой включает задний план и цветовую информацию о маске переднего плана и сжимается с использованием вейвлет-преобразования. Сжатие текстового слоя после его векторизации осуществляется двухкритериальным алгоритмом КЭКМ в режиме самообучения. Восстановление изображения осуществляется в обратном порядке на основе реставрации каждого из слоев. Приводятся теоретическое обоснование эффективности предлагаемого формата CIFc в сравнении с наиболее близким аналогом DjVu и результаты экспериментов на модельных и реальных цветных ГИ.

Ключевые слова: цветное графическое изображение, формат представления изображения, сжатие, текстовый слой, эффективность представления, алгоритм распознавания.

An intelligent format for compressed representation of colour graphic images

L.I. Lebedev¹, M.S. Virjasov¹, V.P. Gromov¹
 lebedev@pmk.unn.ru|mich3mix@mail.ru|GVP1941@bk.ru
¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

The paper describes the intelligent format CIFc for compressed representation of color graphic images (GI). The proposed format is an extension of the effective IFc format, which is based on the correlation-extremal contour methods (CECM) of character-text information recognition. The technology for obtaining descriptions in CIFc format is based on the decomposition of the original GI with the selection of the text layer and the color layer. The text layer is represented by a black-and-white image obtained as a result of binarization of the bleached GI, and is a foreground mask. The color layer includes background and color information about the foreground mask and is compressed using wavelet transform. Compression of the text layer after its vectorization is carried out by the two-criteria KECM algorithm in the self-learning mode. Image restoration is carried out in reverse order on the basis of the restoration of each of the layers. A theoretical justification is given for the effectiveness of the representation of color GI in the proposed CIFc format in comparison with the closest analogue of DjVu. The theoretical justification of the effectiveness of the proposed CIFc format in comparison with the closest analogue of DjVu and the results of experiments on model and real color GI's are given.

Keywords: color graphic image, image format, compression, text layer, presentation efficiency, recognition algorithm.

1. Введение

Для сжатия графических изображений (ГИ) черно-белых документов был разработан алгоритм, основанный на распознавании объектов корреляционно-экстремальными контурными методами (КЭКМ), которые относятся к методам сравнения с эталоном. Идея эффективного сжатия состоит в замене метрического описания распознанных объектов на параметры, полученные при совмещении с эталоном, объем которых значительно меньше. Для хранения получаемых параметров распознавания была предложена структура постоянной длины, которая являлась основой описания предложенного формата IFc [6]. Для повышения качества распознавания кроме базового среднеквадратичного критерия сходства был дополнительно введен критерий на основе оценки расстояния Хаусдорфа [1]. Полученный двухкритериальный алгоритм обеспечивает качество распознавания с любой заданной достоверностью. Такая же идея использования результатов распознавания методом сравнения с прототипом была предложена Яном Лекуном в технологии получения формата DjVu [5, 7]. В форматах DjVu и IFc используются однотипные методы распознавания, основанные на сравнении объекта с эталоном, однако вычисляемые в

алгоритмах оценки сходства имеют разный уровень инвариантности. Методы распознавания в IFc инвариантны относительно ортогональных преобразований и масштабирования, а в формате DjVu только к смещению. Поэтому, класс эквивалентности, порожденный одним эталоном, в формате IFc имеет большую мощность. Отсюда, сжатие изображения с хаотической ориентацией объектов и вариабельностью их масштаба в формате IFc будет выше, чем в формате DjVu, в котором потребуется хранить большее количество прототипов. Когда количество используемых прототипов приблизительно равно, эффективней будет формат DjVu, так как в нем не предусмотрена передача параметров об ориентации и масштабе объекта. Однако, наибольшим преимуществом формата DjVu является возможность сжатия цветных изображений. В то же время наличие огромного количества цветных графических документов и необходимость их более эффективного сжатия делает крайне актуальным решение задачи обработки цветового слоя в формате IFc.

2. Постановка задачи

Требуется разработать технологию представления цветных графических изображений на базе формата IFc. На основе анализа требуемого алгоритмического и

программного обеспечения с учетом векторной модели описания объектов, используемой в формате IFC, обработка цветных ГИ должна включать следующие этапы:

1. Декомпозиция изображения с выделением цветового и текстового слоев.
2. Вейвлет- сжатие цветового слоя.
3. Получение описания текстового слоя в формате векторной (контурной) модели представления изображения.
4. Представление текстового слоя в формате IFC.
5. Восстановление цветового слоя.
6. Восстановление текстового слоя в формате контурного описания изображения.
7. Растривание контурного описания изображения.
8. Слияние восстановленных слоев.

3. Методы решения

Рассмотрим методы решения, применяемые на каждом из этапов предложенной технологии представления цветных ГИ в формате IFC.

Для выделения текстового слоя из цветного трёхканального RGB изображения сначала осуществляется преобразование его в одноканальное изображение в оттенках серого. Для этого здесь для каждого пикселя выполним стандартное преобразование с получением полутонового изображения:

$$Y = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B.$$

Далее, воспользовавшись методом Отцу, находим пороговое значение для бинаризации полутонового изображения. Пороговое значение для разделения по яркости Y всех пикселей на два класса находится на основе максимизации межклассовой дисперсии [3]. Для описания бинарного изображения вначале строится штриховая модель, на основании которой формируется контурная модель текстового слоя. Наконец, используя формат IFC, на базе контурной модели изображения получаем сжатое представление текстового слоя.

Получение цветового слоя можно описать следующей процедурой. Для формирования цветового слоя на исходном изображении вырезаются фрагменты, соответствующие текстовому слою. При этом на месте текстового слоя осуществляется восстановление цвета близкого к цвету фона в его окрестности. Эта аппроксимация необходима для обеспечения лучшего сжатия цветового слоя вейвлетным алгоритмом. Сжатие цветового слоя осуществляется на базе вейвлет- преобразования Баттерворта для изображений и преобразования Добеши 9/7 [2]. На заключительной стадии для кодирования коэффициентов вейвлетного разложения изображения применяется алгоритм SPIHT в комбинации с арифметическим кодированием. Основная идея SPIHT заключается в том, чтобы переупорядочить биты вейвлетного разложения по принципу выделения низко- и высокочастотной информации с последующим подавлением последней для лучшего восприятия изображения.

Восстановление изображения осуществляется в обратном порядке. Наиболее алгоритмически сложным представляется восстановление текстового слоя в части получения по контурной модели растрового изображения. Отметим, что при слиянии слоев восстановленное изображение наследует параметры цветового слоя.

4. Программная реализация

Изложенные выше алгоритмы для сжатия и восстановления изображений реализованы на языке C++ платформы Microsoft Visual Studio 2017 с использованием средств MFC для обеспечения взаимодействия с

пользователем [4]. Программа также предусматривает консольный запуск с параметрами.

Для получения сжатого представления, а также восстановления цветовой составляющей изображения используется свободная библиотека TiLib (Tiny Library). Она предназначена для вейвлетного сжатия изображений с потерями, реализует биортогональный вейвлет-фильтр Добеши 9/7 и биортогональный вейвлет-фильтр Баттерворта. Для кодирования коэффициентов вейвлетного преобразования используется алгоритм SPIHT.

Для получения сжатого представления, а также восстановления текстового слоя используются программные средства, разработанные авторами.

Для выделения текстового и цветового слоёв, а также для формирования и сохранения восстановленного изображения используются средства библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV [8].

Сжатое представление изображения является совокупностью трёх файлов: цветовой слой (.Ti), текстовый слой (.bds + .etl). Для удобства и большей эффективности на финальном этапе сжатия полученные файлы объединяются в архив с помощью программы 7z.

5. Результаты экспериментов

Ниже приводятся результаты представления цветных изображений в форматах CIFc и DjVu. На рис.1 приведено исходное полноцветное изображение «Радуга цифр» размером 1320×1320 (41817600 байт). В формате tiff файл занимает 5620668 байт.

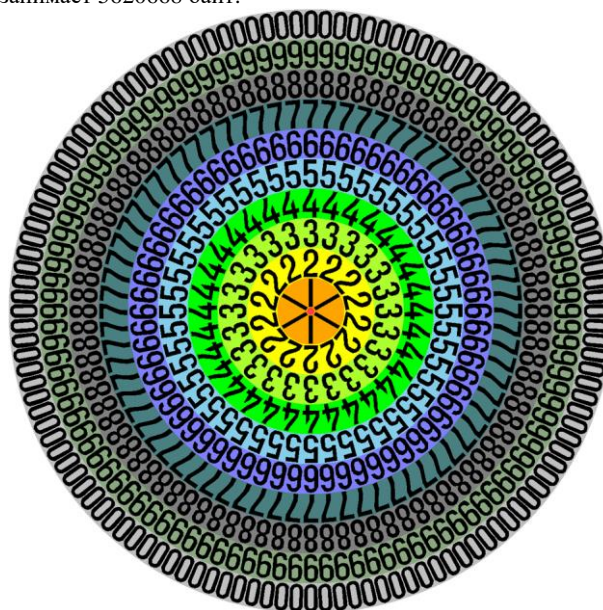


Рис. 1. Цветное изображение «Радуга цифр».

На рис. 2 приведено восстановленное изображение «Радуга цифр», полученное из формата CIFc. Цветовой слой на данном изображении сжат в 200 раз и представлен файлом Ti объемом 26136 байт. Текстовый слой в формате CIFc представлен двумя файлами: параметрического описания объектов bds (8414 байт) и эталонов etl (476 байт). Арифметическое кодирование этих трех файлов дает конечный объем файла в формате CIFc, равный 31124 байт. В формате DjVu цветное изображение «Радуга цифр» имеет размер 665885 байт, что более чем в 21 раз больше относительно формата CIFc.

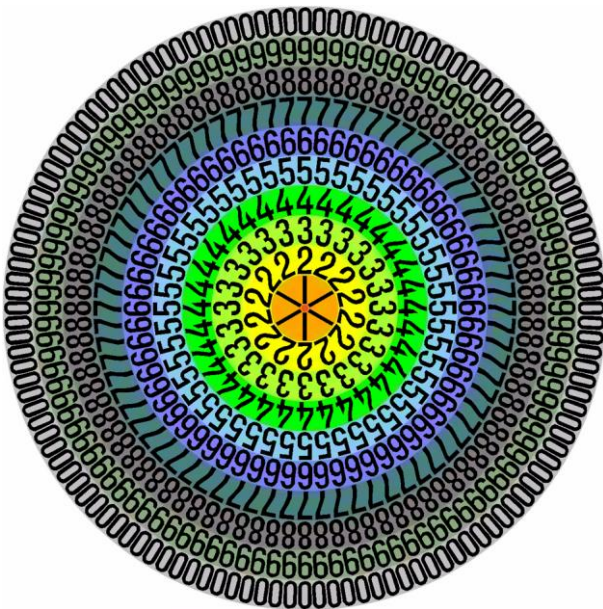


Рис. 2. Восстановленное изображение «Радуга цифр».

На рис. 3 представлено изображение P2, являющееся сканом страницы книги об условных знаках на топографических картах.

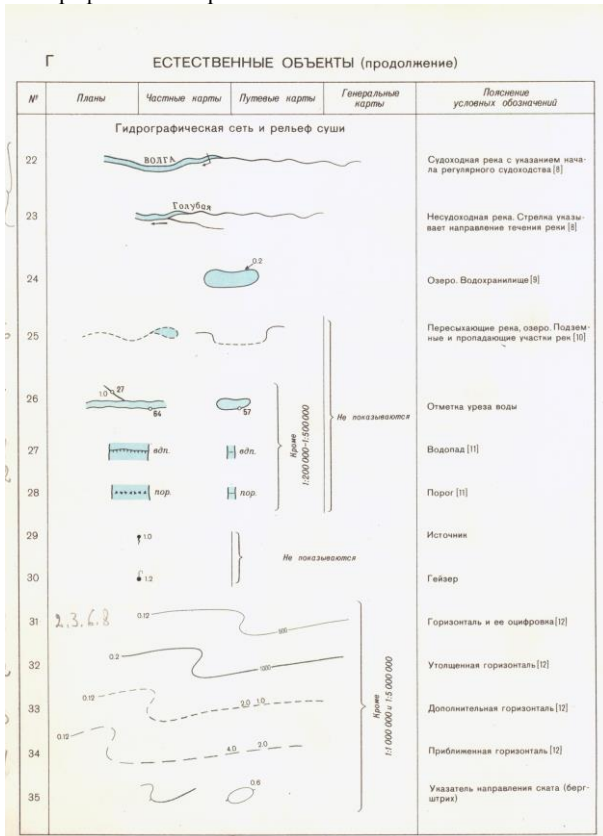


Рис. 3. Исходное изображение P2 в формате tif (62,8 МБ)

На рис. 4 представлена иллюстрация текстового слоя изображения P2, а на рис. 5 его цветовой слой. Описание изображения P2 в формате CIFc составило 34.8 Кб, а в формате DjVu 38.6 Кб. Отметим, что цветовой слой в формате CIFc был сжат в 3000 раз. На данном изображении P2 эффективность форматов в плане получаемых коэффициентов сжатия приблизительно одинакова. На рис. 6 представлено восстановленное изображение из формата CIFc, а на рис. 7 из формата DjVu.

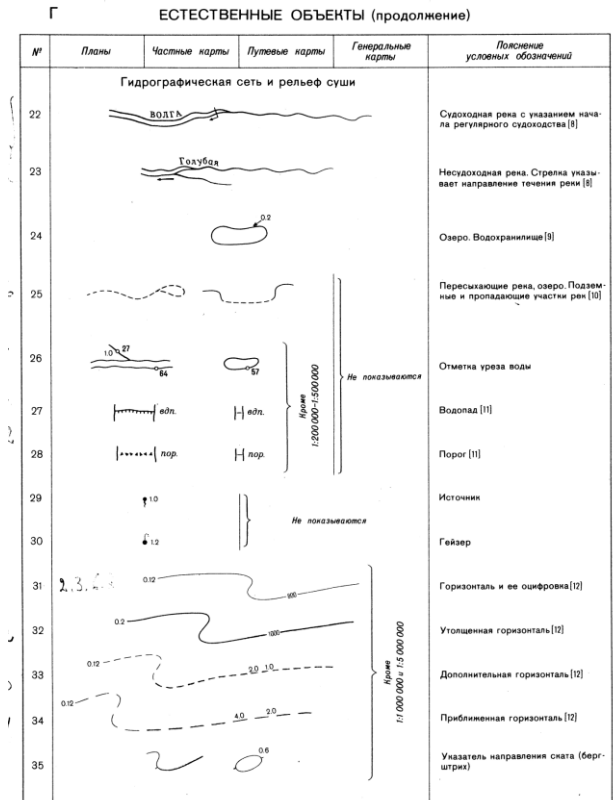


Рис. 4. Текстовый слой изображения P2

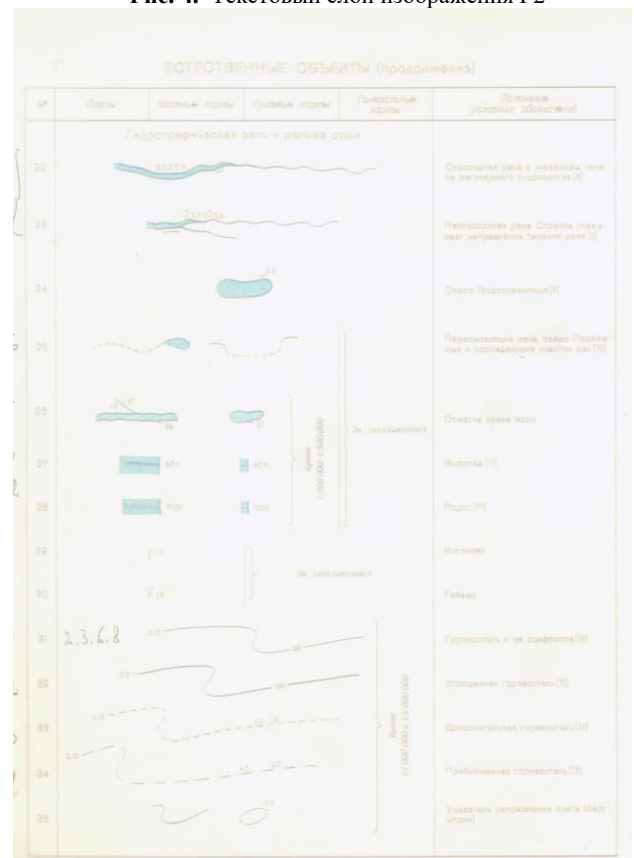


Рис. 5. Цветовой слой изображения P2

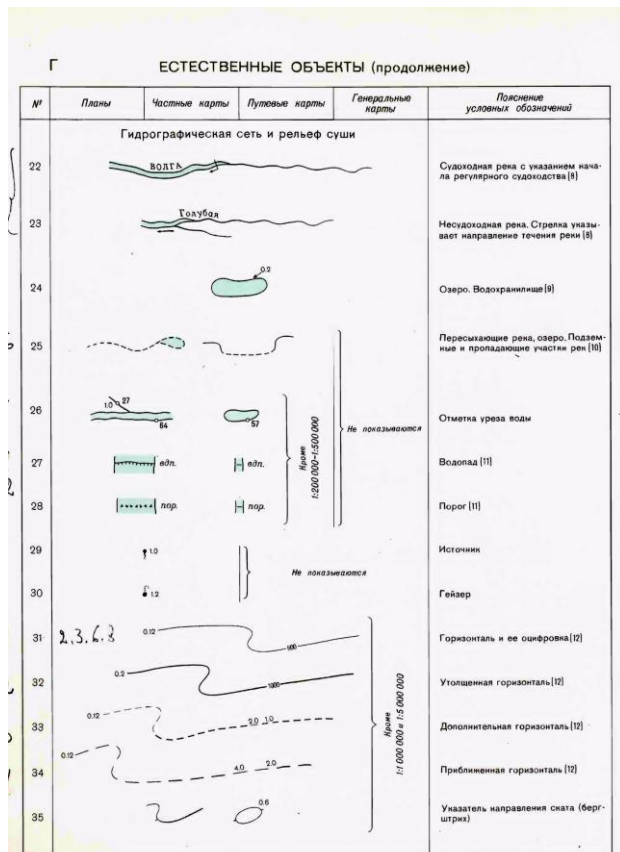


Рис. 6. Восстановленное изображение P2 из формата CIFs

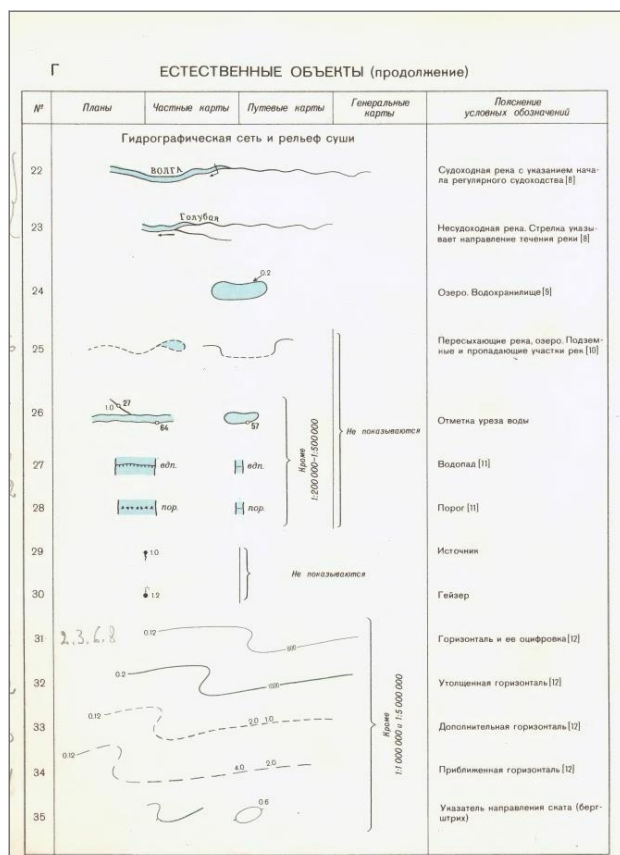


Рис. 7. Восстановленное изображение P2 из формата DjVu

6. Заключение

Разработана и реализована технология создания интеллектуального формата сжатого представления цветных графических изображений CIFs на базе формата IFs. Проведенные исследования и полученные результаты экспериментов показывают высокую эффективность сжатия изображений, представляемых в формате CIFs.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 16-11-00068-П и гранта РФФИ № 18-07-00715.

8. Литература

- [1] Лебедев Л.И. Двухкритериальный алгоритм распознавания объектов графических изображений на базе КЭКМ./ Л.И. Лебедев, Ю.Г. Васин // [ГРАФИКОН2015](http://grafikon2015.ru): Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции. 2015. С. 112-114 (<http://elibrary.ru/item.asp?id=24366739>).
- [2] Симаков А.В. Прогрессивная передача изображений через Интернет/ А.В. Симаков// https://www.compression.ru/download/articles/wavelets/simakov_2004_progressive_image_transmission_over_internet.pdf - (дата обращения 18.09.2019)
- [3] Метод Отсу, алгоритм и программная реализация// Википедия — свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://www.wikipedia.org>.
- [4] Хранилище документации Майкрософт для пользователей. – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com>.
- [5] Haffner P. A General Segmentation Scheme for DjVu Document Compression/ Patrick Haffner, Leon Bottou, Yann Lecun and Luc Vincent // Conference: Proceedings of the International Symposium on Mathematical Morphology (ISMM'02), 2002. – p. 3-4.
- [6] Vasin Yu.G. An effective format for representing graphic information / Yu.G. Vasin and L.I. Lebedev // Pattern recognition and image analysis, 2012, Vol. 22, No. 2, pp. 393–398. © Pleiades Publishing, Ltd., 2012..
- [7] <https://djvu.com/> - Официальный сайт.
- [8] <https://opencv.org/> - Официальный сайт.

Об авторах

Лебедев Леонид Иванович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Центра интеллектуальных информационных технологий Института ИТММ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. E-mail: lebedev@pmk.unn.ru.

Вирясов Михаил Сергеевич, студент 4-го курса кафедры Прикладной информатики Института ИТММ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. E-mail: mix3micha@mail.ru.

Громов Владимир Петрович, ведущий программист Центра интеллектуальных информационных технологий Института ИТММ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. E-mail: GVP1941@bk.ru.

Возможности ГИС-технологий в систематизации сведений о культурном наследии (на примере Брянской области)

Г.В. Лобанов¹, Р.В. Прокопишин², Абадонова Д.Ю.¹, Крохина В.А.¹

lobanov_grigorii@mail.ru|art.sobranie@mail.ru|dasha.abadonova.00@mail.ru|lera.krokhina.2000@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского», Брянск, РФ;

² Фонд сохранения культурного наследия «Достояние поколений», Москва, РФ

Анализируется опыт создания базы пространственных данных (БПД) о культурном наследии Брянской области как основы поддержки принятия решений в организации туристско-рекреационной отрасли региона. Приводятся методические и технологические решения для физического, концептуального и логического уровня проектирования, обсуждаются их научно-методические и нормативно-правовые основания. Описана структура и содержание БПД – электронные карты, слои, пространственные и атрибутивные характеристики объектов. Приводятся обобщённые сведения о методике наполнения тематических слоёв, проблемах сбора, систематизации, визуализации данных. Обсуждается роль разных видов программного обеспечения в сборе, систематизации и визуализации данных о культурном наследии. Рассмотрены задачи, которые решаются или предполагаются к решению на основе БПД: сбор сведений о местности окружающей объект наследия, сортировка и группировка данных, научно-справочное картографирование. Показаны направления использования БПД в решении отраслевых задач и перспективы развития как информационного ресурса.

Ключевые слова: база пространственных данных, ГИС-технологии, интерактивная карта, культурное наследие, поддержка принятия управленческих решений, Брянская область.

The Possibilities of GIS-technologies in Systematization of Information on Cultural Heritage (on the Example of Bryansk Region)

G.V. Lobanov¹, R.V. Prokopishin², D.Yu Abadanova¹, V.A. Krokchina¹

Lobanov_grigorii@mail.ru|art.sobranie@mail.ru|dasha.abadonova.00@mail.ru|lera.krokhina.2000@mail.ru

¹ Bryansk state University named after academician I. G. Petrovsky, Bryansk, Russia;

² The Foundation for the preservation of cultural heritage «Heritage of generations», Moscow, Russia;

The article analyzes the experience of creating a database of spatial data (BPD) on the cultural heritage of the Bryansk region as a basis for decision-making support in the organization of the tourism and recreational industry in the region. Methodical and technological decisions for physical, conceptual and logical level of design are given, their scientific and methodical and normative legal bases are discussed. The structure and content of BPD – electronic maps, layers, spatial and attribute characteristics of objects are described. The generalized information about the method of filling thematic layers, problems of data collection, systematization, visualization is given. The role of different types of software in the collection, systematization and visualization of data on cultural heritage is discussed. The tasks that are solved or proposed to be solved on the basis of the BPD are considered: collection of information about the area surrounding the heritage site, sorting and grouping of data, scientific reference mapping. Directions of use of BPD in the solution of branch tasks and prospects of development as an information resource are shown.

Keywords: spatial database, GIS technology, interactive map, cultural heritage, management decision support, Bryansk region.

1. Введение

Культурное наследие – объекты материальной и (или) нематериальной культуры выделяющиеся научной, исторической, эстетической, этнографической, художественной ценностью и сохранившие идентичность [7]. Материальную часть культурного наследия составляют здания, сооружения, архитектурные ансамбли и окружающие природные или природно-антропогенные ландшафты. Нематериальная часть представлена яркими проявлениями духовной культуры, локализованными в отдельных сообществах, группах или личностях: устными преданиями, обычаями, обрядами, формами исполнительского искусства, специфической картиной мира, навыками традиционного природопользования. Количество объектов культурного наследия, учтённых на региональном уровне, изменяется от нескольких сотен до первых тысяч (в Брянской области более 2000). Подробность сведений о культурном наследии значительно различается. В уполномоченных органах государственной власти информация о культурном наследии ограничена краткими записями о местоположении (адресе), статусе охраны,

техническом состоянии и форме использования объектов. Некоторые, хорошо изученные, обычно выдающиеся объекты подробно описаны в научно-популярной или специальной литературе, но такие сведения разрознены, неполны и слабо формализованы; нередко трудно сопоставимы [3, 5].

Сведения о культурном наследии составляют информационную основу непроизводственной деятельности (от краеведческого образования до организации туристического бизнеса) при организации удобной системы доступа и управления данными. Наиболее приемлемым способом систематизации сведений о культурном наследии представляется создание базы пространственных данных (БПД). Объекты культурного наследия тесно связаны с окружающим пространством, поэтому проектирование их коммерческого (или иного) использования предполагает анализ существующей инфраструктуры (путей подъезда, мест размещения посетителей) и среды (природного или антропогенного ландшафта, которая влияет на восприятие объекта посетителями.

Из вышесказанного, задачей работы определено проектирование, наполнение и апробация базы пространственных данных о культурном наследии,

предполагаемой к использованию как ресурс для организации туристско-рекреационной деятельности в Брянской области. Актуальность задачи именно в таком приложении обоснована перспективами развития туризма и рекреации в регионе. Для аграрно-индустриальных областей Центральной России повышение туристской привлекательности рассматривается как вариант стратегии решения социально-экономических проблем. Близость к столичному региону, высокое ландшафтное разнообразие и хорошая сохранность природных экосистем создают предпосылки развития туризма, которые в Брянской области пока реализуются слабо. Задача систематизации сведений о культурном наследии стоит и на федеральном уровне, но опыт данной работы ограничен регионом, поэтому описанные ниже решения нельзя считать исчерпывающими.

В статье описаны структура и содержания базы пространственных данных и методические решения по её наполнению и эксплуатации.

2. База пространственных данных о культурном наследии региона: методика проектирования и наполнение данными

Рекомендации по разработке структуры, содержания, способов визуализации, форматов хранения пространственной информации о культурном наследии до настоящего времени отсутствуют, поэтому потребовалось создание и обоснование методов проектирования и наполнения БПД на трёх уровнях – физическом, концептуальном, логическом. Методические решения по проектированию базы пространственных данных о культурном наследии опираются на общетеоретические подходы к созданию такого рода информационных ресурсов, описанные в литературе по геоинформатике и аналогичные проекты, созданные в других регионах.

Физический уровень определяет способ размещения базы пространственных данных (БПД) и доступ к ним. Здесь, выбор обоснован доступностью и широкими функциональными возможностями интернет-картографических сервисов на геопорталах. Размещение, хранение и визуализация данных обеспечивается средствами интернет-картографического сервиса GoogleMaps. Решение обусловлено доступностью и функциональной достаточностью интернет-картографических сервисов на геопорталах, которые стали главным источником географической информации и инструментом её обработки для пользователей в разных отраслях деятельности. Геопорталы обеспечивают хранение и передачу информации в формате языка разметки географических данных (kml), который обеспечивает возможность переноса БПД на аналогичные картографические порталы (Яндекс карты, Google-планета, SAS-планета) или, при необходимости, в среду специализированных ГИС-приложений (MapInfo, QGIS, ArcGis) для пространственного анализа.

На концептуальном уровне сведения о культурном наследии предложено отражать на многослойных интерактивных электронных картах. Пространственные объекты – условные знаки, отражающие местоположение и свойства объектов культурного наследия, визуализируются на фоне электронной общегеографической карты Google или синтезированного космического снимка. Использование интерактивных электронных карт до настоящего времени не получило теоретического обоснования, поэтому опирается на представления о свойствах карт как графических моделей и опыт использования программных средств автоматического картографирования.

Главная функция карт – передача различий свойств, структуры, динамики феноменов природы и общества в

пространстве обеспечивается системами условных знаков. Разработка и обоснование условных знаков считается главной, весьма сложной задачей проектирования традиционных карт, в решении которой рекомендуется опираться на представления о предмете картографирования, принципы композиции и восприятия изображений. Необходимо заметить, что смысл определения «традиционный» в отношении картографических изображений семантически не равен значению «бумажный». Возможности компьютерной графики позволяют создавать изображения, которые отвечают требованиям классической картографии на современном техническом уровне. Предполагается, что в рационально спроектированной карте сочетаются информационная насыщенность и наглядность. Пространство карты такой карты оптимально насыщено условными знаками, при этом изображение отвечает законам художественной композиции. Малая плотность условных знаков делает карту ненасыщенной; большая – нечитаемой, поэтому их количество, размер и конфигурация подбирается соответственно размеру изображения. В проектировании карт соответствие обеспечивается тремя методическими приёмами: подбором масштаба картографической основы, генерализацией и рациональным сочетанием графических переменных условных знаков (размер, форма, цвет, ориентировка в пространстве).

Картографическую основу образуют элементы изображения (картографическая сетка, контуры границ, побережий, главные реки, цветовой фон), которые прямо не связаны с темой карты, но подчёркивают, выделяют географические закономерности её содержания. Условные знаки размещаются на картографической основе так, чтобы полностью передать содержание и сохранить указания на местоположение объектов. Генерализация, напротив, означает отбор и обобщение объектов, их пространственных и атрибутивных свойств для изображения на карте, которые выполняются по некоторым, частично формализованным признакам. При генерализации часть сведений неизбежно утрачивается, но географические различия плотности объектов и распределение их свойств сохраняются. В сочетании графических элементов ориентируются на баланс между информационной насыщенностью условного знака и сложностью его восприятия. Конструирование условных знаков со многими графическими переменными позволяет передать максимальное количество информации на одном изображении; вместе с тем избыточно сложные знаки трудны для восприятия. Применение описанных методических приёмов в традиционной картографии предполагает высокую квалификацию разработчика.

Интернет-картографические сервисы располагают разнообразными программными средствами, которые обеспечивают соответствие насыщенности и наглядности картографических изображений. Среди них принципиальное значение для эффективного применения БПД пользователями с разным уровнем подготовки имеют: настройка визуализации, управление содержанием изображения и применение интерактивных условных знаков. Настройка визуализации обеспечивают возможность подобрать гармоничное соответствие картографической основы и содержания по комплексу признаков: плотности условных знаков, композиции, сочетанию цветов. Управление содержанием карты позволяет подобрать сочетание тематических слоёв, которое представляет географические особенности объекта или явления наилучшим образом для решения конкретной задачи. Фактически, пользователь конструирует картографическое изображение, из содержания которого временно исключается неактуальная информация. Применение интерактивных условных знаков позволяет представить разнообразные характеристики объекта, не прибегая к

трудным для восприятия графическим построением сложной конфигурации.

Особенности проектирования БПД на логическом уровне выводятся из нормативных требований и, при отсутствии таковых, из сложившихся практик описания объектов культурного наследия. Пространственные характеристики включают координаты точки или контура для объектов разного типа. Преобладающая часть информации представлена пространственными объектами типа «точка». Выбор обоснован тремя причинами: широким распространением такого способа визуализации на интернет-картографических сервисах – привычных пользователям источникам информации, относительно невысокой трудоёмкостью наполнения БПД и достаточной точностью сведений о местоположении для решения задач пространственного анализа. Атрибутивные характеристики включают обязательную часть – сведения о предмете и категории охраны, состоянии объекта и факультативную – описание связи с историческими событиями, значения для развития культуры в целом. Сводная характеристика структуры БПД представлена на рис. 1

Тип и наименование структурного элемента		
Электронные карты	Тематические слои	Атрибуты
Объекты материального наследия	Объекты архитектуры	Тип архитектурного объекта, архитектурный стиль, время создания, автор, краткое описание здания (сооружения), принадлежность ансамблю
	Объекты археологии - расширенный	Название, категория охраны, современное состояние, хозяйственное использование
	Историко-культурные объекты	Тип историко-культурного объекта, абсолютный и относительный возраст, краткое описание культурного слоя и местообитания
	Объекты археологии	Тип историко-культурного объекта, время создания, событие (персона) – инициатор
	Охраняемые зоны историко-культурных объектов	Количество памятников в окрестностях, тип объектов, населённого пункта, время освоения
Объекты нематериального наследия	Охраняемые зоны историко-культурных объектов	Площадь, время установления, краткое описание местности
		Название, тип, гиперссылка на мультимедийный элемент

Рис. 1. Структура базы пространственных данных объектов культурного наследия Брянской области

Методические приёмы наполнения слоёв БПД адаптированы к качеству информации, поскольку полнота и подробность сведений о культурном наследии, представленных в разных источниках информации, существенно различается.

Слой «Объекты архитектуры» наполняется данными из региональных реестров объектов культурного наследия. В большинстве случаев, исходные сведения о местоположении включают юридический адрес, который после небольшой формализации, геокодируется в координаты объекта (в системе WGS-84 или иных геодезических системах). Область применения алгоритма ограничена записями в БПД о зданиях и сооружениях адрес которого имеется в базах данных популярных геопорталов (Яндекс, Google). Отсутствуют обычно сведения об адресе давно и постоянно неэксплуатируемых зданий, и (или) их комплексов; отдельных сооружений в составе производственных комплексов, помещичьих усадеб, в которых не сохранился жилой дом. Добавление таких объектов в БПД - весьма трудоёмкая задача, их местоположение определяется по иным источникам данных: космическим снимкам, панорамным фотоснимкам, описаниям, картографическим материалам или

непосредственной фиксации координат приёмниками спутниковой навигации. Атрибутивная информация об архитектурных объектах включает обязательные сведения из реестра памятников культурного наследия и ряд дополнительных характеристик, которые повышают ценность БПД как информационного ресурса. Обязательные сведения включают официальное название здания (сооружения), адрес, время постройки, категорию историко-культурного значения, состояние, учётный номер объекта. Состав дополнительных характеристик в общем случае зависит от назначения БПД и опыта её эксплуатации. Для БПД Брянской области выбраны: комплексное научно-популярное описание объектов и принадлежность типу архитектурных сооружений. Описание сообщает о примечательных свойствах объекта и основаниях считать его частью культурного наследия с подробностью достаточной для научно-образовательных целей; тип характеризует функциональное назначение здания (жилое, производственное, сельскохозяйственное, общественное, военно-оборонительное, культовое).

Сведения об археологических объектах представлены в двух тематических слоях: с полным («Объекты археологии – расширенный») и ограниченным («Объекты археологии») представлением информации. Разделение обосновано законодательными ограничениями на публикацию данных о местоположении археологических памятников и предметов охраны. Вариант с полным представлением информации (для специалистов по рекреации и туризму, органов управления) содержит из сведения специальной литературы и (или) отчётов экспедиций.

Наполнение этого слоя «Объекты археологии» весьма трудоёмко, поскольку сведения о местоположении объектов в источниках часто не имеют координатной привязки, их местоположение описано по отношению к местным ориентирам. Идентификация археологических объектов выполняется обычно по комплексу морфологических признаков на крупномасштабных картах и (или) космических снимках, иногда по согласованию со специалистами-археологами. Внешние признаки археологических объектов – остатки валов, рвов, насыпей удаётся обнаружить далеко не всегда. Атрибутивные характеристики объектов слоя включают тип (согласно принятой в археологии классификации), относительную и (при наличии) абсолютную датировку объекта, описание предмета охраны. Относительная датировка отражает совокупность признаков материальной культуры и приводится в соответствии с принятой периодизацией археологических объектов. Абсолютная датировка приводится для небольшого числа хорошо изученных объектов, которые выступают по отношению к прочим как реперные.

Тематический слой с ограниченным представлением информации содержит генерализованные (обобщённые) сведения о положении и состоянии археологических объектов. Локальным объектам и (или) их группам присваиваются координаты ближайшего современного поселения. Атрибутивные характеристики слоя включают сведения о количестве, типах археологических объектов, в окрестностях поселения; отрезки исторического времени, для которых установлены археологические объекты, характер остатков материальной культуры обобщённые описания местообитаний.

Сведения об историко-культурном наследии представлены в двух тематических слоях. Основные сведения содержатся в слое «Историко-культурные объекты», который объединяет сведения о монументах и памятных знаках, произведениях монументальной скульптуры, внесённым в реестр культурного наследия региона. Точность сведений о местоположении памятников

в реестре объектов культурного наследия сильно отличается. В границах жилой застройки положение памятников уверенно определяется визуально по спутниковым изображениям. Местоположение небольших памятников в зелёной зоне (в скверах и парках, на кладбищах, за границами поселений) распознаётся только косвенно (по краеведческих описаниям, крупномасштабным топографическим картам). Справочная информация дополняется научно-популярными описаниями событий или исторических личностей, с которыми связан памятник. Второй слой с информацией об историко-культурном наследии содержит сведения о границах охранных зон памятников, установление которых продолжается до настоящего времени. В отличие от описанных выше тематических слоёв здесь используются площадные пространственные объекты. Наполнение слоя информацией зависит от масштабов проведённых работ по установлению границ охранных зон и, в настоящее, время весьма невелико [3].

Систематизация сведений о нематериальном культурном наследии ограничена слабо разработанными нормативно-правовыми и научно-методическими основаниями. Установлено, что статус объекта нематериального наследия присваивается на основе устойчивых, широко распространённых проявлений, имеющих важное значение в сохранении культурной идентичности. Вместе с тем, критерии ценности слабо формализованы, что отражается в структуре и содержании БПД. Выявленные объекты нематериального наследия (традиционные технологии жизнеобеспечения, обряды, элементы традиционного костюма) обычно имеют чёткую локализацию; их местоположение передаётся объектами-точками. Атрибутивную информацию слоя составляют: типы объектов и гиперссылки на их мультимедийное представление, которое включает графическую, звуковую или видеoinформацию [6].

Информация БПД составляет первичный материал для решения междисциплинарных задач управления культурным наследием методами пространственного анализа. Задачи анализа в контексте исследования представлены оценкой факторов туристической привлекательности объектов культурного наследия. Научно-методические основы и алгоритмы пространственного анализа активно используются в традиционной картографии со второй половине XX века, однако многие из них пока не воплотились в распространённых и доступных программных средствах [2]. Опыт управления культурным наследием позволяет рассмотреть три типа аналитических задач, решаемых при поддержке ГИС-технологий.

3. База пространственных данных о культурном наследии региона: направления использования

Задачи первого типа – сопоставление двух (реже большего количества) картографических изображений для сбора топографических сведений об окружении объектов культурного наследия. Технологически операция представляет конструирование геоизображения из тематических слоёв БПД и основы, которой выступают обычно космические снимки или электронные аналоги общегеографических карт. Термин «геоизображение» сформировался в классической картографии для обозначения разных пространственно-временных, масштабных генерализованных моделей явлений и процессов, возникших на основе развития компьютерных технологий [4]. Традиционная («бумажная»)

географическая карта считается частным случаем геоизображения (рис. 2).

Наложение слоёв «помещает» культурные объекты в среду, характеристики которой, нередко определяют возможность и целесообразность использования объекта для туризма и рекреации. Инструменты, востребованные для сбора сведений о характеристиках среды, включают картометрические операции (измерение расстояний, площадей) и средства управления визуализацией местности, которые обеспечивают эффект присутствия (фотографии, панорамы, 3D-объекты, 3D-режим просмотра). Использование сервисов не требует профессиональной картографической и (или) инженерной подготовки, специализированного программного обеспечения и обычно не ограничено административно. Соответственно, их популярность получили как средство решения прикладных и теоретических задач во многих сферах деятельности, учитывающих в взаимоположение объектов в управленческих решениях.

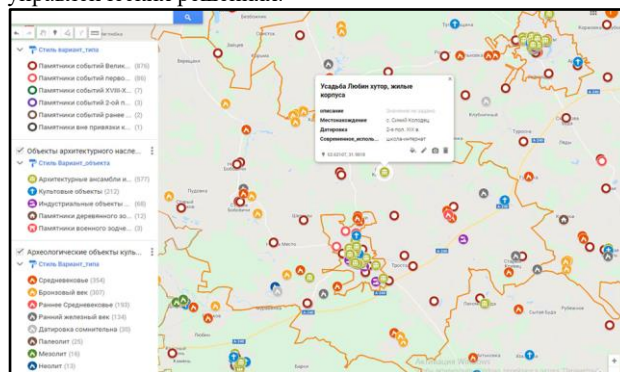


Рис. 2. Геоизображение – пример визуализации базы пространственных данных

Топографические сведения, широко востребованы в туристско-рекреационном проектировании. На их основе выполняется прокладка туристских маршрутов, определение историко-культурной ценности и (или) туристской привлекательности объектов, сравнительная оценка туристско-рекреационного потенциала территорий, выделении туристских кластеров. Важно отметить, что топографические сведения не исчерпывают необходимый набор данных. Прокладка туристских маршрутов учитывает, среди многих прочих параметров, как протяжённость дорог с разным покрытием, так и разнообразие ландшафтов на пути следования. Оценка туристско-рекреационной привлекательности, принятая в рекреационной географии, учитывает конкретные сведения о развитии туристской инфраструктуры, близости иных достопримечательностей, и в тоже время, трудно формализуемую информацию о популярности, фактической посещаемости объекта, источником которой могут быть только экспедиционные материалы) Оценка историко-культурной ценности, предполагает изучение как ландшафтного окружения, так экстерьера и интерьера зданий. Сравнительная оценка историко-культурного потенциала учитывает собственно топографические сведения (горизонтальная расчленённость рельефа лесистость, площадь водоёмов, степень нарушения естественных экосистем хозяйственной деятельностью) и визуально неявные характеристики природно-территориальных комплексов (биологическое разнообразие, особенности климата). Выделение территориальных кластеров строится не только на географической близости объектов, но тесноте экономических и управленческих связей между ними.

Задачи второго типа связаны с отбором, систематизацией и группировкой объектов БПД по сходству пространственных и (или) атрибутивных признаков.

Выборки используются для получения обобщённых количественных сведений, формирования представлений о разнообразии, выявления закономерностей распространении объектов культурного наследия. Область применения обобщённых сведений в организации рекреации и туризма весьма специфична – поддержка управленческих решений высокого уровня и научно-исследовательских работ. Сведения используются для ранжирования территорий по величине туристско-рекреационного потенциала; выделения участков перспективного и проблемного освоения туристских и рекреационных ресурсов; комплексного районирования региона; ограничения зон тяготения к центрам туризма. Функциональные возможности ГИС-порталов по обобщению географической информации невелики. Для работы с «большими» пространственными данными пригодны средства полнофункциональных ГИС-приложений. Инструменты работы с запросами являются их типичной функцией, эффективность применения которой зависит от структуры от уровня систематизации пространственных данных, поэтому с развитием описанной БПД все атрибуты объектов культурного наследия планируется сделать доступными для сортировки.

Задачи третьего типа – создание научно-справочных карт, представляющих сведения о культурном наследии территорий в наглядной образной форме. Традиционные карты, несмотря на конкуренцию со стороны иных способов визуализации территории, незаменимы в подготовке материалов, поддерживающих управленческие решения регионального уровня (аналитические отчёты, комплексные планы развития территорий).

Преимуществом задач второго и третьего типа очевидна. Информация о культурном наследии: количество, плотность, суммарный историко-культурный потенциал объектов картографируется и наносится на векторную цифровую основу средствами полнофункциональных ГИС-приложений. Сведения могут быть привязаны к единицам административного или муниципального устройства (районы, муниципальные образования разного ранга) или тематического районирования (например, туристско-рекреационным районам). Приоритет полнофункционального ПО обоснован широкими возможностями настройки визуализации и компоновки «традиционных» картографических изображений. Средства интернет-картографических сервисов, напротив, малоприспособлены для генерализованного (обобщённого) представления характеристик территории. Частичным аналогом генерализации можно, с некоторым допущением, считать тайловую структуру изображений на геопорталах. Тайловая структура обеспечивает плавное изменение подробности изображения местности в зависимости от масштаба. Для наложенных векторных тематических слоёв технология не реализуется, даже в части автоматического отбора наиболее важных объектов, поэтому при большом территориальном охвате слой с множеством точечных объектов становится нечитаемым. Отсюда – востребованность традиционных генерализованных изображений, созданных, впрочем, средствами компьютерного картографирования.

4. Заключение

Опыт систематизации сведений о культурном наследии Брянской области показывает, что в создании информационного ресурса, имеющего прикладную ценность для решения управленческих задач по организации рекреации и туризма, целесообразно опираться на разные технологии обработки пространственных данных. Создание

структуры данных, наполнение пространственной информацией, использование БПД как средства поддержки решения типичных отраслевых задач обеспечивается средствами привычных пользователям интернет-картографических сервисов. Описанные методические решения выводятся из направления и уровня развития технологий, построенных на использовании языка географической разметки, которые пока не получили теоретического обоснования как средство картографирования. Предполагаемой областью применения полнофункциональных ГИС, напротив остаётся поддержка наиболее масштабных, слабо формализованных управленческих задач, тесно связанных с теорией и практикой работы с обзорными, генерализованными картографическими изображениями. Специфика применения ПО отражает тенденцию развития геоинформатики, в которой обособилось два направления – прикладное, ориентированное на пользовательский спрос и теоретическое, сохраняющее тесную связь с традиционной картографической наукой. Направления объединяются законами восприятия графических образов, на которые следует ориентировать при разработке ГИС-продуктов.

5. Литература

- [1] Федеральный закон «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002 N 73-ФЗ
- [2] Тикунов В.С. Моделирование в картографии М., МГУ, 1997 – 405 с.
- [3] Свод памятников архитектуры и монументального искусства России. Брянская область. / Под ред. В. П. Выголова, А. И. Комеча, В. И. Плужникова, А. Б. Стерлигова. М.: Наука, 1998. - 640 с.
- [4] Берлянт А.М. Теория геоизображений М.: ГЕОС, 2006. – 262 с.
- [5] Археологическая карта России: Брянская область / Автор-сост. А.В. Кашкин. – М., 1993. – 304 с.
- [6] https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/heritage.shtml
- [7] <http://www.rusfolknasledie.ru/ih/ih/html/documents.shtml?215788>

Об авторах

Лобанов Григорий Владимирович, к.г.н., доцент кафедры географии, экологии и землеустройства естественно-географического факультета Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского. E-mail: lobanov_grigorii@mail.ru

Прокопишин Руслан Владимирович, директор исполнительной дирекции фонда сохранения культурного наследия «Достояние поколений». E-mail: art.sobranie@mail.ru

Абадонова Дарья Юрьевна, студент естественно-географического факультета Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского. E-mail: dasha.abadonova.00@mail.ru

Крохина Валерия Андреевна, студент естественно-географического факультета Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского. E-mail: lera.krokhina.2000@mail.ru



Геометрическое моделирование.
Компьютерная графика в образовании

Geometric Modeling.
Computer Graphics in Education

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Особенности моделирования трассы автомобильной дороги с использованием единой пространственной «B-сплайновой» кривой высокой степени

М.М. Абдуллин¹, А.О. Глазычев¹, В.Г. Муфтеев¹, М.А. Талыпов², М.М. Фаттахов¹, П.А. Федоров¹
ingenernaya_grafika@mail.ru|ikafedraig@mail.ru| muftejev@mail.ru
|marih999@gmail.com|adtsp@yandex.ru|fpa_idpo@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия;

²ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа, Россия.

Система автомобильных дорог России является важной частью транспортной структуры. Высокий износ, затрудненность движения, снижение безопасности дорог приводит к уменьшению количества транспортных перевозок в стране. Кроме того, несовершенная дорожная геометрия не позволяет увеличивать скоростной режим на трассе. В данной статье приведены особенности моделирования трассы с учетом выше указанных недостатков. Рассматриваются геометрические аспекты проектирования трассы дороги в плане. Показываются недостатки и ограничения существующих методов трассирования. Ставится задача выбора и адаптации программы геометрического моделирования для решения задач высококачественного трассирования дороги в плане. Предлагается программа «FairCurveModeler» геометрического моделирования кривых высокого качества по критерию плавности. Проводится сравнительное тестирование методов программы «FairCurveModeler» с методами топологической САД-системы «NX12». Полученные результаты позволяют обеспечить более гладкое построение кривых при проектировании автомобильных и других трасс.

Ключевые слова: дорога, трасса, кривая, компьютерное моделирование, плавность, трассирование

Features of Modelling the Highway Route Using a Single Spatial “B-spline” Curve of a High Degree

М.М. Abdullin¹, A.O. Glazychev¹, V.G. Mufteev², M.A. Talypov², M.M. Fattakhov¹, P.A. Fedorov¹
ingenernaya_grafika@mail.ru|ikafedraig@mail.ru| muftejev@mail.ru
|marih999@gmail.com|adtsp@yandex.ru|fpa_idpo@mail.ru

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia;

²Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.

The Russian road system is an important part of the transport structure. High wear, difficulty in driving, and a decrease in road safety lead to a decrease in the number of transportation in the country. In addition, imperfect road geometry does not allow increasing the speed mode on the highway. This article presents the features of the route simulation, taking into account the above disadvantages. The geometric aspects of the design of the road route in the plan are considered. Disadvantages and limitations of existing tracing methods are shown. The task is to select and adapt a geometric modeling program to solve the problems of high-quality road tracing in the plan. The «FairCurveModeler» program is proposed for geometric modelling of high quality curves according to smoothness criteria. A comparative testing of the methods of the «FairCurveModeler» program with the methods of the top CAD system «NX12» is carried out. The results obtained allow for a smoother construction of curves in the design of automobile and other routes.

Keywords: road, track, curve, computer simulation, smoothness, tracing.

1. Введение

Создание безопасных и комфортных условий эксплуатации являются ключевыми задачами при проектировании линейных сооружений. Одним из факторов, влияющих на решение этих задач, является моделирование плавности оси трассы, путем выделения рациональных опорных точек для ее построения [5, 3]. В настоящее время эта задача решается с помощью компьютерного моделирования, в основу которых заложены методы трассирования.

В традиционном методе трассирования оси, применяемые общеизвестные геометрические элементы (прямые, круговые кривые, клотоиды и квадратные параболы) оказываются недостаточно гибкими для выработки приемлемых проектных решений при проектировании реконструкций и ремонтов автомобильных дорог. Наиболее "слабым" местом этой технологии оказываются собственно принципы и методы "склейки" геометрических элементов в кусочно-непрерывную линию в плане и продольном профиле, которую мы называем трассой автомобильной дороги. В первую очередь, это повсеместно

применяемые принцип «тангенциального трассирования» и «пикетный» метод изысканий. Основным следствием их применения являются «жесткие» трассы с многочисленными отрезками прямых и кривых малого радиуса, не обеспечивающие зрительной плавности, ясности и гармоничности проектируемых автомобильных дорог. В свою очередь феномен «живучести» этого принципа можно объяснить тем, что для проектировщиков этот принцип более понятен, прост в инженерных расчетах и обеспечивает предельную технико-экономическую привлекательность для инженерно-изыскательских работ.

Одним из оснований перехода к сплайновым кривым является неудобство применения основной схемы в тангенциальной схеме трассирования. «Применение закруглений дороги в плане по классической схеме «клотоида – круговая кривая клотоида» достаточно обосновано с теоретических позиций, но на практике такая схема имеет множество изъянов и неудобств. Если применить какую-либо функцию, которая могла бы одна в какой-то мере классическую схему (составную кривую), то с позиций алгоритмизации и организации диалога «инженер – компьютер» это было бы достаточно эффективно» [1,2].

Практически все программные комплексы проектирования автомобильных дорог, не имеют соответствующих алгоритмов, реализующих методы построения сплайновых кривых высокого качества на касательной ломаной. Об отсутствии надлежащего инструмента построения сплайновыми кривыми протяженных участков, говорит тот факт, что нежелательная прямая вставка длиной $L < 300$ м, как правило, встречается около 36% случаев [2].

Сплайновые кривые высоких степеней могут обеспечить не только единое представление протяженного участка трассы с удобным геометрическим объектом для редактирования, но и высокое качество трассы по критериям плавности.

При моделировании кривых в CAD-системах используются два вида сплайновых кривых:

- локальные сплайны или геометрические сплайны. Исходные данные представляют собой ГО Эрмита в виде опорной ломаной с фиксированными направлениями касательных и значениями кривизны в вершинах опорной ломаной. Каждый сегмент определяется независимо от других сегментов по заданным параметрам ГО Эрмита.

- NURBS кривые высоких степеней. Для моделирования кривых высокого качества (класса А) используются NURBS кривые высоких степеней. NURBS кривые степени m обеспечивают порядок гладкости $(m-1)$ -го порядка гладкости. Применяются два основных метода – метод построения глобального сплайна на опорной ломаной (в топовых CAD-системах) и прямой метод непосредственного задания ГО NURBS кривой в виде S-полигона (применяется во всех CAD-системах).

Глобальные сплайны строятся на ломаной линии с использованием опорных точек. При определении параметров сегмента сплайна используются не только координаты вершин опорной ломаной, но и равенство производных различных порядков смежных сегментов в точках стыка сегментов. Эти условия приводят к необходимости решения системы уравнений. При этом опорные точки принимаются за узловые точки сплайна. В общем случае, изменение положения любой точки влияет на форму сплайна в целом. Считается, что построение глобального сплайна минимизирует некоторый энергетический функционал и обеспечивает плавность кривой в целом [6].

При прямом методе построения сплайна непосредственно задается управляющая ломаная сплайна (S-полигон), конфигурация которой достаточно точно определяет форму сплайновой кривой. Но прямой метод является трудоемким, так как для хорошего приближения эскиза кривой необходимо достаточно долго и кропотливо корректировать форму S-полигона.

Обычно построение выполняют в два этапа: автоматическое построение глобального сплайна; редактирование сплайна посредством S-полигона для достижения хорошего качества кривой на критических участках.

2. Программа моделирования

Авторами для моделирования трассы высокого качества предлагается программа «FairCurveModeler». В ней используется метод построения виртуальной кривой (B-сплайновой кривой или V-кривой) высокого качества (класса C5), которая затем аппроксимируется посредством рациональной кубической сплайновой кривой или B-сплайновой кривой высокой четной степени m , ($m = 4/6/8/10$). В работе [4] была показана возможность применения программы «FairCurveModeler» для трассирования осевой линии дороги высокого качества по

критериям плавности в системе «IndorCAD/Road». Возможность определения «V-кривой» на дуальном геометрическом определителе позволяет строить и редактировать трассу одинаково высокого качества, как по пикетам, так и на ломаной тангенциального хода. Способ «V-кривой» с аппроксимацией B-сплайновой кривой высокой степени обеспечивает высокое качество трассы с участками перегиба и пространственной формы с обеспечением высокого порядка гладкости с плавным изменением кривизны и кручения во всех точках кривой.

Преимущество «FairCurveModeler» перед топовыми CAD-системами при моделировании трассы дороги показывается путем тестирования с использованием релиза «FairCurveModeler app AutoCAD» [6]. В качестве топовой CAD-системы принята система «NX 12» фирмы Siemens.

Среди систем автоматизированного проектирования автомобильных дорог «IndorCAD/Road» (разработчик ООО «ИндорСофт») является наиболее подходящей для интеграции с программой «FairCurveModeler».

Отличительной особенностью метода трассирования в этой системе является возможность применения NURBS кривой 5-ой степени непосредственно при формировании и редактировании трассы. NURBS 5-ой степени, в потенциале, позволяет сохранить высокий порядок гладкости (4-ый порядок). Высокий порядок гладкости NURBS кривой 5-ой степени позволяет конструировать трассы с пространственной осевой линией с непрерывным и плавным кручением. Это важно при проектировании спортивных трасс и виражей дроз.

NURBS кривая 5-ой степени используется в «IndorCAD/Road» в формате составной кривой Безье 5-ой степени.

Для оценки эффективности системы «IndorCAD/Road» с программой «FairCurveModeler» рассмотрим одну из наиболее распространенных систем применяемых для моделирования трасс систему «NX», разработчиком которой является «Siemens PLM Software».

3. Результаты

Рассмотрим построение кривой класса F принадлежащей окружности. Основное требование к качеству функциональных кривых – это минимизация вершин кривой и плавное изменение кривизны. Очевидно, что единственная кривая с минимальным количеством вершин – это окружность. Наиболее показательный тест для отбраковки методов, не удовлетворяющих требованиям к методам моделирования кривых класса F – это тест на ломаной, принадлежащей окружности. Проверим, относится ли метод построения кривых линий, реализованные в системе «NX» для построения глобального сплайна к методам класса F.

Построим на точках окружности сплайн 8-ой степени в системе «NX» и проверим качество сплайна. Как видно из рисунка 1, а полученная кривая имеет ярко выраженные скругленные вершины и визуально не совпадает с окружностью.

Определим макропараметры сплайна системы «NX»: "Real Length = " 628.301; "Approximated Length = " 613.968; "Potential Energy = " 0.0661325; "Min Curvature = " 0.00740515; "Max Curvature = " 0.0136768. Макропараметры: "Real Length = " 905.272; "Approximated Length = " 627.298; "Potential Energy = " 0.0627298; "Min Curvature = " 0.01; "Max Curvature = " 0.01.

Пульсация кривизны (-0.0136768 0.00740515) = 0.00627165, что в процентах составляет 62.7165% от номинального значения кривизны.

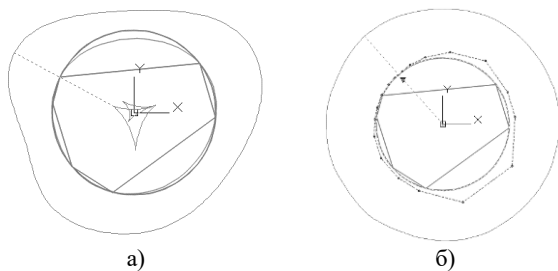


Рис. 1. Результат моделирования окружности

Построим в «FairCurveModeler» V-кривую, аппроксимированную B-сплайновой кривой 8-ой степени (рисунок 26).

Макропараметры: "Real Length = " 769.591; "Approximated Length = " 628.644; "Potential Energy = " 0.0627792; "Min Curvature = " 0.00974056; "Max Curvature = " 0.01025.

Построенная кривая визуально совпадает с окружностью. Значение кривизны находится в пределах [0.00974056, 0.01025].

Пульсация кривизны не превышает значения $(-0.01025 - 0.00974056) = 0.00050944$, что составляет 5.0944 % от номинального значения кривизны.

Очевидно, что тест показывает, что метод моделирования кривых класса F в системе «NX» не обеспечивает требуемого качества.

Случай построения трассы с участком перегиба в программе «FairCurveModeler» приведен на рисунке 2, где на опорной ломаной с участком перегиба построена B-сплайновая кривая 8-ой степени. Концевые сегменты ломаной используются для задания направлений касательных в концевых точках сплайна.

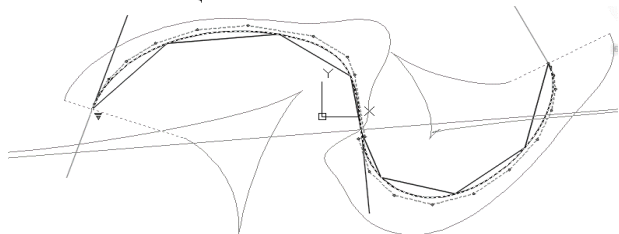


Рис. 2. Результат моделирования B-сплайновой кривой

Аппроксимация с помощью B-сплайновой кривой сохраняет направление касательной в точке перегиба и сохраняет фиксированные значения кривизны в концевых точках V-кривой.

4. Заключение

По результатам проведенной работы получены следующие выводы:

- рекомендован способ моделирования трассы автомобильной дороги, заключающийся в совместном использовании программы «FairCurveModeler» в системе «IndorCAD/Road»;
- результат сравнительного тестирования, установил, что при моделировании трассы автомобильной дороги высоко качества, рекомендованный способ, реализуемый с помощью программы «FairCurveModeler» в системе «IndorCAD/Road» показал наименьшую пульсацию кривизны от номинального значения, перед методами топовой CAD-системы «NX12».

5. Литература

- [1] Бойков, В.Н. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог (на примере IndorCAD Road) /

В.Н. Бойков, Г.А. Федотов, В.И. Пуркин. – М: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2005. – 224 с.

- [2] Бойков В.Н. Методология и практические методы автоматизированного трассирования реконструируемых автомобильных дорог: Автореф. дисс...д-р техн. наук, 05.23.11 /МАДИ. – М., 2002.– 47 с.
- [3] Ma, G. C., Wu, F. J., and Zhang, S. S. (2008). Research on Modeling Free-form Curved Surface Technology. In Global Design to Gain a Competitive Edge (pp. 51-60). Springer, London. DOIhttps://doi.org/10.1007/978-1-84800-239-5_6
- [4] Муфтеев, В.Г. Моделирование плавности оси автомобильной дороги с использованием программы FairCurveModeler / В.Г. Муфтеев, М.А. Тальпов, М.М. Абдуллин, П.А. Федоров, М.М. Фаттахов // Сборник: Проблемы строительного комплекса России XVIII Международная научно-техническая конференция. – Уфа: ...2014. С. 152-155.
- [5] Фаттахов, М.М. Моделирование параметров автомобильных дорог в архитектурно-ландшафтном проектировании (с элементами дорожной геометрии) / М.М. Фаттахов, П.А. Федоров, М.М. Абдуллин, В.Г. Муфтеев, А.Р. Марданов. – Уфа: Изд-во "Нефтегазовое дело", 2014. – 268 с.
- [6] Фокс, А. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс А., М. Пратт. Пер.с англ. – М.: Мир, 1982. – 304 с

Об авторах

Абдуллин Марат Мансурович, к.т.н., профессор кафедры комплексного инжиниринга и компьютерной графики Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: ingenernaya_grafika@mail.ru

Глазьев Антон Олегович, к.т.н., доцент кафедры комплексного инжиниринга и компьютерной графики Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: ikafedraig@mail.ru

Муфтеев Валериян Гайнизаманович, к.т.н., доцент кафедры автомобильные дороги и технология строительного производства Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: muftejev@mail.ru

Тальпов Марат Артурович, аспирант кафедры доцент кафедры механики и инженерной графики Башкирского государственного аграрного университета. E-mail: marih999@gmail.com

Фаттахов Мухарям Миниярович, д.т.н., профессор кафедры автомобильные дороги и технология строительного производства Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: adtsr@yandex.ru

Федоров Павел Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций Уфимского государственного нефтяного технического университета. E-mail: fpa_idpo@mail.ru

Внедрение средств автоматической проверки решений конструктивных задач инженерной геометрии в CAD-систему

А. А. Бойков¹, А. М. Федотов²
albohpx@mail.ru | fam1950@bk.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, Иваново, Россия

Предлагается модель взаимодействия инструментов автоматической проверки решений конструктивных задач с CAD-системой. Анализируются различные подходы к реализации этой модели. Отмечаются недостатки системы проверки файлов с решениями задач в контексте задач образования. Показывается, что этих недостатков лишена система проверки, интегрированная среди прочих инструментов в CAD-систему. Приводятся функциональная и структурная схемы интеграции инструментов проверки на основе CAD-системы и удаленной проверяющей системы, алгоритм работы модуля проверки в составе CAD-системы. Рассматриваются возможности CAD-системы «Компас-3D» для внедрения внешних модулей и программные интерфейсы системы. Показывается создание инструмента для проверки решений графических задач и его использование в CAD-системе «Компас-3D» на примере задачи о построении перпендикуляра к плоскости.

Ключевые слова: CAD-системы, автоматизированная проверка чертежей, автоматизированная проверка электронных моделей, конструктивные задачи инженерной геометрии, CAD-системы в образовании

Implementing tools of the automatically verifying of the solutions of engineering geometry constructive problems to CAD

A. A. Boykov¹, A. M. Fedotov²
albohpx@mail.ru | fam1950@bk.ru

¹ MIREA – Russian Technological University

² Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russia

A model for the interaction of tools for automatically verifying of solutions of constructive problems with a CAD system is proposed. Various approaches to the implementation of this model are analysed. Shortcomings of the system for verifying files with problem solutions in the context of education are noted. It is shown that the verification system integrated among other tools in the CAD system is deprived of these shortcomings. The functional and structural diagrams of integration of verification tools based on a CAD system and a remote verification system, the algorithm of the verification module as part of the CAD system are given. The possibilities of the CAD «Компас-3D» for the implementation of external modules and its application programming interface (API). The creation of a tool for verifying solutions of constructive problems and its use in the CAD «Компас-3D» is shown.

Keywords: CAD, computer aided verifying of drawings, computer aided verifying of 3D models, constructive problems of engineering geometry, CAD-systems in education

1. Введение

В свете широкого внедрения современных информационных технологий в промышленности и техническом образовании становится актуальной проблема проверки качества электронных геометрических моделей, которые, являясь результатом работы обучающихся, содержат в себе объективные сведения о качестве обучения. Формализовать понятие качества (правильности) геометрической модели можно лишь сформулировав задачу, решением которой геометрическая модель является [1]. В [1, 2] для этого введено понятие **конструктивной геометрической модели** (КГМ) как совокупности именованных элементов (геометрических и вспомогательных) с их параметрами и атрибутами и связей между ними (это позволяет рассматривать с единых позиций электронные чертежи и трехмерные модели в векторном представлении), и понятие **конструктивной задачи инженерной геометрии** (КЗ) как задачи, состоящей в создании КГМ, удовлетворяющей заданным условиям. Автоматизация проверки осуществляется на основе эвристического подхода [3] и состоит в формализации условий КЗ и представлении их в виде эталона, с которым сопоставляется проверяемое решение (модель) для выявления количественной оценки правильности [4]. В настоящей работе рассматривается реализация этого подхода в среде CAD-системы.

2. Анализ проблемы и постановка задачи

В [1] подробно рассмотрены подходы (коды 1.1.1–2.2.3) к организации компьютерной проверки КГМ, реализующие указанную эвристическую модель (рис. 1). В следующих случаях решение задачи может быть выполнено в CAD-системе:

- решение и проверка выполняются в среде CAD-системы при помощи встроенных инструментов (код 1.1.1) или удаленно (код 2.1.1);
- решение выполняется в CAD-системе, сохраненные файлы проверяются при помощи специального приложения на том же компьютере (код 1.2) или на удаленном сервере (код 2.1.2).



Рис. 1. Функциональная модель системы проверки
В работах [2, 4] автоматизация проверки решений КЗ, выполненных в CAD-системах, осуществлялась, преимуще-

ственно, в виде проверки файлов решений на удаленном компьютере (код 2.1.2). Этот подход применительно к задачам образования имеет существенные недостатки:

- потери времени (в частности, аудиторного) на загрузку исходных файлов с заданием и решением, на экспорт решения в обменный графический формат;
- потери геометрической информации при конвертации в формат данных, с которым работает система компьютерной проверки.

Этих недостатков лишены подходы, основанные на проверке решения прямо в среде CAD-системы, причем в случае самоподготовки выгодна проверка встроенными инструментами (код 1.1.1) – не требуется доступ в Интернет, пересылка решения и результатов проверки; в случае проведения контрольных мероприятий – проверка на удаленном сервере (код 2.1.1) повышает достоверность результатов проверки и обеспечивает их передачу в Интернет-системы, например, Moodle.

Если система компьютерной проверки решений уже настроена для проверки загруженных пользователями СДО файлов решений, как это предлагается в [2, 4], тогда для реализации подхода 2.1.1 достаточно обеспечить возможность передачи решения (геометрической модели) непосредственно из среды CAD-системы в систему проверки, реализация инструментов проверки в CAD-системе не требуется.

С учетом сказанного целью настоящей работы является обеспечение возможности компьютерной проверки решений КЗ в CAD-системе, для чего требуется:

- Разработать модель внедрения инструментов для компьютерной проверки решений КЗ в CAD-систему;
- Реализовать инструменты для компьютерной проверки решений КЗ в CAD-системе.

3. Разработка модели внедрения инструментов компьютерной проверки КЗ в CAD-систему

В качестве примера рассмотрим CAD-систему «Компас-3D». Широкое распространение на отечественных предприятиях и в учебных заведениях делает ее привлекательным инструментом для решения учебных и прикладных задач, а тот факт, что основные форматы файлов остаются закрытыми, затрудняет использование сторонних проверяющих систем и требует конвертации чертежей и моделей с потерями в обменные форматы (например, DXF или IGES) для проверки.

Функциональная модель решения КЗ представлена следующей схемой (рис. 2).

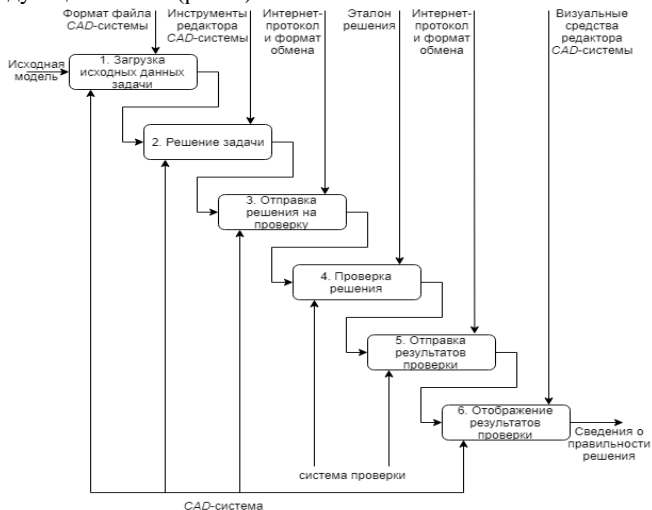


Рис. 2. Функциональная модель решения КЗ

Непосредственно с проверкой связаны блоки 3–6, из которых компоненты, внедренные в CAD-систему, должны реализовывать функции 3, 5 (частично) и 6. Функции 1–2 выполняются стандартными средствами CAD-системы, функции 4–5 – удаленная система проверки.

Для реализации указанных функций требуется инструмент (модуль), дополняющий набор инструментов CAD-системы, имеющий доступ к геометрической модели (решению КЗ), представленной во внутреннем формате CAD-системы в памяти компьютера, и средствам оповещения пользователя (диалоговым окном, всплывающим подсказкам). Структурная модель взаимодействия CAD-системы и удаленной системы проверки решений КЗ показана на рис. 3.

Интеграцию CAD-системы и подсистемы проверки решений КЗ обеспечивают внедренный в CAD-систему модуль и специальный компонент системы проверки (модуль обмена), отвечающий за получение решения (проверяемой КГМ) удаленно (например, используя протокол HTTP), передающий решение в систему проверки и по окончании проверки возвращающий сведения о ее результатах.



Рис. 3. Структурная модель взаимодействия CAD-системы и удаленной системы компьютерной проверки решений КЗ

Поскольку проверка (блок 5) осуществляется путем сравнения КГМ решения и эталона во внутреннем формате системы проверки [1, 4], то реализацию предлагаемой модели можно заметно упростить, если пересылать из модуля проверки 4 в модуль обмена 8 данные решения КЗ (блок 2) не в формате CAD-системы, а в формате, оптимизированном для проверки. В этом случае предлагаемая модель может быть использована для разных CAD-систем с различными внутренними форматами представления КГМ. Для каждой CAD-системы требуется создание своего уникального модуля проверки 4, но модуль обмена 8, который будет получать решение и отправлять сведения о результатах проверки в едином формате, изменений не потребует.

Инструмент проверки представлен в CAD-системе единственной командой (выполнить проверку активного чертежа или модели). Действие этой команды представляет следующий алгоритм (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм работы модуля проверки в составе CAD-системы

Шаги 2–3 не требуют взаимодействия с элементами CAD-системы: обмен данными через сеть Интернет обеспечивают соответствующие средства языка программирования.

Таким образом, для реализации разработанной модели требуется следующее:

- Обеспечить формирование КГМ для пересылки в систему проверки, действующую на удаленном сервере;

- Обеспечить получение сведений о результатах проверки и визуализацию результатов проверки в среде CAD-системы. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

4. Программные интерфейсы CAD-системы «Компас-3D» для внедряемых модулей

Поскольку сами по себе CAD-системы не предназначены для разработки программных модулей, то некоторые из них позволяют создавать новые инструменты в сторонних, специально созданных для этого системах (*Delphi*, *Visual Studio*, *C++ Builder* и др.). Обеспечить взаимодействие таких инструментов с CAD-системой позволяют так называемые интерфейсы создания приложений (*Application programming interface – API*): библиотеки подпрограмм, используя которые, созданные сторонними разработчиками программы могут обращаться к элементам CAD-системы, создавать, редактировать геометрическую модель, открывать и записывать файлы, управлять окнами и пр. Система «Компас-3D» предоставляет такой API и набор средств разработки (*Software development kit – SDK*), который включает в себя файлы-объявлений, упрощающих доступ к элементам графической среды «Компас-3D» из программного кода прикладных программ, справочную систему и набор примеров.

Основу API системы «Компас-3D» составляют объектно-ориентированные элементы, называемые интерфейсами (*interface*), которые предоставляют разработчику доступ к своим данным (*свойства*) и возможность управлять своим поведением (*методы*) [5]. Достаточно подробно создание программ для построения чертежей и моделей в CAD-системе «Компас-3D» на языке *Object Pascal* в среде *Delphi* рассмотрено в [6, 7]. Ввиду универсальности интерфейсов [5] на других языках программирования такие программы создаются аналогично.

Для получения доступа к текущему документу и геометрической модели текущего документа используются следующие интерфейсы API «Компас-3D» [8].

KompasObject – приложение «Компас-3D», интерфейс версии 5. Для получения доступа к активному документу предоставляет методы – *ActiveDocument2D*, *ActiveDocument3D* и др. Для создания итераторов для навигации по объектам некоторого типа – *GetIterator*. Для доступа к интерфейсу версии 7 – *ksGetApplication7*.

Application – приложение «Компас-3D», интерфейс версии 7. Для доступа к активному документу предоставляет свойство – *ActiveDocument*, ко всем документам – *Documents*.

ksDocument2D – плоский документ (фрагмент или чертеж), интерфейс версии 5. Для получения доступа к основной надписи предоставляет метод *GetStamp*. Для создания геометрических фигур содержит набор соответствующих методов – *ksCircle*, *ksLine*, *ksLineSeg*, *ksPoint* и др.

KompasDocument2D – общий интерфейс плоских документов, может быть получен у текущего документа, если он является чертежом, фрагментом (или активным эскизом в трехмерной модели). Для доступа к слоям и видам плоского документа предоставляет свойство *ViewsAndLayersManager*.

IViewsAndLayersManager – менеджер групп слоев (коллекция *LayerGroups*) и видов (коллекция *Views*).

IView – вид (стандартный, дополнительный, местный и др.) и дополнительные интерфейсы вида *IViewDesignation* (обозначение вида), *IDrawingContainer* (графические объекты), *ISymbols2DContainer* (размеры и обозначения), *IBreakViewParam* (параметры разрывов вида), *ICutViewParam* (параметры разрезов вида), *IView1* (системы координат) и др.

IDrawingObject – интерфейс графических объектов и производные от него *ILineSegment* (отрезок), *ICircle* (окружность), *IPoint* (точка), *IDrawingText* (текст на чертеже), *ILine* (прямая), *ILineDimension* (линейный размер) и др.

Также имеются интерфейсы для доступа к трехмерным документам (деталь и сборка) и элементам таких документов. В настоящей работе мы ограничимся плоскими документами и проверкой чертежей.

Для вывода сообщений интерфейсы *KompasObject* и *IApplication* предоставляют следующие методы – *ksMessage* (окно с сообщением), *ksError* (сообщение об ошибке), *MessageBoxEx* (окно с сообщением или всплывающее сообщение в правом нижнем углу экрана), *ksYesNo* (диалоговое окно с вопросом типа Да/Нет) и др.

Таким образом, рассмотренные программные интерфейсы позволяют внедряемому модулю получать сведения о геометрической модели и взаимодействовать с элементами интерфейса CAD-системы «Компас-3D».

5. Формирование КГМ для проверки

Рассмотрим работу блока формирования КГМ для отправки в систему проверки.

КГМ представляет собой структуру данных вида $M = \langle O, R, G, A, E \rangle$ [4], где O – множество объектов (различаются значением *ключ*), составляющих решение, R – множество связей между объектами, G – множество видов связей, A – множество видов объектов (алфавит), E – совокупность свойств пространства, в котором рассматриваются объекты O и связи R . Каждый объект описывается четверкой $o = \langle a, \text{ключ}, P, V \rangle$, где a – символ вида объекта, P – множество параметров, V – множество атрибутов в виде пар (название, значение). Каждая связь описывается четверкой $r = \langle q, o_1, o_2, V \rangle$, где q – символ вида связи, o_1, o_2 – *ключи* целевого и исходного объекта, V – множество атрибутов связи. Каждый элемент алфавита A описывается тройкой $\langle a, P_0, V_0 \rangle$, где a – символ вида объекта, P_0 – множество параметров, V_0 – множество атрибутов. Каждый элемент G описывается четверкой $\langle q, a_1, a_2, V_0 \rangle$, где q – символ вида связи, a_1, a_2 – символы целевого и исходного объекта, V_0 – множество атрибутов связи. КГМ в такой форме позволяет единообразно представлять различные геометрические объекты и связи между ними и может быть получена из внутреннего формата данных CAD-системы, такое представление КГМ используется и в проверяющей системе.

Выше отмечалось, что в рассматриваемой модели, КГМ пересылается в том же формате, в каком выполняется проверка, то есть элементы данных $\langle G, A, E \rangle$ модели уже присутствуют в системе проверки. Будем называть тройку $J = \langle G, A, E \rangle$ **контекстом** для некоторого класса задач. Будем называть структуры данных вида $M^J = \langle O, R \rangle^J$ КГМ (решением) в контексте J . Таким образом, требуется выполнить пересылку только данных M^J . Для этого будем формировать текстовое описание – информацию о каждом объекте КГМ запишем отдельным предложением одного из трех видов:

- ключ* = вид фигуры (список параметров и атрибутов)
 - ключ* = вид фигуры (список параметров и атрибутов), список связей
 - ключ* = вид фигуры (список связей)
- где список параметров и атрибутов состоит из двоек *имя=значение*,
– а список связей – из троек:
имя связи (список параметров связи)=связанный объект

– причем при переводе может быть сформировано ровно одно предложение вида (а), (б) или (в) для каждого значения ключ (уникально для каждого объекта модели).

Рассмотрим в качестве примера решение задачи курса начертательной геометрии на построение треугольника по заданным координатам его вершин и построение перпендикуляра к его плоскости из [1]. Чертеж решения в системе «Компас-3D» представлен на рис. 5, а.

Для передачи в систему проверки сформировано описание следующего вида (показаны фрагменты):

$T4294967331 = \text{Text}(x=25.19512007419307, y=267.23920236796960, \text{width}=101.70019531250000, \text{height}=35.67906951904297, \text{angle}=0, \text{mirror}=0, \text{content}=\text{"ASCII\#001\r\nЗадание. По данным размерам построить\r\nчертеж треугольни..."})$

$T4294967320 = \text{Text}(x=63.69026738388821, y=186.65682389420499, \text{width}=7.56854152679443, \text{height}=8.35843849182129, \text{angle}=0, \text{mirror}=0, \text{text}=\text{"A\$m;2\$"})$...

$S4294967297 = \text{Segment}(ax=151.76421064830959, ay=115.24344890420329, bx=129.76421064830959, by=85.24344890420335, \text{style}=\text{solid})$

$C4294967310 = \text{Circle}(x=69.76421064830964, y=192.10099883548799, \text{radius}=1.0, \text{style}=\text{thin})$...

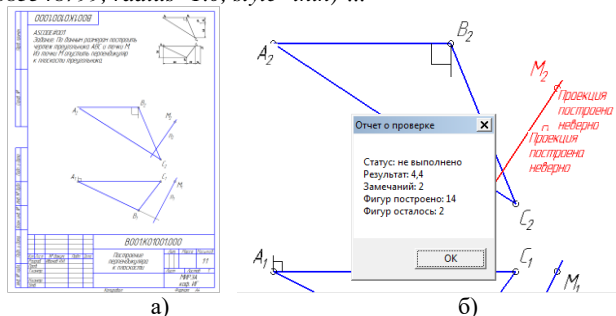


Рис. 5. Пример чертежа с решением задачи и результаты проверки

Существенная информация (геометрические параметры объектов, стиль линий, содержание текстовых полей и др.) представлена полностью; КГМ восстанавливается модулем обмена и выполняется ее проверка, как показано в [4].

6. Обработка результатов проверки

Интернет-запрос, выполняющий отправку данных при помощи Интернет-протокола (например, *HTTP*), также возвращает и результат в виде обыкновенного текста. Будем использовать строки-предложения вида:

идентификатор=значение

Такой формат позволяет передавать и общие результаты проверки (в качестве идентификаторов выступают показатели проверки – оценка, число ошибок, мера), и сведения об ошибках (в качестве идентификаторов выступают ключи, а в качестве значений сообщения об ошибке).

Полученный в виде текста отчет о проверке обрабатывается следующим образом (рис. 6).



Рис. 6. Алгоритм обработки отчета о проверке

Если в очередной строке отчета содержится показатель проверки, он добавляется в строку отчета, которая, по окончании выводится в диалоговом окне (рис. 5, б). Если в строке

отчета содержится ключ фигуры и сообщение об ошибке, то создается текстовый элемент с сообщением, а фигура перемещается в специальный слой ошибок (рис. 5, б сообщения об ошибках размещены поверх соответствующих фигур).

7. Основные результаты

Была разработана модель внедрения средств компьютерной проверки решений КЗ в CAD-систему на примере «Компас-3D», особенностью подхода является использование существующей системы компьютерной проверки, размещенной на сервере в сети Интернет или локальной сети. Были созданы подпрограммы на языке *Delphi*, которые позволяют переслать решение в проверяющую систему, получить и отобразить в среде CAD-системы результаты проверки.

Работоспособность подпрограмм была успешно опробована на ряде задач курса начертательной геометрии из раздела «Точка, прямая, плоскость».

Планируется создание *DLL*-библиотеки для внедрения созданных подпрограмм в среду CAD-системы «Компас-3D» в качестве команды проверки. Дальнейшее изучение возможностей *API* системы позволит осуществлять компьютерную проверку других классов задач, в частности, связанных с пересечением поверхностей и др.

8. Литература

- [1] Бойков А.А. Анализ подходов к созданию системы компьютерной проверки решений конструктивных задач инженерной геометрии // Надежность и долговечность машин и механизмов. Сб. материалов IX Всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – С. 400–403.
- [2] Бойков А. А., Федотов А. М. Обзор компьютерных технологий для проверки и самопроверки решений графических задач // Проблемы координации работы технических вузов в области повышения качества инженерно-графической подготовки студентов: материалы науч.-метод. конф. (с. Дивноморское, 10-16 сентября 2018 г.). – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – С. 171–189.
- [3] Автоматизированное проектирование / В.С. Полозов, О.А. Будаков, С.И. Ротков и др. – М., 1983. – 280 с.
- [4] Бойков А.А., Федотов А.М. Автоматическая проверка решений задач инженерной геометрии // ГРАФИКОН'2016 Труды 26-й Международной научной конференции. – Москва-Протвино, 2016. – С. 352–356.
- [5] Роджерсон Д. Основы COM 2000. Библиотека программиста. – М., 2000. – 400 с.
- [6] Троицкий Д. И. Создание САПР на базе Компас-3D: Методические указания для выполнения лабораторных работ / Д.И. Троицкий. – Тула: ТулГУ, 2007. – 20 с.
- [7] Норсеев С. А. Разработка приложений под Компас в *Delphi* [Электронный ресурс]. – URL: <http://norseev.ru/books/kompas-delphi-2013/> (дата обращения: 10.04.2019).
- [8] Справочная система КОМПАС-МАСТЕР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: входит в состав системы «Компас-3D», файл SDK/SDK.chm. – Загл. с экрана.

Об авторах

Федотов Александр Михайлович, к.т.н., доцент кафедры конструирования и графики Ивановского государственного энергетического университета. E-mail fam1950@bk.ru.

Бойков Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры Инженерной графики Российского технологического университета МИРЭА. E-mail alborphx@mail.ru.

Применение систем автоматизированного проектирования и аддитивных технологий в восстановительной хирургии

В.В. Внук¹, Е.В. Ипполитов¹, М.М. Новиков¹, С.А. Черобыло¹
 vnuk@shatura.laser.ru | ippevg@yandex.ru | novikov@rambler.ru | Svetlana.cherebylo@rambler.ru

¹Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –
 филиал Федерального государственного учреждения
 «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника»
 Российской академии наук», г.Шатура, Московская обл., РФ

В данной работе обобщен опыт использования современных методов лучевой диагностики в сочетании с компьютерными и телекоммуникационными технологиями при планировании реконструктивно-восстановительных операций в нейрохирургической и челюстно-лицевой практике. Современная медицина не стоит на месте, она постоянно развивается и совершенствуется. Благодаря появлению высокотехнологической медицины сегодня, возможно, проводить сложнейшие хирургические операции и дать человеку, столкнувшемуся с серьезными нарушениями, продолжить достаточно качественную и полноценную жизнь. Создание цифровой модели, используя данные конкретного пациента, применение компьютерного моделирования и аддитивных технологий стало настоящим прорывом во многих направлениях хирургии. На сегодняшний день такой подход при планировании реконструктивно-восстановительных операций уже прошел апробацию во многих медицинских учреждениях и вносит значительный вклад в развитие современной медицины.

Ключевые слова: спиральная компьютерная томография, цифровая модель, компьютерное моделирование, CAS-технологии, аддитивные технологии, лазерная стереолитография, восстановительная хирургия.

Application of computer-aided design systems and additive technologies in reconstructive surgery

S A Cherebylo¹, E V Ippolitov¹, M M Novikov¹, S V Vnuk¹
 vnuk@shatura.laser.ru | ippevg@yandex.ru | novikov@rambler.ru | Svetlana.cherebylo@rambler.ru

¹Institute on Laser and Information Technologies – Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences, Svyatoozerskaya 1, 140700 Shatura, Moscow Region, Russia

This work summarizes the experience of using modern methods of radiation diagnostics in combination with computer and telecommunication technologies in planning reconstructive operations in neurosurgical and maxillofacial practice. Modern medicine does not stand still, it is constantly developing and improving. Thanks to the emergence of high-tech medicine today, it is possible to carry out complex surgical operations and to give a person who has faced serious injury, to continue a fairly high-quality and full life. The creation of a digital model and the use of computer simulation using the data of a particular patient, was a real breakthrough in medicine, because this technology is very quickly found its practical use in many areas of surgery. To date, this approach in the planning of reconstructive surgery has already been tested in many medical institutions and makes a significant contribution to the development of modern medicine.

Keywords: Spiral computed tomography, digital model, computer modeling, computer-aided surgery (CAS), additive technology, laser stereolithography, reconstructive surgery.

1. Введение

Широкое внедрение нового поколения спиральных компьютерных томографов значительно расширило возможности использования этой технологии в реконструктивной хирургии [8]. Специализированное программное обеспечение позволяет оперативно производить обработку томографических данных и создавать цифровые трехмерные модели любого дефекта и деформации черепа, проводит моделирование имплантатов, максимально соответствующих области повреждения, для проведения реконструктивных операций.

Цифровые модели все активнее используются при подготовке и планировании оперативного вмешательства в челюстно-лицевой хирургии, хирургии шеи и позвоночника, торакальной хирургии, ортопедии и нейрохирургии [9]. Качество изображения, получаемого в компьютерной томографии, определяется пятью основными факторами: пространственным разрешением, контрастностью, шумом и пространственной однородностью, линейностью и наличием артефактов [10]. Основное влияние на точность

цифровой модели оказывают артефакты и шумы томографических изображений.

Шум и пространственная однородность - различные КТ-числа для ткани с однородной плотностью, вызванные недостатками прохождения фотонов через ткань. В зависимости от источника возникновения, шум разделяют на квантовый (результат ограничения фотонов, достигающих датчиков), электронный (вызванный электрическим взаимодействием в самой системе), вычислительный (приближения, используемые в процессе измерения) и лучевой (вызванный рассеиванием излучения).

Артефактами изображений в компьютерной томографии называют любое несоответствие между КТ-числами реконструированного изображения и истинными коэффициентами ослабления объекта. Артефакты могут проявляться в виде полос (ошибка в отдельном измерении), затемнений (постепенное отклонение группы каналов), колец (ошибки калибровки отдельного детектора), искажений (спиральная реконструкция). Довольно часто в исследуемой области присутствуют объекты с высокой плотностью, например, сделанные из металла, что вызывает на изображении появление артефактов в виде полос.

Движение пациента также дает артефакты в виде полос или размывания изображения.

Все отмеченные проблемы, связанные с получением высокоинформативных данных в компьютерной томографии требует применения специальных программ для обработки полутоновых изображений перед преобразованием их в компьютерные модели, соответствующих реальным биологическим объектам.

2. Обработка томограмм при челюстных дефектах

При травмах челюстно-лицевой области достаточно часто встречаются случаи, когда человек получивший повреждения проходит не один этап хирургического лечения и уже имеет установленные металлические конструкции, которые при рентгеновском исследовании дают на изображениях «блики» и «засветы» в виде полос, искажающие реальную структуру костной ткани.

Подобная картина получается при наличии на зубах металлических коронок либо брекетов, что ухудшает качество и точность цифровой модели для планировании хирургической операции (рис.1).

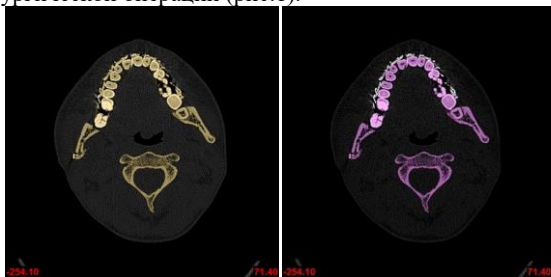


Рис.1. Аксиальные срезы зубного ряда с брекетами до и после редактирования.

Результаты такой обработки представлены на компьютерных моделях (рис.2).

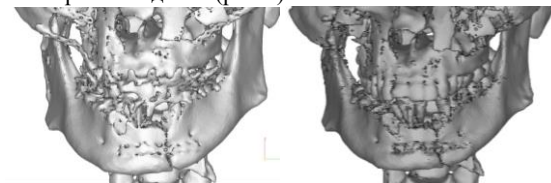


Рис.2. 3D модели до и после редактирования.

В настоящее время специализированные программы обработки томографических данных не обладают автоматической системой распознавания таких дефектов изображения. Удаление артефактов от объектов повышенной плотности происходит их стиранием на изображении, используя графический редактор программы. При этом приходится в ручном режиме последовательно обрабатывать десятки томограмм.

3. Обработка томограмм при краниопластике

Дополнительно обрабатывать данные КТ приходится и для планирования операции при пластике дефекта черепа. Краниопластика – очень распространенная операция в настоящее время. Она проводится для реконструкции костей черепа после декомпрессионной трепанации черепа или после получения механической травмы. Основная задача данной операции – это закрытие дефекта черепа биоимплантатом. Но возникают случаи, когда пациенту необходимо удалить ранее установленный имплантат, а уже потом смоделировать новый, более точный имплантат. Для этого производится виртуальное удаление старого имплантата на томографических изображениях (рис.3).

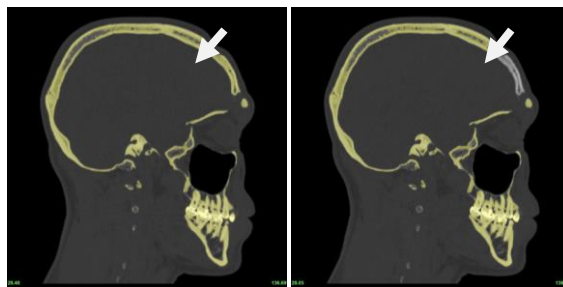


Рис.3. Сагиттальный срез КТ до и после виртуального удаления имплантата.

После получения компьютерной модели без имплантата (рис.6) также виртуально, без участия пациента проводится компьютерное моделирование нового имплантата (рис.7).

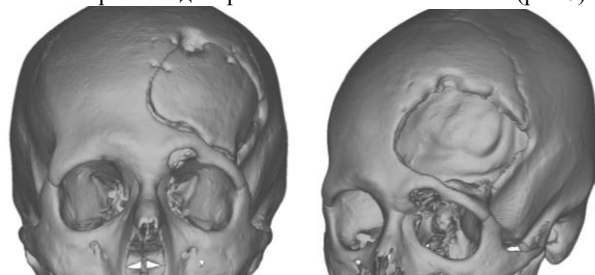


Рис.4. 3D модель черепа до и после редактирования.

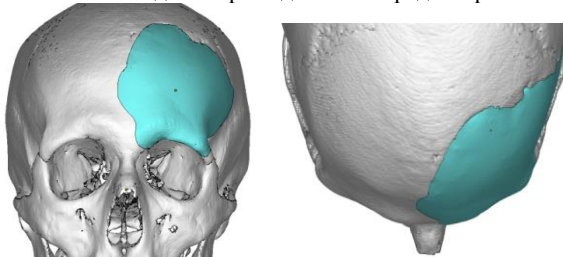


Рис.5. Моделирование шаблона имплантата.

Это позволяет заменить две сложных хирургических операций сначала по удалению старого имплантата, а потом установки нового, а сделать все в одном операционном процессе. Такой подход не только уменьшает стоимость и время операций, но значительно способствует быстрому восстановлению пациента за счет уменьшения времени, проведенным под наркозом и снижению объема хирургического вмешательства.

4. Обработка томограмм при дефектах скулоглазничного комплекса

Переломы скулоглазничного комплекса очень распространенная травма в челюстно-лицевой хирургии. Для более детального изучения клинической картины, а также планирования хирургического лечения необходимо использование 3D моделирования.

Анализируя визуализацию данных КТ, мы часто видим картину, что латеральная, медиальная стенки глазницы имеют прерывистую структуру кости или можно сказать, что получаем «ложные дыры», что не позволяет увидеть на модели точные границы дефекта. Это связано с тем, что сами кости глазничной области имеют от природы незначительные толщины (менее 1 мм), а при стандартном прохождении КТ исследования разрешения томографа не хватает, чтобы отсканировать кость в полном объеме.

Современное программное обеспечение позволяет не только визуализировать данные КТ «в автоматическом режиме», но и дает возможность редактировать каждое изображение во всех проекциях. Для решения данной задачи необходимо доработать каждый срез вручную тем самым восстановить точную анатомическую картину (рис.6).

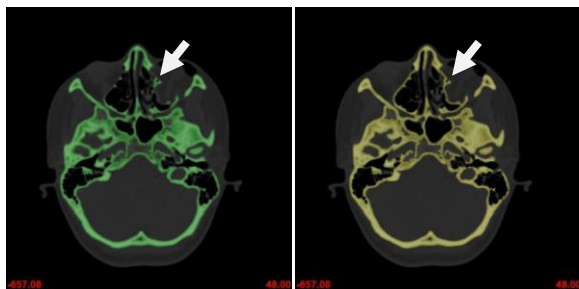


Рис.6. Редактирование КТ изображения стенки глазницы.

На компьютерной модели, полученной после дополнительной обработки томограмм четко видна область дефекта, что позволяет провести точное моделирование замещающего имплантата (рис.7).

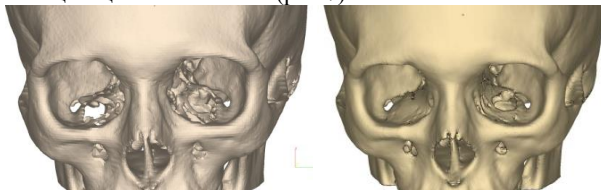


Рис.7. 3D модели стенок глазниц до и после редактирования томограмм.

Предварительная обработка изображение и восстановление информации позволяет смоделировать имплантат требуемой геометрической формы. Высокое соответствие имплантата зоне дефекта уменьшает вероятность развития воспалительных процессов, способствует ускоренному заживлению, повышает эффективность восстановления пациента.

5. Преобразование графических данных томографических обследований в трехмерные цифровые модели

Следующим шагом является преобразование обработанных результатов обследования пациентов на компьютерных томографах в трехмерную компьютерную модель. Для восстановления сложной геометрии костных дефектов с высокой точностью требуют использования сканирования с толщиной среза менее 0.5 мм.

Результаты КТ данных в формате DICOM [4] по электронной сети пересылаются в ИПЛИТ РАН. Опыт изготовления моделей по томографическим данным [5] показал, что объект исследования (например, череп человека) – достаточно сложное образование с большим количеством внутренних полостей и состоящее из биологических тканей разной плотностью. В то же время трехмерная твердотельная модель воспроизводит объект только одной плотности, поэтому очень важно выбрать пороговое значение плотности отсечки (определенное значение яркости на томограмме), которое определяет, что все участки данной плотности и выше становятся твердым телом, а участки пониженной плотности отсекаются. Томограммы содержат большой объем информации (типичный результат томографического исследования – 100-500 томограмм), стратификация, которой позволяет по результату одного исследования пациента построить несколько разных компьютерных моделей, например, черепа или головы с кожным покровом в целом (рис.8).

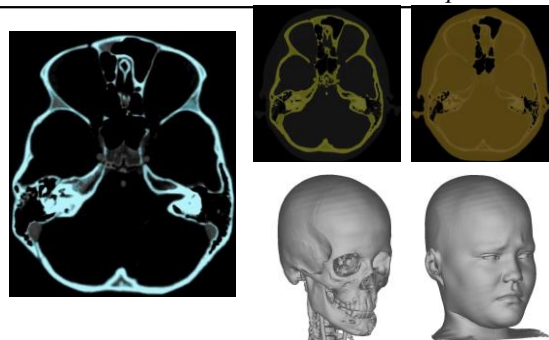


Рис.8. Один из срезов исследования КТ и примеры цифровых моделей при задании разных значений плотности отсечки.

6. CAS технологии

Разработка CAS технологий была начата в середине 1990-х годов и связана с развитием высокоинформационных методов диагностики (компьютерная и магниторезонансная томография), систем компьютерного моделирования и аддитивных технологий. В настоящее время эти технологии широко используются в современной медицине [2,3]. Первоначально они назывались Image Guided Surgery технологиями, а затем Computer Aided или Assisted Surgery – CAS технологиями. Внедрение CAS-систем позволяет добиться значительного повышения эффективности работы хирурга за счет учета индивидуальных особенностей пациента, оптимизации операционного процесса и минимизации хирургического вмешательства.

Задачу автоматизированного сопровождения работы хирурга во многих случаях можно рассматривать как техническую задачу и использовать для ее решения эффективные и проверенные технологии компьютерного моделирования, CAD/CAE/CAM системы. В настоящее время такой подход реализуется с помощью специальных технологий подготовки хирургического вмешательства, включая диагностику, а также предоперационное планирование и интраоперационное сопровождение. Это позволяет повысить уровень безопасности пациента и снизить риск послеоперационных осложнений [8]. Подготовка оперативного вмешательства с использованием CAS технологий проводится хирургами совместно с высококвалифицированными техническими специалистами, использующими различные прикладные программные системы CAD/CAM и аддитивные технологии для изготовления шаблонов, оснастки и имплантатов.

CAS системы предназначены для повышения эффективности работы хирурга и минимизации хирургического вмешательства [7]. Это достигается путем решения следующих задач:

- трехмерная визуализация данных компьютерной томографии;
- построение трехмерной геометрической модели на основе этих данных;
- предоперационное планирование;
- компьютерное моделирование по индивидуальной трехмерной модели пациента;
- изготовление индивидуальной биомодели пациента;
- изготовление прецизионных имплантатов и шаблонов для операции
- интраоперационное сопровождение.

В ИПЛИТ РАН были успешно решены эти задачи для ряда сложных хирургических операций.

7. Аддитивные технологии в хирургии

В ИПЛИТ РАН разработана и успешно применяется лазерная стереолитография - одна из первых аддитивных технологий, основанная на лазерной полимеризации жидких фотополимерных композиций [5].

В ИПЛИТ РАН лазерная стереолитография для медицины была впервые применена в 1994 г. в рамках проведения судебно-медицинской экспертизы по идентификации, найденных под Екатеринбургом останков царской семьи, которая проводилась Центром судебно-медицинской экспертизы Минздрава РФ. Впервые в России по данным компьютерного томографа методом лазерной стереолитографии была изготовлена пластиковая копия человеческого черепа с точностью, пригодной для проведения судебно-медицинской экспертизы [1].

Спиральный компьютерный томограф позволяет провести сканирование всего черепа всего за несколько минут. Для восстановления сложной геометрии костных дефектов черепа с высокой точностью требуют использования сканирования с толщиной среза менее 0.5 мм. Программное обеспечение, реализованное на быстродействующих компьютерных системах, позволяет оперативно производить обработку полученных данных и создавать трехмерные модели любого дефекта и деформации черепа, проводит моделирование имплантатов, максимально соответствующих области повреждения, до проведения реконструктивных операций. А современные методы аддитивного производства трехмерных объектов, в частности - лазерная стереолитография, позволяет изготавливать пластиковые копии любых фрагментов костного скелета человека. Изготовление медицинских имплантатов является ярким примером единичного производства, так как каждый имплантат делается для конкретного пациента.

Компьютерное моделирование и лазерная стереолитография позволила сделать значительный шаг в реконструктивной челюстно-лицевой хирургии, как в улучшении косметического, так функционального результатов оперативных вмешательств [2].

Разработанные методы обработки томографических данных позволяют построить на их основе компьютерные трехмерные модели высокой степени точности для использования в восстановительной хирургии и планировании особо сложных операций. Совместно с Главным клиническим военным госпиталем им. Н.Н. Бурденко г. Москва, хирург Терещук С.В. было впервые в декабре 2007 года проведено предварительное планирование сложной хирургической операции по аутоотрансплантации и восстановлению функциональности ротового аппарата после резекции злокачественной опухоли нижней челюсти. Цель исследования — снижение сроков реабилитации больных злокачественными новообразованиями челюстно-лицевой области путем устранения дефекта нижней челюсти после ее резекции методом аутоотрансплантации.

Первичные реконструктивные вмешательства являются приоритетным направлением хирургического лечения, т. к. они позволяют достаточно быстро восстановить жизненно важные функции в послеоперационном периоде и сократить сроки реабилитации пациентов [6].

8. Заключение

В докладе приведены результаты работы ИПЛИТ РАН по обработке данных обследования на компьютерном томографе и получения точных цифровых биомоделей требуемых зон для подготовки и планирования сложных операций в восстановительной хирургии. Применение

компьютерной томографии, компьютерного моделирования позволяет хирургам планировать в деталях операционный процесс, уменьшить фактическое время операции (что особенно важно для детей), увеличить качество операции и, как следствие, уменьшить период восстановления.

9. Благодарности

Данная работа сделана при финансовой поддержке РФФИ (Грант МК № 18-29-03238). Работа по лазерной стереолитографии выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (Государственное задание ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН).

10. Литература

- [1] Абрамов С.С., Болдырев Н.И., Евсеев А.В., Коцюба Е.В., Новиков М.М., Панченко В.Я., Семешин Н.М., Якунин В.П. // Судебно-медицинская экспертиза. 1998. № 41 (3). С. 13.
- [2] Евсеев А.В., Ипполитов Е.В., Новиков М.М., Черыбыло С.А. Применение лазерной стереолитографии в медицине в монографии «Современные лазерно-информационные технологии», под ред. В.Я. Панченко и Ф.В. Лебедева, М.: Интерконтакт Наука, 2015, стр.358-373.
- [3] Жук Д.М., Перфильев С.А. CAS системы - системы автоматизированного проектирования в хирургии. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – М, электронный журнал, №3 март 2011 г., С.12. <http://technomag.edu.ru>.
- [4] Кравчук А., Потапов А., Корниенко В., Панченко В., Евсеев А., Шурхай В., Биттиров А. «Поиск оптимальных материалов и технологий изготовления имплантов при реконструктивной хирургии посттравматических дефектов и деформаций черепа», Российская нейрохирургия, № 2 (17), 2006 г.
- [5] Хофер М. Компьютерная томография. Базовое руководство. М.: Мед.лит., 2008, С.224.
- [6] Antony A, Chen W, Kolokythas A, Weimer K, Cohen M. Use of virtual surgery and stereolithography-guided osteotomy for mandibular reconstruction with the free fibula. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery* 2011;128(5):1080-1084.
- [7] Guang-Ye Wang, Wen-Jun Huang, Qi Song, Yun-Tian Qin & Jin-Feng Liang (2016) Computer-assisted virtual preoperative planning in orthopedic surgery for acetabular fractures based on actual computed tomography data, *Computer Assisted Surgery*, 21:1, 160-165.
- [8] Rodby K, Turin S et al. Advances in Oncologic Head and Neck Reconstruction: Systemic Review and Future Considerations of Virtual Surgical Planning and Computer Aided Design / Computer Aided Modeling. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery* 2014 Sep; 67(9):1171-1185.
- [9] "Computer Assisted Surgery. Precision Technology for Improved Patient Care", March 22, 2004, <http://www.advamed.org/newsroom/caswhitepaper.pdf>.
- [10] Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, USA. <http://medical.nema.org/standard.html>

Об авторах

Новиков Михаил Михайлович, заведующий лабораторией ЛСОИ, ИПЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, тел.: (49645) 22200 доб.459. novikov@rambler.ru

Черобыло Светлана Александровна, научный сотрудник ИППЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, тел.: (49645) 22200 доб.151. Svetlana.cherebylo@rambler.ru.

Внук Вячеслав Владимирович, младший научный сотрудник ИППЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, тел.: (49645) 22200 доб.151, vnuk@shatura.laser.ru

Ипполитов Евгений Викторович, младший научный сотрудник ИППЛИТ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ул. Святоозерская, д. 1, г. Шатура, Московская область, РФ, ippevg@yandex.ru тел.: (49645) 22200 доб.151.

Квазифокальные линии

А. Т. Дворецкий¹, Т.В. Денисова¹

erces_crimea@mail.ru | smorodina82@mail.ru

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

В статье доказано, что наибольшая концентрация отражённых лучей от поверхности отражателя располагается вдоль квазифокальной линии. Квазифокальная линия принадлежит поверхности каустики конгруэнции отражённых лучей. Параметры формы и положения квазифокальных линий описаны уравнениями. Представлена компьютерная визуализация отражающих поверхностей, конгруэнции отражённых лучей и их каустики, квазифокальные линии и карты изолиний локальных концентраций на поверхности приёмника отражённых лучей.

Ключевые слова: квазифокальная линия, конгруэнция отражённых лучей, поверхность каустики, карта изолиний локальных концентраций.

Quasifocal Lines

A.T. Dvoretzky¹, T.V. Denisova¹

erces_crimea@mail.ru | smorodina82@mail.ru

¹The Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia

The article proved that the highest concentration of reflected rays from the surface of the reflector is located along the quasifocal line. The quasifocal line belongs to the caustic surface of the congruence of reflected rays. The parameters of the shape and position of the quasifocal lines are described by equations. Computer visualization of reflecting surfaces, congruences of reflected rays and their caustics, quasifocal lines and maps of isolines of local concentrations on the surface of the receiver of reflected rays are presented.

Keywords: quasifocal line, congruence of reflected rays, caustic surface, map of isolines of local concentrations.

1. Введение

Особое значение для практических задач преобразования солнечной энергии в тепло и электричество имеет определение параметров зоны наибольшей концентрации конгруэнции отражённых лучей. Огибающей однопараметрического семейства отражённых лучей от плоской кривой является плоская каустика (рис. 1), которую называют «горячей кривой» [1,5] Огибающей конгруэнции отражённых лучей [4,6] является поверхность каустики. На рисунке 2 изображена поверхность каустики для отражающего прямого кругового цилиндра.

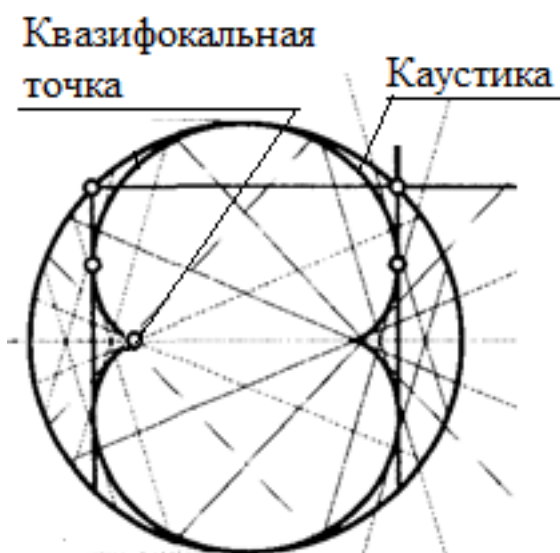


Рис.1. Каустика окружности

Можно предположить, что такой зоной является каустика плоская и пространственная. Однако есть основание считать, что зоной наибольшей концентрации

конгруэнции отражённых лучей является квазифокальная линия.

Говорить о максимальной концентрации лучей конгруэнции на поверхности каустики не корректно. Линией максимальной концентрации для конгруэнции отражённых лучей является квазифокальная линия [5]. Примером может служить солнечная установка с концентратором в виде цилиндра (рис.3).



Рис. 2. Поверхность каустики и квазифокальная линия цилиндрического отражателя

2. Квазифокальная линия цилиндрического концентратора

Для цилиндрических поверхностей величину концентрации определяет кривизна нормального сечения цилиндра. Вдоль прямолинейных образующих кривизна равна нулю. Квазифокальная линия есть прямая, параллельная образующим цилиндра (Рис. 4)

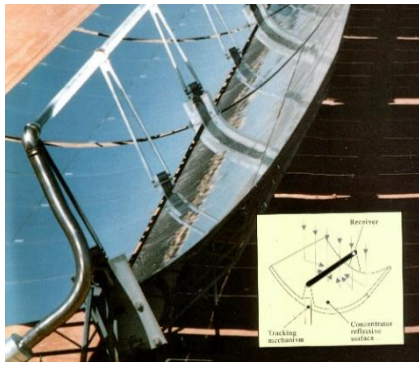


Рис.3. Цилиндрическая солнечная установка

Утверждение. Квазифокальная линия при отражении от прямого кругового цилиндра есть прямая f , параллельная оси цилиндра и удаленная от центра сферы на расстояние равное половине радиуса цилиндра.

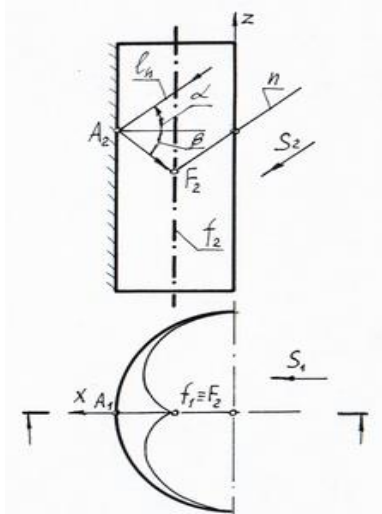


Рис. 4. Квазифокальная линия цилиндрического отражателя

Все отраженные от цилиндра лучи касаются фокальной поверхности. Эта поверхность есть прямой цилиндр с направляющей в виде эллипсиса окружности нормального сечения цилиндра.

Уравнение фокального цилиндра в параметрическом виде следующее:

$$\begin{aligned} x &= \cos \theta - \frac{1}{2} \cos \theta \cdot \cos 2\theta \\ y &= \sin \theta - \frac{1}{2} \cos \theta \cdot \sin 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

Точка возврата эллипсиса есть квазифокальная точка нормального сечения прямого кругового цилиндра.

Квазифокальная прямая состоит из квазифокальных точек и расположена параллельно оси отражающего цилиндра на расстоянии равном половине радиуса. В связи с этим, цилиндрический приемник в солнечных коллекторах с цилиндрическим концентратором совпадает с квазифокальной линией (рис. 3).

3. Квазифокальная линия тороидального концентратора

Представим, что прямой круговой цилиндр изгибается в тор. При этом сеть линий кривизн изменится следующим образом. Окружности нормального сечения цилиндра преобразуются в конгруэнтные окружности меридиан

тора, а прямолинейные образующие цилиндра преобразуются в параллели тора.

Рассмотрим поверхность тора в качестве отражателя, когда лучи падают параллельно его оси. Модель такого отражателя, а также поток отраженных лучей представлены на рисунке 5. Для определения формы и положения приёмника концентрирующей системы с отражателем в виде тора [3] получено аналитическое описание квазифокальной линии (2) при переменном угле падения солнечных лучей:

$$\begin{aligned} x &= \frac{-r \cdot \cos(t) \cdot (\cos(t) + \sin(t) \cdot \operatorname{tg}(t)) \cdot \sin(\operatorname{arctg}(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\pi-t)}))}{2 \cdot \cos(\pi-t) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(t)}} + R \cdot \cos(t), \\ y &= R \cdot \sin(t), \\ z &= \frac{r \cdot (\cos(t) + \sin(t) \cdot \operatorname{tg}(t)) \cdot \sin(\operatorname{arctg}(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\pi-t)}))}{2 \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(t)}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где α – угол падения лучей относительно плоскости миделя концентратора, R – радиус линии центров тора, r – радиус образующей окружности.

При изменении угла падения лучей, допустим, на $\alpha = 30^\circ$ относительно оси Oz можем наблюдать изменение формы и положения квазифокальной линии (рис. 5).

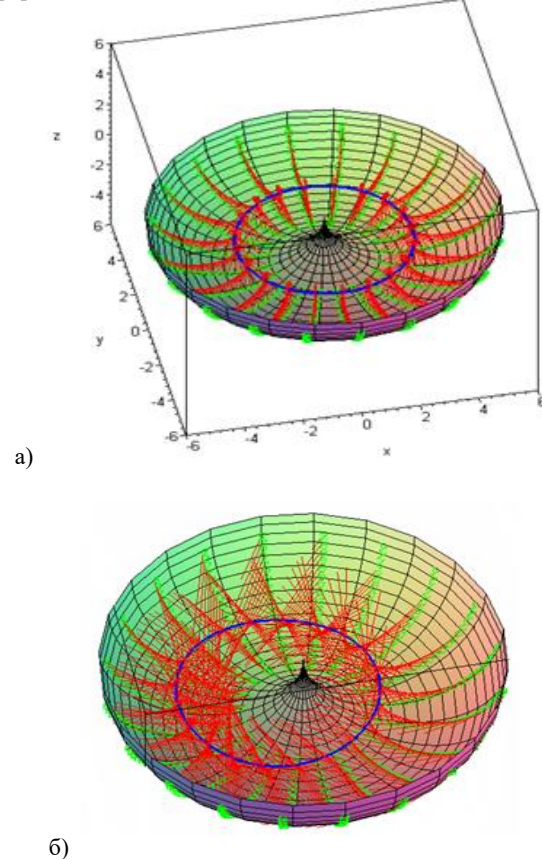


Рис. 5. Компьютерная модель тороидального отражателя и квазифокальной линии: а) $\alpha = 0^\circ$; б) $\alpha = 30^\circ$

3. Степень локальной концентрации

Распределение температуры по поверхности приёмника соответствует степени локальной концентрации падающего на приёмник отражённого потока и дает нам возможность определять точки высоких температур, в которых возникают напряжения, что может повредить приёмник.

Эффективность концентрирующей системы зависит от формы и параметров положения приемника. Теория квазифокальных линий дает нам возможность определить зоны максимальной концентрации энергии и располагать в них приемники с соответствующими параметрами. Компьютерное моделирование дает нам возможность для различных концентрирующих систем получить визуализацию и рассчитать коэффициенты концентрации для разных отражателей и приёмников.

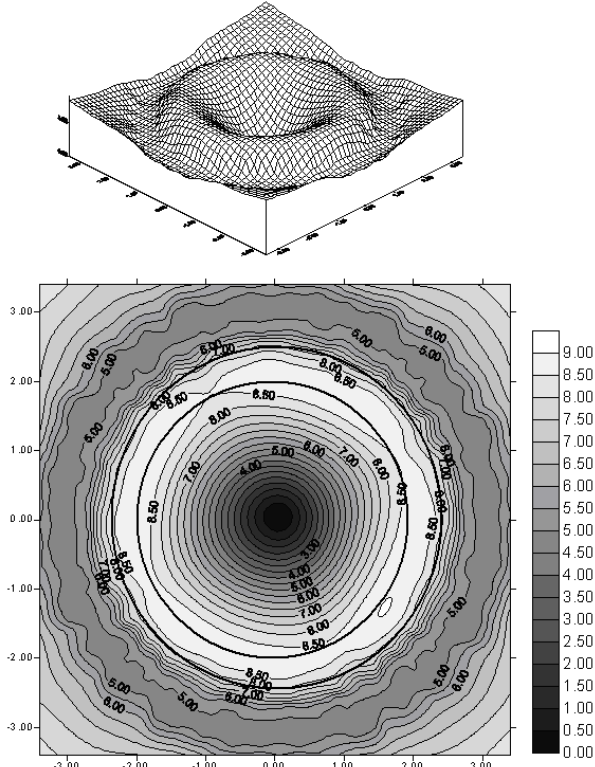


Рис.6. Карта изолиний локальной концентрации на плоском приёмнике тороидального отражателя.

Конгруэнция падающих лучей преобразится в конгруэнцию отражённых лучей, которая имеет разную плотность (рис. 6).

В соответствии с уравнением квазифокальной линии (2) для тороидального отражателя (рис.7) задаётся форма и положение кольцевого приёмника.

По методике, предложенной в статье [7] построена карта изолиний локальных концентраций, характеризующих распределение потока на поверхности приемника.

Рассмотрим поток солнечных лучей, падающих параллельно оси концентратора 1, представляющего собой нижнюю половину открытого отсека тора (рис. 7). После отражения лучи приходят на приемник 2, представляющий собой трубчатую кольцевую поверхность с линией центров, повторяющей квазифокальную линию [2].

5. «Горячая кривая» и квазифокальная линия.

Кривая каустика как «горячая кривая» может быть определена как огибающая однопараметрического множества отражённых лучей от плоской кривой.

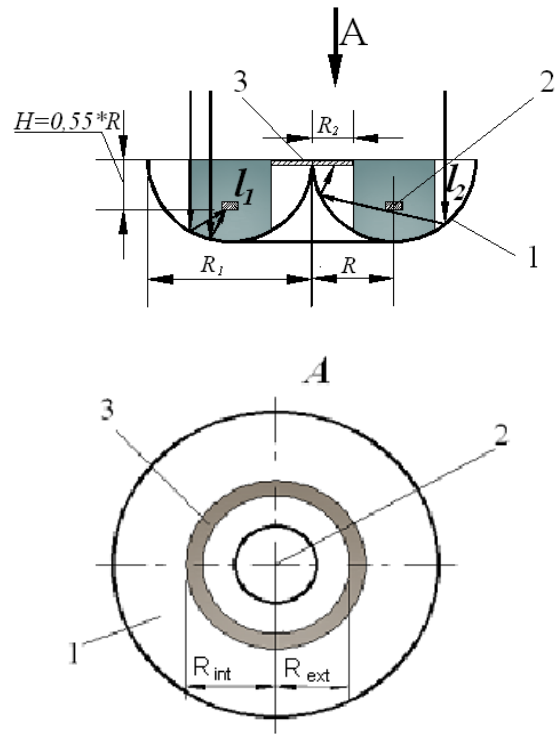


Рис.7. Тороидальный отражатель

Это наблюдается на плоскостях проекций или в плоских сечениях конгруэнции отражённых и преломлённых лучей. Для конгруэнции отражённых лучей зоной наибольшей концентрации является квазифокальная линия. По аналогии с плоской каустикой все лучи конгруэнции отражённых лучей от поверхности отражателя касаются поверхности каустики. Продемонстрировать это можно на примере отражений от параболы и параболоида вращения. На рисунке 8 представлена компьютерная визуализация (программа Maple) отражения от параболы с изображением каустики.

Известно также, что все лучи конгруэнции, отражённые от параболоида вращения, сходятся в точке (фокус) если падающие лучи параллельны оси параболоида.

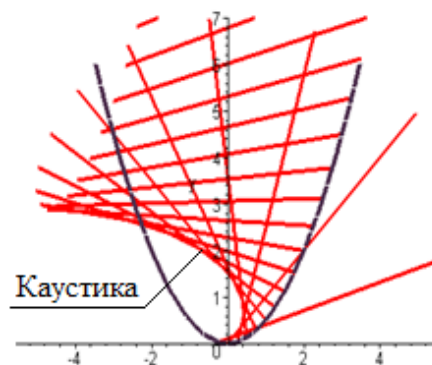


Рис.8. Каустика параболы при направлении падающих лучей 45° к оси параболы

Если падающие лучи не параллельны оси параболоида, то зоной концентрации является квазифокальная линия (рис. 9). Она же хорошо видна на компьютерной визуализации параболоида и отраженных лучей (рис. 10). Угол наклона лучей к оси параболоида 45°. С помощью компьютерной визуализации можно

получить фокальную поверхность конгруэнции отражённых лучей или поверхность каустики для отражающего параболоида (рис. 11).

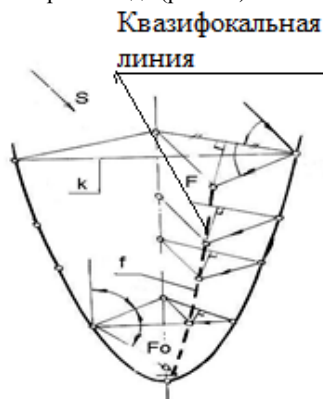


Рис. 9. Квазифокальная линия параболоида вращения

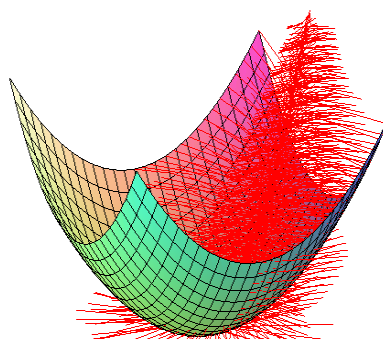


Рис. 10. Конгруэнция отражённых лучей параболоида вращения

6. Заключение

Эффективность концентрирующей системы зависит от формы и параметров положения приемника. Математическая модель квазифокальной линии дает нам возможность определять зоны максимальной концентрации отражённых лучей и положение приемников с соответствующими параметрами.

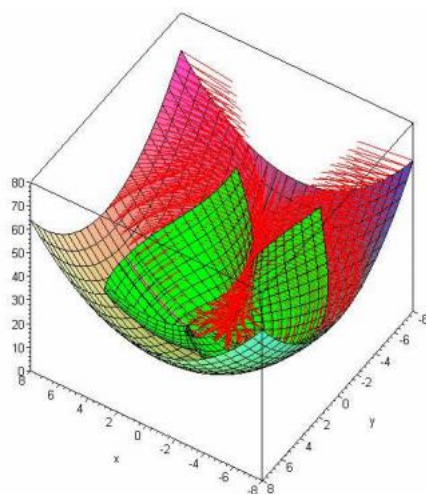


Рис. 11. Поверхность каустики отражённых лучей параболоида вращения

Компьютерное моделирование позволяет убедиться в достоверности результатов математического моделирования и визуально получить конгруэнцию при отражении и рассчитать локальную степень концентрации на приёмнике для концентрирующей системы.

7. Литература

- [1] Брус Дж., Джиблин П. Кривые и особенности: Геометрическое введение в теорию особенностей. Пер. с англ. М. «Мир», 1988. 262с.
- [2] Дворецкий О.Т., Денисова Т.В. Патент на полезную модель №47513 «Солнечная установка с концентратором» зарегистрировано 10.02. 2010.
- [3] Кривошапко С.Н., Иванов В.Н., Халаби С.М. Аналитические поверхности. Москва: Наука, 2006. – 536 стр.
- [4] Підгорний О.Л. Геометричне моделювання надходження сонячної радіації на різні поверхні // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Київ.: КІБІ, 1993.- С.10-13.
- [5] Cayley A. A memoir upon caustics. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. 147:273-312; Collected Works. 1857, Vol. 2. pp. 336-380.
- [6] Dvoretzky A. T. Solar Thermal Concentrating Technologies in Installations with Stationary Concentrators// The XIIth SolarPACES International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems.- Seville, Spain.2006.
- [7] Dvoretzky A.T. Denysova T.V. Quasifocal Line and “Burning Curve” // Proceeding of the 18th International Conference on Geometry and Graphics. Milan, Italy., 2018.- С. 238-251.

Об авторах

Дворецкий Александр Тимофеевич, д.т.н. профессор, заведующий кафедрой Геометрического и компьютерного моделирования энергоэффективных зданий Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. E-mail: erces_crimea@mail.ru

Денисова Татьяна Владимировна, к.т.н., доцент кафедры Геометрического и компьютерного моделирования энергоэффективных зданий Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. E-mail: smorodina82@mail.ru

Распознавание компонент связности в задаче восстановления трехмерной модели по проекционным изображениям

Н.Д. Жилина¹, Т.В. Мошкова¹, С.А. Роменский¹, С.И. Ротков¹, В.А. Тюрина¹

zhilina@nngasu.ru | ng.forever.mtv@gmail.com | romensky.serge@gmail.com | rotkov@nngasu.ru | 55555_73@mail.ru

¹ННГАСУ, г. Нижний Новгород, Россия

В данной статье рассматривается один из способов решения задачи распознавания компонент связности изображений на поле чертеже в проблеме синтеза трехмерной модели. Задача является фрагментом информационной технологии обработки архивов чертежно-конструкторской и технологической документации на бумажных носителях.

Ключевые слова: граф, компоненты связности, проекции, чертеж, каркасная модель.

Recognition of connected components in the problem of restoring a three-dimensional model from projection images

N.D. Zhilina¹, T.V. Moshkova¹, S.A. Romensky¹, S.I. Rotkov¹, V.A. Tyurina¹

zhilina@nngasu.ru | ng.forever.mtv@gmail.com | romensky.serge@gmail.com | rotkov@nngasu.ru | 55555_73@mail.ru

¹NNSAGU, Nizhny Novgorod, Russia

This article describes one of the ways to solve the problem of recognizing the components of the image connectivity in the drawing field in the problem of synthesizing a three-dimensional model. This task is a fragment of the information technology of processing archives of drawing, design and technological documentation on paper.

Keywords: graph, connected component, projections, drawing, wireframe model.

1. Введение

Проблеме синтеза модели 3D объекта по его ортогональным проекциям в последнее время уделяется не так много внимания, однако эта проблема является ключевой при внедрении в промышленность цифровых информационных технологий, таких как PDM, PLM и других. Кроме того, надо учесть и тот факт, что на предприятиях накопились значительные по объему архивы чертежно-конструкторской и технологической документации на бумажных носителях. Без решения задачи ввода данных с чертежа невозможно говорить о полном внедрении упомянутых систем, поскольку вся их работа зависит от полноты и качества введенной в память ЭВМ геометро-графической информации. Наполнение электронных баз данных для PDM и PLM систем может быть произведено различными способами, одним из которых является простейший вариант сканирования чертежа с бумажного носителя и последующее хранение сканированного изображения. Такой вариант мало пригоден для последующего использования в CAD/CAM/CAE системах, требующих данных о геометрических параметрах объектов проектирования и производства. Имеющиеся системы векторизации растровых изображений не в полной мере решают эту задачу, поскольку изначально не были ориентированы на проведение автоматического анализа изображений на поле чертежа и формирование соответствующей базы данных.

В работе [4] формулируется постановка проблемы обработки архивов чертежно-конструкторской и технологической документации, где задача синтеза 3D модели по изображениям на поле чертежа является одним из этапов информационной технологии обработки данных.

В работах [6, 7, 8] приведен аналитический обзор методов синтеза 3D модели, топологического анализа геометрии моделируемого объекта и других аспектов общего решения этой трудно формализуемой задачи, которая может быть определена как обратная задача геометрии и графики [2, 3, 6]. Также в этих работах показано, что программная реализация различных методов и способов синтеза модели 3D объекта зависит от

достоверности введенных данных. Поэтому перед этапом восстановления трехмерной модели объекта по его проекционным изображениям необходимо осуществить этап предобработки имеющейся геометро-графической информации. Необходимость данного этапа обуславливается наличием ошибок во входной информации. Далеко не всегда эти ошибки обуславливаются человеческим фактором, это могут быть повреждения бумажного носителя до этапа сканирования, низкое качество работы сканирующего аппарата, неточности векторизации отсканированного документа, особенности хранения чисел с плавающей запятой (когда в мантиссе возникают неточности в 9-10 знаках) и так далее.

2. Выделение проекционных видов на общем поле чертежа

В соответствии с ГОСТ 2.305-2008 [1] чертеж объекта может состоять из произвольного числа видов, расположенных как на одном, так и на нескольких листах. И в том, и другом случае эти виды должны быть приведены к единой системе координат, на основе которой формируется каркасная модель объекта. Одним из блоков программной реализации алгоритма синтеза является установление и проверка проекционных связей видов между собой [6]. Именно после установления проекционных связей формируется массив 3D координат модели.

Любую проекцию трехмерной модели на плоскость можно представить в виде графа $G(V,R)$, где V - множество вершин, заданных своими координатами, R - множество ребер – линий первого и второго порядка, соединяющих вершины. Структурно сам чертеж также может быть представлен в виде графа $D(F)$, где F – виды или фрагменты изображений объекта, каждый из которых задан в своей системе координат, связанной с системой координат чертежа.

Если на чертеже одновременно размещены несколько проекционных видов, то их можно выделить в компоненты связности этого графа. Применение стандартных подходов к поиску компонент связности (таких как поиск в ширину или глубину, то есть обход всех вершин и ребер графа с фиксацией пройденных вершин) не дадут конечный

результат в виде проекционно связанных видов. В каждой трехмерной модели могут присутствовать отверстия, не связанные с внешней геометрией и они выделяются в отдельные компоненты связности, если использовать, например, поиск в ширину.

В связи с вышеизложенным, в статье предлагается следующий подход к выделению нескольких проекционных видов на чертеже.

При любом способе получения геометро-графической информации, будь то отсканированный чертеж или начерченный в одной из систем автоматизированного проектирования, для всех видов плоских кривых можно выделить область, внутри которой эта кривая помещается. Пусть такой областью у нас будет прямоугольник, назовем его ограничивающим. Для вертикальных и горизонтальных отрезков этот прямоугольник выродится в сам отрезок.

Для каждой компоненты связности тоже запомним ограничивающий прямоугольник, расширяя его при добавлении новых объектов (при необходимости). Проверку же принадлежности объекта будем проводить по принципу: если ограничивающий прямоугольник объекта и ограничивающий прямоугольник компоненты связности имеют общую площадь или вершину или пересекаются их стороны, то объект входит в компоненты связности.

При добавлении объекта в компоненту связности её ограничивающий прямоугольник должен быть переопределен. Примеры различных случаев расположения ограничивающих прямоугольников компоненты и объекта приведены на рис.1.

Более подробная блок-схема процесса выделения проекционных видов представлена на рис.2.

Немного неправильно употреблять термин «компонента связности», так как, строго говоря, объекты внутри выделяемого проекционного вида, могут быть не связаны явно между собой.

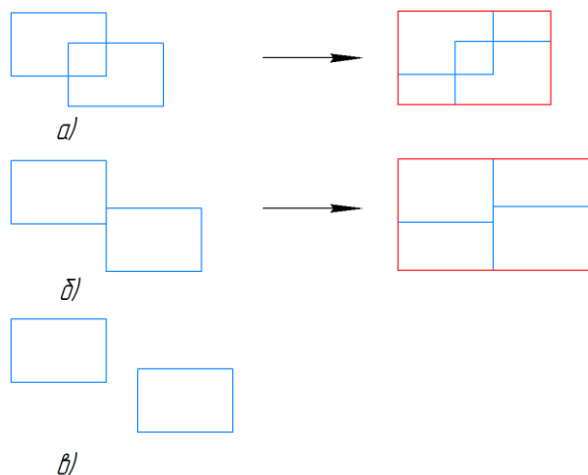


Рис. 1 Различные случаи расположения ограничивающих прямоугольников при определении принадлежности объекта компоненте связности. В случаях а) и б) объект принадлежит компоненте связности и для них определяется новый ограничивающий прямоугольник, показанный красным цветом. В случае в) объект не относится к проверяемой компоненте связности.

При данном подходе для чертежа, содержащего несколько проекционных видов (виды, разрезы, сечения и т.д.) будут выделены в компоненты связности и обработаны все пришедшие в виде входной геометро-графической информации изображения.

3. Практическое применение

Описанный выше способ выделения проекционных видов на чертеже имеет ряд особенностей, позволяющих упростить работу с геометро-графической информацией для последующего ее преобразования в работе алгоритмов восстановления образа объекта по его техническому чертежу.

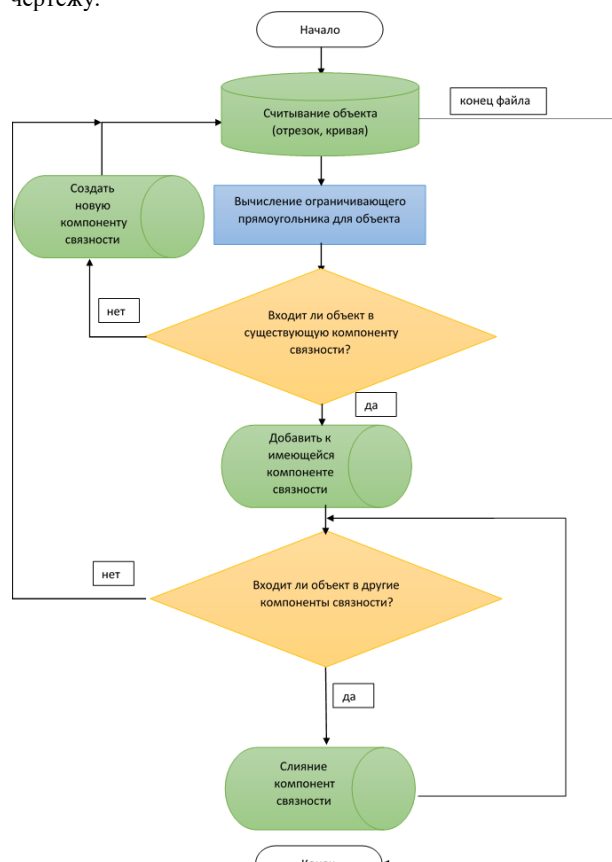


Рис. 2 Блок-схема процесса выделения проекционных видов

Во-первых, удобный способ проверки и восстановления проекционных связей. Сравнив в определенной окрестности ограничивающие прямоугольники выделенных видов, можно выяснить, какие из них имеют (или подразумевают, в случае неточностей входной информации) проекционные связи, а какие являются дополнительными (вынесенные разрезы, сечения и так далее).

Во-вторых, зная ограничивающие прямоугольники для каждого вида, выяснив проекционные связи между ними, можно определять типы проекционных изображений на техническом чертеже (так как согласно ГОСТ 2.305-2008 [1] проекционные виды на чертеже располагаются в определенном порядке).

В-третьих, при работе с геометро-графической информацией, поступающей напрямую из системы автоматизированного проектирования [5] можно получить точки привязки секущих плоскостей для вынесенных разрезов и сечений, считав условные обозначения на чертеже.

4. Заключение

Данный подход позволяет распознавать на поле чертежа все содержащиеся на нем проекционные виды. В число выделяемых попадают как основные, так и дополнительные виды, а также разрезы и сечения.

5. Благодарности

Работа выполнена по грантам РФФИ №17-07-00543 и №19-07-01024

6. Литература

- [1] ГОСТ 2.305-2008 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Изображения - виды, разрезы, сечения (с Поправкой)
- [2] Котов, И.И. Алгоритмы машинной графики / И.И. Котов, В.С. Полозов, Л.В. Широкова. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
- [3] Полозов, В.С. Геометрические и графические задачи: Автоматизированное проектирование / В.С. Полозов, О.А. Будеков, С.И. Ротков, Л.В. Широкова. – М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.
- [4] Роменский С.А., Ротков С.И., Смычѣк М.М., Тюрина В.А. Синтез 3D модели объекта по изображениям на поле чертежа // 26-я Международная конференция (GraphiCon 2016), Нижний Новгород, 19-23 сентября 2016 г.
- [5] Роменский, С.А. Передача геометро-графической информации из системы автоматизированного проектирования в прикладную программу на примере САПР “Компас-График” // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2015): сб. тр.
- [6] Ротков, С.И. Средства геометрического моделирования и компьютерной графики пространственных объектов для CALS-технологий: Дис. докт. техн. наук: 05.01.01 / С.И. Ротков. – Н. Новгород, 1999. – 287 с.
- [7] Т. В. Мошкова, С. И. Ротков, В. А. Тюрина (2018) Проблема синтеза модели 3D объекта по его проекционным изображениям. Аналитический обзор. Научная визуализация 10.1: 135-156, DOI: 10.26583/sv.10.1.11
- [8] Тюрина, В.А. Разработка методов преобразований каркасной модели в задаче синтеза образа 3D-объекта по его проекциям: Дисс. канд. техн. наук: 05.01.01 / В.А. Тюрина. – Н. Новгород, 2003. – 170 с.

Об авторах

Жилина Наталья Дмитриевна, к.п.н., доцент, проф. кафедры инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: zhilina@nngasu.ru.

Мошкова Татьяна Владимировна, к.т.н., доцент, профессор кафедры Инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: ng.forever.mtv@gmail.com.

Роменский Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры Инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: romensky.serge@gmail.com.

Ротков Сергей Игоревич, д.т.н., проф., зав. кафедрой Инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: rotkov@nngasu.ru.

Тюрина Валерия Александровна, к.т.н., доцент, профессор кафедры Инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: 55555_73@mail.ru.

Исследование конических сечений в среде AutoCAD

В.В. Карабчевский¹
karabchevski@mail.ru
¹ДонНТУ, Донецк, ДНР

Рассматривается применение инструментов твердотельного моделирования при создании трехмерных моделей прямого кругового конуса и при исследовании его сечений в среде AutoCAD. Представлены результаты, которые AutoCAD позволяет получить для сечения плоскостями, почти параллельными одной или двум образующим. Найдены граничные значения углов между плоскостью и образующими, определяющие наличие или отсутствие параллельности. Предложены способы получения параметров канонических уравнений кривых, представляющих конические сечения, для случаев, когда соответствующая кривая (гипербола или парабола) моделируется в среде AutoCAD с помощью сплайнов. Описано применение предложенных методов в учебном процессе, позволяющее усилить связь излагаемого при изучении разделов начертательной геометрии материала с освоением способов генерации трехмерных моделей, инструментарием твердотельного моделирования и аналитической геометрии.

Ключевые слова: компьютерная графика, твердотельное моделирование, сечение конуса, каноническое уравнение.

The research of conic sections in AutoCAD environment

V.V. Karabchevsky¹
karabchevski@mail.ru
¹DonNTU, Donetsk, DPR

The application of solid modelling tools is considered when creating three-dimensional models of a straight circular cone and when studying its sections in AutoCAD. The results are presented that AutoCAD allows obtaining for a section by planes almost parallel to one or two generators. The boundary values of the angles between the plane and the generators, which determine the presence or absence of parallelism, are found. Methods are proposed for obtaining the parameters of the canonical equations of curves representing conical sections for cases when the corresponding curve (hyperbola or parabola) is modelled in AutoCAD using splines. The application of the proposed methods in the educational process is described, which makes it possible to strengthen the relationship of what is stated in the study of sections of descriptive geometry of the material with the development of methods for generating three-dimensional models, solid-state modelling tools and analytical geometry.

Keywords: computer graphics, solid modelling, cone section, canonical equation.

1. Введение

Построение сечений поверхностей в среде AutoCAD облегчается в тех случаях, когда существует возможность представить их поверхностями твердых тел. Применение команды section позволяет получить регион, границей которого будут объекты, представляющие сечение, для их извлечения следует применить к региону команду explode [3]. Известно, что, в зависимости от положения секущей плоскости, сечение прямого кругового конуса может представлять собой две образующие, эллипс, гиперболу или параболу [1, 2].

2. Сечение прямого кругового конуса в среде AutoCAD

В случае, когда секущая плоскость проходит через вершину конуса, сечение представляет собой две образующие, результатом применения команд section и explode являются три отрезка – две образующие и линия пересечения секущей плоскости с основанием конуса. Если секущая плоскость пересекает все образующие и параллельна основанию, AutoCAD позволяет получить окружность (объект circle), которую можно рассматривать как эллипс с одинаковыми осями (рис. 1). Средства доступа к свойствам объектов позволяют получить геометрические характеристики отрезков и окружности.

На рис. 2 представлены сечения: плоскостью П1, которая пересекает все образующие и не параллельна основанию – в виде эллипса; плоскостью П2, параллельной образующей SC, – в виде сплайна, который моделирует параболу; плоскостью П3, параллельной двум образующим, SA и SB, – в виде сплайна, который моделирует гиперболу.

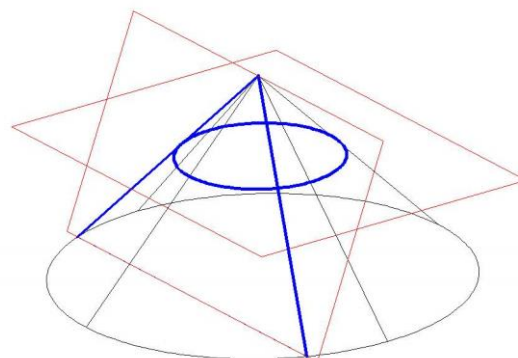


Рис. 1. Сечение конуса плоскостью, проходящей через вершину и плоскостью, параллельной основанию

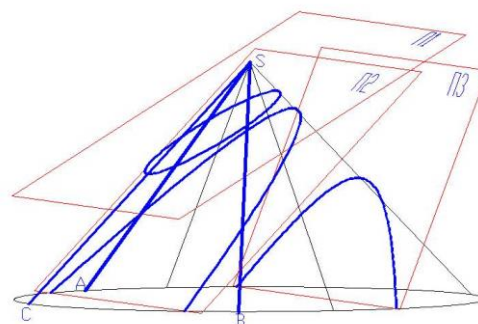


Рис. 2. Сечение конуса плоскостью, не параллельной основанию

При выполнении лабораторных заданий производится построение, соответствующее рисункам 3 и 4. Вначале

задача решается на комплексном чертеже, затем производится поворот одной из плоскостей вокруг оси абсцисс на 90 градусов. После этого генерируется объемная модель, создается твердотельный конус, сечение выполняется с применением команды section [3]. Результат сравнивается с эллипсом, полученным на эюре с применением команды ellipse, использующей концы осей. На рис. 3 он расположен на фронтальной плоскости. Площади и периметры эллипсов должны совпасть, это совпадение является критерием успешности выполнения задания.

Выполнение этого и подобных заданий позволяет студентам закрепить связь между представлением объектов на комплексном чертеже и трехмерным представлением.

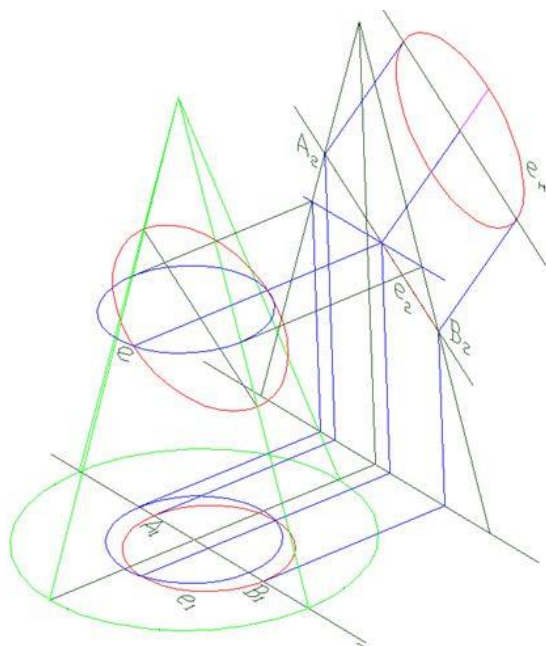


Рис. 3. Сечение на эюре и на поверхности конуса

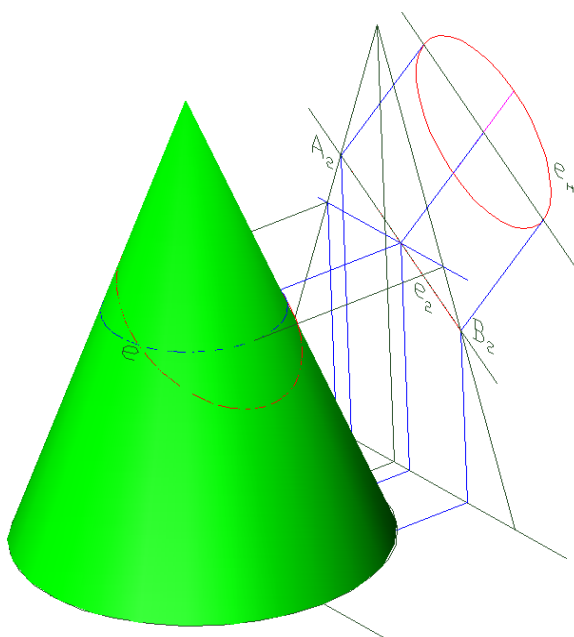


Рис. 4. Сечение на эюре и на поверхности конуса, реалистичный визуальный стиль

Результаты, которые AutoCAD позволяет получить для сечения плоскостями, почти параллельными одной или двум образующим, представляют некоторый интерес. На рис. 5 угол наклона образующей SC к плоскости П5 составляет 0.003 градуса, результат сечения – эллиптическая дуга. На рис. 6 угол наклона образующей SC к плоскости П5 составляет 0.002 градуса, результат сечения – сплайн, моделирующий параболу, хотя должна получиться эллиптическая дуга.

Отсутствие параллельности образующей SC и П5 проиллюстрировано на рисунках 5 и 6 продолжением SC и ее проекции на плоскость П5 до взаимного пересечения с помощью команды fillet. Точка пересечения находится далеко за пределами рисунка. Для рис. 5 длина SC после продолжения составляет 540302 единицы, для рис. 6 – 810397 единиц (высота конуса – 100 единиц). Визуально эллиптическую дугу и сплайн можно отличить, если кривые выбраны. Для эллиптической дуги, которая выбрана на рис. 5, ручки (grips) находятся на концах дуги и на конце оси эллипса, для сплайна, лежащего в плоскости П5, (рис. 6) – в контрольных точках.

Следует также обратить внимание на случай, когда секущая плоскость пересекает все образующие конической поверхности, но твердотельный конус, который ее задает, будет пересекаться через основание. Результатом применения команд section и explode будут эллиптическая дуга в плоскости П5 и отрезок, лежащий в основании конуса и соединяющий концы эллиптической дуги (рис. 5 и рис. 6).

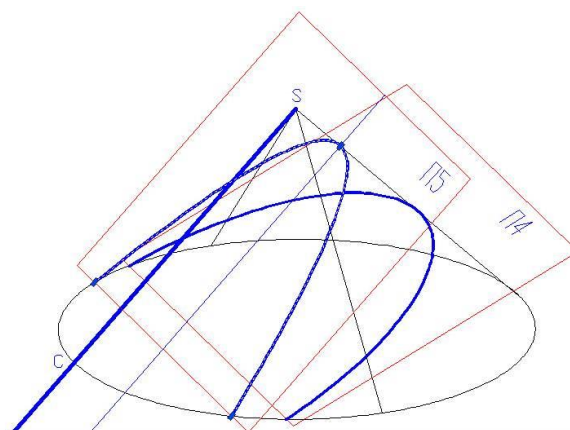


Рис. 5. Сечение в виде эллиптических дуг

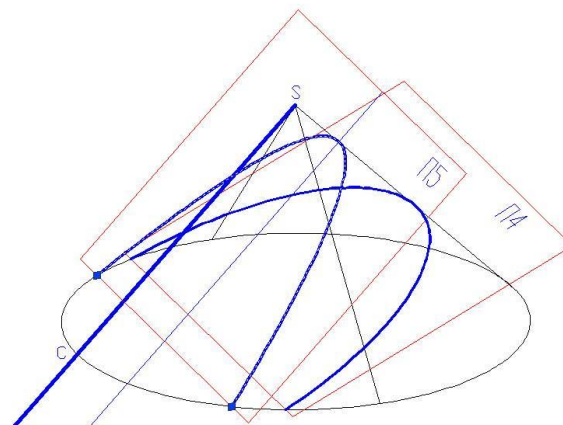


Рис. 6. Сечение в виде эллиптической дуги и сплайна

3. Определение параметров канонических уравнений конических сечений

Параметры канонического уравнения эллипса можно получить из базы данных AutoCAD. Парабола и гипербола смоделированы сплайнами с тремя узловыми точками – первая и последняя являются точками пересечения секущей плоскости с основанием конуса, средняя является вершиной сплайна. Переход к системе координат, горизонтальная плоскость которой лежит в плоскости соответствующей кривой, позволяет проиллюстрировать получение параметров канонического уравнения (рис. 7 и 9). Параметр p канонического уравнения (1) можем получить подстановкой в выражение (2) координат некоторой точки параболы, например $T1$ (рис. 7).

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x \quad (1).$$

$$p = \frac{y^2}{2 \cdot x} \quad (2).$$

Проверка подстановкой полученного значения p и координат точки $T2$ в (1) подтверждает правильность результата.

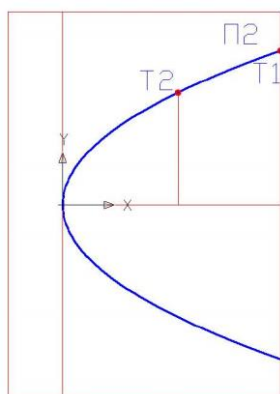


Рис. 7. К отысканию параметров канонического уравнения параболы

Для отыскания параметров канонического уравнения гиперболы (3) необходимо получить ее вторую ветвь (рис. 8), что дает возможность найти центр изображенной на рис. 9 системы координат и определить таким образом параметр a , который будет равняться половине расстояния между вершинами ветвей.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3).$$

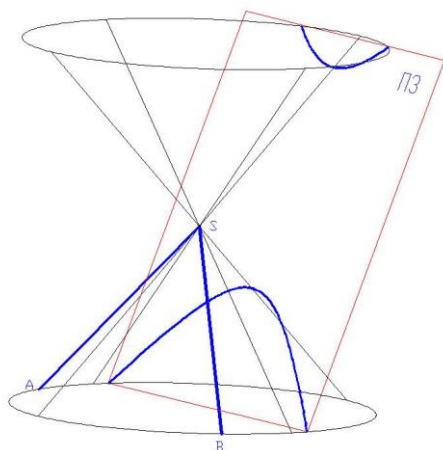


Рис. 8. Две ветви гиперболы

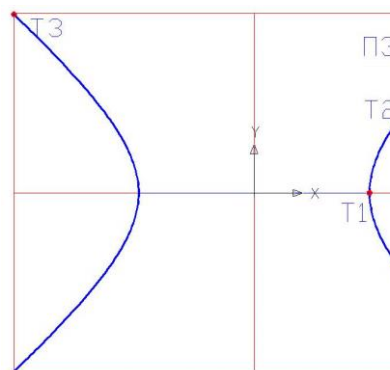


Рис. 9. К отысканию параметров канонического уравнения гиперболы

Из (3) следует:

$$b = \sqrt{\frac{y^2}{\frac{x^2}{a^2} - 1}} \quad (4).$$

Подставив значение a и координаты точки $T2$ в (4), можем получить значение параметра b . Подстановка полученных параметров и координат какой-либо точки, например $T3$, в (3) подтверждает правильность результатов.

4. Заключение

Предложенные методы позволяют получать трехмерные модели конических сечений в соответствии с комплексным чертежом, а также математическое описание таких сечений, полученных с применением средств твердотельного моделирования системы AutoCAD, в виде канонических уравнений соответствующих кривых линий. Такие методы можно использовать в учебном процессе для закрепления связи между представлением геометрических объектов на комплексном чертеже, их трехмерным представлением и аналитическим описанием, а также при решении задач САПР и АСНИ.

5. Литература

- [1] Гордон В.О., Семенцов-Огиевский М.А. Курс начертательной геометрии. – М.: Наука, 1973. – 366 с.
- [2] Ефимов Н.В. Краткий курс аналитической геометрии. – М.: Наука, 1969. – 272 с.
- [3] Карабчевский В.В. Использование средств связи между двумерными и трехмерными компьютерными моделями при преподавании графических дисциплин // Материалы Второй украинско-российской научно-практической конференции СПГМ-07. Харьков: ХГУИПТ. – 2007. – С. 323–332.

Об авторах

Карабчевский Виталий Владиславович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой компьютерного моделирования и дизайна факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

E-mail: karabchevski@mail.ru.

Аппроксимация геометрических объектов многомерного пространства с помощью дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки

Е.В. Конопацкий¹, С.И. Ротков²

e.v.konopatskiy@mail.ru, rotkov@nngasu.ru

¹ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

г. Макеевка, Донецкая Народная Республика

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,

г. Нижний Новгород, Россия

В работе изложены основные идеи аппроксимации геометрических объектов многомерного пространства с помощью дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки, которая заключается в следующем. Формируется специальная сеть точек, размерностью на единицу меньше размерности пространства, в котором располагается моделируемый геометрический объект. Учитывая особые свойства дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки, устанавливается линейная зависимость между параметрами геометрического объекта и факторами влияния, соответствующими осям глобальной системы координат. Далее в узлах сети вычисляются такие значения функции отклика, которые обеспечивают минимальное значение квадратичной функции невязки. Предложенный способ позволяет выполнить обобщение метода наименьших квадратов в сторону увеличения размерности пространства и, соответственно, количества исследуемых факторов, влияющих на функцию отклика, что особенно важно для моделирования и оптимизации многофакторных процессов и явлений.

Ключевые слова: аппроксимация, геометрический объект, многомерное пространство, дуга алгебраической кривой, отсек поверхности отклика, гиперповерхность отклика.

Approximation the geometric objects of multidimensional space using arcs of curves passing through the given points

E.V. Konopatskiy¹, S.I. Rotkov²

e.v.konopatskiy@mail.ru, rotkov@nngasu.ru

¹Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Donetsk People's Republic

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

The paper presents the basic ideas of geometric objects approximation in multidimensional space by means the arcs of algebraic curves passing through given points, which is as follows. A special network of points with a dimension one less than the dimension of the space in which the simulated geometric object is located is formed. Taking into account the special properties the arcs of algebraic curves passing through the given points, a linear relationship between the parameters of the geometric object and the influence factors corresponding to the axes of the global coordinate system is established. Next, the nodes of the network are calculated such values of the response function, which provide the minimum value of the quadratic residual function. The proposed method allows to perform the generalization the method of least squares in the direction of increasing space dimension and, consequently, the number of investigated factors affecting the response function, which is especially important for modeling and optimization of multifactorial processes and phenomena.

Keywords: approximation, geometric objects, multidimensional space, an arc of an algebraic curve, compartment the response surface, the response hypersurface.

1. Введение

Многомерная аппроксимация наряду с многомерной интерполяцией является одним из основных инструментов моделирования и оптимизации многофакторных процессов и явлений живой и неживой природы, техники, технологии, экономики, строительства и т.д. Математически задача многомерной аппроксимации может быть представлена как аппроксимация функции многих переменных, которая входит в состав 23 проблем математики, поставленных в начале XX века Д. Гильбертом [5].

Учитывая практическую и теоретическую важность задачи многомерной аппроксимации, существует достаточно много подходов к её решению как классических, так и инновационных. Например, в работе [2] для решения задач многомерной интерполяции и аппроксимации используется теория случайных функций. В работе [3] разработан структурно-ориентированный метод многомерной аппроксимации. Однако, в большинстве

случаев основой для многомерной аппроксимации служит метод наименьших квадратов (МНК) [4].

Основная идея МНК заключается в минимизации суммы квадратов отклонений расчётных значений от исходных, соответствующих экспериментально-статистической информации. Эта идея получила несколько различных обобщений [7, 8, 12]. В работе [8] рассматриваются обобщения МНК в виде средней квадратической коллокации и фильтрации Калмана. В работе [7] основой обобщения МНК служит принцип максимального правдоподобия, для реализации которого используется распределение величин по нормальному закону. Кроме того в работе [12] предлагается обобщение МНК путём замены переменных, соответствующих исследуемым факторам, на функции от этих переменных. Анализируя различные способы обобщения как МНК, так и многомерной аппроксимации, можно сделать вывод об отсутствии единого подхода, который мог бы наглядно продемонстрировать логическую последовательность обобщения, основанного на методах аналогии. Подобную

преимущество можно получить, используя методы геометрического моделирования.

2. Аппроксимация дискретно заданных точек с помощью однопараметрического множества

Пусть задано m точек A_i с координатами (x_i, y_i) , которые соответствуют исходной экспериментально-статистической информации. Необходимо аппроксимировать заданный ряд дискретных точек однопараметрическим множеством точек, т.е. некоторой линией. В качестве аппроксимирующей кривой используем дугу алгебраической кривой, проходящей через наперёд заданные точки [11]. За основу возьмём идею МНК. Исходя из этого, задача аппроксимации сводится к минимизации целевой функции, в качестве которой будет выступать сумма квадратов разности координат исходных точек y_i и расчётных точек \hat{y}_i (принадлежащих моделируемой дуге кривой M) значения которых определяются при x_i (рис. 1).

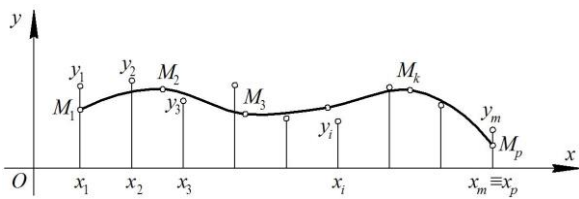


Рис. 1. К задаче аппроксимации однопараметрического множества дискретно заданных точек

Однако классический МНК разработан для функций, представленных в явном виде. При использовании дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки, функция задаётся в параметрической форме. Поэтому сначала необходимо определить значения параметра исходя из расположения точек моделируемой кривой на оси Ox . Используя особые свойства дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки [11], примем равномерное распределение значений x_k , что позволяет установить линейную зависимость между значениями проекции моделируемой дуги кривой на ось Ox и текущим параметром u . Используя инвариантные свойства простого отношения трёх точек прямой относительно параллельного проектирования, получим:

$$x = (x_m - x_1)u + x_1. \tag{1}$$

Тогда для начальной точки дуги аппроксимирующей кривой M_1 (при $x_k = x_1$), значение параметра $u_1 = 0$, а для конечной точки M_p (при $x_k = x_p = x_m$) – $u_p = 1$. Далее в уравнении (1) производим замену переменных и определяем параметр u через переменную x :

$$u = \frac{x - x_1}{x_m - x_1}. \tag{2}$$

После чего, как и в классическом МНК, необходимо определить такие значения координат y_k точек M_k , чтобы минимизировать сумму квадратов разницы соответствующих координат y_i и y_{M_i} :

$$\sum_{i=1}^m (y_i - y_{M_i})^2 \rightarrow \min. \tag{3}$$

Для определения y_{M_i} необходимо в уравнение дуги аппроксимирующей кривой подставить значения

$$u_i = \frac{x_i - x_1}{x_m - x_1}.$$

3. Пример аппроксимации дискретно заданных точек однопараметрическим множеством

Рассмотрим в качестве примера ряд случайных точек A_i , координаты которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для аппроксимации однопараметрическим множеством точек

x	0,1	0,8	1,69	2,12	2,74	3,52	4,13	4,68
y	3,4	3,95	4,6	4,3	4,75	4,3	4,45	4,26

Аппроксимируем исходный ряд точек с помощью дуги кривой 3-го порядка, проходящей через 4 наперёд заданные точки [11], точечное уравнение которой имеет следующий вид:

$$M = M_1(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + M_2(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + M_3(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + M_4(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3), \tag{4}$$

где $\bar{u} = 1 - u$ – дополнение параметра до 1.

Выполнив по координатный расчёт точечного уравнения (4), получим систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x_M = x_{M_1}(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + x_{M_2}(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + x_{M_3}(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + x_{M_4}(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3); \\ y_M = y_{M_1}(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + y_{M_2}(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + y_{M_3}(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + y_{M_4}(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3). \end{cases} \tag{5}$$

Закладываем равномерное распределение искомым точек по оси Ox . Тогда система параметрических уравнений (5) примет следующий вид:

$$\begin{cases} x_M = 4,58u + 0,1; \\ y_M = y_{M_1}(\bar{u}^3 - 2,5\bar{u}^2u + \bar{u}u^2) + y_{M_2}(9\bar{u}^2u - 4,5\bar{u}u^2) + y_{M_3}(-4,5\bar{u}^2u + 9\bar{u}u^2) + y_{M_4}(\bar{u}^2u - 2,5\bar{u}u^2 + u^3). \end{cases} \tag{6}$$

Используя выражение (2), получим уравнение дуги аппроксимирующей кривой в явном виде:

$$\hat{y} = y_M = (-0,047x^3 + 0,443x^2 - 1,288x + 1,124)y_{M_1} + (0,14x^3 - 1,115x^2 + 2,184x - 0,207)y_{M_2} + (-0,14x^3 + 0,9x^2 - 1,158x + 0,107)y_{M_3} + (0,047x^3 - 0,228x^2 + 0,263x - 0,024)y_{M_4}. \tag{7}$$

Далее в соответствии с выражением (3) составляем систему из 4-х обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференцируя поочередно по искомым координатам точек y_{M_1} , y_{M_2} , y_{M_3} и y_{M_4} . Решив полученную систему дифференциальных уравнений, получим следующие значения: $y_{M_1} = 3,38$;

$$y_{M_2} = 4,42; y_{M_3} = 4,516; y_{M_4} = 4,276.$$

После подстановки полученных значений в уравнение (7) получим искомое уравнение дуги аппроксимирующей кривой:

$$y = 0,028x^3 - 0,341x^2 + 1,19x + 3,265.$$

Для приведенного примера в результате аппроксимации удалось достигнуть коэффициента детерминации $R^2 = 0,872$. Следует отметить, что полученное уравнение полностью совпадает со своим аналогом, полученным с

помощью классического МНК, что подтверждает достоверность полученных результатов. На первый взгляд, предложенный способ аппроксимации с помощью кривых, проходящих через наперёд заданные точки, может показаться более громоздким и неудобным, однако он позволяет выполнить обобщение в сторону увеличения размерности пространства и, соответственно, количества исследуемых факторов, влияющих на функцию отклика.

4. Аппроксимация дискретно заданных точек с помощью двухпараметрического множества

Рассмотрим поэтапное обобщение предложенного выше способа аппроксимации геометрических объектов на примере моделирования двухпараметрического множества точек, расположенных в трёхмерном пространстве.

Пусть задано множество $m \times n$ дискретно заданных точек $A_{i,j}$:

$$\begin{matrix} A_{1,n} & \dots & A_{i,n} & \dots & A_{m,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1,j} & \dots & A_{i,j} & \dots & A_{m,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1,1} & \dots & A_{i,1} & \dots & A_{m,1} \end{matrix} \quad (8)$$

Требуется выполнить аппроксимацию множества точек $m \times n$ поверхностью, проходящей через наперёд заданные точки, способ аналитического описания которых и примеры построения приведены в работах [8-11].

Для аппроксимации множества точек $A_{i,j}$ необходимо от сети точек, представленного матрицей (8), перейти к новой регулярной сети точек $M_{k,l}$ с аналогичными границами. При этом количество искомых точек аппроксимирующей поверхности определяется порядком алгебраических кривых, из которых она была создана.

Далее необходимо установить линейную зависимость между координатами x, y и параметрами u, v .

$$u_{i,j} = \frac{x_{i,j} - x_{1,1}}{x_{m,1} - x_{1,1}}; \quad v_{i,j} = \frac{y_{i,j} - y_{1,1}}{y_{1,n} - y_{1,1}} \quad (9)$$

Выполнив покоординатный расчёт аппроксимирующей поверхности по оси Oz и подставив в него уравнения (9), получим искомое уравнение отсека поверхности в явном виде: $z_{M_{i,j}} = f(x_{i,j}, y_{i,j})$.

Далее формируем целевую функцию, как сумму квадратов разности координат исходных точек $z_{i,j}$ и их аналогов, принадлежащих аппроксимируемой поверхности $z_{M_{i,j}}$:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{i,j} - z_{M_{i,j}})^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Используя полученную целевую функцию (10), составляем и решаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений, дифференцируя поочередно по искомым координатам точек $z_{M_{k,l}}$. Далее остаётся только подставить полученные значения координат точек $z_{M_{k,l}}$ в исходное уравнение аппроксимирующей поверхности и проверить с помощью коэффициента детерминации насколько качественным получился результат моделирования.

5. Пример аппроксимации дискретно заданных точек двухпараметрическим множеством

В качестве примера рассмотрим задачу моделирования процесса распределения прочностных характеристик по всему объёму бетонной колонны [10]. В работе [9] приводится один из способов решения этой задачи на основе аппроксимации геометрических объектов многомерного аффинного пространства с помощью дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки. Однако, предложенный в [9] способ аппроксимации предусматривает использование исходных точек в качестве узловых, по аналогии с моделями, представленными в работе [6]. Таким образом, достигаются достаточно высокие показатели точности аппроксимации, но не предусматривается методика выбора узловых точек из массива исходных данных, что затрудняет автоматизацию процесса моделирования многофакторных процессов и явлений.

На рис. 2 показана схема расположения ярусов бетонной колонны. Для 1 яруса характерны одинаковые значения функции отклика во всех точках: $a_1 = b_1 = c_1 = d_1 = e_1 = f_1$, адресация которых представлена на рис. 3. Поэтому для примера выполним аппроксимацию значений функции отклика 2 яруса колонны, для которого: $a_2 = 129,4; b_2 = 125,3; c_2 = 124,4; d_2 = 103,6; e_2 = 103,2; f_2 = 101,8$.

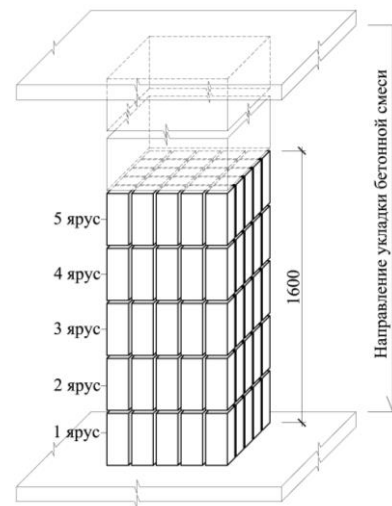


Рис. 2. Схема расположения вертикальных ярусов выпиленных образцов

f _i	e _i	d _i	e _i	f _i
e _i	c _i	b _i	c _i	e _i
d _i	b _i	a _i	b _i	d _i
e _i	c _i	b _i	c _i	e _i
f _i	e _i	d _i	e _i	f _i

Рис. 3. Схема расположения и адресации выпиленных образцов на плане

Исходя из этого, воспользуется для аппроксимации обобщением МНК, предложенным выше. Для получения более простых итоговых уравнений используем в качестве аппроксимирующей дугу кривой 2-го порядка, проходящую через 3 наперёд заданные точки. Тогда искомое точечное

уравнение аппроксимирующей поверхности отклика будет иметь следующий вид:

$$M = \left[M_{11}\bar{u}(1-2u) + 4M_{12}u\bar{u} + M_{13}u(2u-1) \right] \bar{v}(1-2v) + 4 \left[M_{21}\bar{u}(1-2u) + 4M_{22}u\bar{u} + M_{23}u(2u-1) \right] v\bar{v} + \left[M_{31}\bar{u}(1-2u) + 4M_{32}u\bar{u} + M_{33}u(2u-1) \right] v(2v-1) \quad (11)$$

Переходя от точечного уравнения (11) к системе параметрических уравнений, с учётом регулярной сети точек моделируемого отсека поверхности, получим:

$$\begin{cases} x_M = 0,32u; \\ y_M = 0,32v; \\ z_M = \left[z_{M_{11}}\bar{u}(1-2u) + 4z_{M_{12}}u\bar{u} + z_{M_{13}}u(2u-1) \right] \bar{v}(1-2v) + 4 \left[z_{M_{21}}\bar{u}(1-2u) + 4z_{M_{22}}u\bar{u} + z_{M_{23}}u(2u-1) \right] v\bar{v} + \left[z_{M_{31}}\bar{u}(1-2u) + 4z_{M_{32}}u\bar{u} + z_{M_{33}}u(2u-1) \right] v(2v-1) \end{cases} \quad (12)$$

После замены переменных, получим:

$$z_M = f(x_M, y_M, z_{M_{11}}, z_{M_{12}}, z_{M_{13}}, z_{M_{21}}, z_{M_{22}}, z_{M_{23}}, z_{M_{31}}, z_{M_{32}}, z_{M_{33}}).$$

Учитывая равномерное и симметричное распределение исходных данных, получим одинаковую сеть точек, как для исходных данных, так и для моделирования аппроксимирующей поверхности отклика. Вычислим значения $z_{M_{i,j}}$ из условия (10). При этом необходимо использовать значения параметров, найденные с помощью зависимостей (9). В результате, после подстановки в (12) с учётом округления до сотых, получим следующую систему параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = 0,32u; \\ y = 0,32v; \\ z = 440,95uv(uv - u - v + 1) + 9,11(-u^2 - v^2 + u + v) + 101,85. \end{cases} \quad (13)$$

При этом достаточно легко перейти от системы параметрических уравнений (13) к уравнению аппроксимирующей поверхности в явном виде:

$$z = 42051,98y^2x^2 - 13456,63y^2x - 13456,63yx^2 - 88,97y^2 - 88,97x^2 + 4306,12yx + 28,47y + 28,47x + 101,85. \quad (14)$$

Для оценки полученной геометрической модели зависимости прочностных характеристик бетонной колонны воспользуемся коэффициентом детерминации, который в данном случае достиг значения $R^2 = 0,972$. Визуализация полученной аппроксимирующей поверхности отклика представлена для модуля упругости (рис. 4). Используя предложенный способ, можно получить аналогичные геометрические модели аппроксимирующей поверхности отклика для значений прочности бетона и предельной сжимаемости, используя исходные данные, приведенные в работе [10].

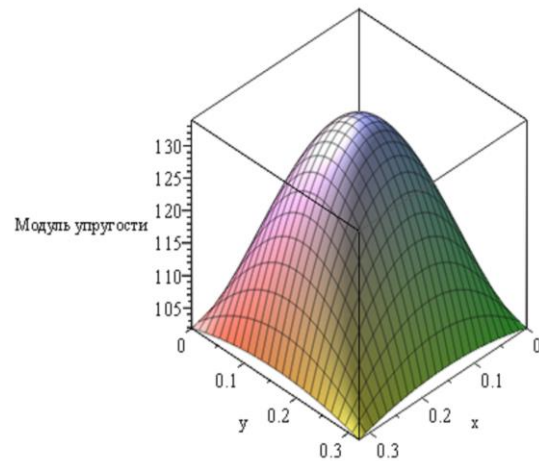


Рис. 4. Визуализация аппроксимирующей поверхности отклика

6. Метод аппроксимации геометрических объектов многомерного пространства на основе дискретного массива точек

Обобщая всё выше изложенное, получим метод аппроксимации геометрических объектов многомерного пространства, представленный в виде следующего вычислительного алгоритма:

1. Выбираем для аппроксимации одну или несколько дуг алгебраических кривых, проходящих через наперёд заданные точки. При этом следует учесть, как наилучшим образом аппроксимировать заданное множество точек, чтобы получить наиболее качественную модель.
2. Формируем регулярную сеть точек для построения аппроксимирующей поверхности отклика. Размерность пространства для построения сети точек аппроксимирующего объекта будет на единицу меньше, чем размерность пространства, в котором будет находиться итоговый геометрический объект.
3. В соответствии с принятой аппроксимирующей сетью точек устанавливаем линейную зависимость между параметрами и факторами геометрической модели, которые соответствуют осям глобальной системы координат.
4. Составляем целевую функцию, представляющую собой сумму квадратов длин отрезков между исходными точками и их аналогами, принадлежащими аппроксимируемому геометрическому объекту.
5. Минимизируем целевую функцию. Для этого составляем и решаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений, количество которых соответствует количеству узловых точек сети аппроксимирующего геометрического объекта.
6. Проверяем результат моделирования путём определения коэффициента детерминации. В случае неудовлетворительного результата повторяем алгоритм с самого начала, выбирая при этом для формирования аппроксимирующего геометрического объекта дуги алгебраических кривых, проходящие через наперёд заданные точки, более высокого порядка, что автоматически ведёт к загрузению аппроксимирующей сети точек.

Следует отметить, что в некоторых случаях рациональным является не увеличение порядка дуг алгебраических кривых, используемых для аппроксимации геометрических объектов, а использование кусочно-полиномиальных функций. Например, обводов необходимого порядка гладкости [1].

7. Пример аппроксимации дискретно заданных точек трёхпараметрическим множеством

В качестве примера использования приведенной методики обобщим решение задачи аппроксимации исходных экспериментальных данных, полученных при испытании на прочность бетонной колонны. На рисунке 2 показано, что колонна состоит из пяти слоёв. В каждом слое по 25 прямоугольных призм. Таким образом, необходимо аппроксимировать экспериментальные данные состоящие из 125 исходных точек. Учитывая высокие показатели коэффициента детерминации для 2-го слоя бетонной колонны, приведенные выше, используем в качестве аппроксимирующей дугу кривой 2-го порядка, проходящую через 3 наперёд заданные точки. Тогда количество аппроксимирующих точек должно равняться 27 (всего получается 3 слоя, по 9 точек в каждом).

В результате применения предложенной методики получим следующее уравнение аппроксимирующей гиперповерхности:

$$\frac{E_b^2}{E_b} = -55781,61z^2x^2y^2 + 77083,58x^2y^2z + 17850,11z^2x^2y + 17850,11z^2xy^2 - \\ -24666,74x^2yz - 24666,74xy^2z - 5712,04z^2xy + 7230,26x^2y^2 + \\ +302,42z^2x^2 + 302,42z^2y^2 - 747,66x^2z - 96,77z^2x - 96,77z^2y - 747,66y^2z \\ -2313,68x^2y - 2313,68xy^2 + 7893,35xyz + 37,23x^2 + 37,23y^2 + 37,36z^2 \\ +740,38xy + 239,25xz + 239,25yz - 11,91x - 11,91y - 71,21z + 122,67,$$

где $\frac{E_b^2}{E_b}$ – соотношение модуля упругости бетона отнесённое

к модулю упругости стандартного образца [10].

В данном случае был достигнут коэффициент детерминации $R^2 = 0,964$, что немного выше, чем в случае с субъективным выбором узловых точек для аппроксимации гиперповерхности отклика, приведенным в работе [9].

8. Заключение

В работе предложен метод аппроксимации геометрических объектов многомерного пространства на основе дискретного массива точек, которая показана на примере моделирования одно-, двух- и трёхпараметрического множеств точек, представляющих соответственно линию, поверхность и гиперповерхность отклика. Как видно из приведенных примеров, МНК легко обобщается в сторону увеличения размерности пространства, что может иметь большое теоретическое и практическое значение для моделирования и оптимизации многофакторных процессов и явлений. При этом МНК обретает четкий геометрический смысл: независимо от размерности аппроксимирующего геометрического объекта, задача сводится к минимизации квадрата расстояния между заданными точками и их аналогами на аппроксимирующем геометрическом объекте. Правда в данном случае речь идёт об особом расстоянии между точками, которое представляет превышение исходных точек над функцией отклика. Это частный случай. Исходя из этого, можно предложить другое обобщение МНК, которое может эффективно использоваться для определения метрических характеристик взаимного положения геометрических объектов вне зависимости от размерности пространства, в котором эти объекты располагаются. Например, расстояния между скрещивающимися прямыми.

9. Литература

- [1] Балюба, И.Г. Конструирование дуг обвода из кривых одного отношения [Текст] / Балюба И.Г., Конопацкий Е.В. // Труды 27-й Международной

конференция по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon 2017». – Пермь: ПГНИУ, 2017. – С.332-334.

- [2] Бахвалов, Ю.Н. Метод многомерной интерполяции и аппроксимации и его приложения [Текст] / Ю.Н. Бахвалов. – М.: Спутник+, 2007. – 108 с.
- [3] Беляев, М.Г. Аппроксимация многомерных зависимостей по структурированным выборкам [Текст] / М.Г. Беляев. – Искусственный интеллект и принятие решений, 2013. – № 3. – С. 24-39.
- [4] Блинов, А.О. Многомерная аппроксимация в задачах моделирования и оптимизации [Текст] / А.О. Блинов, В.П. Фраленко. Автомат. и телемех., 2009. – № 4. – С.98-109.
- [5] Бутырский, Е.Ю. Аппроксимация многомерных функций [Текст] / Е.Ю. Бутырский, И.А. Кувалдин, В.П. Чалкин. – Научное приборостроение, 2010. – Т. 20. – № 2. – С. 82-92.
- [6] Вертинская, Н.Д. Теория нелинейных многомерных моноидальных поверхностей и её приложения: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.01.01. Н.Д. Вертинская – Иркутск, 2006. – 31 с.
- [7] Гольцов, Н.А. Обобщение метода наименьших квадратов на основе принципа максимального правдоподобия [Текст] / Н.А. Гольцов. – Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2001. – №5. – С.202-204.
- [8] Губанов, В.С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии [Текст] / В.С. Губанов. – СПб.: Наука, 1997. – 318 с.
- [9] Конопацкий, Е.В. Аппроксимация геометрических объектов с помощью дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки [Текст] / Е.В. Конопацкий // Информационные технологии. – М.: 2019. – № 1. – Т. 25 – С. 46-52. – DOI: 10.17587/it.25.46-51.
- [10] Конопацкий, Е.В. Геометрическая модель процесса распределения прочностных характеристик в бетонной колонне [Текст] / Е.В. Конопацкий, О.С. Воронова. – Прикладная математика и вопросы управления. – Пермь: ПНИПУ, 2017. – №1. – С.37-44.
- [11] Конопацкий, Е.В. Моделирование дуг кривых, проходящих через наперёд заданные точки [Текст] / Е.В. Конопацкий // Вестник компьютерных и информационных технологий. – М.: 2019. – № 2. – С. 30-36. – DOI: 10.14489/vkit.2019.02.pp.030-036.
- [12] Мустафина, Д.А. Обобщенная многомерная интерполяция методом наименьших квадратов [Текст] / Д.А. Мустафина, А.Е. Буракова, А.И. Мустафин, А.С. Александрова. – Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь: ПНИПУ, 2018. – №27. – С.30-48.

Об авторах

Конопацкий Евгений Викторович, к.т.н., доцент кафедры специализированных информационных технологий и систем, строительного факультета Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. E-mail: e.v.konopatskiy@mail.ru.

Ротков Сергей Игоревич, д.т.н., проф., зав. кафедрой инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: rotkov@nngasu.ru.

Геометрическая модель производящей поверхности эквивалентной рабочей поверхности зуборезного инструмента «долбяк»

С.А. Рязанов¹, М.К. Решетников¹
despro@mail.ru | graphic@sstu.ru

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Существующие математические модели расчета зубчатых зацеплений достаточно сложны и не всегда дают возможность быстро и точно получить желаемый результат. Более простым способом для поиска подходящего варианта зубчатой передачи, удовлетворяющей поставленной задаче, является применение методов компьютерного моделирования и компьютерной графики, а в частности алгоритмов твердотельного моделирования. Применение методов геометрического моделирования для имитации процесса формообразования рабочей поверхности зубчатого зацепления основан на относительном движении взаимопересекающихся объектов в виде системы «заготовка – инструмент». Это позволяет получать необходимую геометрическую модель, точно воспроизводящую геометрическую конфигурацию поверхностей зубьев пространственных зубчатых передач с учетом технологических особенностей их производства на зуборезных станках. Эта информация позволяет выполнить на ЭВМ имитацию управления движением режущего инструмента. В конечном счете, это сводится к проблеме аналитического описания и представления в ЭВМ кривых и поверхностей в трехмерном пространстве. В качестве зуборезных инструментов наиболее широкое применение находят дисковые и червячные модульные фрезы (шевера), зуборезные головки, долбяки и реечные инструменты. В настоящий момент отсутствуют компьютерные алгоритмы получения производящих поверхностей «долбяка», которые получены инструментом с модифицированной производящей поверхностью. Изменение геометрической формы производящей поверхности инструмента приведет к изменению его рабочих поверхностей, что может привести к улучшению их контакта. Данная статья показывает применение разработанных методов и алгоритмов геометрического и компьютерного моделирования, которые предназначены для формообразования рабочих поверхностей зуборезного инструмента «долбяк». Их применение приведет к ускорению процесса расчета промежуточных наладок станков, используемых для нарезания зубчатых передач, минуя сложные математические вычисления, что в условиях старения парка зуборезных станков, их износа и неизбежного снижения точности их кинематических цепей.

Ключевые слова: долбяк, твердотельная модель, зубчатое зацепление, компьютерное имитационное моделирование, зубообработка.

Geometrical Model of the Manufacturing Surface of the Equivalent Working Surface of the Fine Tooth Dolbyak

S.A. Ryazanov¹, M.K. Reshetnikov¹
despro@mail.ru | graphic@sstu.ru

¹Saratov State Technical University named Yu.A. Gagarin, Saratov, Russia

Existing mathematical models for calculating gearing are quite complex and do not always make it possible to quickly and accurately obtain the desired result. A simpler way to find a suitable gear option that satisfies the task is to use computer modeling and computer graphics methods, and in particular solid-state modeling algorithms. The use of geometric modeling techniques to simulate the process of shaping the working surface of gearing is based on the relative movement of intersecting objects in the form of a “workpiece-tool” system. This allows you to obtain the necessary geometric model that accurately reproduces the geometric configuration of the surfaces of the teeth of spatial gears, taking into account the technological features of their production on gear cutting machines. This information allows you to perform on the computer imitation control the movement of the cutting tool. Ultimately, this boils down to the problem of analytic description and computer representation of curves and surfaces in three-dimensional space. As the gear cutting tools, the most widely used are disk and worm modular mills (shaver), gear cutting heads, dolbyaki and lath tools. At the moment there are no computer algorithms for obtaining the “dolbyak” producing surfaces, which are obtained by a tool with a modified producing surface. A change in the geometric shape of the tool producing surface will lead to a change in its working surfaces, which may lead to an improvement in their contact. This article shows the application of the developed methods and algorithms of geometric and computer modeling, which are intended for shaping the working surfaces of the Dolbyak tool. Their application will speed up the process of calculating intermediate adjustments of machines used for cutting gears, bypassing complex mathematical calculations that, under conditions of aging of the gear-cutting machines, their wear and the inevitable reduction in the accuracy of their kinematic chains.

Keywords: dolbyak, solid model, gearing, computer simulation, gear processing.

1. Введение

При изготовлении различных видов зубчатых передач в качестве зуборезных инструментов наиболее широкое применение находят дисковые и червячные модульные фрезы (шевера), зуборезные головки, долбяки и реечные инструменты, которые показаны на рис. 1.

Производящие поверхности ($\Pi_{ик}$) этих инструментов [1-4, 5, 6] представляют собой поверхности вращения или винтовые поверхности, образованные соответствующим

движением заданного профиля осевого сечения (Π_0) вдоль и/или вокруг соответствующих им осей инструмента (рис. 2). На этом рисунке показан, обобщенный алгоритм образования производящей поверхности инструмента, основанный на использовании исходного прямолинейного или модифицированного осевого сечения этой поверхности, индекс «i» соответствует текущему положению координатных осей.

Данная схема позволяет, используя сечение производящей поверхности [10-14], получить различные виды зуборезных инструментов. Координаты точек

принадлежащих производящей поверхности инструмента $\bar{R}_M^{(Su)}$ удобно описывать в векторно-матричной форме (1):

$$\bar{R}_M^{(Su)} = H_{SouSoП} \cdot \bar{R}_M^{(SoП)}, \quad (1)$$

где $\bar{R}_M^{(SoП)}$ – радиус-вектор осевого профиля производящей поверхности в подвижной системе координат $S_{oП}(O_{oП}x_{oП}y_{oП}z_{oП})$:

$$\bar{R}_M^{(SoП)} = |x_M \ y_M \ z_M \ 1|, \quad (2)$$

где x_M, y_M, z_M – координаты точки, принадлежащей сечению производящей поверхности инструмента;

$H_{SouSoП}$ – блочная матрица, выражающая движение системы $S_{oП}$, связанной с осевым профилем производящей поверхности, относительно системы $S_{oИ}$:

$$H_{SouSoП} = \begin{vmatrix} A_{SouSoП} & r_{oП}^{(SoИ)} \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $r_{oП}^{(SoИ)}$ – радиус-вектор сформированной производящей поверхности в системе координат $S_{oИ}(O_{oИ}x_{oИ}y_{oИ}z_{oИ})$;

$A_{SouSoП}$ – матрица поворота размерностью 3×3.

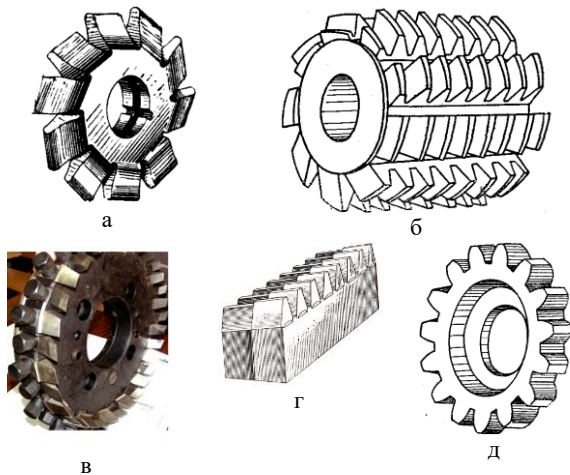


Рис. 1. Основные виды зуборезных инструментов: а) дисковая фреза; б) червячная фреза; в) зуборезная головка; г) рейка; д) долбяк.

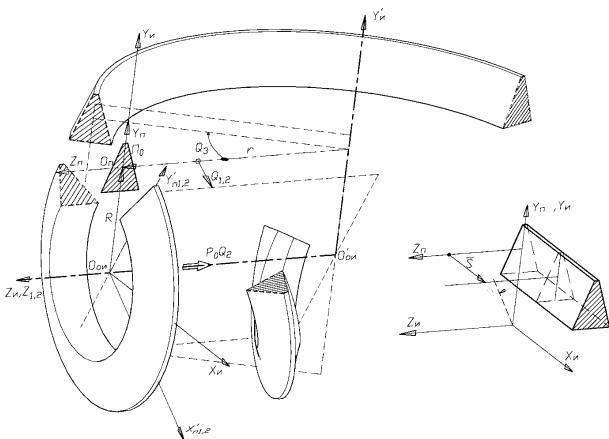


Рис. 2. Геометрическая модель образования обобщенной производящей поверхности инструмента.

Наполнение матрицы $H_{SouSoП}$ соответствует выбранному типу зуборезного инструмента. Для аналитического описания сечения производящей поверхности инструмента необходимо определить координаты вершин ее исходного прямолинейного профиля [7-9,15].

2. Геометрическая модель зуборезного инструмента «долбяк» с исходной прямолинейной рабочей поверхностью

В векторно-матричном виде получение компьютерной модели производящей поверхности [16-21] эквивалентной зуборезному инструменту «долбяк» можно так же описать с помощью матричного произведения (1). При этом, производящая поверхность инструмента «долбяк» образуется Z-кратным дискретным поворотом поверхности $\Pi_{и4}$ (производящая поверхность инструмента «производящая рейка») на угол γ вокруг оси $X_{и}$ и одновременным движением вдоль этой же оси на величину \bar{S} (рис. 3). Угол поворота профиля γ определяется формулой:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{Z},$$

где Z – число зубьев инструмента «долбяк».

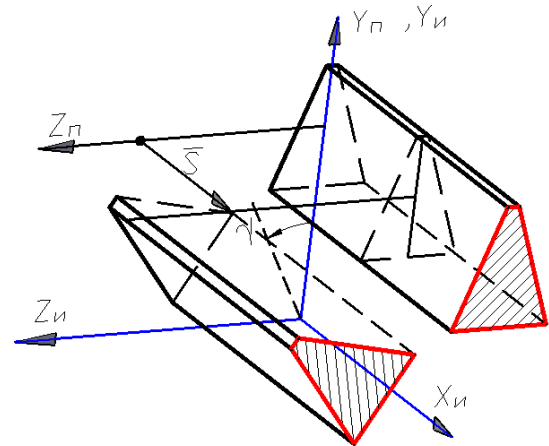


Рис. 3. Геометрическая модель образования производящей поверхности, эквивалентной производящей поверхности зуборезного инструмента «долбяк».

В общем виде, движение и поворот исходного осевого профиля $\Pi_0 = \Pi_{и4}$, для получения производящей поверхности эквивалентной зуборезному инструменту «долбяк», вдоль оси X_4 описывается с помощью матрицы поворота профиля (1) – (3). Для описания координат точек, принадлежащих производящей поверхности эквивалентной зуборезному инструменту «долбяк», в матричном выражении (3) необходимо задать следующие параметры:

$$A_{SouSoП} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_5 & \sin \theta_5 \\ 0 & -\sin \theta_5 & \cos \theta_5 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

$$r_{oП}^{(SoИ)} = |\bar{S} \ R \cdot \cos \theta_5 \ -R \cdot \sin \theta_5|^T = \begin{vmatrix} \bar{S} \\ R \cdot \cos \theta_5 \\ -R \cdot \sin \theta_5 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где \bar{S} – расстояние, на которое происходит движение сечения производящей поверхности, и характеризует текущее положение исходного осевого профиля Π_0 ;

R – расстояние от оси $X_{и}$ до начала подвижной системы координат профиля инструмента;

θ_5 – угол, задающий текущее положение исходного профиля инструмента в системе координат $S_{oИ}(x_{oИ}y_{oИ}z_{oИ})$.

Значение угла θ_5 определяется формулой $\theta_5 = \gamma \cdot Z_i$, где Z_i – текущий шаг положения профиля, т. е. $Z_i \in 1 \dots Z$.

Подставляя значения блочной матрицы $A_{SouSoП}$ (4) и вектора $r_{oП}^{(SoИ)}$ (5) в матричное произведение (1), получим окончательный вид матрицы, описывающей значение

координат радиус-вектора формирующей поверхности инструмента в системе координат инструмента $S_{oi}(x_i, y_i, z_i)$:

$$\vec{R}_M^{(Su)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & S \\ 0 & \cos \theta_5 & \sin \theta_5 & R \cdot \cos \theta_5 \\ 0 & -\sin \theta_5 & \cos \theta_5 & -R \cdot \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \vec{R}_M^{(SoП)}, \quad (6)$$

где $\vec{R}_M^{(SoП)}$ – радиус-вектор осевого профиля производящей поверхности в подвижной системе координат $S_{oП}(O_{П}x_{П}y_{П}z_{П})$.

Выполнив умножение матриц (6) и (2), получаем систему уравнений, которая описывает преобразование координат осевого профиля производящей поверхности из системы координат $S_{oП}(O_{П}x_{П}y_{П}z_{П})$ в систему координат инструмента «долбяк» $S_{oi}(x_i, y_i, z_i)$ в координатной форме:

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = x_m + S \\ R_{MY}^{(Su)} = y_m \cdot \cos \theta_5 + z_m \cdot \sin \theta_5 + R \cdot \cos \theta_5 \\ R_{MZ}^{(Su)} = -y_m \cdot \sin \theta_5 + z_m \cdot \cos \theta_5 - R \cdot \sin \theta_5 \end{cases} \quad (7)$$

где $R_{MX}^{(Su)}$, $R_{MY}^{(Su)}$, $R_{MZ}^{(Su)}$ – координаты точки производящей поверхности заданного радиус-вектором $\vec{R}_M^{(SoП)}$;

x_m , y_m , z_m – координаты точек осевого профиля производящей поверхности заданные в системе координат $S_{oП}(O_{П}x_{П}y_{П}z_{П})$.

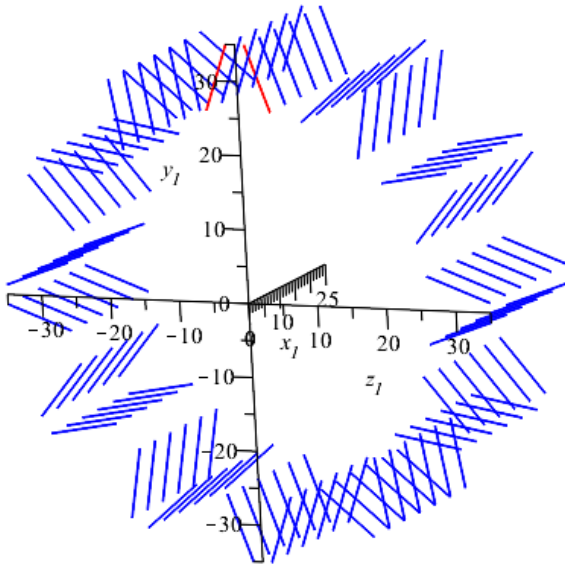


Рис. 4. Каркасная модель производящей поверхности, эквивалентной производящей поверхности зуборезного инструмента «долбяк».

Система уравнений (7) позволяет рассчитать, и получить координаты положения точек сечения компьютерной модели производящей поверхности, которая эквивалентна производящей поверхности зуборезного инструмента «долбяк» (рис. 4).

В соответствии с ГОСТ 19650–97 левая боковая производящая поверхность исходного прямолинейного производящего контура сечения [22-25], рис. 5, описывается уравнением:

$$y_{left} = -\frac{z_{left}}{\operatorname{tg} \alpha_{left}} + \frac{1}{4} \frac{\pi \cdot m}{\operatorname{tg} \alpha_{left}} \quad (8)$$

А правая сторона сечения производящей поверхности – уравнением:

$$y_{right} = \frac{z_{right}}{\operatorname{tg} \alpha_{right}} + \frac{1}{4} \frac{\pi \cdot m}{\operatorname{tg} \alpha_{right}} \quad (9)$$

где α_{left} , α_{right} – угол наклона сечения боковой поверхности инструмента левой и правой стороны соответственно.

z_{left} , z_{right} – проекция точки, принадлежащей боковой исходной производящей поверхности на ось $z_{П}$, для левой и правой стороны соответственно.

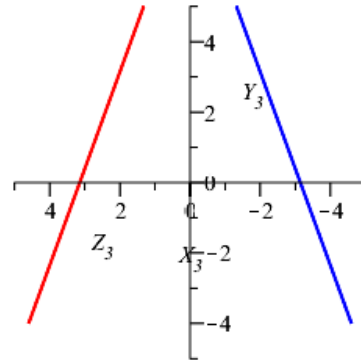


Рис. 5. Осевое сечение исходного контура производящей поверхности.

Подставим в систему уравнений (7) значение $x_m = 0$, т. к. сечение в подвижной системе координат находится в плоскости $Y_{П}z_{П}$; для левого профиля $y_m = y_{left}$, значение которой задается уравнением (8) и для правого профиля $y_m = y_{right}$, заданную уравнением (9), получим системы уравнений, описывающих производящую поверхность в параметрическом виде для левого (10) и правого (11):

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = x_m \\ R_{MY}^{(Su)} = \cos \gamma_5 \cdot \left(-\frac{z_{left}}{\operatorname{tg} \alpha_{left}} + \frac{1}{4} \frac{\pi \cdot m}{\operatorname{tg} \alpha_{left}} \right) + \sin \gamma_5 \cdot z_{left} + R \cdot \cos \gamma_5 \\ R_{MZ}^{(Su)} = -\sin \gamma_5 \cdot \left(-\frac{z_{left}}{\operatorname{tg} \alpha_{left}} + \frac{1}{4} \frac{\pi \cdot m}{\operatorname{tg} \alpha_{left}} \right) + \sin \gamma_5 \cdot z_{left} - R \cdot \sin \gamma_5 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = x_m \\ R_{MY}^{(Su)} = \cos \gamma_5 \cdot \left(\frac{z_{right}}{\operatorname{tg} \alpha_{right}} + \frac{1}{4} \frac{\pi \cdot m}{\operatorname{tg} \alpha_{right}} \right) + \sin \gamma_5 \cdot z_{right} + R \cdot \cos \gamma_5 \\ R_{MZ}^{(Su)} = -\sin \gamma_5 \cdot \left(\frac{z_{right}}{\operatorname{tg} \alpha_{right}} + \frac{1}{4} \frac{\pi \cdot m}{\operatorname{tg} \alpha_{right}} \right) + \cos \gamma_5 \cdot z_{right} - R \cdot \sin \gamma_5 \end{cases} \quad (11)$$

Выполнив расчеты, с применением алгоритма (рис. 6), получаем модель производящей поверхности, эквивалентной производящей поверхности зуборезного инструмента «долбяк» [26, 27], заданную системами параметрических выражений (8) и (9) (рис.7).

3. Геометрическая модель зуборезного инструмента «долбяк» с модифицированной рабочей поверхностью

Левый модифицированный исходный профиль [5-6] зададим с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = 0 \\ R_{MY}^{(Su)} = \mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x - z \cdot \sin \theta_x \\ R_{MZ}^{(Su)} = \mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x - z \cdot \sin \theta_x \end{cases} \quad (10)$$

А правый:

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = 0 \\ R_{MY}^{(Su)} = \mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x - z \cdot \sin \theta_x \\ R_{MZ}^{(Su)} = \mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x + z \cdot \sin \theta_x + \Delta z \end{cases} \quad (11)$$

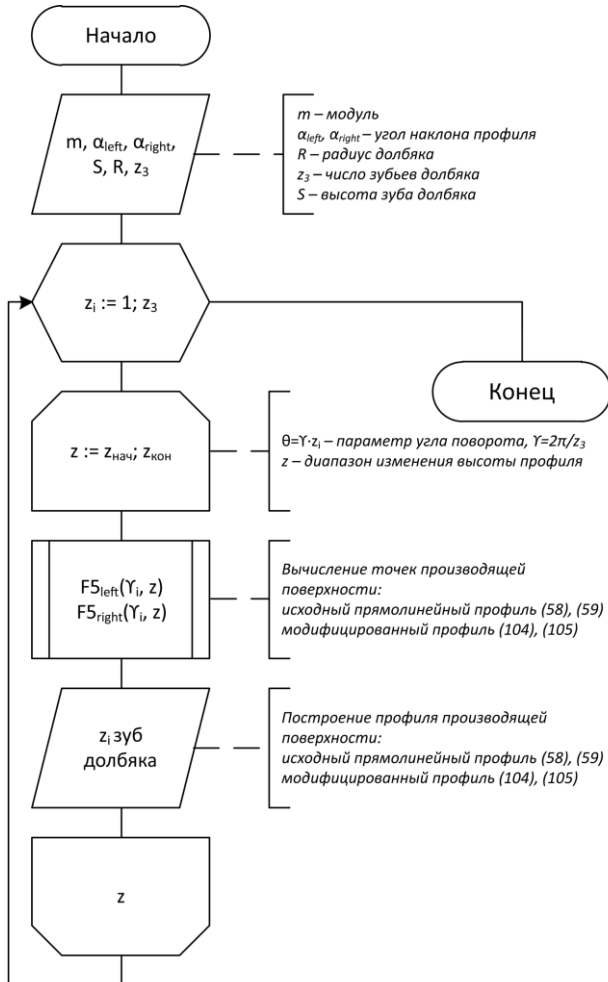


Рис. 6. Алгоритм формирования геометрической компьютерной модели зубьев производящей поверхности эквивалентной зуборезному инструменту «долбляк».

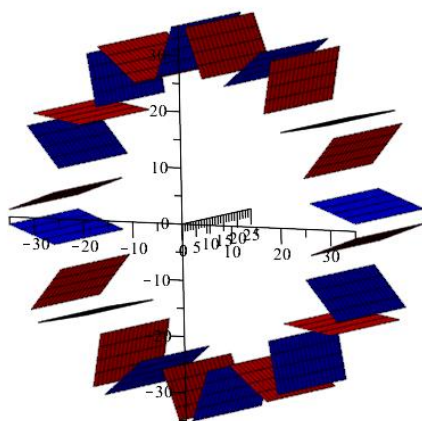


Рис. 7. Алгоритм формирования геометрической компьютерной модели зубьев производящей поверхности эквивалентной зуборезному инструменту «долбляк».

Подставив уравнения (10) и (11) в систему уравнений (7), получаем параметрические зависимости, которые позволяют сформировать модифицированную производящую поверхность, эквивалентную зуборезному

инструменту «долбляк». При этом система уравнений (12) позволяет сформировать левый, а система уравнений (13) правый модифицированные профили этой производящей поверхности:

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = \bar{S} \\ R_{MY}^{(Su)} = \cos \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x - z \cdot \sin \theta_x) + \sin \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \sin \theta_x + z \cdot \cos \theta_x + \Delta z) + R \cdot \cos \gamma_5 \\ R_{MZ}^{(Su)} = -\sin \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x - z \cdot \sin \theta_x) + \cos \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \sin \theta_x + z \cdot \cos \theta_x + \Delta z) - R \cdot \sin \gamma_5 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} R_{MX}^{(Su)} = \bar{S} \\ R_{MY}^{(Su)} = \cos \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x + z \cdot \sin \theta_x) + \sin \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \sin \theta_x - z \cdot \cos \theta_x - \Delta z) + R \cdot \cos \gamma_5 \\ R_{MZ}^{(Su)} = -\sin \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \cos \theta_x + z \cdot \sin \theta_x) + \cos \gamma_5 \cdot (\mu \cdot z^2 \cdot \sin \theta_x - z \cdot \cos \theta_x - \Delta z) - R \cdot \sin \gamma_5 \end{cases} \quad (13)$$

Системы параметрических уравнений (12) и (13) позволяют сформировать компьютерную геометрическую модель модифицированной производящей поверхности, которая является эквивалентной производящей поверхности зуборезного инструмента «долбляк» с измененным формообразующим профилем (рис. 8).

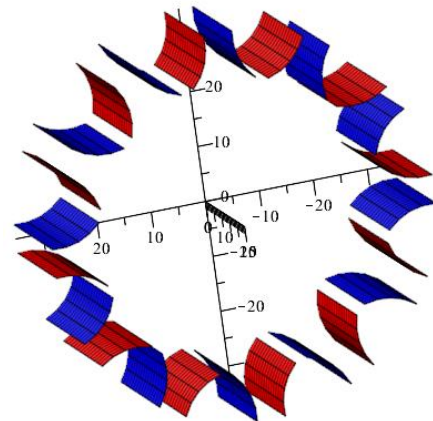


Рис. 8. Производящая поверхность, эквивалентная производящей поверхности зуборезного инструмента «долбляк» с модифицированным исходным профилем.

4. Заключение

Таким образом, применение методов компьютерного аналитического моделирования [7, 9] позволяет ускорить процесс создания геометрической модели производящей поверхности, которая является эквивалентной производящей поверхности зуборезного инструмента «долбляк», что даст возможность выполнить виртуальное формообразование рабочей поверхности колеса с новыми контактирующими поверхностями для сокращения времени его проектирования.

5. Литература

[1] Вейц, В. Л. Геометрия зацепления зубчатых передач : учебник / В. Л. Вейц, А. М. Волженская, Н. И. Колчин. – Л.: Машиностроение. 1978. – 136 с.
 [2] Волков, А. Э. Компьютерное моделирование процессов формообразования поверхностей резанием / А. Э. Волков // Конструкторско-технологическая информатика 2000 : сб.

- тр. IV междунар. конгресса: в 2 т.: – М.: «СТАНКИН», 2000. – Т. 1. – С. 122-126.
- [3] Гинзбург, Е. Г. Типовые технологические процессы изготовления зубчатых колес: учебник / Е. Г. Гинзбург, А. В. Шаманин; под ред. Н.И. Колчина. – М.: Ленинградское отделение МАШГИЗА, 1958. – 130 с.
- [4] Гогаладзе, Р. В. Геометрические вопросы преобразований прикосновения для решения прикладных задач: метод. указания / Р. В. Гогаладзе, Р. Г. Кирия. – Тбилиси: Технический университет, 2009. – 57 с.
- [5] Калашников, С. Н. Зубчатые колеса и их изготовление: учебник / С. Н. Калашников, А. С. Калашников. – М.: Машиностроение, 1983. – 264 с.
- [6] Калашников, С. Н. Производство зубчатых колес: справочник / С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган [и др.]; под ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
- [7] Карачаровский, В.Ю. Визуализационная оценка геометрических характеристик контактирующей поверхности в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики [Текст] / В.Ю. Карачаровский, М.К. Решетников, С.А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — № 4. — Вып. 1. — С. 55–60.
- [8] Карачаровский, В.Ю. Визуальная оценка параметров локализованного контакта в червячных передачах на основе применения методов 3D компьютерной графики [Текст] / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2011. — № 2. — Вып. 2. — С. 73–77.
- [9] Карачаровский, В. Ю. Геометрическое моделирование и визуальная оценка винтовой поверхности зуба [Текст] / В. Ю. Карачаровский, М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Проблемы графической подготовки студентов технических вузов в условиях современного компетентного подхода к процессу обучения: сб. тр. междунар. науч.-метод. конф. – Дивноморское: ДГТУ, 2015. – С. 59-66.
- [10] Карачаровский, В.Ю. Геометрическое моделирование формообразования пространственных поверхностей при винтовом относительном движении [Текст] / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Проблемы геометрического моделирования в автоматизированном проектировании и производстве: 1-я Междунар. науч. конф. — М.: Изд-во МГИУ, 2008. — С. 143–146.
- [11] Карачаровский, В.Ю. Обобщенная модель твердотельного зуборезного инструмента с изменяемой кривизной производящей поверхности [Текст] / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Совершенствование подготовки учащихся и студентов в области графики, конструирования и стандартизации: межвуз. науч.-метод. сб. — Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. — С. 152–156.
- [12] Карачаровский, В. Ю. Определение координат точек эвольвентной винтовой поверхности червячной передачи [Текст] / В. Ю. Карачаровский, М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Проблемы графической подготовки студентов технических вузов в условиях современного компетентного подхода к процессу обучения: сб. тр. междунар. науч.-метод. конф. – Дивноморское: ДГТУ, 2015. – С. 66-73.
- [13] Карачаровский, В.Ю. Применение методов компьютерной 3D графики и твердотельного моделирования при разработке технологических процессов зубонарезания [Текст] / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — № 4. — Вып. 1. — С. 55–60.
- [14] Карачаровский, В.Ю. Разработка цифровых технологий твердотельного моделирования процессов формообразования пространственных зубчатых передач для реализации на многокоординатных станках [Текст] / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Пятый Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций: в 2 ч. — Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. Ч. 1. — С. 150–151.
- [15] Решетников, М. К. Оценка параметров червячных передач на основе методов 3D компьютерной графики / М. К. Решетников, С. А. Рязанов // Геометрия и графика. – М.: ИНФРА-М, 2018. – Т. 6, №1. – С. 34-38. DOI: 10.12737/article_5ad0971a86af78.65167837.
- [16] Лашнев, С. И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ: учебник / С. И. Лашнев. – М.: Машиностроение, 1975. – 392 с.
- [17] Лашнев, С. И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами: учебник / С. И. Лашнев. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
- [18] Литвин, Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений: учебник / Ф. Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
- [19] Лопато, Г. А. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями. Справочное пособие / Г. А. Лопато, Н. Ф. Кабатов, М. Г. Сегаль. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
- [20] Мерчанский, Д. П. Зуборезное дело: учебник / Д. П. Мерчанский. – Л.: Машиностроение, 1969. – 224 с.
- [21] Мильштейн, М. З. Нарезание зубчатых колес: учеб. пособие для подготовки рабочих / М. З. Мильштейн. – М.: Высш. школа, 1972. – 272 с.
- [22] Радзевич, С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории: монография / С. П. Радзевич. – Киев: Растан, 2001. – 592 с.
- [23] Романов, В. Ф. Расчеты зуборезных инструментов / В. Ф. Романов. – М.: Машиностроение, 1969. – 251 с.
- [24] Сандлер, А. И. Производство червячных передач / А.И. Сандлер, С. А. Лагутин, А. В. Верховский; под общ. ред. С. А. Лагутина. – М.: Машиностроение, 2008. – 272 с.
- [25] Сандлер, А. И. Теория и практика производства червячных передач общего вида: учеб.-практ. пос. / А. И. Сандлер, С. А. Лагутин, Е. А. Гудов; под ред. С. А. Лагутина. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 346 с.
- [26] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015616756 Российская Федерация, Геометрическое твердотельное моделирование зубчатых передач со скрещивающимися осями вращения / Карачаровский В. Ю. (RU), Решетников М. К. (RU), Рязанов С. А. (RU); заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (RU)». – № 2015613296; заявл. 23.04.2015; дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2015.
- [27] Справочник машиностроителя; гл. ред. тома Н. С. Ачеркан. – М.: Машгиз, 1955. – Т. 1. – 855 с.

Об авторах

Рязанов Сергей Анатольевич, заведующий лабораторией кафедры «Инженерная геометрия и основы САПР» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. E-mail: despro@mail.ru.

Решетников Михаил Константинович, д.т.н., заведующий кафедрой «Инженерная геометрия и основы САПР» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. E-mail: graphic@sstu.ru.

Проблема неоднозначности в задаче синтеза каркасной модели объекта по техническому чертежу

V.A. Tyurina¹, S.I. Rotkov¹, T.V. Moshkova¹, M.V. Lagunova¹
55555_73@mail.ru|rotkovs@mail.ru|ng.forever.mtv@gmail.com|mvlnn@mail.ru
¹ННГАСУ, Нижний Новгород, Россия

От полноты использования классов графической информации, используемой для синтеза 3D-модели объекта по техническому чертежу, зависит уровень качества каркасной модели, полученной на первом этапе решения задачи восстановления образа неплоского объекта. В тех случаях, когда чертеж достаточно прост и позволяет считывать полную информацию об объекте существующими процедурами автоматического "чтения чертежа", есть возможность восстанавливать каркасные модели, полностью соответствующие синтезируемому объекту. Их можно сразу использовать для дальнейших преобразований в другие типы 3D-моделей. Такие каркасные модели характеризуются тем, что все вершины и ребра, входящие в их структуру, принадлежат поверхности искомого объекта и задают клеточное разбиение тела. Но в большинстве практических случаев, когда моделируемые объекты соответствуют реальным изделиям и их технический чертеж насыщен трудноформализуемой информацией, в структуре каркасных моделей, построенных по стандартным процедурам, в силу ряда объективных причин появляются ложные геометрические элементы, т.е. такие, которые отсутствуют на поверхности искомого 3D объекта. Это приводит к неоднозначности восстановления единственной каркасной модели, соответствующей объекту, заданному на техническом чертеже, и требует разработки процедур, позволяющих избежать множественности решений.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, технический чертеж, ортогональные проекции, каркасная модель, ложные геометрические элементы, граничная модель.

The problem of ambiguity in the task of synthesizing a wireframe model objects according to a technical drawing

V.A. Tyurina¹, S.I. Rotkov¹, T.V. Moshkova¹, M.V. Lagunova¹
55555_73@mail.ru|rotkovs@mail.ru|ng.forever.mtv@gmail.com|mvlnn@mail.ru
¹NNGASU, Nizhny Novgorod, Russia

The level of quality of the wireframe model obtained in the first stage of solving the problem of restoring the image of a non-planar object depends on the completeness of using the classes of graphic information used to synthesize a 3D model according to the technical drawing. In cases where the drawing is quite simple and allows you to read complete information about the object by existing procedures of automatic "reading the drawing", it is possible to restore the frame models that are fully consistent with the synthesized object. They can be used immediately for further transformations to other types of 3D models. Such frame models are characterized by the fact that all the vertices and edges included in their structure belong to the surface of the desired object. But in most practical cases, when the simulated objects correspond to real products and their technical drawing is full of difficult to formalize information, in the structure of frame models built according to standard procedures, due to a number of objective reasons, there are false geometric elements, i.e. those that are not on the surface of the desired 3D object. This leads to the ambiguity of the restoration of a unique wireframe model corresponding to the object specified in the technical drawing, and requires the development of procedures to avoid the multiplicity of solutions.

Keywords: geometric modeling, technical drawing, orthogonal projections, wireframe model objects, false geometric elements, boundary model.

1. Введение

Задача синтеза 3D-модели по техническому чертежу относится к разряду сложно формализуемых и, как показывает анализ литературы [4], алгоритмы, реализующие полный учёт всей многоплановой информации, содержащейся на чертеже, пока находятся в стадии разработки. Существующие алгоритмы решения задачи имеют ограничения на входную информацию и ни один из них не предусматривает работу с чертежом, выполненным в соответствии с требованиями ЕСКД [1]. Каркасные модели, полученные известными способами автоматического синтеза, часто несут в себе ложную геометрическую информацию, что существенно затрудняет дальнейшее преобразование модели и её последующую визуализацию [2]. Этап формирования каркасной модели является одним из наиболее значимых в задаче восстановления объекта. В данной статье представлены результаты исследования, направленного на выявление причин, вызывающих неоднозначность восстановления каркасной модели и поиск

путей, позволяющих преодолеть эту проблему. Необходимо, чтобы передаваемая для дальнейшего преобразования каркасная модель была по возможности полно освобождена от ложных геометрических элементов во время процедуры "чтения чертежа" и анализа графической информации, содержащейся на чертеже.

Чертежи, с которыми имеют дело алгоритмы автоматического синтеза объекта, часто бывают неоднозначными, допускающими различное толкование. Такая неоднозначность возникает в силу природы процесса ортогонального проецирования. Данный процесс приводит к перекрытию видимости вершин и ребер, принадлежащих проецирующим плоскостям и поверхностям. Это относится к конкурирующим вершинам, принадлежащим одной проецирующей прямой и проецирующимся на плоскость в одну точку, и конкурирующим ребрам, принадлежащим одной проецирующей поверхности и проецирующимся на плоскость на один и тот же сегмент кривой [3].

Количество конкурирующих элементов на проекциях зависит от выбора главного вида объекта и поэтому один и тот же оригинал может быть представлен различными

вариантами чертежа, что в конечном итоге не должно влиять на возможность формирования 3D-модели объекта.

Если некоторые элементы каркаса имеют во всех проецирующих направлениях конкурирующие элементы, то часто это приводит к появлению ложных вершин и ложных ребер, так называемых "фантомов". Это происходит вследствие того, что с проекций считываются все возможные соединения вершин, даже те, которые возникли в результате конкурирования с элементами, лежащими ближе или дальше от наблюдателя, чем рассматриваемое соединение.

Необходимо в процессе анализа проекций, на самом начальном этапе формирования 3D вершин и ребер, выявлять такие элементы, так как наличие элементов, не принадлежащих поверхности объекта, приводит к невозможности применения алгоритма, автоматически выделяющего истинные грани из каркасного представления. Такие элементы не позволяют выделить объем, заполненный материалом, а значит, являются препятствием на пути восстановления образа оригинала. Чтобы на этапе преобразования каркасной модели в граничную не возвращаться к анализу проекций, вся работа по нахождению ложных геометрических элементов (ЛГЭ) должна быть проделана на этапе создания каркасной модели.

2. Область существования множества ЛГЭ

Для формального описания каркасной модели будем использовать следующие обозначения:

$G = (V, R)$ – граф, задающий каркасную модель, где V – множество вершин, а R – множество ребер каркаса;

$G_K = (V_K, R_K)$ – подграф G , задающий множество всех конкурирующих элементов каркаса, где $V_K \in V$ и $R_K \in R$, вершины и ребра, имеющие "конкурентов" по некоторым направлениям проецирования;

$G_{ЛГЭ}$ – множество ЛГЭ полученной каркасной модели [5].

Утверждение 1. $G_{ЛГЭ}$ является подмножеством множества всех конкурирующих элементов G_K , восстановленных с проекций, т.е. $G_{ЛГЭ} \subset G_K$.

Это утверждение вытекает из того факта, что геометрические элементы каркаса, не имеющие конкурентов по направлениям проецирования, представляют собой элементы реального клеточного разбиения оригинала. Поэтому ЛГЭ не могут находиться среди них по определению. Следовательно, они находятся среди конкурирующих элементов.

Но в случае неоднозначности проекций, множество G_K может содержать и действительные ребра, и вершины, т.е. принадлежащие поверхности тела. Для каждого восстановленного по проекциям варианта образа объекта набор ложных элементов $G_{ЛГЭ}^*$ будет своим, но $G_{ЛГЭ}^* \subset G_K$.

Назовем $G_{ЛГЭ}^{max}$ множество, содержащее максимальное количество ЛГЭ и соответствующее одному из возможных вариантов объектов. Тогда множества $G_{ЛГЭ}^*$, соответствующие остальным возможным вариантам являются подмножествами $G_{ЛГЭ}^{max}$, т.е. $G_{ЛГЭ}^* \subset G_{ЛГЭ}^{max}$.

Целью является выделение подмножества $G_{ЛГЭ}$ из множества G_K , а затем подмножеств $G_{ЛГЭ}^*$ из $G_{ЛГЭ}$, для получения всех возможных образов оригинала.

Множество G_K во многих случаях может содержать большое число элементов, поэтому простой перебор всех сочетаний C_n^i [9], принадлежащих ему элементов, который выражается суммой:

$$\sum_{i=1}^n C_n^i = \sum_{i=1}^n \frac{n!}{(n-i)! i!}$$

где n – число элементов, нецелесообразен, хотя возможен, как один из вариантов решения данной задачи.

Необходимо найти ряд эвристик, позволяющих сократить во множестве G_K область поиска $G_{ЛГЭ}$. Такими эвристиками могут являться нижеследующие утверждения [5].

Утверждение 2. ЛГЭ могут находиться только среди элементов, имеющих конкурирующие элементы на каждом проекционном виде.

Основанием этого утверждения является тот факт, что если элемент не имеет конкурентов хотя бы на одном виде, то проекция данного элемента на этом виде принадлежит единственному пространственному элементу, а значит, принадлежит клеточному разбиению оригинала. Другими словами, он является действительным, т.к. принадлежит поверхности оригинала.

Множество $G_{ЛГЭ}$, состоящее из таких ребер и вершин, которые не имеют конкурирующих элементов хотя бы в одном проецирующем направлении, будем называть множеством истинных геометрических элементов (ИГЭ).

Утверждение 3. Если ребро $R_{ij} \subset G_{ЛГЭ}$, то и вершины, инцидентные ему $V_i, V_j \subset G_{ЛГЭ}$.

В самом деле, если ребро является истинным, то оно не может быть удалено из каркаса, так как это повлечет за собой несоответствие проекциям. Следовательно, не могут не существовать и конечные точки этого ребра.

Утверждение 4. Если у ребра R_{ij} конечные точки $V_i, V_j \subset G_{ЛГЭ}$ и валентность этих вершин $P(V_i, V_j) = 3$, то и $R \subset G_{ЛГЭ}$.

Действительно, если истинная вершина имеет валентность равную 3, то трехгранный материальный угол, представленный этой вершиной, тоже истинный. Поэтому все ребра, выходящие из данной вершины, относятся к ИГЭ.

Утверждения 2, 3, 4 позволяют существенно сокращать область существования ЛГЭ. Исключив множество $G_{ЛГЭ}$ из множества G_K , получаем его подмножество $G_{ЛГЭ}^*$, то есть: $G_{ЛГЭ}^* = (G_K \setminus G_{ЛГЭ})$

Замечание. Можно искать $G_{ЛГЭ}^* = (G \setminus G_{ЛГЭ})$, так как G_K получено из G исключением элементов $G_{ЛГЭ}$, найденных ранее.

Дальнейший поиск $G_{ЛГЭ}$ будем проводить в этом подмножестве.

Если восстановление по проекциям даёт одно или несколько решений, но их получение было затруднено существованием ЛГЭ, то множество $G_{ЛГЭ}^*$ в большинстве случаев и является $G_{ЛГЭ} = G_{ЛГЭ}^{max}$ (см. рис.1).

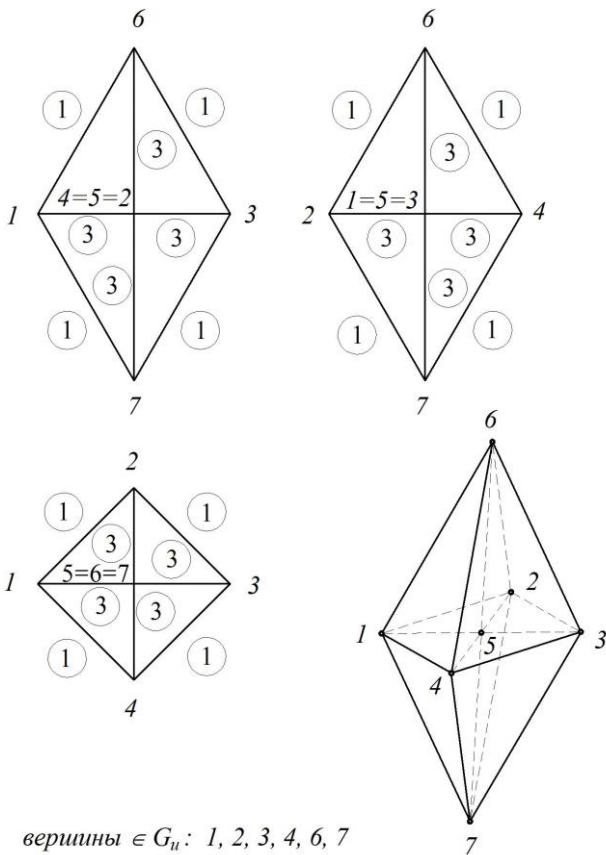
3. Пример поиска множества ЛГЭ

Как отмечалось выше, решений может быть несколько, поэтому может потребоваться дальнейший анализ множества $G_{ЛГЭ}^*$ с целью выделения из него подмножеств $G_{ЛГЭ}$.

Замечание: Некоторые ребра $R \subset G_{ЛГЭ}^*$ могут не являться в прямом смысле ЛГЭ, так как лежат на поверхности оригинала. Они возникли не как образы проекций реальных ребер клеточного разбиения поверхности, а в результате восстановления конкурирующих элементов. Такие ребра порождают смежные грани, принадлежащие одной геометрической поверхности-носителю. Они не мешают преобразованию каркасной модели в граничную, но увеличивают количество граней и замедляют преобразование, поэтому их удаление (по принадлежности множества ЛГЭ) приводит к более эффективному действию алгоритмов преобразования.

На рисунке 1 приведен пример трехмерного объекта, заданного тремя ортогональными проекциями (вид спереди, вид сверху, вид слева). Показан процесс формирования множеств $G_{ЛГЭ}$ и G_K его вершин и ребер, учитывающий

наличие конкурирующих элементов на каждом из видов. В «кружке» цифрой обозначено количество ребер, соответствующих на проекции одной геометрической линии-носителю. Например, ребро (1,6) на виде спереди не имеет конкурирующих ребер (но имеет их на двух других видах), следовательно: $(1, 6) \in G_{II}$. Ребро (6, 4) не имеет конкурирующих ребер на виде слева и поэтому также принадлежит множеству истинных геометрических элементов G_{II} . Аналогичный признак используется и для выделения истинных вершин. Для показанного на рисунке объекта таких вершин шесть. Если же на каждом виде для вершины (либо ребра) находятся конкурирующие элементы, то это свидетельствует о принадлежности их множеству G_K и возможности принадлежать множеству $G_{ЛГЭ}$. На рисунке показаны списки сформированных множеств G^*_K , $G_{ЛГЭ}$ и $G^{max}_{ЛГЭ}$ и случай их совпадения, то есть для рассматриваемого объекта $G^*_K = G_{ЛГЭ} = G^{max}_{ЛГЭ}$.



вершины $\in G_{II}$: 1, 2, 3, 4, 6, 7
 вершины $\in G^*_K$: 5
 ребра $\in G_{II}$: (1, 6), (2, 6), (3, 6), (4, 6), (1, 2), (2, 3),
 (3, 4), (4, 1), (1, 7), (2, 7), (3, 7), (4, 7).
 ребра $\in G^*_K$: (5, 6), (5, 7), (1, 5), (2, 5), (3, 5), (4, 5)

Рис. 1. Пример формирования множеств ИГЭ и ЛГЭ.

Дальнейший анализ позволяет выделить из множества $G^{max}_{ЛГЭ}$ восемь подмножеств $G^*_{ЛГЭ}$. Каждое из них соответствует объекту «с вырезанной четвертью» - варианты зависят от расположения «выреза», так как изменение параметров положения оригинала при распознавании его по проекциям приводит к формированию новой 3D-модели. Рисунок 2 иллюстрирует мультипликативное решение синтеза каркасной модели приведенным проекционным видам. Одна модель соответствует выпуклому («целому») многограннику и восемь вариантов соответствуют восьми многогранникам «с вырезанной четвертью».

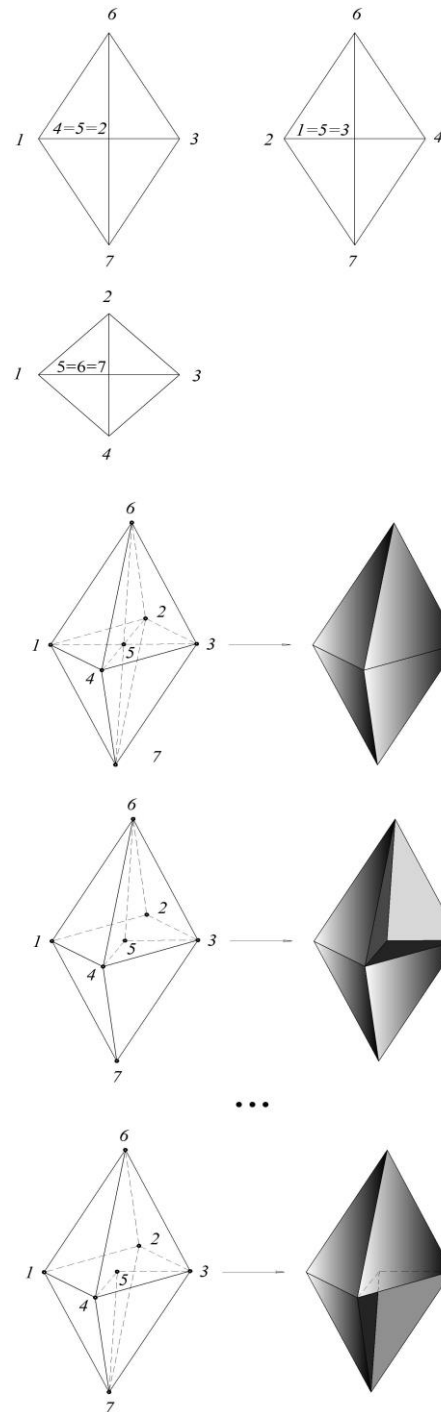


Рис. 2. Пример мультипликативного решения: девять вариантов каркасных моделей, соответствующих проекционным видам

4. Заключение

Проведённое исследование позволило сделать вывод, что решение проблемы неоднозначности восстановления каркасной модели по техническому чертежу, включающему основные виды, требует расширения возможностей эвристических алгоритмов поиска ложных геометрических элементов. Кроме того, необходимо продолжать исследования в области разработки алгоритмов, использующих различные классы входной информации, присутствующей на многовидовом техническом чертеже, с целью получения множеств истинных геометрических

элементов каркасной модели с наименьшим количеством ложных элементов. Минимизация множества ЛГЭ упрощает процесс дальнейших преобразований каркасной модели, необходимых для решения различных задач, в том числе визуализации генерируемого объекта.

5. Благодарности

Работа выполнена по грантам РФФИ №17-07-00543 и РФФИ 19-07-01024.

6. Литература

- [1] Дергунов В.И., Формирование предварительной каркасной модели 3D-объекта по техническому чертежу, содержащему разрезы и сечения / В.И. Дергунов, М.В. Лагунова, М.М. Смышчѐк, В.А. Тюрина // Сборник трудов Междунар. Научно-практ. конф., Протвино, 2018.
- [2] Зудин, А.А. Новая технология геометрического моделирования твердых тел / А.А. Зудин, С.И. Ротков // Сб. тезисов Междунар. конф. «VAI-91». – Новосибирск, 1991.
- [3] Котов, И. И. Алгоритмы машинной графики / И.И. Котов, В.С. Полозов, Л.В. Широкова. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
- [4] Мошкова, Т.В. Проблема синтеза модели 3D объекта по его проекционным изображениям. Аналитический обзор / Мошкова, Т.В., С. И. Ротков, В. А. Тюрина // Научная визуализация, 2018, том 10, номер 1, стр. 135-156, DOI: [10.26583/sv.10.1.11](https://doi.org/10.26583/sv.10.1.11)
- [5] Тюрина, В.А. Разработка методов преобразований каркасной модели в задаче синтеза образа 3D-объекта по его проекциям : Дис. канд. техн. наук: 05.01.01 / В.А. Тюрина. – Н. Новгород, 2003. – 170 с.

Об авторах

Тюрина Валерия Александровна, к.т.н., доцент, профессор кафедры инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: 55555_73@mail.ru

Ротков Сергей Игоревич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: rotkovs@mail.ru

Мошкова Татьяна Владимировна, к.т.н., доцент, профессор кафедры инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: ng.forever.mtv@gmail.com

Лагунова Марина Викторовна, д.п.н., профессор, зам. заведующего кафедрой инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: mvlmn@mail.ru



Компьютерная графика,
светотехника и дизайн

Computer Graphics,
Lightning Engineering and Design

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Визуализация информации посредством инфографики

Е.В. Анашкина¹, Ю.С. Ризен¹
katena_anashkina@mail.ru|yulja_vit@tpu.ru

¹Томский политехнический университет, Томск, Россия

Статья посвящена применению инфографики как одного из методов визуализации информации и возможности влияния на внимание аудитории. Основная задача исследования – систематизировать базовые правила составления инфографики и выявить дополнительные принципы. В работе проанализирован опыт и проблемы применения визуализации средствами массовой информации. Изложены основные понятия и определения визуальной передачи информации. Рассмотрены преимущества и недостатки использования инфографики. На основе анализа сферы коммуникативного дизайна рассмотрены различные типы визуальной инфографики. Выявлена возможность искажения транслируемой информации для влияния на восприятие аудитории. В данной статье предпринята попытка раскрыть основные инструменты для создания понятной инфографики. Рассматриваются ключевые этапы создания инфографики. В результате исследования выявлены и описаны дополнительные принципы создания четкой визуализации информации.

Ключевые слова: компьютерная графика, инфографика, визуализация, восприятие, клиповое мышление.

Visualization of information through infographics

E.V. Anashkina¹, Yu.S. Riesen¹
katena_anashkina@mail.ru|yulja_vit@tpu.ru

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The article is devoted to the use of infographics as one of the methods of visualizing information and the possibility of influencing the attention of the audience. The main objective of the study is to systematize the basic rules for compiling infographics and identify additional principles. Analyzed the experience and problems of using visualization by the media. outlines the basic concepts and definitions of the visual transmission of information. reviewed advantages and disadvantages of using infographics. Based on the analysis of the sphere of communicative design, various types of visual infographics are considered. The possibility of distorting the broadcast information to influence the perception of the audience is revealed. This article attempts to disclose basic tools for creating understandable infographics. The main stages of creating infographics are considered. As a result of the study, additional principles were identified and described to create a clear visualization

Key words: computer graphics, infographics, visualization, perception, clip thinking.

1. Введение

Необходимость внедрения инфографики как визуализации данных вызвана стремлением в короткий срок донести до зрителя большой объем информации.

Опираясь на исследования о восприятии, наибольшая часть информации поступает к нам через органы зрения. Поэтому визуализация информации имеет огромное значение и становится в современном мире одним из лучших инструментов эффективной коммуникации. Время, затраченное на обработку простых изображений, занимает всего 13 миллисекунд, на восприятие абстрактных символов мозгу требуется 150 ms, а на понимание их значения — еще 100 миллисекунд [1]. Из этого следует, что информация, выраженная в визуальном формате, воспринимается эффективнее, чем текст с большим объемом данных.

В век преобладания клипового мышления, это несомненно важно и поэтому стоит обратить внимание на такой способ подачи информации как инфографика. Многие ошибочно считают, что это любая картинка с текстом, но это является заблуждением. Она предполагает подачу информации путем наглядности, конкретики, сжатия текста, а также построение ассоциативного ряда, это оправдано тогда, когда показать легче, чем рассказать. К тому же сфера её применения очень широка.

Актуальность проделанной работы заключается в том, что активное внедрение этого способа подачи информации, зачастую используется неверно. Следовательно, возникает необходимость дополнительных правил составления инфографики.

2. Преимущества использования инфографики

Инфографика занимает большую часть полосы в журналах, имея собственные заголовки, не привязывается к текстовым блокам. Веб-издания активно используют инфографику, обогащая её за счет применения анимации, 3Dвизуализации, а также интерактивности [2].

Правильная визуализация понятна сама по себе и сохраняет свой смысл, даже лишившись сопровождающего текста. Её основная задача представить большой объем сложной информации в упрощенном виде, которая с первого взгляда, даёт о себе определенное представление. Чтобы на основании полученного материала появилась возможность быстро принимать решения и генерировать оценку темы и ситуации. Инфографика позволяет за несколько минут узнать то, на что могло быть использовано гораздо больше времени, при другом способе подачи. Визуализация данных необходима для замены объемных трудночитаемых таблиц и текстов.

Инфографика — это достаточно мощный самостоятельный инструмент, позволяющий придать сложной информации простой и привлекательный вид. Такой способ подачи давно вышел за пределы презентаций и печатной продукции, она успешно применяется во всех СМИ. Большое количество пользователей обращают внимание в первую очередь на материал, сопровождаемый иллюстрациями, из этого и следует актуальность инфографики.

О достоверности данного заявления свидетельствует 80% увеличение узнаваемости брендов, использующих инфографику в рекламе [3].

Помимо этого, интернет-ресурсы получили прирост входящего трафика на 12% в результате использования визуальной информации, общее количество применения изображений в интернете увеличилось на внушительные 9 900% по сравнению с 2007 годом, и 85% людей заявили, что использование графики делает восприятие и понимание запутанных графиков и диаграмм проще [4].

3. Искажение информации и воздействие на зрителя при помощи инфографики

С помощью инфографики, легко ввести зрителя в заблуждение искажая информацию. Таким образом компания Apple прибегала к намеренному искажению визуализации преподносимой информации. На слайде Apple их доля 19.5% визуально кажется больше, чем 21.2%, рис.1. И это не случайность, такое искажение сделано намерено. Через несколько минут, зрители не вспомнят, сколько точно процентов было у Apple, но они запомнят, что кусок «яблочного пирога» уступал только RIM. На правдивом нижнем графике 19,5% выглядят менее впечатляющие, рис.2. Особенно рядом с 21%.

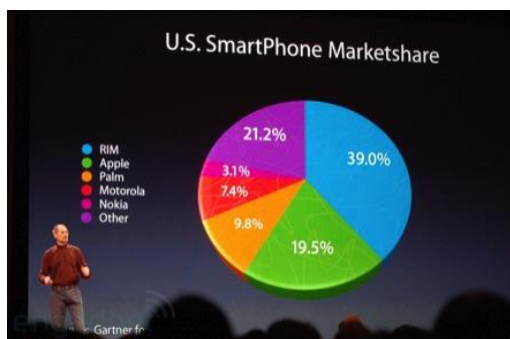


Рис. 1. Слайд компании Apple

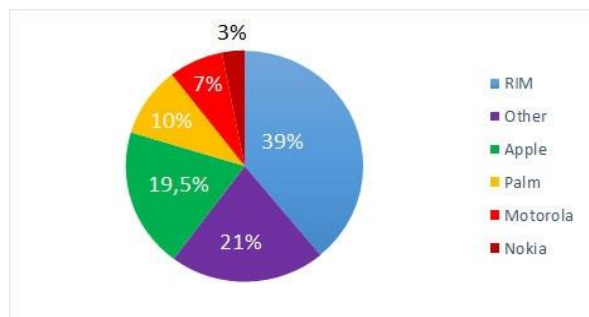


Рис. 2. Настоящее процентное соотношение

Помимо этого, в инфографике образ не дублирует вербальный текст, а помогает его структуризации (рис.3-4). Образ создает дополнительные смыслы, увеличивающие концентрацию информации.

Рисунок 3 показывает пример многоуровневого образа, вносящего дополнительные смыслы. Рисунок 4 приведен в пример использования образа, вообще не связанного смысловыми и визуальными связями с основной информацией.

4. Инфографика в средствах массовой информации

В современном мире распространены различные устройства и большое количество людей смотрят информацию с мобильных устройств, в таком случае необходимо учитывать читаемость шрифта, для просматривания с небольшого экрана. Также важным

моментом является инфографика в соц. сетях. Она должна быть емкой, привлекательной, чтобы за счёт этого рос трафик посещения сайтов.

Инфографика как визуализация информации становится все актуальнее на современном этапе развития информационных технологий, так как способствует быстрому ее усвоению. Она соответствует тому как человек воспринимает зрительные образы и ассоциативные ряды. К тому же инфографика не стоит на месте и развивается в анимированную, интерактивную. Тип СМИ влияют на вид подачи инфографики, так как в веб-пространстве присутствует возможность прокрутки страниц, что расширяет возможности создания интерактивности.

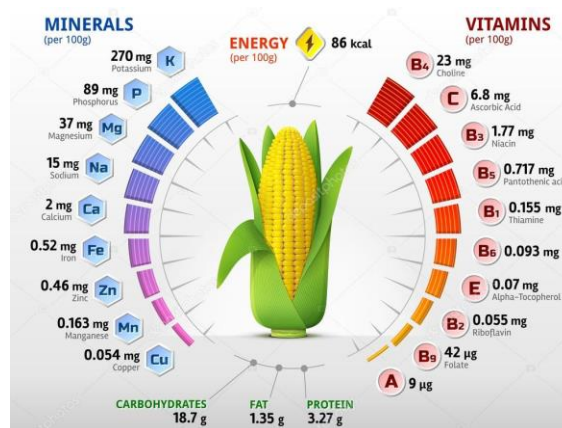


Рис.3. Инфографика минералов в кукурузе

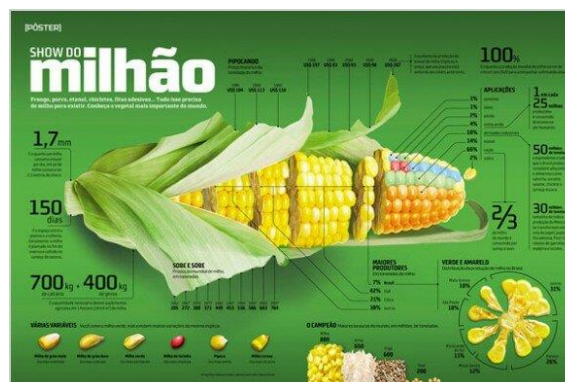


Рис.4. Инфографика с переизбытком информации

5. Правила составления инфографики

Базовые правила инфографики:

1. В первую очередь необходимо составить портрет целевой аудитории, для определения способа подачи информации и способа влияния.
2. Формулировка темы. Она должна быть четкой, достаточно узкой и лаконичной.
3. Последовательность повествования. Контент должен располагаться в логичной последовательности образуя непрерывную историю.
4. Создать точку фокуса внимания. Необходимо создание центрального графического элемента, несущего основной посыл.
5. Визуализация информации. Передача информации в виде образов позволяет быстрее донести смысл и сделать его легко считываемым, в отличие от текстового описания.
6. Ограничить количество цветов и шрифтов.

Два шрифта и три цвета — чаще всего более, чем достаточно. То же самое касается размера шрифтов.

Изученный материал позволяет выявить следующие дополнительные принципы составления понятной, четкой инфографики:

7. Баланс контента.

Необходимо соблюдать баланс графики и текстовых блоков. Не нужно перегружать инфографику обилием текста и изображений. Вспомогательная информация может помешать верному восприятию и запоминанию.

8. Универсальность трансляции инфографики на разных площадках.

Её должны суметь прочитать, даже если она не очень большого размера с мобильного устройства или в распечатанном виде.

9. Достоверные источники.

Данные необходимо проверять, используя надежные источники информации. Достоверность данных делает инфографику убедительной и эффективной.

10. Четкая структура.

Простая структура обеспечит большую ясность и восприятие информации, не запутывая аудиторию. Стоит избегать сложных графиков, диаграмм.

11. Использование метафор.

Сложные концепции и взаимосвязи можно представлять, используя метафоры, завязанные на аналогии с простыми образами.

12. Создание нескольких скетчей будущей инфографики. Этот этап необходим для сравнения и определения наиболее удачного расположения и представления информации. При этом учитывать законы композиции: масштаб, единство, соподчиненность, равновесие, контраст. Привлекательный дизайн важен для завоевания внимания аудитории.

Заключение

В ходе изучения материала были выявлены правила, на которые стоит опираться в процессе создания инфографики, для получения удачного результата.

Основные требования к инфографике сводятся к использованию максимально простых цветовых схем, минимума текста, актуальной для целевой аудитории. Следовательно, с помощью инфографики можно создавать защиту от информационного шума и доносить до потребителей только необходимую информацию.

В итоге успех визуализации определяется тем, насколько ясно и четко она донесла основную мысль и идею, заложенную в ней. Без использования выявленных правил, хорошей визуализации информации не получится.

Использование инфографики оправдано в случае, когда есть необходимость акцентировать внимание на одном вопросе или событии, структурирования большого количества данных. Важным аспектом, является приведение инфографики к основным характеристикам: доступность, читабельность, наглядность, логический порядок. Область визуальной коммуникации стремительно развивается, появляются новые технические возможности, поэтому с течением времени необходимы коррективы в принципах составления инфографики, что отражено в дополнительных принципах составления инфографики.

Литература

1. Нефедьева К.В. Инфографика — визуализация данных в аналитической деятельности// Труды Санкт-Петербургского государственного университета культуры и искусств. — 2013. — т. 197. — с. 89—93.

2. Визуальный контент в онлайн-маркетинге: факты и статистика. Инфографика [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://infographer.ru/alberto-kairoinfografika-v-reklame-otkryvaet-shirokie-vozmozhnosti-dlya-obmana-intervyu/#more6909> (дата обращения: 02.06.2019)

3. Диссертация На тему «Формы визуализации данных» [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://d.120-bal.ru/informatika/21020/index.html?page=11> (дата обращения: 27.05.2019)

4. Инфографика как средство визуальной коммуникации – СибАК Режим доступа: <http://sibac.info/14730> (дата обращения: 02.06.2019)

Об авторах

Ризен Юлия Сергеевна, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: yulja_vit@tpu.ru

Анашкина Екатерина Владимировна, студент группы 8Д61 отделения автоматизации и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: katena_anashkina@mail.ru

Оценка качества освещения по яркостной фотографии и синтезированному изображению трехмерной сцены

Владимир Будак¹, Виктор Желтов¹, Виктор Чембаев¹, Татьяна Мешкова¹

budakvp@mpei.ru | zheltov@list.ru | chembervint@gmail.com | tvmesh@mail.ru

¹кафедра светотехники, Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

В статье предлагается новый критерий качества освещения, расширяющий существующий UGR. Предложенный критерий апробируется в эксперименте на реальных осветительных установках – станциях московского метрополитена. На станциях метрополитена проводится измерение пространственно-углового распределения яркости с помощью фотоаппарата, снимающего в RAW формате и яркомера. Яркомер используется для нормирования изображения на абсолютные значения яркости. В эксперименте наблюдатели оценивают качество освещения станций и проводится сравнение результатов с расчетом нового критерия. Показана высокая корреляция результатов, полученных наблюдателями и рассчитанных с помощью нового критерия качества. Для ряда станций строится трехмерная модель, и проводится расчет критерия по модели. В статье делается вывод о применимости критерия качества к оценке качества освещения. При этом предложенный критерий можно считать расширением уже существующего UGR.

Ключевые слова: качество освещения, яркость, уравнение глобального освещения.

Evaluation of the quality of illumination based on the luminance photo and the visualization of the 3D scene

Vladimir Budak¹, Victor Zheltov¹, Victor Chembraev¹, Tatina Meshkova¹

budakvp@mpei.ru | zheltov@list.ru | chembervint@gmail.com | tvmesh@mail.ru

¹department of lighting technology, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

The article proposes a new criterion for lighting quality that extends the existing UGR. The proposed criterion is tested in an experiment on real lighting installations - Moscow metro stations. At metro stations, the spatial-angular distribution of luminance is measured using a camera that shoots in RAW format and a luminance meter. A luminance meter is used to normalize the image to absolute luminance values. In the experiment, observers evaluate the quality of station lighting and compare the results with the calculation of a new criterion. A high correlation of the results obtained by observers and calculated using the new quality criterion is shown. For a few stations, a 3D model is built, and the criterion is calculated according to the model. The article concludes that the quality criterion is applicable to the assessment of lighting quality. Moreover, the proposed criterion can be considered an extension of the existing UGR.

Keywords: quality of lighting, luminance, global illumination equation, UGR

1. Введение

Одним из основных источников информации об окружающем мире является зрение. Глаз человека реагирует на свет, отраженный от окружающих предметов – яркость падающего излучения. Так, в компьютерной графике при визуализации трехмерных сцен решается, теми или иными методами, уравнение глобального освещения (УГО) [4], позволяющее моделировать яркость. Отметим, что сегодня методы решения позволяют получать точное несмещенное значение яркости в произвольной точке пространства [1].

Методы решения УГО из компьютерной графики нашли свое отражение в светотехническом проектировании, когда моделируется еще не существующая осветительная установка (ОУ). Однако происходит это с некоторым запозданием. Так, если методы решения на основе метода конечных элементов уже являются фактически устаревшими в компьютерной графике, то в светотехнике они занимают лидирующие позиции. Что находит свое отражение в таких программных пакетах как DIALux и Relux. При этом моделируется не яркость, а освещенность, на которую глаз человека не реагирует.

При проектировании осветительных установок инженер-проектировщик опирается на нормативные документы, нормирующие как количественные показатели, так и качественные. Отметим, что среди количественных преобладают характеристики, связанные с освещенностью. Что связано с образовавшимся замкнутым кругом в

светотехнике между нормативной документацией и возможностями расчетов и измерений. В основе качественных показателей, на которые может влиять проектировщик при создании ОУ, находится объединенный показатель дискомфорта UGR, который основан на учете малоразмерных блестящих источников [5].

Однако, еще в 1915 году было показано, что решающее значение на качество освещения имеет угловое распределение яркости в поле зрения наблюдателя [3]. Что находило свое подтверждение и в дальнейших работах, в том числе и советских исследователей [7]. Однако это и по сей день не нашло своего отражения при проектировании ОУ.

2. Критерий качества освещения

В работе [6] был предложен критерий качества освещения на основе анализа пространственно-углового распределения яркости (ПУРЯ), который был апробирован на лабораторной установке [5]. В рамках данной работы в критерий были внесены незначительные коррективы. Согласно новому критерию качество освещения может быть оценено из заданной точки в пространстве сцены в заданном направлении как

$$Q = \frac{1}{K_{пор}} \int K(x, y)h(x, y)dx dy, \quad (1)$$

где $K_{пор}$ – пороговое значение контраста, h – весовая функция, позволяющая учитывать светотехническую

задачу, $K(x,y)$ – обобщенный контраст в точке сцены, определяемый как

$$K(x,y) = \frac{|\text{grad}(L(x,y)p(x,y))|}{\bar{L}}, \quad (2)$$

а средняя яркость определяется

$$\bar{L} = \frac{1}{A} \int_{(A)} L(x,y)p(x,y)dx dy, \quad A = \int_{(A)} dx dy. \quad (3)$$

Переменные x и y – определяются в плоскости анализа кадра изображения, видимого из исследуемой точки, в заданном направлении, $p(x,y)$ – функция, связанная с неравномерностью плотности распределения колбочек и палочек по сетчатке глаза.

В предложенном критерии любое изменение яркости будет давать вклад в результат. При этом очевидно, что перепады яркости ниже некоторой яркости не вносят дискомфорта в восприятие. Отметим, что величина Q есть обобщение видимости, в которой должна учитываться решаемая зрительная задача, что требует отдельного исследования. В рамках настоящей работы ограничимся предельным случаем $Q=1$.

$$K(x,y) = \begin{cases} L(x,y) \leq L_{\text{пор}} & \rightarrow 0 \\ L(x,y) > L_{\text{пор}} & \rightarrow K(x,y) \end{cases} \quad (4)$$

3. Экспериментальное исследование критерия качества освещения в московском метрополитене

В рамках нашей работы было проведено исследование критерия качества в реальных осветительных установках. В качестве объектов исследования были выбраны новые станции московского метрополитена, построенные в последние годы. Такой выбор был обусловлен наличием нетиповых ОУ в одном классе объектов и тем фактом, что в метрополитене применяется огромное количество бликующих строительных материалов – гранит, мрамор, металл, стекло и т.п.

В качестве исследуемых станций была выбрана 21 станция. Станции выбирались до проведения эксперимента как заведомо «хорошие», так и «плохие» – на которых было очевидно, что освещение сильно бликует или наоборот кажется мне достаточно равномерным. При проведении эксперимента, на каждой станции выбирались от 1 до 4-х ракурсов, в которых производилась съемка широкодиапазонной фотографии фотоаппаратом Nikon D3100 в Raw формате. Также проводился замер яркости яркомером Konika Minolta LS-100 для последующей нормировки фотографии на абсолютные значения яркости.

В эксперименте принимали участие три человека, которые выставляли субъективную оценку качества освещения станции по шкале от 0 до 10. При этом 0 – соответствует условно «качественному» освещению, 10 – освещение на станции дискомфортно. При этом под «качеством» в первую очередь понимался зрительный комфорт, вызванный освещением на станции.

При обработке результатов по предложенному критерию качества, в качестве пороговой яркости на первом этапе была взята средняя яркость по станции. Отметим, что аналогично низкие значения яркости отсекались и в работе [2], где также делается попытка анализа качества освещения на основе пространственно-углового распределения яркости. На рисунке 1 сверху представлена оригинальная фотография станции метро Говорово и ее контраст, а снизу соответствующие изображение после коррекции по формуле (4).

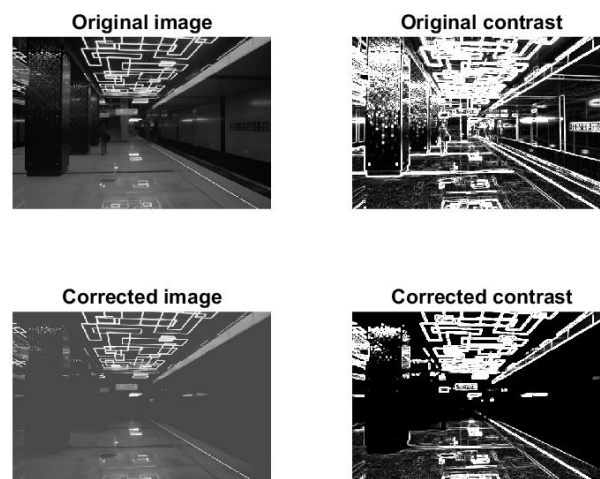


Рис. 1. Обработка фотографий станции Говорово.

На рисунке 2 представлена карта рассеяния критерия качества освещения и ответов наблюдателей. Коэффициент корреляции для полученных результатов составил 0.5709.

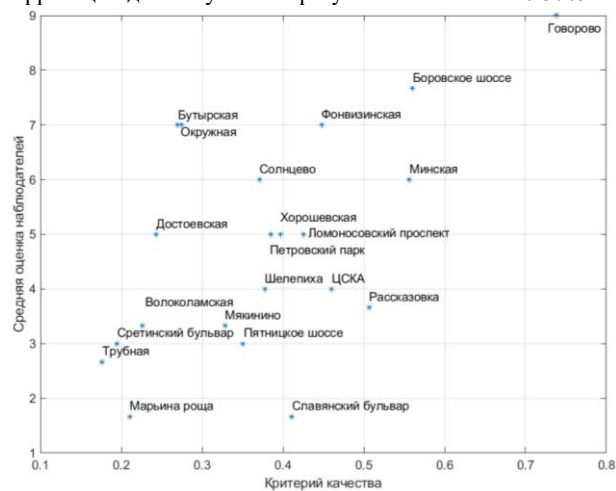


Рис. 2. Рассеяние средней оценки наблюдателей и критерия качества освещения при яркости адаптации равной средней яркости на станции. Шрифт графика увеличить

Вопрос пороговой яркости для каждой из станций неоднозначен. Необходимо учитывать, что проведение эксперимента в метро было сопряжено с организационными сложностями и временными ограничениями, в результате наблюдатели находились на станции от 5 до 15 минут. При этом перемещались между станциями в вагонах метро, в которых яркость менялась очень сильно. При этом были проведены замеры яркости в вагонах и было получено среднее значение 183 кд/м^2 . Предположим, что пороговая яркость должна формироваться отчасти от средней яркости по станции и средней яркости в вагонах метро

$$L_{\text{пор}} = cL_{\text{ср.вагон}} + (1-c)L_{\text{ср.станции}} \quad (5)$$

Так для $c=0.5$ коэффициент корреляции составил 0.7586, что является сильной корреляцией по шкале Чеддока. Также был проведен расчет зависимости коэффициента корреляции от коэффициента c в диапазоне от 0 до 1. В результате коэффициент корреляции лежал от 0.57 до 0.77.

На основании проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что в целом предложенный критерий качества хорошо согласуется с экспертными оценками наблюдателей.

4. Моделирование станций московского метрополитена

Для 4-х станций были построены модели в DIALux и проведен расчет UGR, результаты расчета приведены в таблице 1. Отметим, что DIALux, в силу диффузной модели отражений, лежащей в основе метода излучательности, учитывает только прямые блики от источников света, а как видно на рисунке 1, на станциях огромное количество вторичных бликов.

Все станции уложились в нормы по UGR, но наблюдатели испытывали дискомфорт на станциях Говорово и Боровское шоссе. При этом, важно, что динамика UGR и предложенного критерия качества имеют сходную тенденцию. Таким образом, предложенный критерий качества не только не противоречит UGR, но и уточняет его.

Одним из несмещенных методов моделирования уравнения глобального освещения являются локальные оценки метода Монте-Карло [1]. В рамках нашей работы был реализован этот алгоритм. На основе созданной программы был проведен расчет трех исследуемых станций. На рисунке 4 представлены фотографии и визуализации этих станций.

Станция	Оценка	UGR	Q
Говорово	9	17	0.94
Боровское шоссе	8	16	0.58
Солнцево	6	19	0.50
Ломоносовский проспект	5	12	0.48

Табл. 1. Результаты моделирования станций в DIALux.

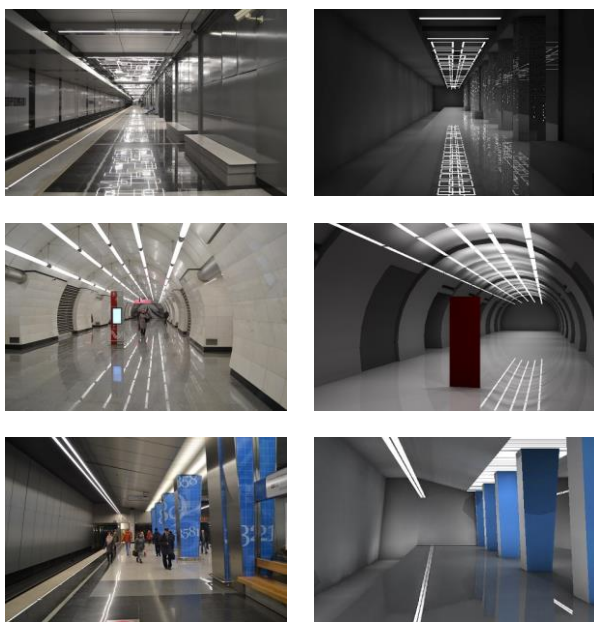


Рис. 4. Фотографии и визуализации станций Московского метрополитена: Говорово, Окружная, Ломоносовский проспект.

Для полученных визуализаций был также рассчитан критерий качества. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Станция	Эксперимент	Визуализация
Говорово	0.9396	1.0157
Окружная	0.3200	0.3991
Ломоносовский проспект	0.4755	0.2558

Табл. 2. Значения критерия качества по фотографиям и визуализациям моделей станций.

Результаты для станций Говорово и Окружная получились очень близкими к эксперименту. Расхождение же для станции Ломоносовский проспект, по всей видимости, связано с неточностью построения модели.

5. Заключение

Предложенный критерий качества, на данный момент, успешно апробирован как на лабораторной установке, так и в реальных осветительных установках. Безусловно, требуется еще огромное количество экспериментов, прежде чем рассмотренный критерий сможет найти свое отражение в повседневной инженерной практике при расчетах ОУ.

Тем не менее, проведенные эксперименты показывают, что предложенный критерий позволяет не только оценивать уже существующую осветительную систему, но и может оценивать качество освещения еще не существующей ОУ, только моделируемой на компьютере.

Появление новых методов решения уравнения глобального освещения, позволяющих не смещено оценивать непосредственно яркость, должно найти свое применение в инженерной практике светотехнического проектирования. И уже в целом этот процесс начинается, так DIALux Evo построен на методе фотонных карт, однако в России до сих пор он не находит широкого распространения. А даже там, где он используется в качестве моделей отражения, зачастую используют диффузную. Однако, возможность моделирования непосредственно яркости, с появлением критерия качества на ее основе, становится уже не самоцелью, а подлинной ценностью.

6. Благодарности

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам московского метрополитена, принявшим участие в эксперименте. А также лично и.о. главного инженера М. А. Шевченко и старшего механика службы электроснабжения Малютину П. В. Отдельно выражаем благодарность Столяревской Р. И. за помощь в определении погрешностей измерений.

7. Литература

- [1] Budak V., Zheltov V., Notfulin R., Chembaev V. Relation of instant radiosity method with local estimations of Monte Carlo method // Journal of WSCG. 2016.
- [2] Cai H. Luminance gradient for evaluating lighting // Lighting Res. Technol. 2013; 0: 1–21
- [3] Ferree C. и Rand G. Tr. IES 1915
- [4] Kajiyu J.T. The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'86), 1986. V.20, N4. P.143-150
- [5] Будак В.П., Желтов В. С., Чембаев В.Д., Мешкова Т.В. Оценка качества внутреннего освещения в сценах с неравномерными блестящими источниками // GraphiCon 2018, Томск, 24–27 сент., 2018 г. С.411-414
- [6] Будак В.П., Желтов В. С., Мешкова Т.В., Нотфуллин Р.Ш. Оценка качества освещения на основе пространственно-углового распределения яркости // Светотехника. 2017. № 3. С. 17-22.
- [7] Епанишников М. М. Принципы нормирования и методы расчета освещения помещений общественных

зданий: Автореферат дисс. доктора технических наук // МЭИ, Москва, 1966. 42 с.

Об авторах

Будак Владимир Павлович, д.т.н., профессор кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Желтов Виктор Сергеевич, к.т.н., ассистент кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Чембаев Виктор Дмитриевич, аспирант кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Мешкова Татьяна Валерьевна, аспирант кафедры светотехники национального исследовательского университета "МЭИ".

Формирование эргономических требований к проектированию бытовых кухонных приборов

М.А. Викулова¹, Ю.П. Хмелевский¹
mascha.vikulova@yandex.ru|ykhm@mail.ru

¹Национальный исследовательский Томский Политехнический университет, Томск, Россия

В настоящее время бытовые приборы стали неотъемлемой частью окружающей среды человека. Поэтому форма всех элементов бытовых приборов должна быть удобной и безопасной в использовании. Однако, не существует ГОСТов, нормативов и требований, которые бы регламентировали эргономику бытовых приборов. В данной работе на основе антропометрических данных определены основные размеры и параметры ручки устройства, панели управления и плоскостей, с которыми взаимодействует пользователь. Данный метод может быть использован для любого типа устройств.

Ключевые слова: эргономика, бытовые приборы, антропометрия, промышленный дизайн

Forming Ergonomic Requirements for the Design of Household Kitchen Appliances

M.A. Vikulova¹, Yu.P. Khmelevkiy¹
mascha.vikulova@yandex.ru|ykhm@mail.ru

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Currently, household appliances have become an integral part of the human environment. Therefore, the shape of all elements of household appliances should be comfortable and safe to use. However, there are no state standards, standards and requirements that would regulate the ergonomics of household appliances. In this paper, on the basis of anthropometric data, the main dimensions and parameters of the device handle, control panel and planes with which the user interacts are determined. This method can be used for any type of device.

Keywords: ergonomics, home appliances, anthropometry, industrial design

1. Введение

Эргономика является неотъемлемой частью дизайн проектирования. Данная дисциплина позволяет обеспечить эффективное и безопасное взаимодействие между людьми и объектами окружающей среды, а также обеспечить общее функционирование системы [1]. При эргономическом проектировании используется целостный подход, в рамках которого рассматриваются и учитываются физические, когнитивные и социальные факторы.

Ежедневно человек взаимодействует с большим количеством бытовых приборов (техникой, которая предназначена для облегчения домашних работ и создания комфорта в повседневной жизни [2]): каждое утро наливает из чайника чай, варит кофе в кофемашине, готовит сок в соковыжималке, греет обед в микроволновке, готовит ужин в мультиварке и так далее.

Таким образом, целью данной работы является формулирование требований для бытовых кухонных приборов, которые бы отвечали антропометрическим данным человека, а также обеспечивали комфортное и безопасное использование устройства. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- Изучение существующих ГОСТов, регламентирующих кухонные бытовые приборы
- Изучение антропометрических данных
- Выдвижение гипотезы
- Проведение гипотетического анализа элементов корпуса
- Создание макетов и проведение эксперимента
- Формулирование эргономических требований к бытовому кухонным приборам

2. Существующие нормативы, регламентирующие проектирование бытовых приборов

В настоящее время технические аспекты проектирования регламентируются ГОСТами – межгосударственными стандартами, которые были приняты Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ. Межгосударственные стандарты применяются для соблюдения технических регламентов, а также оценки соответствия данным требованиям. Для каждого технического регламента существует два перечня стандартов. Первый необходим для выполнения требований технического регламента, а второй содержит правила и методы испытания продукции. Некоторые межгосударственные стандарты разрабатываются на основе международных стандартов (ИСО, МЭК, ЕЭК ООН), а также европейских аналогов.

Все существующие ГОСТы собраны в Общероссийском классификаторе стандартов. В данном классификаторе были найдены и изучены все ГОСТы, регламентирующие проектирование бытовых приборов. Данные стандарты описывают технические требования, правила и методы испытания, рекомендуемые материалы изготовления, маркировку, упаковку, транспортировку, хранение и безопасность при изготовлении и эксплуатации. Однако ни один из существующих ГОСТов не описывает эргономические требования при проектировании бытовых приборов. Так, в ГОСТе 7400-81 «Электрочайники и электросамовары бытовые. Технические условия» говорится: «Форма и расположение ручек должны обеспечивать удобство захвата и безопасную переноску приборов», но отсутствуют рекомендуемые размеры, которые бы отвечали эргономическим требованиям [3].

3. Антропометрические параметры в проектировании

Для обеспечения удобного и безопасного использования бытовые приборы должны иметь размер и форму, соответствующую антропометрическим параметрам человека. Антропометрические параметры зависят от возрастных, половых, расовых и физических характеристик. Антропометрические данные также описываются в некоторых ГОСТах, которые были приняты в 1980-1990 годах. Однако, в мире происходит непрерывный процесс акселерации, в результате чего за прошедшие 30 лет средний рост населения России увеличился на 18 сантиметров (средний рост в 1980-х годах – 160 см, средний рост в 2018 году – 178 см) [4]. Таким образом, антропометрические данные, полученные в 1980-х годах не актуальны на сегодняшний день. В настоящее время, при проектировании могут быть использованы международные стандарты ИСО, которые содержат результаты исследований 2010-х годов.

4. Формирование эргономических требований

Эргономические требования распространяются на все элементы корпуса, с которыми осуществляется непосредственный контакт пользователя. При комплексном рассмотрении бытовых приборов можно выделить три основных элемента: ручка устройства, панель управления (экран и органы управления) и поверхности, которых касается человек в процессе эксплуатации. Размеры всех элементов должны соответствовать антропометрическим данным, в данном случае размерам руки человека.

Первым этапом в процессе проектирования является определение целевой аудитории, это необходимо для правильного выбора диапазона антропометрических данных. В первую очередь рассмотрим особенности проектирования ручки бытовых приборов. Закономерности формообразования рукояток и органов управления, а также их соответствие строению руки и физическим возможностям человека изучает дисциплина хиротехника [5]. При проектировании ручки устройства, в первую очередь необходимо определить ее функцию, чтобы понять, какое пространственное положение будет занимать рука.

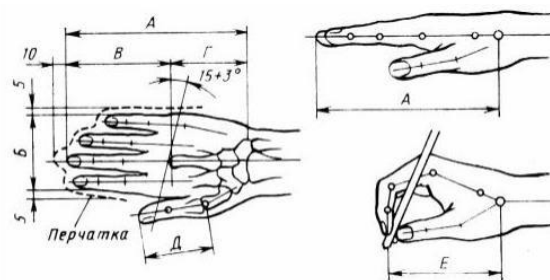
В случае с бытовыми приборами, ручка чаще всего используется только для подъема и удерживание объекта. При подъеме любого объекта за ручку кисть совершает хватательное движение, то есть предмет или его часть удерживаются в определенном положении пальцами или ладонью. Так как кроме удерживания объекта ничего не требуется, то используется крюковой захват, то есть объект подвешивается на согнутых пальцах при поддержке или без поддержки большого пальца.

Наиболее удобный захват обеспечивается только при максимальном контакте между поверхностью ладони и пальцев и ручкой, поэтому форма ручки должна иметь сплющенное цилиндрическое или эллиптическое сечение. Также форма ручки должна соответствовать основным контурам руки во время хватки, но в то же время не должно быть контурного соответствия между сжатыми пальцами и ручкой, так как увеличивается риск несоответствия большому количеству рук.

На рис. 1 представлены основные размеры кисти, которые необходимы для определения размеров ручки [4].

Длина ручки зависит от ширины кисти, для данного параметра необходимо использовать максимальное значение, чтобы обеспечить удобство использования для максимального количества пользователей. Обхват ручки зависит от длины кисти. Так как форма ручки преимущественно должна иметь эллиптическое сечение, то длинная сторона должна равняться расстоянию А, а короткая – расстоянию В (рис. 2).

В этом случае необходимо выбрать минимальное значение, так как человек с маленькой рукой не сможет обхватить ручку слишком большую в диаметре.



Измеряемая величина	Обозначение (по рис. 1.18)	Мужчины		Женщины	
		Средняя	Максимальная	Средняя	Максимальная
Длина кисти	А	193	208	176	178
Ширина кисти (у основания большого пальца)	Б	86	94	74	79
Длина среднего пальца	В	117	127	102	104
Длина пясти (до центра кулака)	Г	76	81	71	74
Длина большого пальца	Д	69	76	61	61
Длина кисти при письме	Е	117	127	–	104

Рис. 1. Размеры кисти

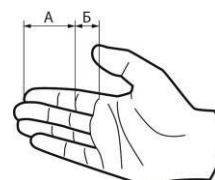


Рис. 2. Необходимые размеры кисти для ручки с эллиптическим сечением

Ориентация ручки, по возможности, должна обеспечивать естественное положение кисти и ладони, при котором запястье допускает пронацию не более чем на 30°. Таким образом, угол наклона ручки может варьироваться от 0 до 30°.

Следующим элементом является панель управления, которая включает в себя экран и органы управления. Ориентация панели управления должна обеспечивать естественное положение тела человека. Угол наклона панели управления относительно горизонтальной плоскости зависит от того, в каком положении осуществляется работа и от оптимальных углов обзора человека. Так как большинство бытовых приборов предназначены для работы в положении стоя, должен учитываться оптимальный угол поворота головы и глаз вниз (рис. 3) [6].

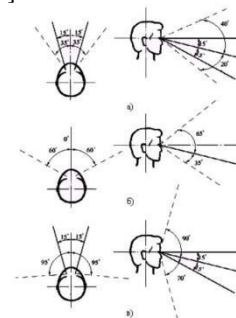


Рис. 3. Поле зрения

Так как оптимальный поворот глаз 15°, а головы – 35°, следовательно, оптимальный наклон панели управления – 15°, максимальный 35°. Размер панели управления зависит от размера экрана и количества органов управления.

Орган управления состоит из приводного элемента и исполнительной части. Форма приводного элемента должна интуитивно подсказывать пользователю, чем и каким образом необходимо использовать тот или иной орган управления.

Размер приводного элемента зависит от размера той части тела, с которой он будет соприкасаться.

В рамках данной работы рассмотрим только один вид органов управления, так как в большинстве бытовых приборов используются кнопки. Чаще всего для нажатия кнопки пользователь использует указательный палец. Согласно нормативам, максимальный размер указательного пальца равен 23 мм в диаметре [7]. Было предположено, что для комфортного использования размер кнопки должен равняться половине диаметра указательного пальца – 11,5 мм.

При проектировании панели управления также должна быть учтена возможность случайного нажатия кнопок. В случае если случайное нажатие нежелательно, можно использовать один из трех вариантов решения:

- увеличить расстояние между кнопками;
- предусмотреть специальную защиту кнопки: ограждение или специальный колпак;
- утопить кнопки внутрь корпуса.

При проектировании также важно обращать внимание на поверхности, с которыми взаимодействует пользователь. В случае если в корпусе есть какие-либо отверстия, их размер должен полностью исключать случайное попадание пальца внутрь. Для расчета диаметра или ширины отверстия используется минимальный диаметр указательного пальца, из которого вычитается небольшой припуск. Минимальный диаметр указательного пальца – 18 мм, следовательно, диаметр отверстия должен быть меньше данного значения.

Кроме этого, поверхности могут подсказывать пользователю, как использовать устройство. Так, например, на корпусе могут присутствовать специальные насечки, которые предотвращают скольжение рук по гладким поверхностям и указывают пользователю, в каком месте нужно взяться, чтобы открыть крышку, а в каком для перестановки прибора. Однако, необходимо учитывать, что высота насечек не должна превышать 3 мм, для предотвращения повреждений кожного покрова.

5. Проведение эксперимента

Данная гипотеза проверяется на примере проектирования устройства для выращивания микроводорослей в домашних условиях. Данное устройство представляет собой корпус с электроникой и панелью управления, на котором располагаются 2 емкости для выращивания микроводорослей. Таким образом, в данном устройстве присутствуют все вышеназванные элементы.

В случае с устройством для выращивания микроводорослей, целевой аудиторией являются спортсмены и люди, которые заботятся о своем здоровье. Таким образом, данным устройством будут пользоваться как мужчины, так и женщины всех возрастов.

Для проведения эксперимента было создано 4 вида ручек: с эллиптическим, круглым (диаметр 38 мм и 110 мм) и квадратным сечением (две ручки были прямые и две – с наклоном 15°); корпус с панелью управления без наклона и с наклоном 15°.

На первом этапе был проведен графический анализ всех объектов на предмет соответствия антропометрическим данным. Результаты представлены на рис. 4-10. Серым цветом отмечены места контакта ладони и пальцев с ручкой.

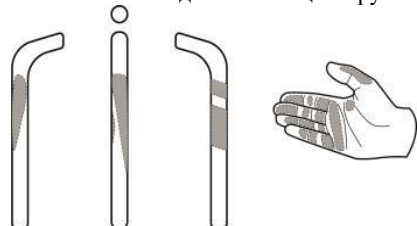


Рис. 4. Ручка с круглым сечением 38 мм в диаметре (размеры по ГОСТу), прямая

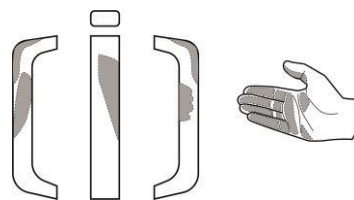


Рис. 5. Ручка с квадратным сечением 40x30 мм, прямая

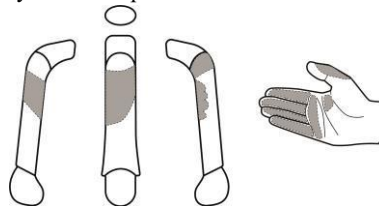


Рис. 6. Ручка с эллиптическим сечением 40x30 мм, угол наклона 15°

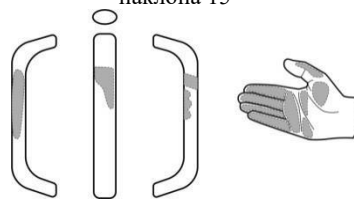


Рис. 7. Ручка с эллиптическим сечением 30x20 мм, прямая

В результате графического эксперимента было выявлено, что ручка, представленная на рис. 7, обеспечивает наибольшую площадь касания ладони и пальцев с ручкой. Следовательно, данный вариант должен быть удобнее в использовании.

Ниже представлен графический анализ панели управления. Так как бытовые приборы в большинстве случаев используются на кухне, высота поверхности, на которой располагается устройство, равна 850 мм.

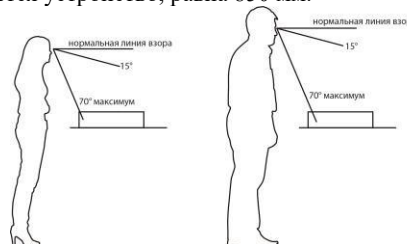


Рис. 8. Поле обзора горизонтальной панели управления в положении стоя

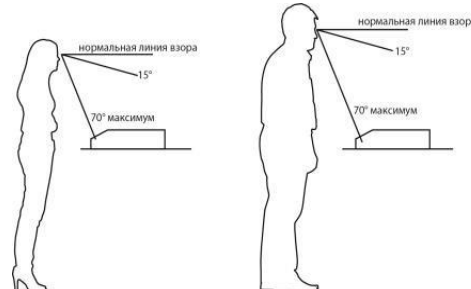


Рис. 9. Поле обзора панели управления с углом наклона 30° в положении стоя

Далее из скульптурного пластилина и бумаги были созданы макеты всех объектов и собрана тестовая группа в количестве 10 человек разного пола, возраста и с разными антропометрическими данными. Тестовая группа оценивала удобство взаимодействия с каждым вариантом на всех этапах эксплуатации устройства. Результаты представлены на рис. 11.

В ходе эксперимента тестовая группа оценила ручку (рис. 7) наиболее высокими баллами, что подтверждает выдвинутую гипотезу.



Рис. 11. Тестирование ручек

Ручка (рис. 4), выполненная по ГОСТу, слишком тонкая для бытовых приборов. В этом случае происходит минимальный контакт ладони с поверхностью, что не позволяет комфортно удерживать вес полтора килограмма.

Ручки (рис. 5-6) также не обеспечивают максимального контакта с поверхностью из-за слишком большого размера. Однако, тестовая группа отметила преимущество ручки (рис. 6), так как она располагается под углом 15° , что обеспечивает более удобный захват.

Эксперимент подтвердил, что панель управления должна располагаться под небольшим углом, что обеспечивает комфортную работу как в положении стоя.

6. Заключение

В результате исследования, были сформулированы основные требования к проектированию элементов бытовых кухонных приборов.

Ручка для бытовых приборов должна иметь сечение в виде эллипса с оптимальными размерами 30×20 и, при возможности, быть под углом $0-30^\circ$. Длина ручки должна быть не меньше 94 мм, расстояние от емкости до ручки составляет 45 мм.

Панель управления должна располагаться под углом относительно горизонтальной плоскости на $15-35^\circ$. Размер горизонтальной плоскости зависит от размера экрана и количества органов управления.

Минимальный размер органов управления должен быть 11,5 мм, но, при возможности, желательно увеличивать размер кнопки до 15 мм.

7. Литература

- [1] Психология труда, инженерная психология и эргономика. Труды Международной научно-практической конференции «Эрго 2014» // Под ред. А.Н. Анохина, П.И. Падерно, С.Ф. Сергеева. СПб.: Межрегиональная эргономическая ассоциация, 2014. — 452 с.
- [2] Бытовые приборы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/826631> (Дата обращения: 11.04.19)
- [3] ГОСТ 7400-81. Электрочайники и электросамовары бытовые. Технические условия
- [4] Акселерация роста и развития [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://narfu.ru/agtu/www.agtu.ru/fad08f5ab5ca9486942a52596ba6582elit.html> (Дата обращения: 11.04.19)
- [5] Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна: Учебник для студентов вузов/ И.С. Степанов, А.Н. Евграфов, А. Л. Карунин, В.В. Ломакин, В.М. Шарипов; Под общ. ред. В.М. Шарипова. – М.: МГТУ “МАМИ”, 2002. - 230 с.
- [6] Чулков Н. А. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 180 с.
- [7] СТБ ЕН 547-3-2003. Безопасность машин. Размеры тела человека. Часть 3. Антропометрические данные

Об авторах

Викулова Мария Алексеевна, студентка Томского Политехнического Университета. E-mail: mascha.vikulova@yandex.ru

Хмелевский Юрий Петрович, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники. Томский Политехнический Университет. E-mail: hmelevskiy@tpu.ru

Использование бионического образа в проектировании детских саней как наиболее визуально комфортного

А.Н.Готина¹, Ю.П. Хмелевский²

gotina.ancka@yandex.ru hmelevskiy@tpu.ru

¹Томский политехнический университет, Томск, Россия

Данная статья посвящена выбору бионического образа как наиболее визуально комфортному при проектировании промышленных изделий. В работе описана проблема отсутствия у промышленных изделий визуально комфортного художественного образа. Проведен подробный анализ проблемы исследования и определены критерии оценки вариантов эскизных решений. Были выбраны три художественных образа детских саней связанные основной функцией проектируемого изделия. По каждому художественному образу было создано эскизное решение корпуса изделия. С помощью метода экспертных оценок профессионалами в области дизайна было определено наиболее перспективное эскизное решение корпуса с точки зрения эстетических и эргономических качеств. На основе выбранного, бионического наиболее перспективного решения была разработана трехмерная модель проектируемого объекта. В соответствии с бионическим обозом детских саней было выбрано гармоничное колористическое решение. Объект имеет эффектный внешний вид за счет яркого образа горного барана, а также соответствует эстетическим и эргономическим параметрам. В статье были сформированы этапы бионического проектирования детских саней в соответствии с критериями эстетики и эргономики, которые могут быть использованы для проектирования подобных объектов.

Ключевые слова: бионический образ, детские сани, критерий эргономики, критерий эстетики, образ.

The use of a bionic image in the design of children's sledges as the most visually comfortable

A.N. Gotina¹, Yu.P. Khmelevsky ²

gotina.ancka@yandex.ru | hmelevskiy@tpu.ru

¹ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

This article is devoted to the choice of a bionic image as the most visually comfortable when designing industrial products. The paper describes the problem of the lack of industrial products visually comfortable artistic image. A detailed analysis of the research problem was carried out and criteria for evaluating the options for outline solutions were determined. Three artistic images of children's sledges connected with the main function of the designed product were chosen. For each artistic image, a conceptual design of the product body was created. Using the method of expert assessments by professionals in the field of design, the most promising outline solution of the case was determined in terms of aesthetic and ergonomic qualities. Based on the selected, bionic most promising solution, a three-dimensional model of the designed object was developed. In accordance with the bionic cart of children's sledges, a harmonious coloristic solution was chosen. The object has a spectacular appearance due to the vivid image of a mountain sheep, and also corresponds to aesthetic and ergonomic parameters. The article formed the stages of bionic design of a children's sled in accordance with the criteria of aesthetics and ergonomics, which can be used to design such objects.

Keywords: bionic image, children's sleigh, ergonomic criterion, aesthetics criterion, image.

1. Введение

Один из самых популярных средств перевозки грузов, катания и развлечения в зимнее время года являются сани. Конструкция саней проста и удобна в использовании. Также сани являются основным видом перевозки детей в зимнее время года. Поэтому в качестве объекта проектирования были выбраны детские сани. Целью исследования является применение бионического образа в проектировании как наиболее комфортного. В качестве объекта проектирования взяты сани для детей, возрастная категория от 8-12 лет, которые отвечают основным эргономическим и антропометрическим требованиям, имеют эстетически привлекательный вид и уникальный образ. Также были сформированы определенные задачи для достижения поставленной цели: Разработка вариантов художественного образа проектируемых саней, формирование критериев для оценки вариантов, анализ разработанных вариантов в соответствии с заданными критериями, выбор наиболее оптимального варианта на основе анализа с помощью заданных критериев, моделирование и визуализация проектируемого объекта. Также в исследовании представлены бионические образы и образ стихии, необходимо в ходе сравнения доказать какие образы являются предпочтительнее для создания объектов.

2. Бионический метод проектирования

На сегодняшний день сформировано большое количество методов проектирования [1]. Они позволяют создавать дизайнерам уникальные объекты, которые пользуются спросом. В данном проекте за основу взят бионический метод, поскольку он более всего подходит для разработки проектируемого объекта. В его основе лежит использование природных форм в проектировании объектов [2]. Бионический метод проектирования позволяет более эргономично подойти к разработке объекта, поскольку природные формы наиболее близки к человеку. Природа – это естественная среда обитания всех живых организмов, в том числе и человека. Он использует природные ресурсы для поддержания жизнедеятельности. Также человек берет у природы структуры, функции, образы для разработки различных объектов промышленности, архитектуры, предметов быта. Бионический метод наиболее гармонично подходит для проектирования предметов непосредственного пользования человека. Природа благоприятно влияет на психику человека, обладает успокаивающим эффектом, поэтому формы, напоминающие природу, являются оптимальными в проектировании [3].

Первым этапом являлось создание вариантов художественных образов для проектируемого объекта.

Сани – это объект, который характеризуется скоростью и динамикой. Данные характеристики учитывались в проектировании эскизных вариантов саней.

Первый вариант эскиза – сани, которые по форме имеют образ тела летающей рыбы как представлено на рис.1.

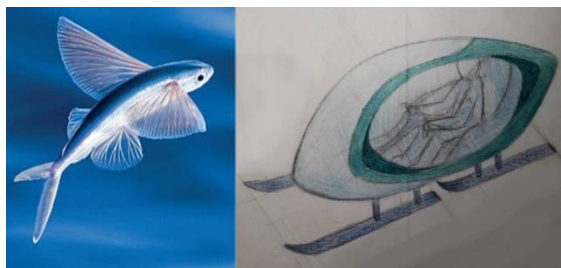


Рис. 1. Сани в образе летающей рыбы

Летающая рыба – это движение, стремление вперед, скольжение по поверхности воды. Она имеет обтекаемую форму, с помощью которой можно развивать большую скорость. Цветовое решение сочетает в себе изумрудные и голубые оттенки, которые напоминают море, тесно связанное с ледниками, снегом. Боковые части саней являются открытыми, они позволяют легко садиться в сани и ощущать динамику движения при езде на санях. Место посадки имеет цветовой акцент в виде канта. Также сани являются управляемыми, в них присутствует руль с механизмом управления.

Второй вариант эскиза саней имеет образ метели как представлено на рис. 2.



Рис. 2. Сани в образе метели

Образ метели – это движение воздушной массы вперед, пластика, динамические элементы. Метель возникает во взаимодействии ветра и снега. Этот вариант является простым и универсальным. Полосы саней имеют место для постановки ног. Сани предназначены для катания, как в одиночку, так и вдвоем. Цветовое решение – это темно-синий цвет, который является холодным и отражает зимнее время года в сочетании с теплым желтым цветом. Желтый цвет придает динамичность, создает акцент на ручках, расположенных на сидении.

Третий вариант эскиза саней имеет образ горного барана вида архар как представлено на рис. 3.



Рис. 3. Сани в образе горного барана

Это животное обитает на высоких горных склонах, покрытых снежными шапками. Они обладают грациозной стройной формой тела, которая позволяет им совершать дальние прыжки [3]. Рога горного барана были взяты за основу разработки ручек для данного эскиза саней. На полозьях саней есть место для постановки ног. Сидение имеет пластическую форму, которая повторяет естественные изгибы человеческого тела.

В процессе работы над проектом был проведен анализ разработанных форм саней по двум основным критериям: эстетика, в которую входят такие пункты, как цветовое решение, художественный образ, композиция и эргономика, в которую входят следующие пункты: удобство эксплуатации, функциональность объекта. Было решено оценивать каждый параметр по десяти бальной шкале. Был создан опрос, который проходили эксперты и в результате выведены средние показатели. По результатам оценки были составлены диаграммы с критериями по каждому варианту саней как представлено на рис. 4.

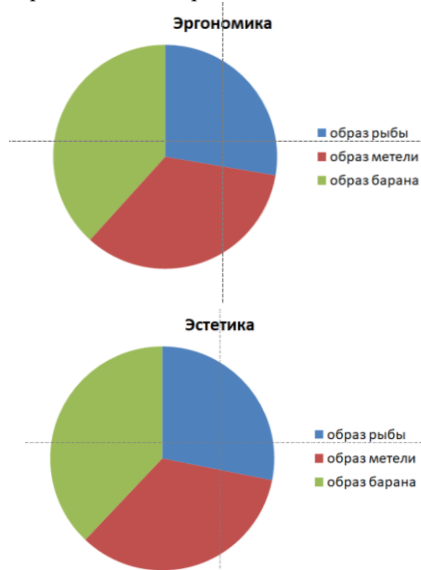


Рис. 4. Диаграммы образов по критериям

По пункту каждого критерия было произведено оценивание также по десяти бальной шкале, далее результаты пунктов суммировались и выводились значения критериев.

Согласно критерию «Эстетика» наибольшее количество баллов набрал вариант эскиза в виде барана (8,5 из 10). Вторым по количеству баллов эскиз саней в образе метели (7,6 из 10). Третьим по количеству баллов стал вариант саней в образе летающей рыбы (6,3 из 10).

По критерию «Эргономика» больше всего баллов получил также эскиз саней в образе барана (9 из 10). Вторым по количеству баллов эскизный вариант саней в виде метели (8 из 10). Третий вариант саней в виде летающей рыбы получил более низкую оценку (6,5 из 10).

В результате экспертных оценок наибольшее количество баллов набрал третий вариант эскиза саней в виде барана. Поскольку более всех соответствует двум основным критериям.

Дальнейшая работа над проектом производилась с выбранным вариантом эскиза.

Для данного образа саней было решено взять сочетание желтого и голубого цвета. В основе лежит образ барана, который обитает в горной местности, горы ближе всего находятся к солнцу, поэтому взято сочетание голубого и желтого цветов. Данные цвета являются контрастными. Голубой – это холодный цвет, который ассоциируется со

льдом, снегом и является успокаивающим цветом. Желтый-это теплый цвет, который обозначает просветление, радость, он разбавляет холодный колорит голубого цвета [4]. Также была произведена доработка общей конструкции саней. На поверхности саней были сделаны выступы, предотвращающие скольжение по поверхности. На ручки и место для поставки ног были добавлены прорезиненные элементы, чтобы исключить скольжение ног и рук. Прорезиненные элементы для ручек являются съемными и имеют фиксаторы, чтобы не скользить по поверхности ручки. Также было увеличено по длине само сидение, чтобы можно было кататься на санях вдвоем. Далее были продуманы варианты положения катания человека на разработанных санках. Сани выполнены из прочного пластика, который придает легкость конструкции, что важно при транспортировке саней.

В результате, согласно этапам проектирования были разработаны и проанализированы три варианта детских саней. Также был проведен экспертный анализ каждого варианта по заданным критериям, в ходе которого был выбран наиболее подходящий вариант, который был доработан и смоделирован в программе как представлено на рис. 5.

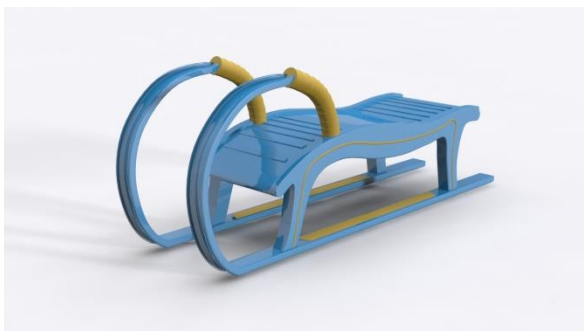


Рис. 5. 3 D модель саней

Данный вариант саней соответствует эргономическим и антропометрическим требованиям, и имеет авторский дизайн, соответствующий основной функции объекта. Представленный проект является концептуальным решением, дальнейшим этапом работы над проектом будет работа с чертежами, конструктивными особенностями, анализ материалов, создание прототипа.

3. Заключение

Таким образом, в ходе исследовательской работы было выявлено, что бионический образ является наиболее приемлемым для создания визуально комфортных художественных образов для объектов. Поскольку является универсальным и приближенным к человеческому миру.

4. Литература

- [1] Агнес Гийо, Жан-Аркади Мейе «Бионика. Когда наука имитирует природу» перевод - М. Широкова. – М.: Техносфера. 2013г.-296 с.
- [2] Джон Гейдж «Цвет и его Значение: Наука, Искусство, Символизм», Thames & Hudson, 2015 г. -320 .
- [3] Рунге В.Ф.,Сеньковский В.В. «Основы теории и методологии дизайна» Учебное пособие(конспект лекций)–М.:МЗ-Пресс,2003 г.-252с.
- [4] Э.Гьялве «Краткий курс промышленного дизайна» перевод с англ., П.А. Кунина.–Машиностроение, 1984 г. -192 с.

Об авторах

Готина Анна Николаевна, студент группы 8ДБ1 ОАР ИШИТР Томского Политехнического Университета. e-mail gotina.ancka@yandex.ru

Хмелевский Юрий Петрович, старший преподаватель ОАР ИШИТР Томского Политехнического Университета, hmelevskiy@tpu.ru

Тестирование освещения проектируемого объекта в программной среде с учетом различных условий

Н.С. Канкеева¹, Е.М. Давыдова¹
natasha.kank@gmail.com|davydova@tpu.ru.
¹ Томский политехнический университет, Томск, Россия

В данной статье рассмотрен процесс создания уникального светильника «Синхрония», с учетом применения метода художественного формообразования. Основная идея концепции базируется на пластике бионических форм. В данном проектируемом объекте была реализована возможность регулировки света, на основе поворотного механизма, располагающегося на верхней части светильника. Принцип его работы основан на двух рядах планок, одна из которых зафиксирована, а вторая подвижна. Проведено тестирование освещенности данного светильника, с целью прогнозирования разных световых сценариев. Тестирование проводилось в его разных режимах – с открытыми ламелями и закрытыми. Для проведения эксперимента использовалась программная среда DIALux, которая служит для проектирования, расчета и визуализации освещения. Так же во внимание принимались существующие стандарты, регламентируемые СНиПом.

Ключевые слова: светильник, регулировка света, световой дизайн, DIALux

Testing the Lighting of the Designed Object in a Software Environment, Taking into Account Various Conditions

N.S. Kankeeva¹, E.M. Davydova¹
natasha.kank@gmail.com | davydova@tpu.ru
¹ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

This article discusses the process of creating a unique lamp "Synchrony", taking into account the application of the method of artistic shaping. The main idea of the concept is based on the plastic of bionic forms. In this projected object, the ability to adjust the light was implemented, based on a rotary mechanism located on the top of the lamp. The principle of its operation is based on two rows of slats, one of which is fixed, and the second is movable. The illumination of this lamp was tested in order to predict different light scenarios. Testing was carried out in its different modes - with open slats and closed. For the experiment, the DIALux software environment was used, which serves to design, calculate and visualize lighting. The existing standards regulated by SNiP were also taken into account.

Keywords: lamp, light adjustment, light design, DIALux

1. Введение

В современной жизни человек повседневно пользуется искусственными источниками освещения. Их с полным основанием можно отнести к системе, которая обеспечивает комфортное нахождение человека в любом помещении. Так же следует отметить, что уровень освещенности оказывает влияние на полноценность отдыха и психоэмоциональное состояние.

Сейчас на рынке светотехники можно заметить большое разнообразие декоративных светильников, которые служат объектом интерьера и дополняют его. Их классифицируют по следующим признакам: стилю, типу технологий, способу питания, мощности, месту установки, по назначению и др. признакам [2]. Поэтому при выборе продукта покупатель обращает внимание на тот или иной объект исходя из своих потребностей.

Заинтересовать потребителя только внешней оболочкой и стандартным набором функций достаточно сложно. Поэтому для создания конкурентоспособного объекта следует обратить внимание и на техническую составляющую. Таким образом, целью работы является проведение нескольких тестирований освещения светильника «Синхрония» в различных условиях.

Для достижения поставленной цели были определены основные задачи:

- Выбрать программу для тестирования.
- Выбрать помещение для проведения тестирования
- Проанализировать и выбрать условия для последующего тестирования.
- Произвести экспериментальное тестирование освещения в программной среде.

- Провести анализ и сделать выводы.

2. Описание создания оболочки

Разработка оболочки начинается с выбора образа и концепции. Благодаря методу художественного формообразования, который позволяет сформировать целостную идею, применяющуюся в последствии для разработки концепции и эскизных решений.

Основная идея концепции – это создание пластичной бионической формы. Она основывалась на образе рыб, которые собираясь в стаи, создают плавное синхронное движение, своими очертаниями напоминающее волны.

Данный художественный образ был взят за основу исходя из ассоциативного ряда, которое возникает при упоминании рыб и волн, это море, вода, свежий воздух, пляж. Данный ряд вызывает ассоциации с отдыхом и расслаблением, что соответствует основному функционалу светильника - дополнительный декоративный источник освещения и ночник, которые вызывают у потребителя чувства спокойствия, умиротворения, расслабления и защиты, так как в ночное время суток ночник, освещая приглушенным светом помещение, дает людям ощущение уюта и безопасности.

Основой оболочки светильника стал цилиндр, так как данная форма проста в промышленном производстве, не требует использования высокотехнического оборудования, при создании светильника. Выбранная форма – цилиндр – обладает круговым движением, благодаря которому был создан основной декор, напоминающий синхронное перемещение рыб в воде, что задает динамику образу. На внутренние части светильника, состоящей из ламелей – в такт внешнему декору, нанесен стилизованный узор рыб, являющийся прорезями, через которые исходит свет, когда светильник становится ночником.



Рис. 1. Итоговая форма светильника

3. Описание технологии поворотного механизма

На рынке присутствует множество вариантов светильников, но практически все имеют стандартный набор функций, поэтому покупатель больше ориентируется на форму. Так же для того, чтобы создать более конкурентоспособный продукт следует внедрить дополнительные функции, на которые потребитель обратил бы внимание, и они были ему полезны.

Таким образом, для расширения аудитории покупателей был предложен механизм, который бы позволил создать светильник с функцией регулировки яркости света. Данная идея позволила применять светильник не только в качестве интерьерного решения, но и ночника, который может служить дополнительным источником освещения в комнате.

Принцип механизма основан на двух рядах планок – зафиксированный (внешняя окружность) и подвижный (внутренняя окружность). Планки были зафиксированы в верхней и нижней части светильника. Внутренняя окружность вращается за счет установленного в основании подшипника. Регулировка света происходит следующим образом: поворачивая центральную окружность с ламелями, они либо встают друг за другом, позволяя использовать светильник в качестве настольной лампы, либо ламели загораживают проемы наружного цилиндра, преобразуя объект в ночник [3]. Прокрутка планок осуществлялась за счет дополнительного выступающего элемента, установленного на верхней части светильника.

4. Проведение экспериментального тестирования в программной среде

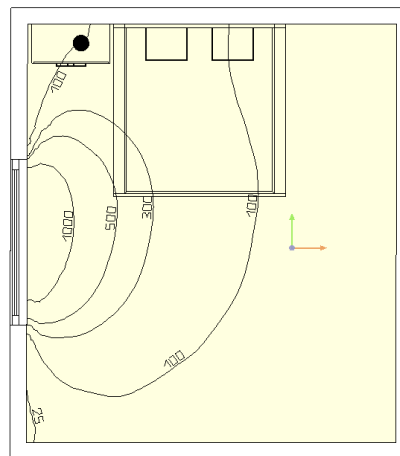
Уровень освещенности играет важную роль в жизни человека. Так, например, слишком тусклое или ярко освещение будут негативно влиять на здоровье и психологическое состояние. Поэтому для того, чтобы правильно рассчитать норму освещенности, создают симуляции в различных программных средах [4].

Одна из наиболее точных и простых программ, где можно провести расчет – это DIALux. Программа предназначена для проектирования, расчета и визуализации освещения, а также позволяет создать полноценный проект местности, здания или помещения. Принцип работы базируется на объектно-ориентированной технологии, главная идея которой заключается в организации среды, где основной элемент – это объект [1].

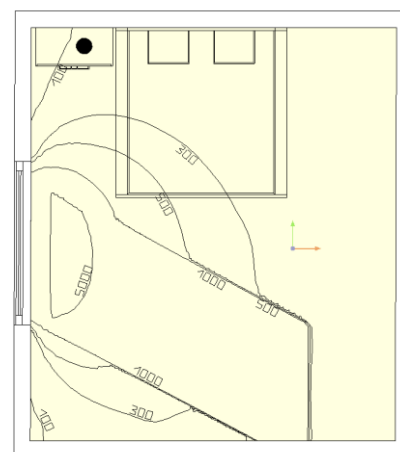
Для более правильного расчета существуют определённые стандарты, которые указаны в СНиП. Согласно документу, норма освещенности в квартире в зависимости от помещения варьируется от 20Лк до 300Лк.

Существует большое количество вариаций, как и где можно разместить светильник, но опираясь на двойную функцию (интерьерный светильник и ночник), выбор был сделан в пользу размещения светильника возле кровати. Поэтому рассмотрим в качестве примера спальню площадью 22 м² и площадью окна в 3 м².

Первый эксперимент – это дневное и ночное освещение без дополнительных источников. Сделав расчёт при двух этих условиях, можно заметить, что в некоторых местах уровень приближается к минимальному (норма для спальни 150Лк). На рисунке 2 показаны графические данные освещенности со значениями (в люксах). Поэтому расположение светильника обосновано тем, что в данном месте недостаточно света и там требуется дополнительный источник освещения для более комфортного пребывания человека в комнате.



а – дневное



б – ночное

Рис. 2. Графические данные тестирования естественных источников освещения

Второй эксперимент – это непосредственно расчет освещения учитывая светильник. Для данного эксперимента было выбрано два условия: тестирование светильника с закрытыми и открытыми ламелями. Учитывая, что светильники используются чаще всего в темное время суток, расчет производился в условиях ночного освещения, когда уровень становится минимальным. На рисунке 3 представлены графические данные расчетов.

Проанализировав данные, которые получились в ходе второго эксперимента, можно заметить, что в варианте, когда ламели закрыты максимальная освещенность равняется 100 Лк. В данных условиях получается достаточно приглушенный свет и возможен комфортный отдых.

При открытых ламелях поток света становится более интенсивным, что можно заметить по характеру графиков представленных на рисунке 4, вариант б.

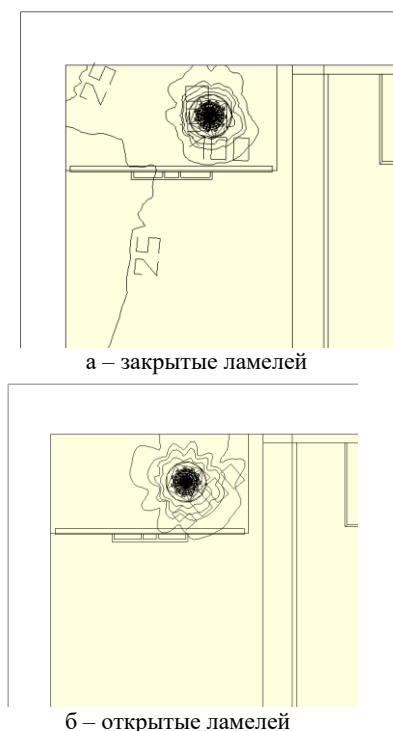


Рис. 3. Графические данные тестирования освещенности со светильником

Для более наглядного представления результатов эксперимента были выведены изображения фиктивных цветов в двух вышеуказанных условиях, показанные на рисунках 4 и 5. Сравнивая выведенные данные можно заметить, что в режиме ночника, света становится намного меньше, чем в режиме светильника. Зоны распространения света так же различаются – в варианте, когда ламели закрыты, зона намного меньше, чем во втором, когда они открыты.

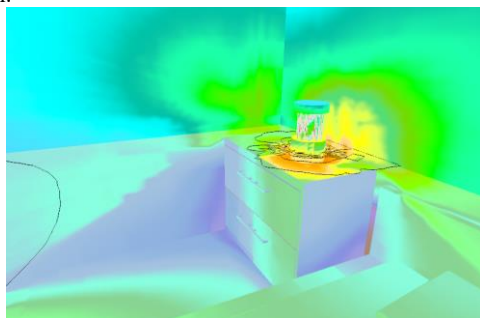


Рис. 4. Отображение фиктивных цветов освещения от светильника в закрытом режиме

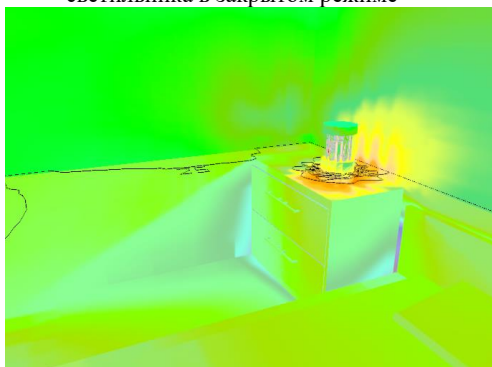


Рис. 5. Отображение фиктивных цветов освещения от светильника в открытом режиме

После проделанных экспериментов можно сделать вывод, что данный светильник возможно использовать как дополнительный источник освещения к комнате. Например, для недолгого и не систематического чтения (минимальный показатель – 40-50 Лк). Если у светильника открыть ламели, то он выдает .. Лк, что подходит под минимальный показатель.

5. Заключение

В процессе реализации проекта было проведено тестирование освещенности в программной среде DIALux разработанного светильника «Синхрония», который имеет два режима – открытые и закрытые ламели. Данная особенность позволяет регулировать поток света: в открытом режиме света становится больше, что позволяет использовать его в качестве светильника; в закрытом света становится намного меньше, и поэтому он используется как ночник. Это позволяет расширить выбор продукта в сфере светового дизайна для потребителя.

Таким образом, было предложено применение программных сред для тестирования освещенности проектируемых светильников, а также на примере светильника «Синхрония» был представлен данный способ и подтверждено различие в уровне освещенности в открытом и закрытом режиме и обосновано применение в данного светильника в качестве декоративного источника освещения.

6. Литература

- [1] DIALux [электронный ресурс]: <https://www.dial.de/en/dialux/> (дата обращения 18.05.2019)
- [2] Декоративные источники света [электронный ресурс]: <https://amperof.ru/osveshenie/dekorativnye-svetilniki.html> (дата обращения 03.05.2019)
- [3] Проектирование интерьерного светильника "Синхрония" / А. В. Коротун [и др.] // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 3-7 декабря 2018 г., г. Томск. — Томск : Изд-во ТПУ, 2018. — [С. 484-485].
- [4] Яковлев А.Н., Гречкина Т.В. Расчёт освещения и проектирование осветительных установок для внутреннего освещения зданий с использованием программного комплекса DIALux. Методические указания / А.Н. Яковлев, Т.В. Гречкина – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – 14 с.

Об авторах

Давыдова Евгения Михайловна старший преподаватель кафедры инженерной графики и промышленного дизайна инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: davydova@tpu.ru.

Канкеева Наталья Сергеевна студент направления промышленного дизайна инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: Natasha.kank@gmail.com

Особенности проектирования детских игровых комплексов

Е.В. Вехтер¹, А.А. Павлова¹
vehter@tpu.ru|aap79@tpu.ru

¹ Томский политехнический университет, Томск, Россия

В данной статье рассмотрены особенности дизайн-проектирования детского игрового оборудования, а также основные этапы проектирования. Были проанализированы основные ступени предпроектного и проектного этапов дизайн-проектирования, и, выявлен исходный набор приемов, обеспечивающих эффективный и в то же время функциональный процесс разработки детского игрового оборудования, отвечающий заданным требованиям к объекту. Кроме того, была предложена упрощенная методическая концепция классификации в виде графовой модели, которая выступала бы вспомогательной теоретической базой при проектировании детских игровых площадок на проектном этапе дизайн-проектирования. Предложенная графовая модель по разным критериям способствует эффективному решению проблематики проектирования игрового пространства для детей, а также способствует модернизации и совершенствованию рынка детских товаров в целом.

Ключевые слова: особенности проектирования, детское игровое оборудование, классификация, графовая модель, концепция, дизайн-проектирование.

Features of the Design of Children's Playgrounds

E.V. Vekhter¹, A.A. Pavlova¹
vehter@tpu.ru|aap79@tpu.ru

¹ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

This article discusses the design features of children's gaming equipment, as well as the main stages of design. The main stages of the pre-design and design stages were analyzed, and an initial set of techniques was identified that provided an effective and at the same time functional development process for children's playground equipment, that meets the specified requirements for the object. In addition, a simplified methodological concept of classification in the form of a graph model was proposed, which would serve as an auxiliary theoretical base for the design of children's playgrounds at the design stage of design. The proposed graph model, according to various criteria, contributes to an effective solution to the problems of designing a play space for children, and contributes to the modernization and improvement of the market for children's goods in general.

Keywords: design features, children's play equipment, classification, graph model, concept, design.

1. Введение

В связи с растущей урбанизацией, роль обустройства городской территории стремительно увеличивается. Проектирование детского игрового оборудования становится все более актуальным для студентов дизайнеров; проектировщиков архитектурной среды; лиц, обустривающих городские территории и т.п. В процессе решения поставленных задач, исполнители сталкиваются с проблемой отсутствия методики, ускоряющий процесс выполнения заданного проекта, поэтому возникает необходимость формирования теоретической базы на основе которой будет формироваться содержание игровой площадки и ее основные составляющие [1].

Цель работы – упорядочить и систематизировать заданную практическую деятельность, ускоряющую процесс проектирования детского игрового оборудования. Данные, подверженные систематизации, должны быть представлены в кратко изложенном графическом виде.

В зависимости от поставленной задачи или цели проектирования, концепция формирования особенностей проектирования может быть выражена индивидуальным способом (определена концепция дизайн-проектирования).

Установление порядка действий проектирования способствует формулированию системы дизайн-проектирования в виде правильного процесса решения задачи, которая характерна процессу мышления дизайнера. Общий процесс дизайн-проектирования, в частности проектировании детского игрового оборудования, делится на следующие этапы:

1. Предпроектный этап.

Предпроектная ступень дизайн-проектирования связана со сбором, обобщением информации о проектной задаче, о возможных способах её решения, о достоинствах и недостатках, имеющихся аналогах этих решений, разработка собственных принципов [2]. Предпроектный анализ включает: анализ проектной ситуации; выявление проблемы; определение потребителя; поиск приемов и методов; разработка дизайн-концепции

2. Проектный этап.

Проектный анализ направлен на создание дизайнерского продукта. Проектная ступень дизайн-проектирования содержит: создание функциональной схемы объекта проектирования; подбор и анализ аналогов; разработка композиционно-пластических решений; выбор оптимального варианта проектного решения; подача проекта; общее заключение по объекту [3].

Системный подход к проектированию в дизайне обретает всю большую востребованность при конструировании промышленных изделий, в частности детского игрового оборудования. Именно поэтому актуально исследование особенностей проектирования детского игрового оборудования, которые необходимы дизайнеру во время проектной стадии выполнения объекта.

2. Особенности процесса проектирования детского игрового оборудования

Главная задача в формировании классификации для проектирования - упорядочить и систематизировать практическую деятельность при разработке детского игрового оборудования.

На этапе предпроектного анализа активно используются эвристические методы дизайн-проектирования

эстетического образа, составляющих и комплектующих детского игрового оборудования. Основными методами являются: бionика (заимствование природных форм), метод аналогий (анализ аналогов, трансформация проектного решения), метод ассоциаций, эмпатии [4].

В работе над концепцией детского игрового оборудования, необходимо проанализировать исходные заданные параметры для проектируемого пространства (предпроектный этап), т.е. при получении или формировании технического задания, основными данными к такому проекту должны быть: размер обустройства территории, ландшафт, назначение соседних сооружений, на основе которых будет определяться содержание игрового комплекса.

Так, например, особенность детского игрового оборудования в эксплуатации детьми, значит, оно должно соответствовать предназначенной категории возраста, эргономическим и антропометрическим характеристикам, содержать исключительно экологически чистые и негорючие материалы и пр. [5]. Из этого следует, что основополагающими факторами при проектировании детского игрового оборудования являются эргономические характеристики, которые определяются на разные возрастные категории, исходя из которых будут планироваться размеры элементов игрового комплекса, а также концепция площадки и ее внутреннее содержание.

Проектный этап дизайн-проектирования является синтезом функционального подхода к проектированию и способностью к реформированию конечной формы\концепции изделия. Проектный этап формируется на основе и классификации данных, полученных на аналитической стадии.

В рамках данного этапа необходим исходный набор приемов, обеспечивающих эффективный и в то же время функциональный процесс проектирования, отвечающий заданным требованиям к объекту. Данная специфика проектирования должна иметь набор критериев, применимых к детскому игровому оборудованию, т.е. наличие систематизированной информации в виде классификации, схемы, методички, наполнение которых должно интегрироваться в реализуемый проект.

Классификация проанализированных данных об исследуемом объекте дает возможность создавать дизайн комплекса в более ускоренном и упрощенном режиме, т.е. всевозможные критерии, характерные для элементов игрового оборудования объединены в единую методическую систему.

Таким образом, для того чтобы облегчить процесс проектирования детских площадок была разработана классификация, представленная в виде графовой модели в графическом виде (Рис.1.). Модель основана на данных предпроектного этапа, с целью упрощения и модернизации проектного этапа.

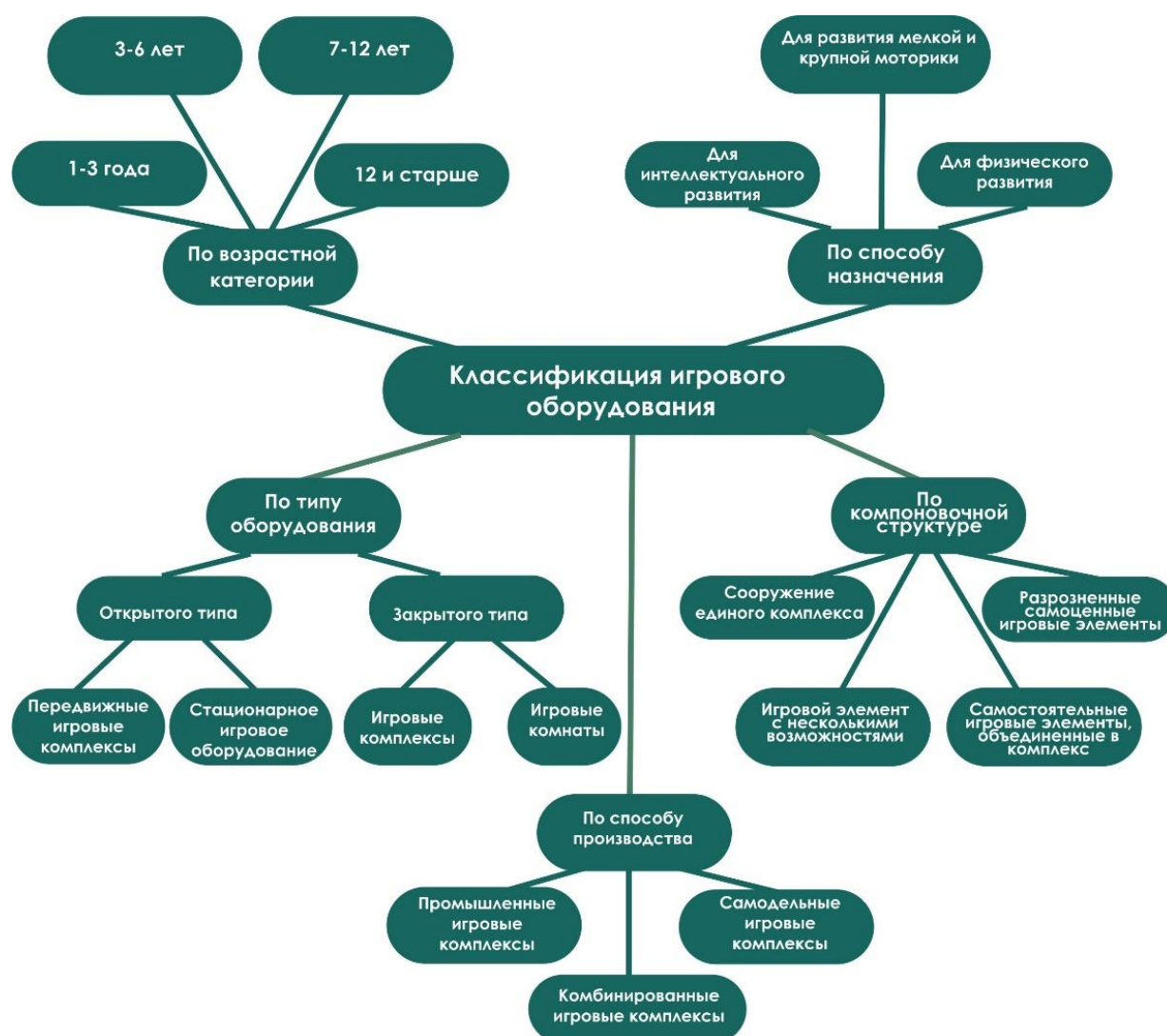


Рис. 1. Графовая модель для проектирования детского игрового оборудования

Классификация была основана на следующих критериях для проектирования детских игровых площадок:

1. Возрастная категория (1-3 года, 3-6 лет, 7-12 лет, 12 и старше).
2. Компонировочная структура оборудования (сооружение единого комплекса, разрозненные самоценные игровые элементы, игровые элементы с несколькими возможностями, самостоятельные игровые элементы, объединенные в единый игровой комплекс и пр.).
3. Способ назначения (для физического или интеллектуального развития детей, для развития мелкой и крупной моторики).
4. Тип оборудования (закрытые и открытые комплексы и их подкатегории).
5. Способ производства (промышленные игровые комплексы, самодельное игровое оборудование и комбинирование перечисленных способов) [6].

3. Заключение

Главным результатом исследования является теоретический анализ проблематики дизайна детской игровой среды, и разработанная на его основе концепция классификации особенностей проектирования в виде графовой графической модели, которая при внедрении в проектную деятельность, будет способствовать эффективному процессу разработки детских площадок с точки зрения дизайн-проектирования.

Предложенная в работе графовая модель для проектирования игрового оборудования по разным критериям, способствует решению проблемы совершенствования и модернизации рынка детских товаров в целом. Систематизированная модель игрового оборудования направлена на решение профессиональных задач дизайнера, в числе которых: повышение технико-эргономической эффективности, надежности проектируемого изделия, соответствие проектируемому возрасту и т.п. В дальнейшем классификация предполагает наполнение критериями, которые позволят систематизировать объект и сделать его более уникальным и совершенным в процессе проектирования.

4. Литература

- [1] Агде Г., Проектирование детских игровых площадок / Г. Агде, А.Нагель, Ю.Рихтер. - М., 1988. - 122 с.
- [2] Григорьев А. Д., Проектирование. Детские игровые площадки. Уч. пособ. - 2012 г. — 234 стр.
- [3] Джонс Дж.К. Методы проектирования: Пер. с англ. -2-е изд., доп.- М.: Мир, 1986.
- [4] Сотникова В. О. Проектирование элементов благоустройства. Учебное пособие для студентов специальности 27030265 «Дизайн архитектурной среды» по дисциплине «Архитектурно-дизайнерское проектирование». Ульяновск, 2008.
- [5] Шимко В.Т. Основы дизайна и средового проектирования. Уч. пособ. - М.: Архитектура-С, 2007. - 160с.: ил.
- [6] Этапы дизайн-проектирования [Электронный ресурс]. - <https://studfiles.net/preview/2688129/page:5/> (дата обращения 02.04.2019).

Об авторах

Вехтер Евгения Викторовна, к. п. н., доцент Инженерной школы информационных технологий и робототехники, зав. лабораторией 3D-моделирования и промышленного дизайна Томского Политехнического университета. E-mail: vehter@tpu.ru

Павлова Анастасия Александровна, магистр Инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского Политехнического университета. E-mail: aap79@tpu.ru

Специфика использование бионических форм при проектировании портативной колонки

А.А. Рудинская¹, Ю.П. Хмелевский¹

Aar52@tpu.ru

¹Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет, г. Томск, Россия

В данной статье рассматривается проблема отсутствия художественного образа у объектов данного типа. Проведен анализ эстетических и эргономических параметров у аналогичных моделей изделия. Были выбраны три художественных образа портативной колонки соответствующих основной функции проектируемого изделия. По каждому художественному образу было создано эскизное решение корпуса изделия. С помощью сравнительного анализа было определено наиболее перспективное эскизное решение корпуса с точки зрения эстетических качеств и соответствия основной функции изделия. Проведено экспериментальное макетирование объекта проектирования с помощью скульптурного пластилина и пеноплекса с последующей оценкой потенциальных пользователей и доработкой формы корпуса изделия и расположения составных частей. Результатом исследования стал макет портативной колонки бионической формы. Объект имеет эффектный внешний вид за счет яркого образа щупальца осьминога, а также соответствует эстетическим и эргономическим параметрам.

Ключевые слова: бионика, портативная колонка, эргономика, визуальное восприятие, тактильное восприятие.

Designing a portable speaker with a support of a bionic method

A. Rudinskaya¹, Y. Khmelevsky¹

Aar52@tpu.ru

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

This article discusses the problem of the lack of an artistic image of objects of this type. The analysis of aesthetic and ergonomic parameters in similar product models. Three artistic images of a portable speaker were selected corresponding to the main function of the designed product. For each artistic image, a conceptual design of the product body was created. Using a comparative analysis, the most promising outline solution of the case was determined from the point of view of aesthetic qualities and compliance with the main function of the product. An experimental prototyping of the design object was carried out using sculpted plasticine and foam, followed by an assessment of potential users and refinement of the shape of the product's body and the location of its components. The result of the study was the layout of a portable bionic column speaker. The object has a spectacular appearance due to the bright image of the octopus tentacle, and also corresponds to aesthetic and ergonomic parameters.

Keywords: bionics, portable speaker, ergonomics, visual perception, tactile perception.

1. Введение

Портативная колонка – это девайс, соединяющий в себе мощность, компактность, мобильность и эргономичность. Подключив аудиосистему к носителю информации (карта памяти, смартфон или ноутбук), на выходе получается воспроизведение медиа-файлов. Несмотря на все особенности данного девайса, в нем зачастую наблюдается отсутствие художественных образов. Именно поэтому целью данной статьи является рассмотрение использования бионических форм в дизайн-проектировании портативного музыкального устройства.

Бионическое направление в дизайне занимает прочное место и относится к одним из самых перспективных путей развития дизайна. Бионика (от греч. *bíon* - элемент жизни, буквально - живущий) - прикладная наука о применении в технических устройствах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы [1].

2. Обзор и анализ аналогов

Рассмотрим аналоги существующих моделей, популярных на современном рынке.

Достоинствами девайса JBL Pulse 3 как представлено на рис. 1. можно назвать наличие яркой многоцветной подсветки, которую можно регулировать и полностью влагозащищенный корпус. В качестве недостатков - большой вес и отсутствие образа.

Из достоинств аналога Sony SRS-XB10 как представлено на рис. 2. можно назвать водонепроницаемый корпус и компактный размер. Недостатками данного девайса

являются неудобство управления и маркий корпус, и также отсутствие образа.



Рис. 1. JBL Pulse 3



Рис. 2. Sony SRS-XB10

Достоинствами предложенного аналога Marshall Kilburn как представлено на рис. 3. являются лёгкое управление и наличие стилизованного направления: ретро. Недостатками можно назвать большой вес и отсутствие образа.



Рис. 3. Marshall Kilburn

Подводя итоги можно сказать, что у популярных на современном рынке портативных колонок отсутствует запоминающийся образ и совершенно отсутствуют функции для тактильного контакта с будущим пользователем. А тактильный контакт, в свою очередь, помогает запомнить пользователю объект, тем самым спровоцировать визуальные воспоминания о нем, что благоприятно сказывается на последующих продажах данного устройства. Данную особенность можно охарактеризовать как проблему, которую необходимо решить при помощи бионического метода проектирования.

3. Создание эскизных вариантов

Для дальнейшего этапа проектирования – создания эскизов, необходимо найти образ, который будет взят за основу при создании портативного музыкального устройства. Бионическое стилевое направление задается цветом, характером линий и общим видом «картинки», напрямую связанной с окружающей природой. Принцип единства актуален и здесь: для создания законченного, гармоничного образа необходимо, чтобы все три элемента визуально сочетались как единое целое.

Так как будущая форма непосредственно связана с визуальным восприятием пользователя, то для первоначальных эскизов были взяты образы из окружающей нас природы.

Образ щупальца был выбран из-за особенности передвижения моллюска. Осьминог передвигается в воде, подобно продольной звуковой волне. Характеризуется данный образ плавной изогнутой линией, активно создающей динамику как представлено на рис. 4.

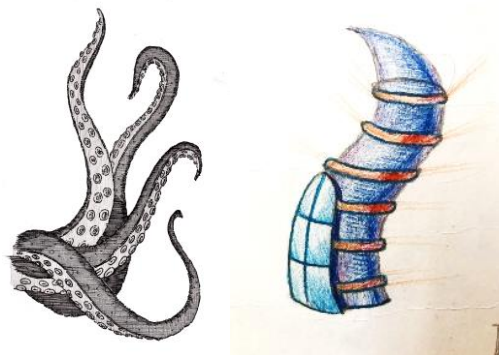


Рис. 4. Образ щупальца и эскиз

К естественным источникам звука, в первую очередь, относится шелест листьев, вызывающий у слушателей чувство умиротворения и спокойствия. Образ лепестка был взят за основу в связи со своими пластичными и динамичными формами как представлено на рис. 5.

К еще одному естественному источнику звука относится голос, именно поэтому за образ следующего эскиза были взяты человеческие губы. Плавность двух линий, переходящих в обоих концах в одну, создают ассоциацию пересечения двух звуковых волн как представлено на рис. 6.



Рис. 5. Образ лепестков и эскиз



Рис. 6. Образ губ и эскиз

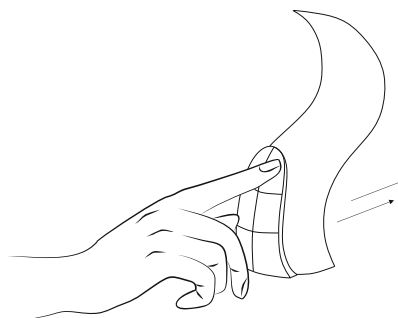


Рис. 7. Неудобное нажатие

При дальнейшем проектировании было решено остановиться на портативном устройстве, имеющем образ-щупальца осьминога, так как морское животное осьминог, как символ, широко использовался в качестве декоративного мотива в минойском и микенском искусстве. К тому же, восемь спиралевидных щупалец ассоциируют осьминога с раскручивающимся из космического центра мирозданием, а это, в свою очередь, делает процесс восприятия описанных ранее трех элементов бионического стиля более эффективным. Помимо этого, его вертикальная конфигурация на рабочей поверхности позволяет избежать большого заполнения пространства, тем самым, не помешав пользователю при эксплуатации. Последующие доработки образа были связаны с необходимостью убрать острый край колонки, закруглив ее, так как при сохранении данной особенности возникали бы трудности при изготовлении и транспортировке. А также, проведя эргономический анализ среди пользователей на черновом макете, была выявлена проблема неудобного нажатия на кнопки одной рукой, расположенные на самом корпусе. Это связано с отсутствием опоры сзади, из-за чего колонка начинает двигаться, принося неудобство пользователю как представлено на рис. 7.

Визуальное восприятие клавиш, расположенных на корпусе, происходит с одного угла зрения, а это в свою очередь усложняет пользование портативным устройством, если пользователь находится не с фронтальной стороны колонки. Таким образом, было решено перенести панель с кнопками на нижнюю часть корпуса, где пользователь без особого труда сделает нажатие одной рукой, выбрав необходимую функцию как представлено на рис. 8.

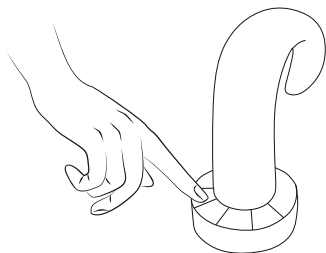


Рис. 8. Эргономическое решение проблемы

Размеры проектируемой портативной колонки представлены на рис. 9.

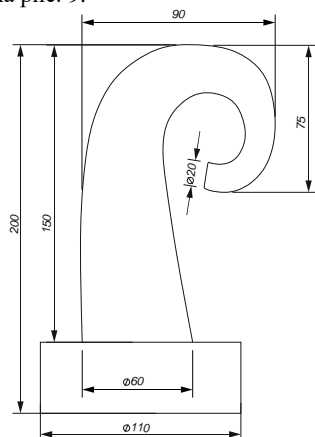


Рис. 9. Эргономический анализ (размеры)

4. Внутреннее строение

Динамики размещены по периметру под металлической сеткой, служащей каркасом для натяжения ткани как представлено на рис. 10.

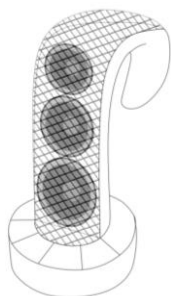


Рис. 10. Динамики и сетка

На каркасы натягивается ткань, позволяющая создать благоприятную акустическую среду.

Для поддержания бионического стиля в созданном девайсе, было решено использовать ткань светлых оттенков. Материалом для твердого корпуса служит дерево, имитирующее особенности строения кожи осьминога. Это обеспечит тактильный контакт с будущим пользователем, а также придаст корпусу портативной колонки способность противодействия скольжению из рук пользователя.

Пример кожи осьминога представлен на рис. 11.



Рис. 11. Кожа осьминога

5. Создание макета

Следующим этапом проектирования портативной колонки было создание чистового макета как представлено на рис.12.

В качестве материала использовался пеноплекс, покрытый известковым раствором и лаком. На данном макете уже были внедрены декоративные элементы (выделенные черным цветом). Данным элементам была придана функция многоцветной подсветки. Также было решено подсветить кнопки для удобства использования данной колонки в темном помещении или темном времени суток. При проведении эргономического анализа среди пользователей, горизонтальное нажатие на клавиши существенно облегчает работу с данным девайсом.



Рис. 12. Чистовой макет

6. 3d визуализация

Далее была создана 3D визуализация данного девайса с помощью программы 3D MAX как представлено на рис. 13.

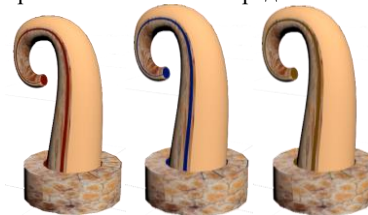


Рис. 13. 3D визуализация девайса

На визуализации видно, что в качестве материала, для поддержания бионического стиля, было применено дерево с нанесенной структурой кожи осьминога. Элементы ярких цветов находят свое применение с помощью декоративной подсветки. Эмпирически было доказано, что созданное портативное устройство с первого же зрительного и тактильного восприятия напоминает пользователю о головоногом моллюске, оставляя приятные воспоминания у него об объекте.

Также были добавлены разъемы под TRS, USB micro A и type A как представлено на рис.14.



Рис. 14. Разъемы

7. Заключение

В результате был разработан концепт портативного устройства, имеющий характерный образ и эргономичные формы с доступными элементами управления. Для

достижения результата использовался бионический метод проектирования с тремя его составляющими: характером линии, цветом и общей картинкой. Созданная портативная колонка помимо функциональной особенности - аудиосистемы, также является эксклюзивным арт-объектом.

Литература

[1] Цвет и вид в бионике // [Электронный ресурс]. 2014. № 9. URL: <https://theoryandpractice.ru/posts/2745-dostizheniya-bioniki-chemu-lyudi-mogut-nauchitsya-u-tarakanov-yashcherits-i-morskikh-rakovin>

[2] Кулайкин В., Чайнова Л. Материалы промышленных изделий и предметно-простр. среды // Учеб. пос., 2009 г. С. 252-258

[3] Бионика // [Электронный ресурс]. 2014. № 9. URL: <https://rehouz.info/stil-bionika-v-interere/>

Об авторах

Рудинская Алина Алексеевна / Rudinskaya Alina - бакалавр, направление: дизайн, Отделение автоматизации и робототехники, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск. E-mail: aar52@tpu.ru.

Хмелевский Юрий Петрович / Khmelevsky Yuri - старший преподаватель, Отделение автоматизации и робототехники, Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

E-mail: hmelevskiy@tpu.ru.

Проектирование оболочки компьютерного манипулятора с использованием метода экспертной оценки

Л.Ю. Ткачева¹, Ю.П. Хмелевский¹

leleika26@mail.ru, hmelevskiy@tpu.ru

¹Томский политехнический университет, Томск, Россия

В работе описана проблема отсутствия комфортного использования компьютерного манипулятора, основанная на различных эргономических показателях у пользователей. Проведен анализ эстетических и эргономических параметров у аналогичных моделей изделия. Были выбраны три художественных образа компьютерного манипулятора тематически связанных с основной функцией проектируемого изделия. По каждому художественному образу было создано эскизное решение корпуса изделия. С помощью метода экспертных оценок профессионалами в области дизайна было определено наиболее перспективное эскизное решение корпуса с точки зрения эстетических качеств и соответствия основной функции изделия. Проведено экспериментальное макетирование объекта проектирования с помощью скульптурного пластилина и пеноплекса с последующей экспертной оценкой и доработкой формы корпуса изделия и расположения составных частей. Результатом исследования стал макет компьютерного манипулятора с бионической формой. Объект имеет эффектный внешний вид за счет яркого образа стилизованной рыбы, а также соответствует эстетическим и эргономическим параметрам.

Ключевые слова: компьютерный манипулятор, компьютерная мышь, метод экспертных оценок.

Designing the shell of a computer manipulator using the expert evaluation method

L. Tkacheva¹, Y. Hmelevsky¹,

leleika26@mail.ru, hmelevskiy@tpu.ru

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The paper describes the problem of the uncomfortable use of a computer manipulator, based on various ergonomic indicators among users. The analysis of aesthetic and ergonomic parameters in similar product models. Three artistic images of a computer manipulator thematically related to the main function of the designed product were selected. For each artistic image, a conceptual design of the product body was created. Using the method of expert evaluations, design professionals determined the most promising outline solution of the case in terms of aesthetic qualities and compliance with the main function of the product. An experimental prototyping of the design object was carried out using sculptural clay and foam, followed by expert evaluation and refinement of the shape of the body of the product and the location of the components. The result of the study was a mock-up of a computer manipulator with a bionic shape. The object has a spectacular appearance due to the bright image of a stylized fish, and also corresponds to aesthetic and ergonomic parameters.

Keywords: computer mouse, computer mouse, expert assessments

1. Введение

В настоящее время активно развиваются компьютерные технологии, что обусловлено техническим прогрессом. С развитием вычислительных машин возникла потребность в координаторе движений человека, далее передающего сигнал, иными словами устройстве ввода информации. Таким образом возникла потребность в разработке компьютерного манипулятора, отвечающего эргономическим параметрам, необходимым для комфортного использования данного объекта.

Актуальность разработки данного объекта обусловлена широким пользовательским спросом на него, поскольку с развитием технологий увеличилось количество пользователей компьютерами, а соответственно и манипуляторами для них. При этом достаточно часто встречается проблема неудобного использования данных объектов в силу эргономических показателей человека.

Целью данного проекта является разработка оболочки компьютерного манипулятора, соответствующего параметрам человеческой руки для комфортного пользования при взаимодействии, а также имеющего привлекательный внешний вид. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: анализ аналогов, разработка эскизов

художественного образа, изготовление опытного чернового макета, создание итогового прототипа.

2. Анализ аналогов

Применение манипулятора пользователем осуществляется путем перемещения мыши по поверхности рабочей плоскости, в процессе чего происходит считывание необходимых координат и их передача через специальное программное обеспечение в компьютер. Помимо датчиков движения в наличии манипулятора имеются несколько кнопок (в зависимости от типа мыши), а также колесо прокрутки и клавиши.

На сегодняшний день существует множество вариаций оболочки компьютерной мыши, но при этом остается проблема удобства пользования данным аппаратом. Зачастую представленные варианты имеют поверхность, которая имеет недостаточную высоту относительно уровня стола, что отражается на подъеме кисти, а также положение пальцев при работе, следствием чего является быстрая утомляемость, дискомфорт, а также различные заболевания кисти руки при длительном использовании.

3. Метод экспертной оценки

Для решения вышеописанной проблемы было решено использовать в стадиях оценивания разрабатываемого проекта метод экспертных оценок, заключающийся в

коллективном апробировании результата, полученного на каждом этапе. Преимуществом данного способа является принятие решения о дальнейшей разработке продукта, на основе среднестатистических данных.

Поскольку исследование проводится в рамках учебной программы, в качестве экспертов были выбраны студенты 3 курса, обучающиеся на направлении дизайн и имеющие необходимый базис знаний, а также пользовательский опыт использования данного устройства.

Первоначальным этапом разработки стал поиск художественного образа, отражающего тематику использования мыши и соответствующего техническим параметрам. Изначально было создано 3 различных варианта. Один из которых представлял образ волны, подразумевающий ассоциативный ряд с бесконечными просторами интернета, которые часто поглощают пользователя как представлено на рис. 1.



Рис. 1 Эскиз манипулятора в образе волны

Цветовое решение с использованием синего, белого и голубого также основывается на ассоциативных цветах выбранного художественного образа [1].

Для второго эскиза была взята робототехническая тематика, в которой имеются плавные формы, а также акценты на детально проработанных элементах, которые подчеркивают образ и при этом увеличивают комфортность использования мыши. Например, ребристые поверхности, создающие антискользящий эффект как представлено на рис. 2.



Рис. 2 Эскиз манипулятора с робототехническим образом

За основу третьего художественного образа была взята бионическая форма рыбы, которая также носит ассоциативный ряд огромного количества данных (океана), и помимо этого символизирует личность пользователя, способного справиться с потоком информации как представлено на рис. 3. [2].



Рис. 3 Эскизный вариант с использованием бионического образа рыбы

Помимо художественного образа, изгиб формы мыши также подразумевает поднятие ладони пользователя на определенную высоту, что позволяет снизить утомляемость кисти и делает работу за компьютером более комфортной и эффективной.

В завершение первоначального этапа разработки был использован метод экспертной оценки, где по результатам опроса был выбран наиболее интересный и применимый художественный образ. Визуально комфортный и эргономичный эскиз. Оценивание происходило по параметрам эстетики (соответствие формы основной функции объекта, цветовое решение) по десятибалльной шкале. Собранные данные экспертной оценки были отражены в созданных диаграммах по выше представленным параметрам.

В ходе опроса участвовало 35 девушек возрастом от 20 до 25 лет, результатом стал выбор бионического образа рыбы, пластика которого наиболее привлекла экспертов (9 баллов). Образ волны получил 6 баллов, робототехническая тематика-4 балла.

Таким образом, по результатам первого этапа проектирования был выбран эскизный вариант компьютерного манипулятора для дальнейшей разработки, обладающий ярким, запоминающимся образом.

Последующим этапом проектирования стало создание чернового макета из скульптурного пластилина, позволяющего апробировать выбранный ранее эскиз, а также скорректировать форму объекта согласно средним эргономическим параметрам. Изготовление макета позволяет увеличить количество информации при восприятии потенциальным пользователем за счет добавления тактильных ощущений при взаимодействии с объектом, что необходимо для достижения положительного результата при проектировании компьютерного манипулятора.

Создание макета выполнялось в два этапа: создание общей формы, которая в дальнейшем тестировалась на предмет комфортного размещения в руке, а также детальная проработка с нанесением необходимых элементов (клавиши, колесо прокрутки, кнопки переключения). Второй этап неоднократно тестировался на предмет удобного задействования элементов манипулятора. Учитывался средний параметр руки от общего числа экспертов. Результатом данного этапа стало изготовление макета согласно усредненным эргономическим показателям, взятым согласно методу экспертных оценок, а также готового к дальнейшему исполнению прототипа.

Завершающим этапом проектирования стало создание итогового макета манипулятора, основываясь на проведенном ранее анализе эстетических и эргономических параметров. Для итогового макета было решено выбрать такой материал как пеноплекс. Его преимуществом является легкость в обработке, что важно при создании пластичных форм [3].

Создание макета также подразделялось на два этапа, первоначальным является изготовление общей формы объекта, на основе изначального с последующей апробацией экспертами. Данный способ позволяет уточнить необходимые детали, касающиеся эргономических параметров, что необходимо для комфортного пользования [4]. Далее были добавлены необходимые элементы конструкции, апробация которых также была проведена с помощью экспертной оценки. После изготовления формы из пеноплекса, макет был зашпаклеван и окрашен водоэмульсионной краской, что позволило создать презентабельный вид прототипа как представлено на рис. 4. и рис.5.



Рис. 4 Макет компьютерного манипулятора



Рис.5 Макет компьютерного манипулятора

4. Заключение

Таким образом, в процессе проектирования объекта был использован метод экспертных оценок, позволяющий решить проблему визуального комфорта и удобства пользования с помощью анализа продукта на каждом этапе в ходе разработки. Результатом исследования стал макет компьютерного манипулятора с бионической формой. Объект имеет эффектный внешний вид за счет яркого образа стилизованной рыбы, а также соответствует эстетическим и эргономическим параметрам.

5. Литература

- [1] Гийо Агнес, Жан-Аркади Мейе «Бионика. Когда наука имитирует природу» перевод - М. Широкова. – М.: Техносфера. 2013
- [2] Заева-Бурдонская Е.А. Курасов СВ. Формообразование в дизайне среды. Метод стилизации. - С. В. - Москва : МГХПУ им. С. Г. Строганова, 2008
- [3] Куманин В.И., Кухта М.С. Дизайн. Материалы. Технологии Энциклопедический словарь. – Томск, ТПУ, 2011. – 320 с.
- [4] Михеева М.М. Современные методы в дизайне: по курсу «Основы теории и методологии проектирования в промышленном дизайне» М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012 г.- 104 с.

6. Об авторах

Ткачева Лейла Юрьевна, студент 3 курса направления промышленный дизайн отделения автоматизации и робототехники Томского Политехнического Университета. E-mail: leleika26@mail.ru

Хмелевский Юрий Петрович, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники. Томский Политехнический Университет. E-mail: hmelevskiy@tpu.ru

Детская книжная иллюстрация как способ коммуникации

А.Д. Фаныгина¹, Ю.С. Ризен¹

e-mail: adf4@tpu.ru / e-mail: yulja_vit@tpu.ru

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Статья посвящена особенностям создания детской книжной иллюстрации. В рамках данной статьи, иллюстрация рассматривается не только в качестве визуализации текстовой части книги, но и в качестве основного источника подачи и получения информации. В ходе работы над статьей, была проверена гипотеза о рассмотрении детской иллюстрации в качестве средства коммуникации, а также, на базе теоретических знаний из области детской психологии, был выявлен ряд особенностей восприятия и значимости изображений в книгах для целевой аудитории, а именно – аудитории детей, которым, необходимо руководствоваться и учитывать при создании работ в данной области. Ряд сформированных критериев, который является итогом проделанной работы, является необходимым для создания рациональной детской иллюстрации, а также является инструментом оценки степени соответствия работ заданной тематике.

Ключевые слова: изображение, иллюстрация, книга, детская литература, визуальная коммуникация.

Children's book illustration as a communication process

A.D. Fanygina¹, Y.S. Rizen¹

e-mail: adf4@tpu.ru / e-mail: yulja_vit@tpu.ru

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The article is devoted to features in a process of creating Children's book illustrations. In this article, illustration is considered not only as a visualization of the text part of the book, but also as the main source of getting information.

Key words: image, illustration, book, children's book, visual communication.

Введение

Книга - является неотъемлемой частью процесса детского обучения, где играет одну из ведущих ролей. Одной из особенностей детской литературы – является то, что, в отличие от доступных в настоящее время различных цифровых носителей, книга – является одним из первых источников получения информации для ребенка, начиная с младенчества.

Детская литература имеет свою специфику создания, одной из аспектов которой – является обязательное наличие иллюстрации. В рамках данного контекста, актуальным – будет являться вопрос о значении иллюстрации в детской литературе, какая ее основная роль, и, является ли иллюстрация в детской книге – отличной от иллюстраций в книгах иного содержания.

Данная статья направлена на рассмотрение признаков детской книжной иллюстрации, на основании которых ее можно рассматривать в качестве средства коммуникации, а также, на выявление характерных специфических особенностей для ее создания.

Иллюстрация как средство коммуникации

Любая иллюстрация – является графическим пояснением текста, вне зависимости от его содержания. [1]

Иллюстрация, созданная без опоры на текстовую часть - будет иметь уже другое назначение и термин, так как основной ее функцией является именно иллюстрирование того, о чем сказано в тексте. [1] Текст, в свою очередь – определяет сюжет и содержимое иллюстрации, на основании чего, можно сделать вывод, что иллюстрация отличается от обычного изображения конкретно заданными сюжетными рамками.

Наличие иллюстраций в детской литературе – является одной из ее специфик, так как, для детей, кто является целевой аудиторией произведения, иллюстрация будет являться не просто визуальной поддержкой текстовой части, а ее главным источником. Исходя из данной информации, детскую книжную иллюстрацию – можно рассматривать в качестве одной из разновидностей средств коммуникации, а,

так как иллюстрация – является одним из направлений графического дизайна, то, следовательно, детскую книжную иллюстрацию можно рассматривать как средство визуальной коммуникации.

Визуальная коммуникация – является одной из направленных сфер в дизайне, которая направлена на передачу главной идеи при помощи визуализации объектов. Визуальная коммуникация, также, направлена на создание определенных образов, которые вызывают определенное эмоциональное воздействие на зрителя.

Для обеспечения корректного взаимодействия со зрителем, рекомендуется руководствоваться рядом критериев, которые помогают изображению оказать необходимое воздействие:

1. Изображение должно быть максимально наглядным
2. Изображение должно соответствовать по смыслу
3. Изображение должно быть максимально информативным, и обеспечивать быстрое получение информации
4. Изображение должно строиться на образах

Все вышеперечисленные критерии, можно применить для создания детской книжной иллюстрации, на основании чего, можно подтвердить, что детская иллюстрация является одним из средств коммуникации.

Но, детская книжная иллюстрация – выделена в качестве отдельного направления, так как имеет ряд специфических особенностей, которые, к примеру, могут не применяться для создания иллюстраций в контекстах книг иного содержания, для другой возрастной группы.

Специфика создания детской иллюстрации

Если рассматривать аудиторию малышей, которые еще не умеют читать самостоятельно, то, для них, иллюстрация в книге – будет являться основным и единственным источником информации. Через иллюстрации в книгах, дети получают информацию об окружающем их мире, и, через образы представленных персонажей получают представления об объектах живой и неживой природы и их формах. [2] Исходя из этого, так как, в рамках детской

литературы, иллюстрация – играет не просто сопроводительную или дополняющую роль текста, а также является источником передачи информации, то, отсюда можно выявить один из аспектов создания детской иллюстрации – необходимость соблюдения прямолинейности изображения.

Если для оформления книг для более зрелых или взрослых читателей, допускается использование изобразительно-стилизированных элементов, которые – или не несут в себе определенной смысловой нагрузки, или же, завуалированы для создания определённого концептуального образа страницы или книги, то, в литературе детского содержания, такие элементы изображения могут оказать обратное воздействие, которое было задумано художником-оформителем. Важно понимать, что ребенок, в отличие от взрослого, еще не умеет разделять полученную информацию на реальное и фантастическое, он воспринимает мир таким, каким его видит. [2]

Так как, иллюстрация в детской книге – также является одним из способов привлечения и фокусировки внимания ребенка, то, отсюда следует, что правильно оформленная смысловая иллюстрация, которая будет являться четкой визуализацией текстовой части без лишней нагрузки – будет грамотно передавать ребенку информацию о сюжетном содержании и закладывать определенные образы в его мышление, и, сосредоточивши свое внимание на изображении, ребенок сможет получить всю необходимую ему информацию, которая была изначально заложена автором.

Исходя из особенностей восприятия детьми информации, можно также выявить, что изображение в детской книге – не может быть изображено в качестве схематичного или неразборчивого рисунка, что, также, является отличительной особенностью в сравнении иллюстраций для книг взрослого содержания – в данном направлении, изображения, например, могут быть выполнены в уникальном стиле автора, который специально закладывает в свой стиль особый подтекст. Но, важно отметить, что данный вовсе аспект не означает, что все детские иллюстрации должны быть выполнены 100% реалистично и не отражать особенности стиля иллюстратора. Детская иллюстрация – безусловно, может быть также выполнена в уникальном авторском стиле, но, при этом, художник-иллюстратор должен понимать, что изображение должно быть стилизовано до определённого уровня, который позволит ребёнку без труда узнавать объекты по их форме. Форма, в данном случае – будет являться для автора средством расставления акцентов: выделения главного и второстепенного, преподнесения доминирующих объектов или персонажей, наделяния объекта или персонажа определёнными чертами. Иными словами, через форму, автор может выразить свое личное отношение к тому или иному объекту или персонажу, тем самым, создавая тему для размышления для юных читателей.

В рамках рассмотрения особенностей создания детских иллюстраций, также, невозможно не отметить особенности цветового решения. Здесь же, различия цветовых составляющих между книг с детским содержанием и взрослым – строятся на основе разного уровня восприятий: дети, в отличие от взрослых, воспринимают форму и цвет – как единое целое, и, восприятие черно-белых иллюстраций будет являться не только недоступным для ребенка, но и будет иметь определенный эмоциональный окрас, который, задается изображению при помощи цветовой гаммы. В таком случае, перед художником-иллюстратором поставлена непростая задача создания иллюстрации таким образом, чтобы ребенок смог заинтересоваться данным

изображением, а так как для детей одинаково значимыми являются как форма объекта, так и его цвет, то, автору изображения необходимо при помощи законов колористики, контраста и композиции – сделать акцент на важных деталях, и переместить второстепенные детали на другой план, тем самым, выделяя главное или то, на что стоит обратить внимание. При выборе цветов, особо важную роль играет психологическое влияние цвета на ребенка. Для подробного изучения данного вопроса, авторам иллюстраций, необходимо ознакомиться с рядом существующих проведенных исследований, которые выдвигают определенные закономерности воздействия цветов на ребенка. Вопрос о колористическом решении, является не только важным при создании определенного изображения, но и, рассматривая его в контексте детских иллюстраций – очень сложным. Психологи подтверждают, что несмотря на выявленные закономерности влияния цвета на человека, все же, взрослые люди могут иметь разную реакцию и ассоциативный ряд по отношению к одному цвету, что является следствием их жизненного опыта. [3] С детьми все иначе. Их жизненный путь только начинает формироваться, и, для обеспечения правильного эмоционального развития, правильной реакции и восприятия касательно тех или иных вещей, необходимо опираться на выявленные закономерности и рекомендации людей, которые исследуют данную область.

В качестве примера применения вышеперечисленных признаков, был проведен анализ двух иллюстраций от разных авторов к сказке Л. Кэрролла “Алиса в стране чудес”.



Рис.1. Иллюстрация М. Л. Этвэл

На рисунке 1, представлена интерпретация Алисы от иллюстратора Мэйбл Люси Этвэл.

Иллюстрация выполнена в яркой и теплой цветовой гамме, приятной глазу. Главный персонаж – Алиса, представлена в качестве маленького ребенка, изображение которого имеет ряд привычные ассоциативных деталей облика для данной сказки: светлые волосы девочки, красивый наряд и другое.

Остальные персонажи и детали окружающего мира – имеют привычное очертание и будут являться понятными для ребенка: элементы природы, животные, дома.

Несмотря на отсутствие мелких и излишних деталей, композиция выглядит законченной и содержит в себе несколько поочередных сюжетов.

В качестве противопоставления, были выбраны иллюстрации “Алисы в стране чудес” автора Ребекки Дотремер. Одна из иллюстрация представлена на рисунке 2.

В отличие от предыдущего примера, первым, что бросается в глаза – является мрачность изображения. Цветовая гамма преобладает в основном только в темных и холодных оттенках, что сказывается на настроении, полученном от просмотра данной иллюстрации.



Рис. 2. Иллюстрация Р. Дотремер

В иллюстрациях данного автора, присутствуют искажение форм и использование различных визуально-стилистических приемов, например, как - перетекание форм предметов из одного в другой, что делает данные иллюстрации сложным для восприятия и понимания сюжета не только ребенку, но и взрослому человеку.

Саму Алису - мы видим в качестве девочки, но, возвращаясь к особой стилистике автора, мы можем наблюдать такие явления, как, например, черные глаза у персонажа, что абсолютно не будет иметь связи с действительностью и затруднять восприятие.

Свойственные черты иллюстраций данного автора создают определенный эмоциональный окрас, который вызывает ряд соответствующих эмоций, опираясь на данные изображения – не будут являться позитивными.

Безусловно, в данных иллюстрация присутствует авторский стиль, и книга с данными иллюстрациями может служить в качестве подарка фанатам данного произведения или же коллекционерам, но, следует помнить и учитывать то, что детская книга – прежде всего, носит воспитательный и поучительный характер, а это значит, что все иллюстрации в книге должны советовать определенному ряду свойств, которые будут передаваться ребенку через картинку, так как она будет являться его главным источником получения информации.

Перед иллюстраторами детских книг стоит непростая задача обеспечения комфортного и рационального взаимодействия изображения с пользователем, для создания которого, авторам, необходимо изучить определенное количество информации о специфике и аспектах создания данной разновидности контента. Иллюстратор – является своего рода посредником между процессом коммуникации ребенка и изображения, и, основной из его задач – будет является создание максимально комфортных и грамотных условий, для успешного обеспечения данного контакта.

Вывод

Детская книжная иллюстрация – играет важную роль в детском обучении, так как она оказывает влияние на формирование эмоционального восприятия и мировоззрения ребенка, что делает исследование данной темы актуальным.

Детскую книжную иллюстрацию, можно рассматривать в качестве средства коммуникации, так как ее основным назначением – является передача информации в визуальном виде.

Так как, детская иллюстрация – является одним из направлений графического дизайна, а также, может рассматриваться в качестве средства коммуникации, то, на основании этого, при создании детской книжной иллюстрации, необходимо руководствоваться общими критериями для создания информативных изображений, соблюдение которых, будет обеспечивать точность процесса

передачи необходимой информации посредством изображения и оказывать определенное эмоциональное воздействие на зрителя.

Тем не менее, детская книжная иллюстрация имеет свою специфику создания, которая обусловлена особенностями детского восприятия, в связи с чем - ряд общепринятых критериев был дополнен особенностями, свойственными данному направлению.

Было выявлено, что, помимо общепринятых критериев, необходимо уделять внимание следующим деталям:

Связью изображения с действительностью: так как, ребенок, в младенчестве, еще не обладает способностью разделения информации на реальную и фантастическую, поэтому, для обеспечения формирования правильного мировоззрения, объекты, должны иметь связь с реальным миром.

Обеспечением узнаваемости форм: что, также, выявлено на основании особого восприятия мира детьми. Иными словами, характерный иллюстратору стиль не должен отражаться на способности ребенка узнавать объекты по их форме.

Выполнением изображения в определенной цветовой гамме: что выявлено основе психологических исследований о влиянии колористических решений на восприятие. Данный критерий необходимо учитывать в работе с детскими иллюстрациями, так как он является важным аспектом в формировании эмоционального восприятия, которое влияет на формирование личности.

Таким образом, общий список критериев для создания детской книжной иллюстрации будет выглядеть следующим образом:

Ряд общепринятых критериев:

- Наглядность изображения
- Рациональная смысловая нагрузка
- Информативность изображения

Ряд критериев, сформированный на основе специфики детской иллюстрации

- Соответствие изображения действительности
- Грамотная расстановка акцентов
- Соответствие изображения рекомендациям по цветовому решению

Данный ряд критериев, которые были сформированы в ходе синтеза материала из разных областей, таких как: графический дизайн, психология и колористика - позволяет создавать изображения, которые будут обеспечивать рациональность и точность взаимодействия участников коммуникации, а также, позволяет оценить степень соответствия изображения требованиям.

Литература

1. Ляхов В.Н. Искусство книги: иллюстрация, книга, графика. М., 1978.
2. Обухова Л.Ф. Детская психология: теория, факты, проблемы. М., 1995.
3. Шалимова Л. А. Культурно-символическое значение цвета: чувство цвета в культуре. / Л. А. Шалимова // Искусство и образование. 2010.

Об авторах

Ризен Юлия Сергеевна, старший преподаватель отделения автоматизации и робототехники Томского Политехнического университета.

Фаныгина Анна, студент группы 8Д61 отделения автоматизации и робототехники Томского Политехнического университета

Бионический метод формообразования как способ решения проблемы визуальной экологии городской среды

В.В. Юриков¹, Е.М. Давыдова¹

yurikovvladislav@yandex.ru|davydova@tpu.ru

¹Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

В данной статье изложена проблема визуальной экологии городской среды, которая становится все более актуальной в связи с глобальными изменениями, касающимися внешнего облика современных городов. В ходе исследования было выявлено, что среда современного большого города становится все более агрессивной для человека и его восприятия, что влечет за собой негативное воздействие на его психоэмоциональное состояние. Агрессивной городской среде противопоставляются природные формы, которые оказывают противоположное воздействие. Возможным решением данной проблемы является применение бионического метода формообразования. Данный метод предполагает интерпретацию природных мотивов в формообразовании предметов дизайна, архитектуры и т.д. В рамках данного исследования предлагаемое решение поставленной проблемы демонстрируется на примере создания концепции рекреационной зоны.

Ключевые слова: визуальная экология, бионика, дизайн, рекреационная зона

Bionic method of shaping as a way to solve the problem of the visual ecology of the urban environment

V. V. Yurikov¹, E. M. Davydova¹

yurikovvladislav@yandex.ru|davydova@tpu.ru

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

This article outlines the problem of the visual ecology of the urban environment, which is becoming increasingly relevant in connection with global changes relating to the appearance of modern cities. The study revealed that the environment of a modern big city is becoming more aggressive for a person and his perception, which entails a negative impact on his psycho-emotional state. Natural forms that have the opposite effect oppose aggressive urban environments. A possible solution to this problem is the use of the bionic method of morphogenesis. This method involves the interpretation of natural motifs in the shaping of objects of design, architecture, etc. In the framework of this study, the proposed solution to the problem is demonstrated by the example of creating the concept of a recreation zone.

Keywords: visual ecology, bionic, design, recreation area

1. Введение

За последние годы всеобщая урбанизация, отдалившая человека от естественной визуальной среды, сделала проблему визуальной экологии более актуальной. Отрыв от здоровой визуальной среды произошел во многом по причине массового применения индустриальных конструкций и изделий для градостроительства. Городская среда современных, особенно крупных городов оказывает негативное воздействие на баланс систем организма человека. Это связано с тем, что во многих современных городах среда имеет следующие особенности: резкие шумовые эффекты, высокая загазованность, господство темно-серого цвета, преобладание прямых углов и линий, городские строения по преимуществу имеют статичные формы и содержат много больших поверхностей.

В связи с постоянными изменениями городского пространства, такими как строительство новых жилых массивов, рост этажности зданий, увеличение числа наружной рекламы, появление новых видов дополнительного освещения (реклама с подсветкой, яркие витрины магазинов), нехватка природных форм ощущается человеком особенно остро.

Природная среда, напротив, оказывает благоприятное воздействие как на физиологическое, так и на эмоциональное состояние человека, поскольку соответствует оптимальным условиям ее восприятия: она насыщена формами, разнообразными по силуэту, размеру, фактуре, цвету, освещенности, удаленности. Для создания оптимальной жизненной среды необходима гармоничная

композиционная взаимосвязь архитектуры с природным окружением.

Целью данной работы является применение метода бионического формообразования на примере создания концепта рекреационной зоны.

2. Визуальная экология

В настоящее время происходит экологизация всех областей научных знаний, что обусловило появление таких направлений, как архитектурная экология, урбозкология, видеоэкология, так как именно в городах наиболее наглядно происходит процесс ухудшения окружающей среды.

Помимо таких важных характеристик, как загрязнение воздуха и воды, уровень шума и радиации, существует понятие «загрязнение» визуальной среды города.

Городское пространство за последние 50-70 лет существенно изменилось. Его визуальная среда стала настолько дискомфортной, что видеоэкология рассматривает ее как неблагоприятный экологический фактор.

Мозг обладает удивительной способностью преобразовывать зрительные образы в эстетические, которые вызывающие различную эмоциональную оценку окружающей среды. Глаз сканирует видимое пространство, совершая примерно две саккады в секунду, фиксируя какой-либо элемент и поставляя информацию в мозг.

Глазодвигательный аппарат человека совершает быстрые произвольные перемещения взгляда в автоматическом режиме называемые саккадами. В физиологии известны различные автоматические процессы, например, автоматия работы сердца и автоматия дыхания.

Таковой же является и автоматия саккад. Глаза непрерывно сканируют видимое окружающее пространство. После каждой саккады глаз фиксирует какой-либо зрительный элемент, и в мозг поступает информация об увиденном. Когда взгляд останавливается на каком-либо элементе, амплитуда саккад уменьшается до минимума и происходит чередование фиксации глаз на новых элементах и предметах. Человек в это время отдыхает, ничего не рассматривая пристально, а это значит, что автоматия саккад работает в собственном режиме с предпочтительной ориентацией и интервалом.

Как показывают эксперименты, человеческий глаз чувствует себя комфортно лишь тогда, когда у него много работы. При этом естественно сформировавшиеся визуальные поля он воспринимает как наиболее благоприятные, поскольку они отличаются максимальным разнообразием фокусных точек.

Разнообразие, соразмерность и ритм природного формообразования обеспечивают позитивные визуальные ощущения. В результате человек начинает испытывать ощущение визуального, эмоционального и эстетического удовлетворения [4].

Гомогенные и агрессивные поля создают противостественную визуальную среду. Гомогенным называется видимое поле, на котором либо отсутствуют видимые элементы, либо присутствуют в незначительном количестве (рис 1).



Рис. 1. Гомогенное визуальное поле

На агрессивном видимом поле равномерно рассредоточено множество одинаковых элементов. Агрессивное видимое поле является мощным зрительным раздражителем и приводит к большой нагрузке на нервную систему (рис. 2).



Рис. 2. Агрессивное визуальное поле

Бессмысленное увеличение сенсорного потока при недостатке информации противоречит основам взаимодействия биологических систем с внешней средой. Для создания оптимальной жизненной среды необходима гармоничная композиционная взаимосвязь архитектуры с природным окружением. Рекреационные зоны города, включающие парки, скверы, сады, водоемы, могут частично восполнять утраченную возможность непосредственного контакта с природой.

Формированию комфортной видимой среды в городе может способствовать развитие архитектурной бионики — прикладной науки о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы [3].

3. Выбор метода формообразования

Человек, являясь частью природы, всегда испытывал потребность контакта с ней. Эстетика природной среды,

согласно исследованиям, оказывает благоприятное воздействие на общий эмоциональный фон человека, помогает расслабиться. Немаловажным аспектом является эстетическое наслаждение, испытываемое человеком, созерцающим многообразие природных форм.

Исходя из вышесказанного, главным критерием, которому должна соответствовать создаваемая концепция рекреационной зоны, является формообразование ее элементов на основе природных форм, в качестве метода проектирования был выбран метод бионических аналогий - бионика.

Бионика – это наука, изучающая потенциал применения природных форм механическими способами. Изучение природных организмов происходит на разных уровнях:

- Бионика как наука изучает закономерности функционирования живых систем;
- Биомеханика исследует природные конструкции и конструктивные свойства органических материалов;
- Биоморфология изучает строение форм организмов и генезис естественного формообразования [1].

Поскольку в рамках данного исследования идет работа именно с формообразованием элементов рекреационной зоны, поиск бионических аналогов был осуществлен на основе анализа формы.

Каждая природная форма имеет свои, присущие лишь ей черты. Пространственная конструкция многих промышленных изделий – производная эмпирического изучения логики строения структурных форм природы.

Формы, проектируемые на бионической основе, во многом приближены к естественной среде, а значит, визуально комфортны. Отсутствие в природных формах прямых линий и углов, ритмическое изменение поверхностей стен, разнообразие и неповторимость элементов, естественный колорит и фактуры все это является эталоном для создания проектов отвечающих нормам зрительного восприятия.

4. Создание концепции

Как было сказано ранее, визуальная среда современного города насыщена гомогенными и агрессивными полями. Гомогенным называется видимое поле, на котором либо отсутствуют видимые элементы, либо присутствуют в незначительном количестве. Агрессивное поле является противоположностью гомогенному, то есть на агрессивном видимом поле равномерно рассредоточено множество одинаковых элементов.

В условиях городской среды, местами, где человек может абстрагироваться от визуального шума, являются лесопарковые зоны рассредоточенные по территории города. Поскольку такие места предназначены для общественного отдыха, они должны быть оснащены специальными зонами рекреационного назначения.

В распространенной схеме места для отдыха людей на территории лесопарковых зон содержат такие элементы как лавочки, элементы освещения, декоративные ограждения. Приведенная комбинация элементов была выбрана в качестве основы для создания концепта рекреационной зоны. Основным принципом формообразования был выбран метод бионических аналогий. Первым этапом работы является поиск аналогов, формы которых будут противопоставляться формам городской среды, которые, как было установлено ранее, в большинстве своем оказывают негативное воздействие на человека. Таким образом, аналог, который послужит основой формообразования, должен являть собой форму, разнообразную по силуэту, размеру и фактуре.

В качестве бионических аналогов были выбраны следующие природные формы: лист виктории амазонской

(водное тропическое растение; вид рода Виктория семейства Кувшинковые), цветок кувшинки, коралл, трахиандра (рис. 3).



Рис. 3. 1 – лист кувшинки, 2 – цветок кувшинки, 3 – кораллы, 4 – трахиандра

Выбор в пользу именно этих природных аналогов обусловлен тем, что среди всего существующего многообразия форм, не все из них обладают выраженной

структурой, характерными визуальными чертами, которые можно использовать в стилизации формы для её дальнейшей интерпретации в формообразовании элементов рекреационной зоны. Выбранные природные аналоги имеют динамичные, выразительные формы, которые разнообразны по силуэту, размеру и фактуре.

Основываясь на характерных чертах выбранных аналогов, был выполнен анализ формообразующих элементов. Лист кувшинки представляет собой горизонтальную поверхность округлой формы, которая имеет вертикальные стенки, выполняющие функцию защиты от попадания лишней воды на поверхность листа. Рассматривая вертикальную стенку листа более детально, можно увидеть, что её поверхность формируют множественные прожилки, которые удерживают её в нужном положении (рис. 4).



Рис. 4. Лист кувшинки

Цветок кувшинки имеет правильную симметричную форму, а также свойство раскрывать и закрывать лепестки с целью защиты сердцевины цветка. При стилизации цветка было использовано такое свойство его формы как симметрия (рис. 5).

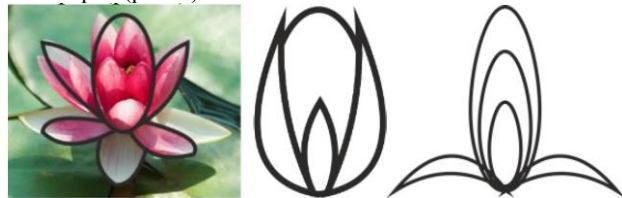


Рис. 5. Цветок кувшинки

Кораллы имеют ветвистую структуру и динамичную форму, которая строится из полых трубок. Рассматривая форму кораллов более детально, можно сказать, что она состоит как из плавных, так и из ломаных линий, которые формируют общую динамику силуэта (рис. 6).

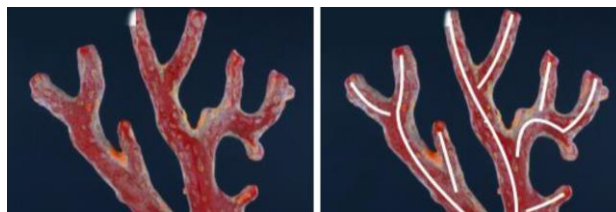


Рис. 6. Коралл

Трахиандра выглядит как гладкие, будто искусственные, устремленные кверху стручки, которые имеют плавную волнообразную, в некоторых случаях спиралевидную форму, которая является основной характерной визуальной чертой растения (рис. 7).



Рис. 7. Трахиандра

На основе выявленных формообразующих элементов были созданы три концепции рекреационных зон (рис. 8).

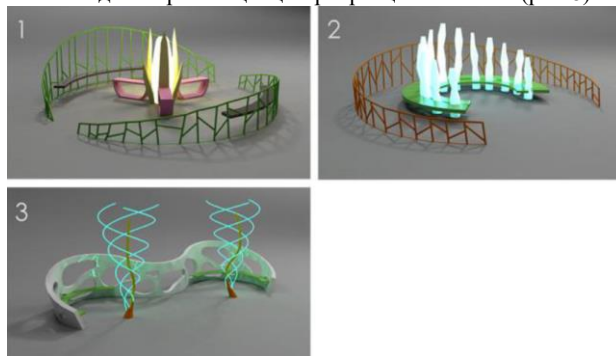


Рис. 8. Концепты рекреационных зон

Для первого варианта формообразующими являются цветок и лист кувшинки. Центральным элементом является источник света, который окружен панелями, имитирующими лепестки цветка, которые раскрываются в темное время суток, освещая пространство вокруг себя. Конструкция ограды основана на структуре листа кувшинки, то есть имитирует его прожилки, которые поддерживают положение стенки листа в вертикальном положении. Концепт получил название «Ночная лилия». Цветовое решение заимствовано из природных аналогов.

Для второго варианта аналогами являются кораллы и лист кувшинки. Динамичная форма кораллов была заимствована при создании источников света, которые расположены по центру, а конструкция ограды основана на структуре листа кувшинки. Цветовое решение основано на контрасте теплого и холодного. Концепт получил название «Коралловый лес».

Для третьего варианта аналог – трахиандра. Композиционно, рекреационная зона состоит из двух окружностей, внутри которых расположены источники света, спиралевидная форма которых заимствована от растения. Ограждение, по форме, является абстрактной бионической структурой. Концепт получил название «Пластика света».

Созданные концепции предполагают наличие световых элементов, которые несут сугубо декоративную функцию и не являются полноценными источниками освещения,

поскольку изначально предполагалось, что создаваемая рекреационная зона будет размещена на территории каких-либо городских парков, которые, согласно существующим стандартам, должны быть оснащены осветительными приборами, обеспечивающими необходимый уровень освещения.

5. Визуализация

При создании трехмерных моделей концептов использовалась программа для 3D моделирования Autodesk 3ds Max. Для создания визуализации была использована профессиональная система рендеринга изображений Mental Ray. В качестве источника освещения был выбран фотометрический Free Light, а генерация мягких теней осуществлена посредством алгоритма Ray-Traced Shadow.

6. Заключение

В процессе исследования проблемы визуальной экологии городской среды была создана концепция рекреационной зоны на основе метода бионического формообразования.

Созданная концепция предлагает лишь дополнение лесопарковой зоны, поскольку основным фактором, воздействующим на человека, является окружающая его природа. В свете описанной в данной работе проблемы, предложенное решение, а именно использование метода бионического формообразования как инструмента борьбы с неблагоприятной визуальной средой, является актуальным.

7. Литература

- [1] Волкотруб, Иван Тимофеевич. Основы художественного конструирования. Моделирование материалов и биоформ: учебное пособие / И. Т. Волкотруб. — Киев: Вища школа, 1982. — 152 с.
- [2] Кухта, Мария Сергеевна. Основы дизайна: учебное пособие / М. С. Кухта, Л. Т. Жукова, М. Г. Гольдшмидт; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — 288 с.
- [3] Филин В.А. Видеоэкология: что для глаза хорошо, а что — плохо. — М., 2006. — 512 с.
- [4] Филин В.А. Автоматия саккад. — М.: Изд-во МГУ, 2001. — 263 с.

Об авторах

Юриков Владислав Вячеславович — студент группы 8Д62 Отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского Политехнического Университета. E-mail: yurikovvladislav@yandex.ru.

Давыдова Евгения Михайловна — старший преподаватель Отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского Политехнического Университета. E-mail: davydova@tpu.ru.



Автоматизация проектирования,
тренажеры и симуляторы

CAD/CAM/CAE,
Trainers and Simulators

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Новая формула нахождения приближенного расстояния в задаче подбора неявных алгебраических многообразий

М.В. Гончарова¹, А.Ю. Утешев¹

m.goncharova@spbu.ru|a.uteshev@spbu.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе описано применение новой формулы нахождения приближенного расстояния от точки до алгебраического многообразия в геометрическом подходе к подбору кривых и реконструкции поверхностей с помощью неявных алгебраических многообразий. Приведен краткий обзор особенностей методов подбора неявных алгебраических многообразий. Для иллюстрации возможностей новой формулы нахождения приближенного расстояния приведены изоконтурные точного расстояния, расстояния Самсона и оригинальной формулы. Предложен четырехшаговый алгоритм подбора неявных алгебраических многообразий, использующий один из алгебраических методов подбора на начальном шаге, оригинальную формулу нахождения расстояния для вычисления геометрического критерия качества приближения и оптимизационный метод для обновления значения вектора коэффициентов подбираемого многообразия. Кратко охарактеризованы первые результаты работы предложенного алгоритма на тестовых данных. В заключении описаны требующие решения задачи и направления для продолжения исследований.

Ключевые слова: расстояние, приближенное расстояние, неявные алгебраические многообразия, подбор кривых и поверхностей.

On a New Distance Approximation for an Implicit Polynomial Manifold Fitting

Marina V. Goncharova¹, Alexei Yu. Uteshev¹

m.goncharova@spbu.ru|a.uteshev@spbu.ru

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The application of a new approximate point-to-algebraic manifold distance formula is suggested to the geometric approach to curve fitting and surface reconstruction using implicit polynomial manifolds. A brief overview of the fitting methods features for implicit algebraic manifolds is given. To illustrate the possibilities of a new approximate point-to-manifold distance formula, the equidistant curves of the exact distance, Samson's distance and the present formula are given. A four-step algorithm for implicit algebraic manifold fitting is proposed, using one of the algebraic fitting methods at the initial step, the present approximate formula for the distance finding to calculate the geometric criterion of approximation quality and an optimization method for updating the value of the vector of coefficients of the manifold. The first results of the proposed algorithm on test data are briefly characterized. In conclusion, the tasks and directions for further research are described.

Keywords: distance, distance approximation, implicit polynomial manifold, curve and surface fitting.

1. Введение

Задачи подбора кривых и реконструкции поверхностей занимают особое место в исследованиях в областях компьютерной графики, моделирования и компьютерного зрения. Для построения моделей приходится иметь дело с наборами данных, полученных со сканирующих в 2D или в 3D устройств, фото и видео аппаратуры. Часто исходные данные для моделирования представлены в виде конечного множества точек, и улучшение методов подбора кривой или поверхности, наилучшим образом описывающей это множество, не теряет актуальности, несмотря на значительное количество исследований в этой области (например, [1, 2, 6]).

Одним из удобных, компактных способов представления кривой или поверхности являются неявные алгебраические уравнения. Такой способ представления обладает рядом преимуществ над альтернативами (сетками, B-сплайнами и др.), поскольку не требует параметризации и предварительной информации о распре-

делении точек в заданном множестве. Подбору неявных алгебраических многообразий, наилучшим образом приближающих заданное множество точек, посвящен ряд исследований (например, [4, 7, 8]). Вкладом настоящей работы можно считать первое применение оригинальной формулы нахождения приближенного расстояния от точки до алгебраического многообразия [15] в рамках существующего геометрического подхода к подбору неявных алгебраических многообразий. Улучшение алгоритмов определения оптимальной степени многообразия, модификация известных методов подбора или создание новых методов являются предметом дальнейших исследований и в данной работе не рассматриваются.

2. Неявные алгебраические многообразия и методы подбора

Пусть задано некоторое множество точек

$$P = \{p_i\}, p_i \in \mathbb{R}^n, i = \overline{1, N}, n \in \{2, 3\}. \quad (1)$$

Требуется получить аппроксимирующее представление этого множества точек в виде неявной кривой или поверхности, которые можно задать в виде множества нулей некоторой полиномиальной функции $f(\mathbf{x})$. В трехмерном случае для поверхностей искомое неявное алгебраическое многообразие степени ℓ может быть записано в векторном виде

$$f_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = \mathbf{m}(\mathbf{x})^T \mathbf{a},$$

где $\mathbf{x} = (x, y, z)$,

$\mathbf{m}(\mathbf{x}) = (1, x, y, z, x^2, \dots, z^\ell)^T$ – вектор мономов; в дальнейшем процессе подбора компоненты этого вектора зависят только от координат точек из заданного множества (1),

$\mathbf{a} = (a_{000}, a_{100}, a_{010}, a_{001}, a_{200}, \dots, a_{00\ell})^T$ – вектор коэффициентов алгебраического многообразия; основной задачей процесса подбора является нахождение вектора \mathbf{a}_* , наилучшим образом описывающего заданное множество (1).

Далее следует определить критерий качества подбора для определения меры близости множества

$$Z_f = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | f(\mathbf{x}) = 0\}$$

к заданному множеству (1) (то есть, зафиксировать, что мы понимаем под словами ”описывает наилучшим образом”)

$$Distance(P, Z_f)$$

и, минимизируя значение этого критерия, найти вектор коэффициентов \mathbf{a}_* .

Существующие методы подбора можно разделить на алгебраические и геометрические; считается, что преимущество первых является точность подбора, вторых – скорость работы. Алгебраические методы в качестве минимизируемого критерия качества используют так называемое алгебраическое расстояние

$$Distance(P, Z_f) = \sum_{i=1}^N f_{\mathbf{a}}^2(p_i).$$

Широко известным и часто применяемым алгебраическим методом подбора является 3L-алгоритм [3].

В геометрических методах подбора минимизируемый критерий записывают, используя расстояние от точки до поверхности

$$Distance(P, Z_f) = \sum_{i=1}^N d^2(p_i, q_i),$$

где q_i – точка на поверхности $f_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = 0$, ближайшая к точке p_i .

Для записи минимизируемого критерия необходимо иметь некоторое начальное многообразие $f_{\mathbf{a}}(\mathbf{x})$, поэтому первое значение вектора \mathbf{a} обычно получают применением одного из алгебраических методов. Далее процесс подбора состоит из двух шагов – определения ближайших точек на поверхности, а затем улучшения значения вектора \mathbf{a} коэффициентов многообразия.

Нахождение расстояния от точки до кривой или поверхности можно проводить в двух разных идеологиях – решать нелинейные системы, определяя ортогональные проекции точек на рассматриваемое многообразие (например, [1]), или использовать различ-

ные приближения расстояния (например, [8, 10]). Далее для нахождения следующего значения вектора \mathbf{a} могут быть использованы различные оптимизационные методы, в частности, алгоритм Левенберга – Марквардта (Levenberg – Marquardt Algorithm, LMA) [5].

Остается открытым вопрос выбора степени ℓ неявного алгебраического многообразия. Часто это значение предопределено характером множества (1). На практике чаще используют четные значения ℓ , и этот факт имеет простое объяснение [12] – многообразия нечетных степеней задают неограниченные множества, а исходные наборы данных всегда конечны. Наиболее используемыми являются значения ℓ от 2 до 10 в силу того, что большие значения степени требуют определения значительного количества коэффициентов (например, для $\ell = 14$ в 2D неявное алгебраическое многообразие имеет 120 неизвестных коэффициентов, а в 3D – 680). Однако, существуют методы автоматического подбора наилучшего значения ℓ , например, [7].

3. Нахождение приближенного расстояния от точки до алгебраического многообразия

Получение простых в применении формул и надежных для широкого класса задач и эффективных с точки зрения потребляемых вычислительных ресурсов алгоритмов нахождения приближенного расстояния является востребованной задачей несмотря на возрастающие возможности использования вычислительной техники и развитие технологий распределенных и параллельных вычислений. Одной из актуальных подзадач в множестве задач подбора наилучших аппроксимирующих кривых и поверхностей является подбор эллипсов (ellipse fitting problem). В работе [16] был предложен точный метод определения расстояния между объектами как наименьшего положительного корня так называемого уравнения расстояния (distance equation). В частности, этот метод подходит для задачи определения расстояния от точки до эллипса в \mathbb{R}^2 или эллипсоида в \mathbb{R}^3 . Преимуществом такого подхода является то, что точное значение расстояния можно определить, не находя ближайшую точку на поверхности. Однако, метод имеет и недостатки – препятствием для практического использования оказывается неявное представление найденного расстояния, а также необходимость проведения затратных символьных вычислений (нахождение дискриминанта полинома). В работе [14] удалось найти явное, аналитическое представление для приближенного значения расстояния от точки до эллипса или эллипсоида, используя разложение корня уравнения расстояния в степенной ряд. В статье представлены детальные объяснения и полные доказательства, определены области, в которых найденные формулы неприменимы, а также описаны границы погрешности формул.

Применение предложенного подхода не ограничивается только квадратами, в работе [13] сформулирован метод построения уравнения расстояния для алгебраических многообразий, а в работе [15] представ-

лена новая явная формула нахождения приближенного расстояния от точки до алгебраического многообразия, применение которой к задаче подбора неявных алгебраических многообразий и является новшеством настоящего исследования.

Основной идеей нелинейных геометрических методов подбора неявных алгебраических многообразий является использование расстояния Самсона (Sampson's distance) [9] в качестве приближения первого порядка для точного значения расстояния от точки до кривой или поверхности [10, 11]:

$$Distance(\mathbf{x}, Z_f) \approx \frac{|f(\mathbf{x})|}{\|\nabla f(\mathbf{x})\|}. \tag{2}$$

Существуют обобщения такого метода определения критерия качества подбора (например, [7, 8]), однако, новая формула [15] по сути не просто обобщение расстояния Самсона, а приближение для точного значения расстояния более высокого порядка:

$$Distance(\mathbf{x}, Z_f) \approx \frac{|f(\mathbf{x})|}{\|\nabla f(\mathbf{x})\|} \cdot \left(1 + \frac{\nabla f^T(\mathbf{x}) \cdot \mathcal{H}(f(\mathbf{x})) \cdot \nabla f(\mathbf{x})}{2\|\nabla f(\mathbf{x})\|^4} f(\mathbf{x}) \right), \tag{3}$$

здесь $f(\mathbf{x})$ – дважды дифференцируемая вещественная функция,

$\nabla f(\mathbf{x})$ – градиент,

$\mathcal{H}(f(\mathbf{x}))$ – матрица Гессе функции $f(\mathbf{x})$.

Заметим, что формула (3) позволяет находить расстояния от точки \mathbf{x} не только до алгебраических многообразий, но и до неалгебраических кривых и поверхностей, хотя в этом случае мы не можем построить соответствующее уравнение расстояния.

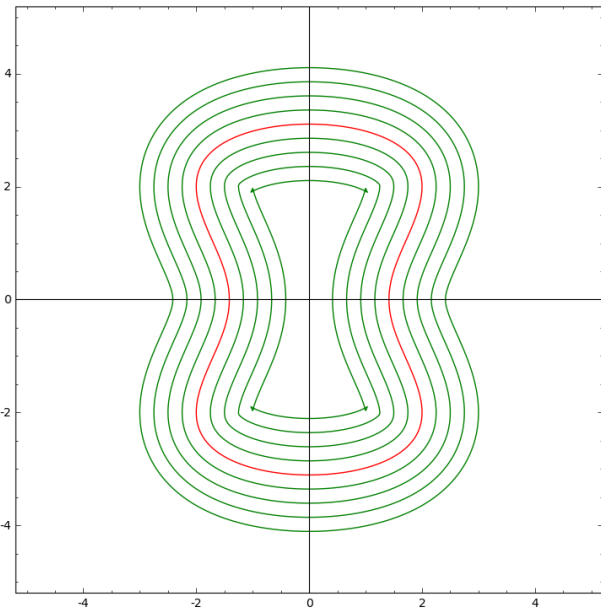


Рис. 1. Точное расстояние.

Для иллюстрации возможностей формулы (3) на рис. 1–3 приведены изоконтуры (кривые, находящиеся на фиксированном расстоянии от исходной кривой) множества $\{(x, y) : 8x^2 + (y^2 - 4)^2 - 32 = 0\}$, взятого из

работы [8]. В каждом случае для сравнения представлены изоконтуры на удалении 1/4, 1/2, 3/4 и 1 от исходного множества, изображенного на каждом рисунке красным. На рис. 4 представлено наложение изоконтур точного расстояния, приближенного расстояния Самсона (2) и приближенного расстояния по формуле (3) на удалении 1 от исходного множества. Нестабильность изоконтуров при удалении от границы множества на рисунке 3 предположительно возникает по причине наличия особой точки внутри замкнутой кривой.

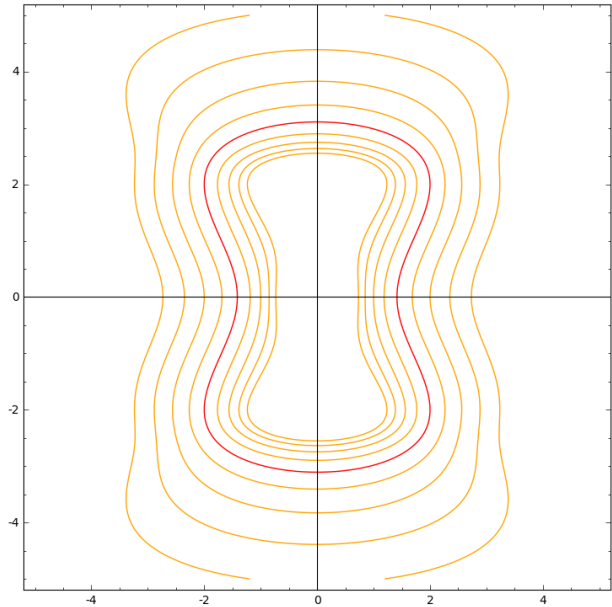


Рис. 2. Приближенное расстояние Самсона (2).

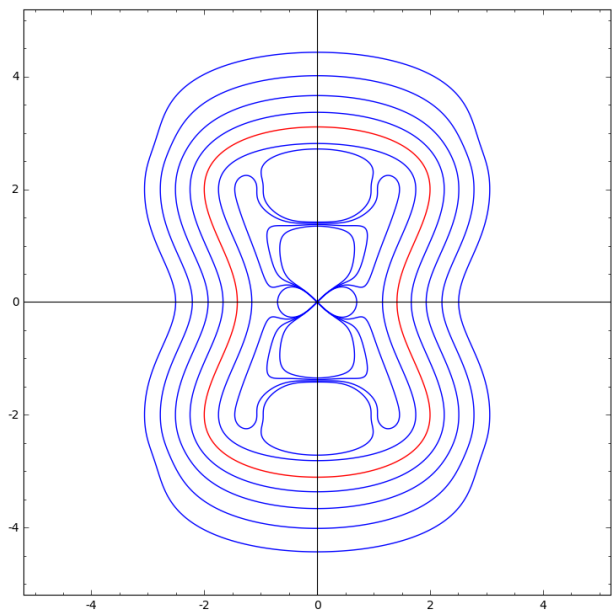


Рис. 3. Приближенное расстояние по формуле (3).

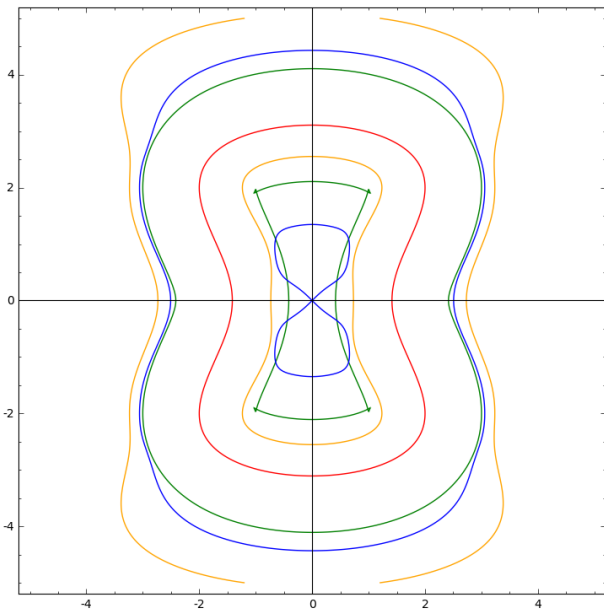


Рис. 4. Наложение изоконтуров с расстоянием 1.

4. Применение формулы нахождения приближенного расстояния в задаче подбора неявных алгебраических многообразий

Подбор неявных алгебраических многообразий для аппроксимации множества (1) с помощью формулы (3) нахождения приближенного расстояния был осуществлен по следующей схеме:

1. Формируем начальное значение вектора \mathbf{a} , применяя $3L$ -алгоритм.
2. Находим расстояния от точек множества (1) до текущего неявного алгебраического многообразия $f_{\mathbf{a}}(\mathbf{x})$, используя формулу (3).
3. Вычисляем значение критерия качества $Distance(P, Z_f)$ как сумму квадратов расстояний, найденных на предыдущем шаге.
4. Если не достигнута желаемая точность подбора и предельное число итераций, обновляем значение вектора \mathbf{a} , используя метод LMA, и возвращаемся к шагу 2.

В качестве первых тестовых данных были взяты несколько 3D наборов из базы AIM@SHAPE. Для примера на рисунке 5 приведено построенное алгебраическое многообразие 6 степени для набора точек Knot.mat. Текущая накопленная информация о результатах подбора не позволяет сделать заявление об однозначном преимуществе использования новой формулы для всех рассмотренных множеств, однако можно с уверенностью говорить о том, что для большого количества точек в наборе, а именно, более 1000, подбор с использованием новой формулы (3) дает хороший результат, и минимизируемое значение суммы квадратов расстояний от точек заданного множества до построенной поверхности часто оказывается наименьшим среди рассмотренных методов подбора. Для небольших наборов точек предложенный метод ожидаемо проигры-

вает по минимизируемому критерию суммы расстояний методам алгебраического подбора. Сравнение скорости работы методов для достижения сопоставимой точности приближения является одной из будущих задач.

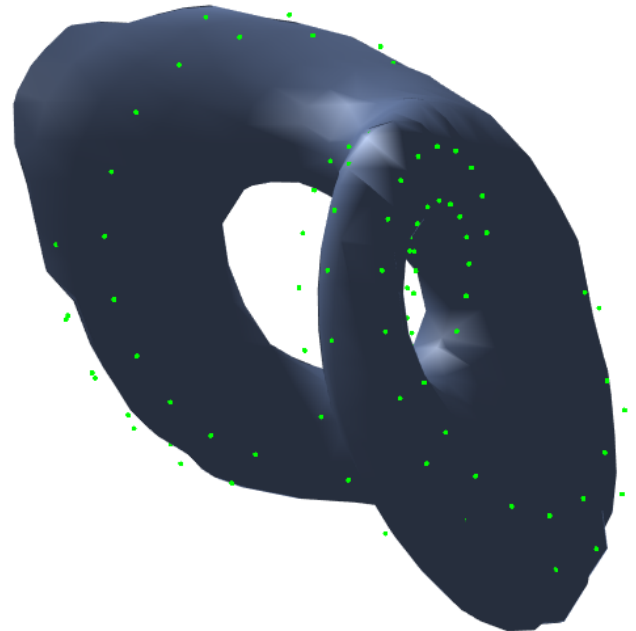


Рис. 5. Пример построенного алгебраического многообразия.

5. Заключение

В работе представлено краткое описание процесса подбора неявных алгебраических многообразий для представления точечного множества данных в виде кривых или поверхностей. Приведена явная формула нахождения приближенного расстояния от точки до алгебраического многообразия, даны графические иллюстрации в виде изоконтуров. Описан метод применения формулы (3) в задаче подбора неявных алгебраических многообразий, охарактеризованы первые полученные практические результаты.

Предметом дальнейшего исследования является сравнение по ряду критериев качества подбора с применением новой формулы с другими известными методами и выработка рекомендаций по использованию новой формулы, например, при наличии дополнительной информации о структуре заданного множества данных. Представление аппроксимируемого множества в виде неявного алгебраического многообразия позволяет легко определять положение точек исходного множества (1) относительно границы поверхности $f_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = 0$ ("вовне" или "внутри"). Сравнение рис. 2 и рис. 3 наталкивает на идею использования обеих формул (2) и (3) на втором шаге предложенного в п. 4 подхода к подбору алгебраического многообразия, в зависимости от места нахождения точек множества (1), что несомненно позволит использовать сильные стороны обеих формул нахождения приближенного расстояния и в общем

итоге приведет к улучшению качества подбора неявных алгебраических многообразий.

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 18-31-00413.

7. Литература

- [1] S. Ahn, W. Rauh, H. Cho, and H. Warnecke, Orthogonal Distance Fitting of Implicit Curves and Surfaces. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no. 5, pp. 620–638, 2002.
- [2] M. Aigner and B. Jutler, Gauss–Newton–type Technique for Robustly Fitting Implicit Defined Curves and Surfaces to Unorganized Data Points. *Proc. IEEE Int. Conf. Shape Model. Appl.*, New York, pp. 121–130, 2009.
- [3] M. Blane, Z. Lei, H. Civil, and D. Cooper, The 3L Algorithm for Fitting Implicit Polynomials Curves and Surface to Data. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 3, pp. 298–313, 2000.
- [4] S.-W. Cheng and M.-K. Chiu, Implicit Manifold Reconstruction. *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp. 161–173, 2014.
- [5] R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*, 2nd ed. New York: Wiley, 1990.
- [6] A. Gomes, I. Voiculescu, J. Jorge, B. Wyvill, and C. Galbraith, *Implicit Curves and Surfaces: Mathematics, Data Structures and Algorithms*. 1st ed. Springer-Verlag London, 2009.
- [7] R. Interian, J. Otero, C. Ribeiro, and A. Montenegro, Curve and Surface Fitting by Implicit Polynomials: Optimum Degree Finding and Heuristic Refinement. *Comp. Graph.*, vol. 67, pp. 14–23, 2017.
- [8] M. Rouhani and A. Sappa, Implicit Polynomial Representation Through a Fast Fitting Error Estimation. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 21, pp. 2089–2098, 2011.
- [9] P. Sampson, Fitting Conic Sections to Very Scattered Data: an Iterative Refinement of the Bookstein Algorithm. *Comput. Gr. Image Process.*, vol. 18, pp. 97–108, 1982.
- [10] G. Taubin, Estimation of Planar Curves, Surfaces, and Nonplanar Space Curves Defined by Implicit Equations with Applications to Edge and Range Image Segmentation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 13, no. 11, pp. 1115–1138, 2002.
- [11] G. Taubin, Distance Approximations for Rasterizing Implicit Curves. *ACM Trans. Graph.*, vol. 13, no. 1, pp. 3–42, 1994.
- [12] G. Taubin, F. Cukierman, S. Sullivan, J. Ponce, and D. Kreigman, Parameterized Families of Polynomials for Bounded Algebraic Curve and Surface Fitting. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 16, pp. 287–303, 1994.
- [13] A. Uteshev and M. Goncharova, Metric Problems for Algebraic Manifolds: Analytical Approach. *Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov), CNSA 2017 – Proceedings*, 7974027, 2017.
- [14] A. Uteshev and M. Goncharova, Point-to-Ellipse and Point-to-Ellipsoid Distance Equation Analysis. *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 328, pp. 232–251, 2018.
- [15] A. Uteshev and M. Goncharova, Approximation of the Distance from a Point to an Algebraic Manifold. *Proceedings of the 8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods – Vol. 1: ICPRAM*, pp. 715–720, 2019.
- [16] A. Uteshev and M. Yashina, Metric Problems for Quadrics in Multidimensional Space. *J. Symbolic Computation*, vol. 68, no. 1, pp. 287–315, 2015.

Об авторах

Гончарова Марина Витальевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры управления медико-биологическими системами факультета прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета. E-mail: m.goncharova@spbu.ru.

Утешев Алексей Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры управления медико-биологическими системами факультета прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета. E-mail: a.uteshev@spbu.ru.

О геометрическом моделировании поверхностей скругления

А.А. Ладилова¹

ladilova@ascon.ru

¹СЗД Лабс, Коломна, Россия

Данная работа посвящена одной из самых сложных тем геометрического моделирования – построению поверхностей скругления. Многие мировые математические ядра используют специальный вид скругления — full round fillet. Математический и алгоритмический аппарат этого типа скруглений не публиковался. Обсуждается реализация аналога такого скругления в C3D Kernel. Рассматривается общий подход к построению скругления трех граней.

Ключевые слова: геометрическое моделирование, геометрическое ядро, моделирование поверхностей, скругление, скругление трех граней.

On geometric modeling of fillet surfaces

A.A. Ladilova¹

ladilova@ascon.ru

¹C3D Labs, Kolomna, Russia

This paper is dedicated to one of the most complex parts of geometric modeling as constructing of fillet surfaces. The popular mathematic kernels use a special type fillets named full round fillet. Mathematic and algorithmic apparatus of these fillets were not published. The realisation of analogous fillets in C3D Kernel is discussed. The general way to construct full round fillet is considered.

Keywords: geometric modeling, geometric kernel, surfaces modeling, fillet, full round fillet.

1. Введение

Тема моделирования скруглений, наверное, всегда будет актуальной для разработчиков геометрических ядер. Как известно, во многих мировых CAD-системах уже давно используется специальный вид скругления – full round fillet ([1, 2]). Соответственно, было решено реализовать аналог такого скругления в C3D Kernel. Математический и алгоритмический аппарат этого типа скруглений в должной мере не опубликован, поэтому наш подход к этой проблеме может представлять интерес.

2. Скругление трех граней

В русскоязычной литературе мы не нашли устоявшегося названия для full round fillet, поэтому в нашей интерпретации используется термин скругление трех граней. Несколько слов о том, что это такое.

Пусть в некотором теле выделена одна из граней – назовем ее центральной, а также две смежные с ней боковые грани. Боковые грани не должны соединяться с центральной гладким образом. См. рис. 1.

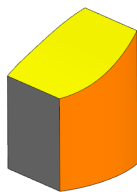


Рис. 1. Верхняя (желтая) грань – центральная, боковые – передняя (оранжевая) и противоположная ей задняя.

Под скруглением трех граней будем понимать грань, заменяющую центральную (рис. 2) и касающуюся каждой из трех граней (рис. 3).

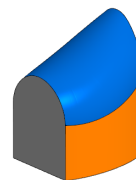


Рис. 2. Выполненное скругление трех граней.

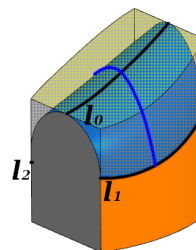


Рис. 3. Скругление касается каждой из трех граней по кривым l_0, l_1, l_2 . Синей линией изображено поперечное сечение.

Данный вид скругления имеет в общем случае переменный радиус, который определяется автоматически.

3. Немного теории

Для построения искомой грани первоначально необходимо определить кривые, по которым скругление касается каждой из трех заданных граней. В общем случае эти кривые можно построить только как сплайны, проходящие через известные точки, рассчитанные заранее. Рассмотрим, как можно вычислить тройку точек – по одной на каждом сплайне.

Пусть боковые поверхности задаются радиус-векторами $r_1(u, v)$ и $r_2(z, w)$, а центральная – $r_0(x, y)$ в некоторой области изменения параметров. Введем также положительный числовой параметр d .

Обозначим через $n_0(x, y)$, $n_1(u, v)$, $n_2(z, w)$ единичные нормали к соответствующим поверхностям, направленные “внутрь” (рис. 4).

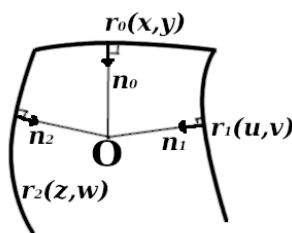


Рис. 4. Поперечное “сечение” при построении скругления.

Потребуем, чтобы концы этих нормалей, растянутых в d раз, попали в одну точку (точку O на рис. 4). Таким образом, мы имеем систему уравнений

$$\begin{cases} dn_0(x, y) = dn_1(u, v), \\ dn_0(x, y) = dn_2(z, w), \end{cases}$$

имеющую одну степень свободы.

Для однозначности потребуем, например, чтобы плоскость, проходящая через основания нормалей, содержала некоторую заранее фиксированную точку p_0 . Таким образом, к системе добавится уравнение вида

$$(r_0(x, y) - p_0, r_1(u, v) - p_0, r_2(z, w) - p_0) = 0,$$

где $(, ,)$ – оператор смешанного произведения векторов.

В результате мы получаем систему

$$\begin{cases} dn_0(x, y) = dn_1(u, v), \\ dn_0(x, y) = dn_2(z, w), \\ (r_0(x, y) - p_0, r_1(u, v) - p_0, r_2(z, w) - p_0) = 0, \end{cases}$$

из семи уравнений с семью неизвестными. Используя алгоритмы численных методов (например, метод Ньютона), мы находим решение этой системы: $x_0, y_0, u_0, v_0, z_0, w_0, d_0$. Это решение определяет точки касания с поверхностями: $r_0(x_0, y_0)$, $r_1(u_0, v_0)$, $r_2(z_0, w_0)$, а также радиус d_0 .

Теперь остается построить сплайновую кривую, проходящую через точки $r_0(x_0, y_0)$, $r_1(u_0, v_0)$, $r_2(z_0, w_0)$ и ортогональную в этих точках векторам нормали $n_0(x_0, y_0)$, $n_1(u_0, v_0)$, $n_2(z_0, w_0)$ соответственно. Если слегка изменить постановку задачи и

искать кривую по заданным точкам и касательным векторам в этих точках, то методы, которыми можно реализовать такой сплайн можно найти, например, в [3]. Указанная кривая будет являться поперечным плоским сечением поверхности скругления, проходящим через фиксированную точку p_0 .

Пробегаая некоторый набор значений p_0 , мы получаем наборы троек точек, по которым можно восстановить “кривые касания” l_0, l_1, l_2 (см. рис. 3). Далее по этим кривым производится расчет нужного сечения скругления. Таким образом, задача полностью решается.

4. Заключение

Выше был изложен общий подход к построению скругления трех граней. На практике же возникает ряд сопутствующих вопросов, касающихся выбора точек p_0 , параметризации сплайновых кривых и т.д., которые в рамках данной работы не освещаются. Отдельной темой для исследования может стать обеспечение гладкой стыковки между поверхностями для более сложных форм (рис. 5).

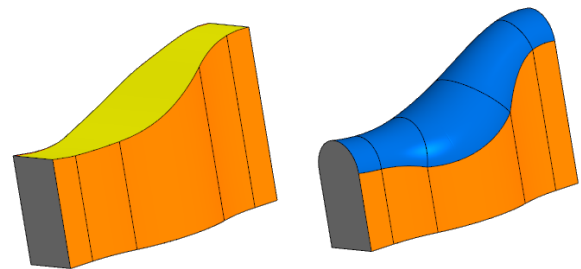


Рис. 5. Пример скругления сложной детали.

На данный момент эта проблема до конца не решена.

5. Литература

- [1] Bethune J.D. Engineering design graphics with Autodesk Inventor 2015. // Boston: Pearson, 2015.
- [2] Weber M. SolidWorks 2014 Black Book. // USA: CAD/CAM/CAEWORKS, 2014.
- [3] Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. // Москва: КУРС: ИНФРА-М, 2016.

Об авторах

Ладилова Анна Александровна, к.ф.-м.н., старший математик-программист ООО “СЗД Лабс”. Ее e-mail ladilova@ascon.ru.

К подавлению цепочек скруглений при помощи эйлеровых операторов

С.Е. Сляднев¹, В.Е. Турлапов¹

sergey.slyadnev@gmail.com | vadim.turlapov@itmm.unn.ru

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Описана процедура упрощения CAD-моделей путем распознавания и подавления некоторых типов скруглений и их цепочек. Предлагаемый метод основан на эйлеровых операторах KEV, KEF и KFMV, реализованных на базе геометрического ядра с открытыми исходными кодами. Упрощение задействует два этапа, а именно, распознавание скруглений и их подавление с гарантией топологической и геометрической целостности результата. Описанный подход ориентирован на использование в автоматическом режиме, предъявляющем высокие требования к надежности алгоритма. Ключевыми свойствами разработанного подхода являются надежность, предсказуемость результата и расширяемая архитектура, допускающая добавление новых топологических случаев без изменения основной процедуры упрощения. Распознавание состоит в построении графа смежности граней и насыщении его узлов атрибутами, содержащими информацию о типах ребер, их свойствах и предполагаемых видах скруглений. На этапе подавления, алгоритм итеративно проходит граф смежности граней, формируя цепочки скруглений. Для каждой грани в цепочке осуществляется распознавание локальной топологической ситуации, определяющей способ подавления в терминах эйлеровых операторов. Алгоритм может быть расширен путем добавления дескрипторов новых топологических ситуаций. После применения эйлеровых операторов затронутые ребра перестраиваются для получения геометрически корректного граничного представления.

Ключевые слова: подавление скруглений, упрощение CAD-модели, геометрическое моделирование, прямое редактирование, распознавание конструктивных элементов, Analysis Situs, OpenCascade.

Towards the suppression of blend chains using Euler operators and open geometric modeling kernel

S.E. Slyadnev¹, V.E. Turlapov¹

sergey.slyadnev@gmail.com | vadim.turlapov@itmm.unn.ru

¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

This paper presents a CAD model simplification procedure which consists of recognition and suppression of certain types of blend chains. The proposed method involves Euler operators KEV, KEF, and KFMV, which are developed on top of open-sourced geometric modeling kernel. The simplification process employs two stages: recognition and suppression. The suppression stage ensures the geometric and topological validity of the simplification result. The present approach is targeted for use in a batch mode, which poses strict requirements to the robustness of the suppression algorithm. The essential properties of the presented approach are its sustainability, the predictability of the result and the extensible architecture, which allows for adding new topological cases without affecting the algorithm's core. At the recognition stage, the algorithm constructs an attributed adjacency graph, which is then enriched with such information as edges' types, their properties, and the assumed kinds of blend faces. At the suppression stage, the algorithm iterates the adjacency graph and composes the blend candidate faces into the chains. For each face in a chain, a local topology analysis is performed to determine the corresponding sequence of Euler operators which are supposed to eliminate that face. The algorithm allows for extensions through adding descriptors of the new topology situations into the processing. After the Euler operators are done, the affected edges are reconstructed to obtain a watertight boundary representation of the model.

Keywords: blend suppression, CAD model simplification, geometric modeling, direct editing, feature recognition, Analysis Situs, OpenCascade.

1. Введение

Упрощение CAD-моделей и сборок выполняется для решения разнообразных инженерных задач. Среди прочих назовем подготовку геометрии к расчетам, сжатие данных для эффективной визуализации, защиту интеллектуальной собственности при обмене информацией, облегчение работы в системах проектирования, устранение вторичных конструктивных элементов для обеспечения распознавания первичных и т.п. В системах параметрического проектирования, основанных на истории построения, упрощение CAD-модели может быть выполнено путем исключения соответствующего набора конструктивных элементов из дерева операций [1]. В случае же, если история построения отсутствует или не имеет достаточно выразительной структуры, такой подход неприменим. Возникает необходимость использования операторов прямого редактирования, которые на сегодняшний день

отсутствуют в открытых библиотеках геометрического моделирования.

В данной работе мы описываем оператор подавления цепочек скруглений, основанный на распознавании конструктивных элементов с последующим применением эйлеровых операторов. Вкладом настоящей работы являются: а) реализация эйлеровых операторов KEV, KEF и KFMV на основе открытого ядра геометрического моделирования; б) разработка расширяемой архитектуры распознавания и подавления цепочек скруглений; в) реализация алгоритма подавления некоторых типов цепочек скруглений.

Предлагаемый алгоритм допускает работу в глобальном и локальном режимах. В первом случае осуществляется инкрементальное подавление, т.е. цепочки удаляются одна за другой с промежуточным перестроением вспомогательных структур данных. Во втором – локальном – режиме, распознавание цепочки начинается из грани, выбранной пользователем в качестве кандидата, притом

остальные цепочки оказываются нетронуты. Алгоритм подавления накапливает непрерывную историю модификации модели, позволяющую соотнести результирующее граничное представление с оригинальным, обеспечивая, тем самым, возможность сохранения ассоциированных данных (цветов, имен, аннотаций, допусков и т.п.).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 дан обзор наиболее значимых работ, посвященных распознаванию и подавлению цепочек скруглений. В разделе 3 описан наш подход к распознаванию скруглений с использованием атрибутированного графа смежности граней. В разделе 4 представлен алгоритм подавления скруглений и инкрементальная процедура для его применения в пакетном режиме. Раздел 5 содержит некоторые примеры, демонстрирующие использование алгоритма на CAD-моделях из повседневной практики авторов. Вопросы, оставленные для дальнейшего исследования, приведены в разделе 6.

2. Состояние проблемы

Публикации, посвященные проблеме упрощения CAD-моделей и сборок, были рассмотрены нами в работе [2]. Там же дано описание соответствующего программного комплекса. Остановимся здесь на результатах, имеющих отношение исключительно к подавлению цепочек скруглений.

Авторы работы [3] описывают процедуру подавления скруглений, реализованную в популярной САПР Rhinoceros. Алгоритм выполняет предварительную классификацию граней по типам EBF (edge-blend face) и VBF (vertex-blend face), как показано на Рис. 1. После этого алгоритм рассчитывает новые геометрические носители граничных элементов (ребро для скруглений типа EBF и вершина для VBF). Топология модели изменяется на завершающем этапе процедуры и не предугадывается изначально.

Авторы работ [4,5] описывают «топологическую» процедуру подавления скруглений, основанную на применении эйлеровых операторов с последующим «стягиванием» геометрии. В отличие от эвристических «геометрических» подходов, таких как [3], алгоритмы [4,5] заранее готовят программу преобразования топологии модели в виде последовательности эйлеровых операторов, гарантирующих целостность граничного представления. Предсказуемость результата, достижимая благодаря локальному анализу топологии скруглений, делает, на наш взгляд, алгоритмы [4,5] предпочтительными для неструктурного автоматического упрощения CAD-моделей в пакетном режиме. Так, сложные конфигурации скруглений, которые не могут быть обработаны в силу ограничений алгоритма, окажутся нераспознанными еще на начальной стадии и будут пропущены. Таким образом, алгоритм примет в обработку только те топологические случаи, для которых достоверно известна соответствующая программа эйлеровых операторов. С другой стороны, реализация подобных алгоритмов требует наличия геометрического ядра, содержащего эйлеровы операторы (например, Parasolid или ACIS). Поскольку единственное открытое геометрическое ядро OpenCascade данных операторов не предоставляет, одной из наших задач в контексте настоящего исследования являлась их реализация.

Распознавание элементов скруглений на граничном представлении считается относительно простой задачей (в отличие от задачи их подавления). Действительно, всякая грань задается точным уравнением параметрической поверхности $s(u, v)$, имеющей, как правило, явный спецификатор собственного типа (плоскость, цилиндр, сфера, тор, сплайн и т.п.). На основании данного

спецификатора и дифференциальных свойств поверхности, можно заключить, является ли некоторая грань элементом скругления. В то же время, при относительной простоте классификации единичной грани, надежное распознавание цепочек, особенно в условиях их взаимоналожений, остается нетривиальным. Достаточно общий алгоритм распознавания цепочек, дающий также порядок их построения, был предложен в работе [6]. Работа [5] дополняет результат, оформленный в [6], алгоритмом подавления, где в качестве одного из этапов задействован оператор удаления грани [7] тех же авторов.

Комплекс работ [5,6,7], на наш взгляд, дает *принципиальное* решение проблемы распознавания и подавления скруглений. Как указано выше, основная идея этого «топологического» подхода состоит в предугадывании структуры результирующей модели с последующим преобразованием исходного граничного представления к заранее известному результату. Наша работа, таким образом, состоит в формализации и реализации данного принципа с использованием открытых средств геометрического моделирования.

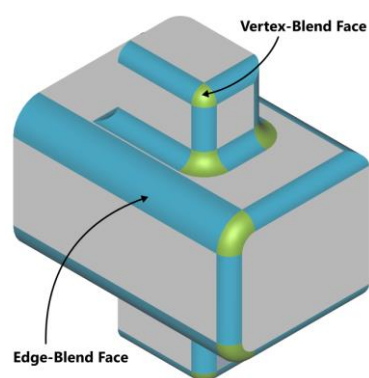


Рис. 1. Основные типы скруглений: EBF и VBF.

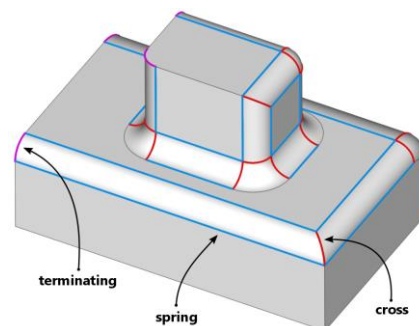


Рис. 2. Типы ребер, ограничивающих грани скруглений.

3. Распознавание

Для подавления цепочек скруглений их следует прежде всего распознать в исходной модели. На данном этапе задача состоит не только в поиске собственно граней, но также в классификации принадлежащих им ребер (Рис. 2). Классификация осуществляется по следующим типам: а) опорные ребра (spring edges); б) поперечные ребра (cross edges); в) терминальные ребра (terminating edges). Результат распознавания помещается в качестве атрибутов графа смежности граней. На данном этапе цепочки не формируются. Кратко, процесс распознавания состоит в последовательности следующих действий:

1. Построение атрибутированного графа смежности граней (attributed adjacency graph, AAG).
2. Распознавание граней типа EBF (edge-blend faces).
3. Распознавание граней типа VBF (vertex-blend faces).

4. Уточнение терминальных ребер (терминальное ребро не может содержаться в двух гранях, распознанных как элементы скруглений).
5. Извлечение результата.

Для распознавания граней типа EBF и VBF используется набор геометрических и топологических эвристик. Мы не приводим здесь их полное описание, отсылая читателя к исходным кодам алгоритма и их непосредственной документации [8].

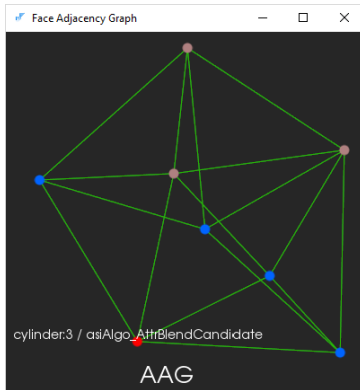


Рис. 3. Атрибутированный граф смежности граней. Элементы скруглений отмечены голубым маркером.

В результате процедуры распознавания, исходный граф смежности граней G преобразуется в эквивалентный граф \hat{G} , снабженный дополнительными атрибутами, ассоциированными с его вершинами (Рис. 3). Используются два типа атрибутов: а) элемент скругления (значение атрибута 1); б) несущая грань (значение атрибута 2).

4. Подавление

Подавление скруглений и их цепочек заключается в удалении соответствующих граней и стягивании соседних для получения «водонепроницаемой» оболочки. Собственно удаление может быть реализовано несколькими путями: а) исключение граней из топологической структуры модели с последующим затягиванием разрывов; б) применение последовательности эйлеровых операторов. В первом случае удаление выполняется в известной степени «слепую», так как нет гарантии, что топологическая конфигурация в окрестности цепочки допускает корректное стягивание разрыва. Так, для управления процессом стягивания, авторы работы [9] осуществляют дополнительный анализ, сопоставляя локальную топологическую конфигурацию цепочки гомеоморфную ей абстрактную область. В случае, если для удаления используются эйлеровы операторы [10], топологические разрывы оказываются невозможны. С другой стороны, эйлеров оператор выполняет лишь синтаксическое преобразование модели, оставляя ее семантику (геометрию) нетронутой.

Формально, процесс удаления скруглений состоит в следующей последовательности действий:

1. Обходом графа \hat{G} формируются цепочки скруглений в виде множеств граней модели $\{F_k\}$ ($k = \overline{1, K}$, где K – количество цепочек). Извлекаются только те вершины, которым отвечает подграф $\hat{C}_k \subset \hat{G}$, где $A(V_i(\hat{C}_k)) = 1$. Здесь функция $V_i(\cdot)$ возвращает вершину графа с номером $i = \overline{1, N_k}$, где N_k – количество граней в цепочке; Функция $A(\cdot)$ возвращает значение атрибута для

данной вершины (1 для элементов скруглений, 2 для опорных граней и 0 для остальных).

2. Грани цепочки F_k удаляются из модели. Граф \hat{G} играет вспомогательную роль в процессе удаления, поэтому его перестроение необходимо лишь в том случае, если подавление будет продолжено для следующей цепочки, т.е. $k \neq K$.
3. Затронутые ребра модели перестраиваются для «стягивания» опорных граней.

4.1 Базовый алгоритм

В базовом алгоритме подавления рассматриваются следующие топологические случаи для единичной грани:

1. Изолированные скругления.
2. Полные и неполные цепочки скруглений, набранные из граней типа EBF с чередующимися VBF.

На предварительном этапе выполняется проверка возможности подавления цепочки в целом. С этой целью используются дополнительные топологические эвристики. В частности, любое поперечное ребро цепочки должно содержаться ровно в двух гранях той же цепочки. В противном случае цепочка оказывается распознанной не полностью и считается неподдаваемой (Рис. 4).

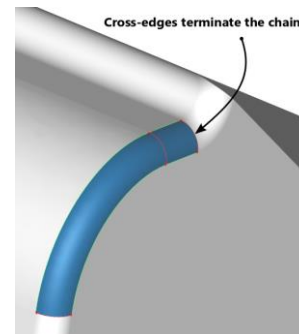


Рис. 4. Пример неподдаваемой цепочки: поперечное ребро содержится в единственной грани.

Последующие этапы алгоритма подавления состоят в следующем:

1. Применение операторов Эйлера для топологической подготовки результата.
2. Выполнение операции «стягивания» ребер для адаптации геометрии к новой топологической структуре.
3. Апостериорная проверка корректности затронутых граней.

Шаг 1 состоит в последовательном применении операторов KEV (kill-edge-vertex), KEF (kill-edge-face), KFMV (kill-face-make-vertex) в порядке, определяемом дескриптором той или иной топологической конфигурации.

Шаг 2 выполняет чисто геометрические построения на предопределенной топологической структуре модели. На данном этапе реконструируются затронутые топологической операцией ребра, вершины и грани. Так, для получения новой несущей кривой ребра, осуществляется пересечение соответствующих поверхностей опорных граней.

Шаг 3 предохраняет алгоритм от возможных ошибок геометрических построений (пересечение поверхностей, проецирование кривой на поверхность и т.п.), связанных с небезупречной надежностью геометрического ядра. Кроме того, на данном этапе выполняется проверка самопересечений границы области определения D для

каждой затронутой грани. Последнее необходимо, поскольку подавление скруглений может, вообще говоря, привести к изменению количества компонент связности области D (Рис. 5). Предполагается, что количество компонент связности данной области есть инвариант оператора подавления скруглений.

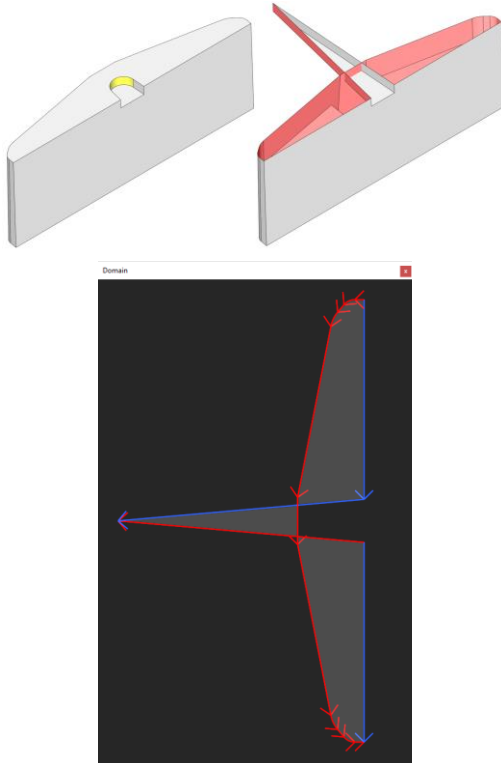


Рис. 5. Сверху: самопересечение в результате подавления изолированного скругления. Снизу: область определения D проблемной грани после модификации (нарушено свойство односвязности).

4.2 Инкрементальная процедура

Базовый алгоритм, описанный выше, позволяет упростить CAD-модель путем подавления единственной выбранной цепочки скруглений. Для упрощения в пакетном режиме этого недостаточно. Для расширения алгоритма на все цепочки, была реализована вспомогательная процедура т.н. инкрементального подавления.

Процедура начинается с конструирования атрибутированного графа смежности граней G . Данный граф должен быть перестроен всякий раз, когда изменяется топология модели, поскольку вершины графа адресуют граничные элементы модели через их серийные индексы, неустойчивые к операторам модификации [11].

Процедура реализует два вложенных цикла обработки данных (Рис. 6). На каждой итерации внешнего цикла, происходит распознавание цепочек скруглений F всей модели. После выбора произвольной грани $f \in F$, выполняется попытка подавления соответствующей ей цепочки $chain(f)$. В случае успеха, граф G перестраивается для обновленной модели s и осуществляется конкатенация локальной истории модификаций h в глобальную историю H . В случае же, если цепочка $chain(f)$ не может быть удалена (внутренний контур), соответствующие грани изымаются из очереди F на подавление, и выбирается новая цепочка без перестроения графа смежности. Кроме того, алгоритм сохраняет множество адресов неподдаваемых граней T , которые, как правило, остаются актуальными даже при изменении топологии (это т.н. «транзитные индексы»). Во внутреннем контуре алгоритм перебирает

цепочки до тех пор, пока подавление не будет осуществлено, либо не опустеет очередь F .

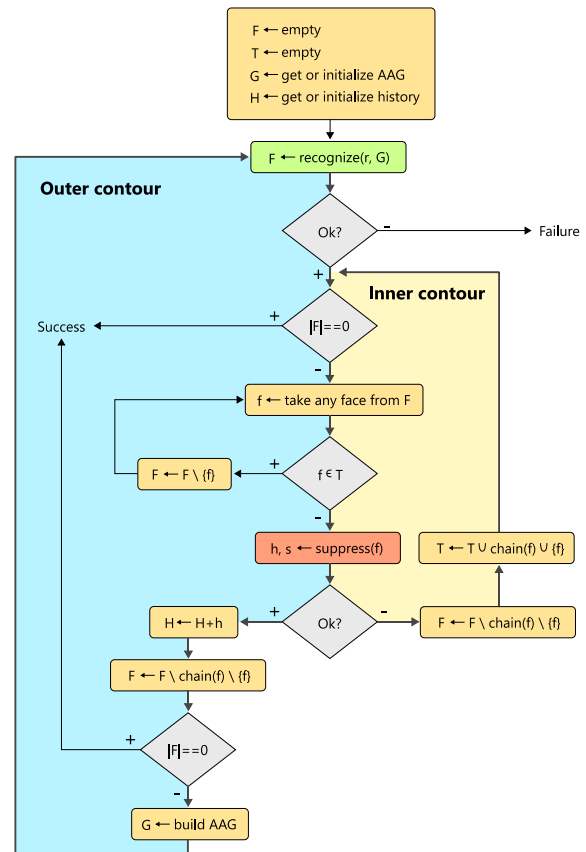


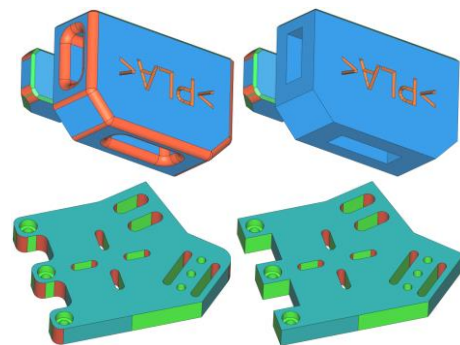
Рис. 6. Блок-схема инкрементальной процедуры подавления.

4.3 История модификаций

Как любой оператор редактирования формы, оператор подавления должен сохранять ассоциативность между граничными элементами результата и исходной модели. С этой целью, в алгоритм подавления была введена структура данных, представляющая историю модификации топологических элементов в виде графа. Поскольку описанная выше инкрементальная процедура состоит в неоднократном вызове оператора подавления, соответствующие структуры данных подлежат «склейке» для получения непрерывной истории каждого граничного элемента.

5. Примеры

Некоторые примеры, демонстрирующие результат подавления показаны на Рис. 7.



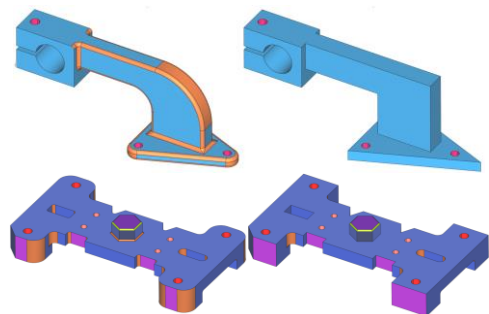


Рис. 7. Примеры подавления скруглений.

6. Заключение

Предложенный подход к распознаванию и подавлению цепочек скруглений был реализован на языке C++ с использованием геометрического ядра OpenCascade и платформы Analysis Situs [12], где осуществлялось прототипирование. В дальнейшем, алгоритм будет индустриализован в составе коммерческого программного обеспечения.

Отметим пути дальнейшего развития предложенного подхода. Во-первых, «каталог» обрабатываемых типов скруглений на сегодняшний день не является полным и должен быть расширен. Во-вторых, представляется возможной и целесообразной оптимизация производительности инкрементальной процедуры, которая выполняет глобальное перестроение графа смежности граней, несмотря на то, что каждая итерация состоит в локальном изменении топологии.

7. Литература

- [1] Belaziz, M., Bouras, A., and Brun, J.M. 2000. Computer-Aided Design 32, 5–6, 377–388.
- [2] Сляднев, С.Е., Малышев, А.С., Турлапов, В.Е. Автоматизированное упрощение машиностроительных САД-моделей и сборок без использования истории построения. Труды международной конференции Графикакон 2018, 488–494.
- [3] Lai, J.-Y., Wong, C., Huynh, T.T., et al. 2016. Small blend suppression from B-rep models in computer-aided engineering analysis. Journal of the Chinese Institute of Engineers 39, 6, 735–745.
- [4] Cui, X., Gao, S., and Zhou, G. 2004. An Efficient Algorithm for Recognizing and Suppressing Blend Features. Computer-Aided Design and Applications 1, 1–4, 421–428.
- [5] Venkataraman, S., Sohoni, M., and Rajadhyaksha, R. 2002. Removal of blends from boundary representation models. Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications - SMA '02, ACM Press, 83.
- [6] Venkataraman, S., Sohoni, M., and Elber, G. 2001. Blend recognition algorithm and applications. Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modeling and applications - SMA '01, ACM Press, 99–108.
- [7] Venkataraman, S. and Sohoni, M. 2002. Reconstruction of feature volumes and feature suppression. Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications - SMA '02, 60.
- [8] Analysis Situs: suppress blend. Режим доступа: http://analysis situs.org/features/features_suppress-blends.html, дата обращения 09.06.2019.
- [9] Zhu H, Menq C (2002) B-Rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition. Computer-Aided Design 34:109–123.
- [10] Mantyla and Sulonen. 1982. GWB: A Solid Modeler with Euler Operators. IEEE Computer Graphics and Applications 2, 7, 17–31.

- [11] Kripac, J. 1997. A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models. Computer-Aided Design 29, 113–122.
- [12] Slyadnev, S., Malyshev, A., and Turlapov, V. 2017. CAD model inspection utility and prototyping framework based on OpenCascade. GraphiCon 2017, 323–327

8. Об авторах

Турлапов Вадим Евгеньевич, д.т.н., профессор кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий ННГУ им. Н.И. Лобачевского, email: vadim.turlapov@itmm.unn.ru

Сляднев Сергей Евгеньевич, аспирант, ИИТММ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, email: sergey.slyadnev@gmail.com



Обработка и анализ изображений
в материаловедении

Image Processing and Analysis
in Materials Science

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Автоматизированный анализ микроструктуры материалов. Нестандартный подход к анализу изображений

Сивкова Татьяна¹, Губарев Семен¹
sivkova@siams.com|mnogono@gmail.com
¹ООО «СИАМС», г. Екатеринбург, Россия

Анализ изображений микроструктуры материалов является актуальной задачей количественного анализа, проводимого лабораториями серийного контроля металлургической продукции и исследовательскими лабораториями. Повышение качества, скорости и удобства контроля микроструктуры с помощью цифровых технологий является основной целью компании ООО «СИАМС». В данной статье рассматриваются вопросы распознавания элементов микроструктуры металлов и сплавов, наиболее часто встречающиеся проблемы и ошибки распознавания, способы их решения. Приведены примеры микроструктуры до и после цифровой обработки изображений. Затронут вопрос о целесообразности применения в области цифровой микроскопии серверной технологии, снимающей с пользователей такие ограничения как: размеры области съемки и области анализа микроструктуры, привязка к одному рабочему компьютеру и к одной лицензии программного обеспечения, а также ограничения при обмене результатами между специалистами отрасли.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, сегментация, SIAMS, клиент-серверные технологии

Computer-aided Metals' Microstructure Analysis. A non-standard approach to image analysis

Tatiana Sivkova¹, Semyon Gubarev¹
sivkova@siams.com|mnogono@gmail.com
¹SIAMS Ltd, Ekaterinburg, Russia

Analysis of metals' microstructure images is an actual quantitative analysis problem, solved by quality control and research labs in the field of metallurgy. SIAMS Ltd pursues the goal of improving microstructure analysis quality, speed, and convenience. This article discusses the issues of recognition of the microstructure elements of metals and alloys, the most common problems and recognition errors, methods for solving them. Microstructure examples are given before and after digital image processing. The question of the advisability of using server technology in digital microscopy that removes such restrictions from users as the size of the shooting area and the area of microstructure analysis, binding to one working computer and one software license, as well as restrictions on the exchange of results between industry experts, will be raised.

Keywords: digital imaging, segmentation, SIAMS, client-server technologies

1. Введение

Начиная с 90х гг., вместе с распространением компьютеров на промышленных предприятиях в России, началась разработка систем анализа изображений для количественного анализа микроструктуры, предназначенных для замены трудоемкого ручного подсчета элементов структуры с помощью окулярных шкал. Вместе с разработкой и активным внедрением таких систем в металлографических лабораториях рос запрос на качество выделения нужных объектов микроструктуры: границ зерен, включений, фаз, слоев и пр. Многолетний опыт внедрения систем анализа изображений компании SIAMS показал, что применения набора базовых функций сегментации недостаточно для анализа «сложной» микроструктуры. Понятие «сложной» микроструктуры можно применить к микроструктуре, содержащей дефекты пробоподготовки и съемки: царапины, плохо протравленные элементы структуры, а также к изображениям, имеющим градиент яркости за счет неравномерного освещения или травления. Это относится также к изображениям, содержащим частицы разных фаз близких по яркости и цвету. Запрос на повышение точности выделения объектов микроструктуры и разделения похожих объектов сформировал необходимость поиска и применения новых функций обработки изображений.

2. Специализированные алгоритмы SIAMS

С момента своего создания и до сегодняшнего дня компания SIAMS активно ведет разработку новых алгоритмов, а также последовательно улучшает и

ускоряет существующие алгоритмы, наблюдая за развитием мировых тенденций в области анализа изображений [3-7], [10]. На сегодняшний день можно выделить 4 основных направления разработки, по которым достигнуты положительные результаты. Полученные алгоритмы успешно применяются в методиках анализа микроструктур, наиболее востребованных металловедами. Это комплексы функций, позволяющие лучше выделить объекты микроструктуры: дифференциальный анализ, в частности, анализ «хребтов» и «долин» (анализ собственных значений и векторов Гесснан функции интенсивности); методы сегментации, в частности, адаптивная сегментация и методы Graph-Based Segmentation; морфологические операции. Рассмотрим подробнее каждый из них на конкретных примерах.

2.1 Адаптивная сегментация

Адаптивная сегментация была разработана изначально для улучшения распознавания машинописного текста [1]. В отличие от базовой сегментации по одному глобальному порогу, адаптивная сегментация выбирает порог на каждом пикселе изображения с учетом интенсивностей соседних пикселей.

В общем виде адаптивная сегментация (также ее называют сегментацией с локальным порогом или сегментацией с переменным порогом) записывается следующим образом:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } f(x, y) > t(x, y) \\ 1, & \text{если } f(x, y) \leq t(x, y) \end{cases}$$

где $t(x, y)$ - функция локального порога определенная в окрестности точки x, y ;

$f(x, y)$ - исходное изображение (в простейшем случае функция интенсивности).

Функции локального порога в общем виде может быть записана следующим образом:

$$t(x, y) = \alpha\sigma_{xy} + \beta m_{xy} + \gamma,$$

где σ_{xy} - стандартное отклонение,

m_{xy} - среднее значение в окрестности точки x, y ;

α, β, γ - управляющие коэффициенты, подбираемые экспериментально.

На базе семейств алгоритмов сегментаций создана методика анализа однородных фаз на изображении. Методика не ограничивается применением одного алгоритма сегментации. Это совокупность разных алгоритмов, условно разделяемых на предобработку (уменьшение шума на изображении), обработку (выделение искомым объектов) и постобработку (морфологические преобразования, векторный анализ, фильтрация). Только комплексный анализ позволяет решить поставленную задачу выделения и расчёта характеристик объектов на изображении.

Пример работы методик анализа однородных фаз представлен на рисунке на рис. 1а,б,в. Простое использование функции бинаризации (вычисление среднего порога по изображению) не позволяет выделить, а значит, и измерить частицы (рис.1б). Поэтому для выделения частиц в качестве основной обработки использовалась адаптивная сегментация (рис. 1в).

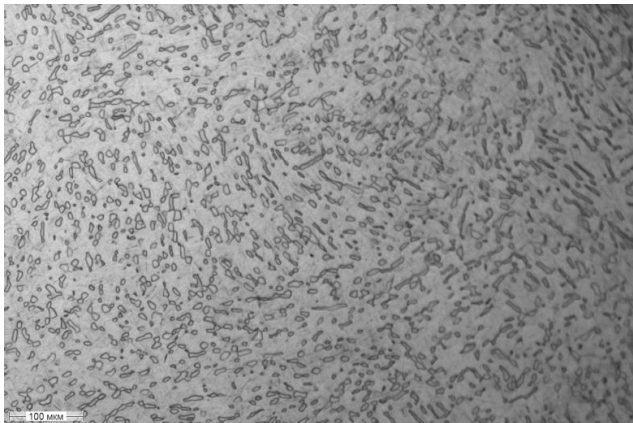


Рис. 1а. Исходное изображение

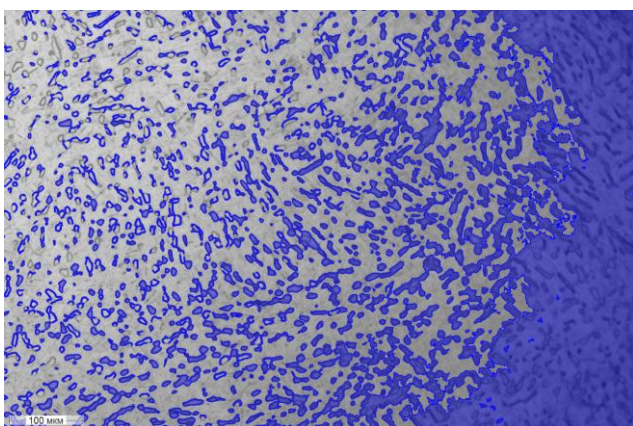


Рис. 1б. Выделение частиц с помощью функции бинаризации

2.2 Устранение помех на изображении от царапин на микрошлифе

Устранение помех на изображении базируется на анализе собственных значений Гессиян функции интенсивности и предположении о прямолинейности царапин в пределах поля

зрения. Программное обеспечение SIAMS использует набор специфических фильтров, в результате применения которых вычисляется собственное значение Гессиян функции, после чего применяется преобразование Хафа [2, 9]. Описанные преобразования позволяют вычислять объекты, относящиеся к царапинам на микрошлифе, что особенно актуально при анализе неметаллических включений в стали (рис. 2а,б,в).

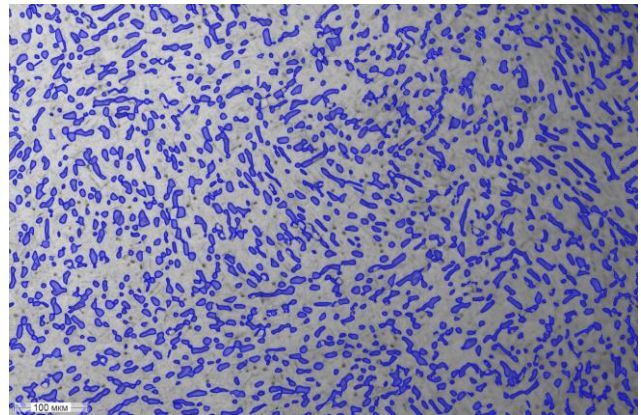


Рис. 1в. Выделение частиц с помощью методики выделения фаз SIAMS (на базе алгоритма адаптивной сегментации)

Применение последовательности стандартных функций (бинаризации, фильтрации) приводит к выделению вместе с классифицируемыми частицами фрагментов царапин, которые по фактору формы неотличимы от частиц и вносят погрешность в результат количественного анализа (рис. 2б). Использование в алгоритме методики анализа неметаллических включений в стали набора специфических фильтров SIAMS автоматически исключает царапины и их фрагменты из объектов дальнейшей классификации (рис. 2в).



Рис. 2а. Исходное изображение

Известно, что любая однотонная частица после оцифровки имеет градиент по яркости. При бинаризации изображения периферийные области частицы относятся к другой области яркости и выделяются вместе с частицами другого класса, попавшими в этот же диапазон яркости. На рис.3а,б,в приведены частицы неметаллических включений в стали и примеры их распознавания. Из рис.3б видно, что качественное разделение разных типов частиц с помощью простого подбора порога бинаризации, невозможно. Программное обеспечение SIAMS использует в качестве меры неоднородности магнитуду градиента. Совокупное вычисление цветовых компонент, Гессиян функции и градиента позволяет избавиться от подобных ошибок классификации частиц (рис. 3в).

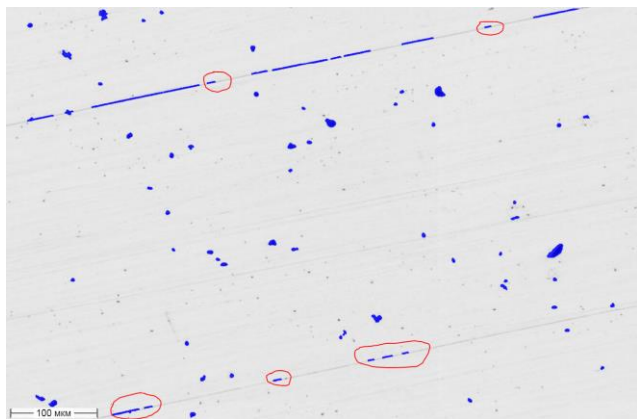


Рис.2б. Одновременное выделение частиц и царапин с помощью функции бинаризации. Указаны фрагменты царапин, которые при классификации будут ошибочно отнесены к частицам.

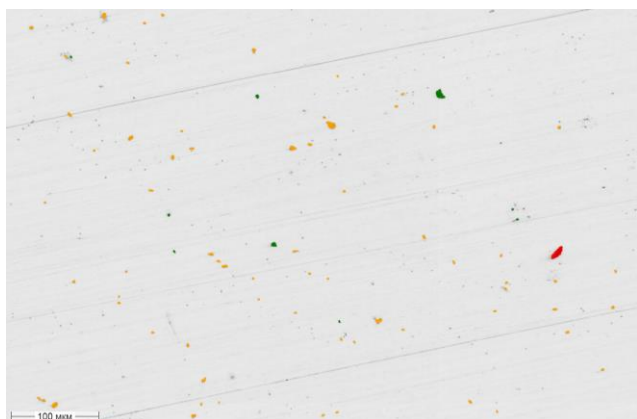


Рис.2в. Выделение и классификация частиц с помощью набора специфических фильтров SIAMS. Царапины автоматически исключаются из классифицируемых частиц.

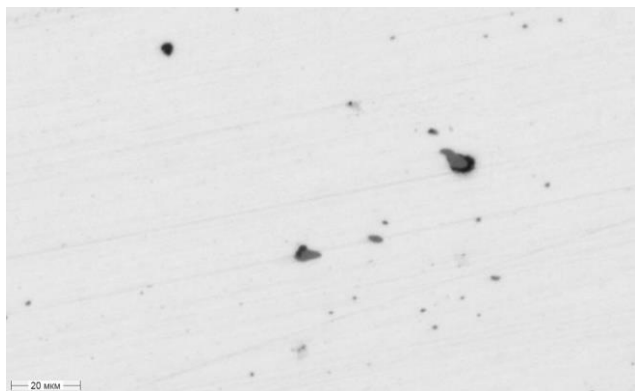


Рис.3а. Исходное изображение

2.3 Современные методы сегментации

Одним из современных методов сегментации является Graph-Based Image Segmentation – алгоритм сегментации, основанный на графе [8], примененный разработчиками компании SIAMS к анализу величины зерна в металлах. Описанный алгоритм был основательно переработан, в результате чего, в отличие от стандартной функции пороговой сегментации, позволил выделять неявные (плохо протравленные, неконтрастные) границы зерен, а также позволил не относить к границам зерен темные зерна и включения. Ранее применяемый для этой цели метод

локального контрастирования является недостаточно эффективным.

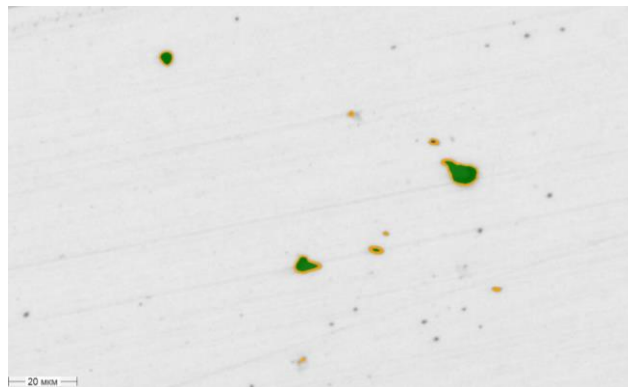


Рис.3б. Выделение частиц с помощью функции бинаризации. Появление «ободка» вокруг частиц приводит к их некорректной классификации.

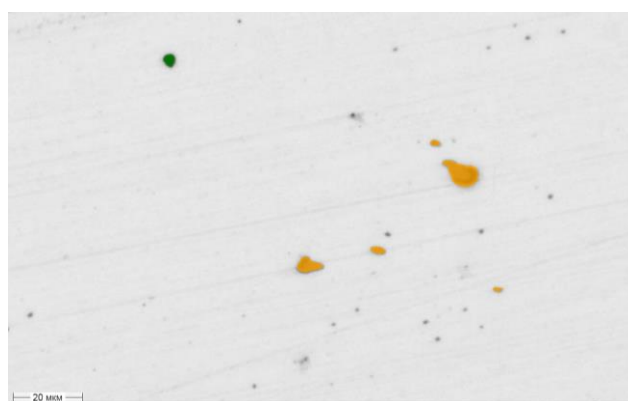


Рис.3в. Выделение и корректная классификация частиц с помощью набора специфических фильтров SIAMS.

На рис. 4а приведен пример структуры зерна алюминиевого сплава Д16. На рис. 4б показано, что при бинаризации изображения границы светлых зерен, темные зерна и включения выделяются одновременно, что не позволяет автоматически построить корректную сетку границ зерен, соответствующую реальным границам.

Алгоритм сегментации SIAMS позволяет корректно выделить границы зерен, а значит, и определить балл зерна автоматическим методом (рис.4в).

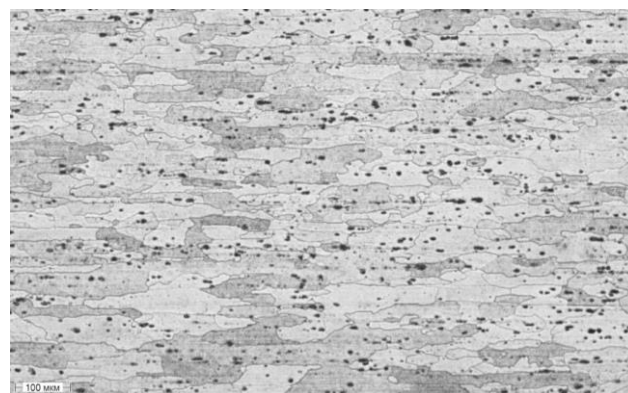


Рис.4а. Исходное изображение



Рис.4б. Изображение после бинаризации. Границы светлых зерен, темные зерна и включения выделяются одновременно.

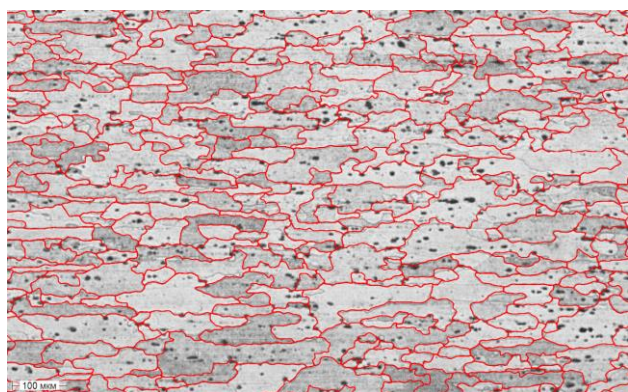


Рис.4в. Выделение сетки границ зерен с помощью алгоритма сегментации SIAMS. Восстановленная сетка границ повторяет реальные границы зерен.

Алгоритм сегментации SIAMS также позволяет определять границы зерен на цветных изображениях. Задача разделения зерен в микроструктуре слитков из алюминиевых сплавов после специальной подготовки микрошлифа решается поиском цветового контраста между соседними зернами. Оказалось, что для деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов задача распознавания границ зерен осложняется тем, что разные участки одного и того же деформированного зерна различаются по оттенку из-за волокнистой текстуры. В результате стандартная цифровая обработка приводит к появлению «лишних» границ. На рис.5а приведена микроструктура плиты из сплава серии 7xxx. Специальный алгоритм сегментации SIAMS позволяет обрабатывать подобные структуры, корректно выделяя границы зерен, несмотря на различие оттенков внутри одного зерна (рис.5б).



Рис.5а. Исходное изображение

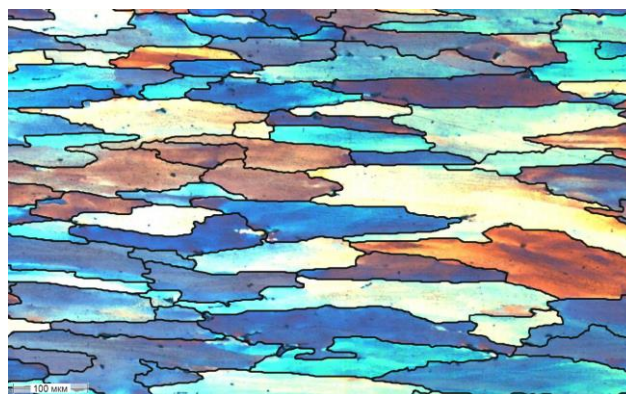


Рис.5б. Выделение сетки границ зерен в деформированном полуфабрикате из алюминиевого сплава с помощью алгоритма сегментации SIAMS

3 Серверная технология

Вместе с повышением качества обработки изображений компания SIAMS с 2015г использует клиент-серверные технологии для получения, обработки и визуализации в графическом интерфейсе программного обеспечения SIAMS панорамных изображений микроструктуры больших размеров (более 2 Гб), а также для одновременного независимого запуска исполняемых приложений несколькими пользователями со своих рабочих мест. Запуск исполняемых аналитических приложений программного обеспечения SIAMS осуществляется через штатный веб-браузер рабочего места, в том числе, в удаленном режиме и по локальной сети без использования дополнительных программных средств.

Описанный режим работы снимает с пользователей такие ограничения, как привязка к одному компьютеру, трудности с передачей изображений и результатов их анализа другим специалистам, поочередная работа с одной лицензией программного обеспечения, приводящие в конечном итоге к замедлению работы.

Построение панорамных изображений больших размеров сегодня становится более доступным, благодаря системам моторизации оптических микроскопов, производимым компанией SIAMS в рамках импортозамещения. Также быстрое получение панорамных изображений доступно пользователям микроскопов с ручным управлением, благодаря уникальной системе анализа видеопотока с видеокамеры микроскопа, позволяющей автоматически собирать все просмотренные на микроскопе области микрошлифа в одно цельное панорамное изображение [11].

4 Заключение

Стремление к постоянному улучшению имеющихся алгоритмов анализа изображений, а также появление новых задач анализа изображений, требует постоянного поиска новых решений и кропотливого труда от разработчиков компании SIAMS.

После разработки новых алгоритмов осуществляется обработка их устойчивости на тестовых образцах и на образцах заказчиков. Это еще один важный этап, необходимый для успешного внедрения технологий SIAMS на производстве. Новые алгоритмы анализа изображений выпускаются и интегрируются в пакет программного обеспечения SIAMS не реже одного раза в 3 месяца.

Большое разнообразие и вариации микроструктуры металлов, требующих автоматизированной цифровой обработки оставляют практически безграничное поле деятельности для разработчиков алгоритмов в области анализа изображений.

5 Благодарности

Компания ООО «СИАМС» выражает благодарность нашим заказчикам, которые передавая нам свои металлографические образцы и изображения микроструктуры, ставят перед нами новые задачи количественного анализа, тем самым побуждая нас искать оптимальные пути их решения и развивать возможности наших программных продуктов.

6 Литература

- [1] Гонсалес Р., Вудс., Цифровая обработка изображений, 1104 с, 2012.
- [2] Hough P.V.C. Methods and Means for Recognizing Complex Patterns. U.S. Patent 3,069,654. 1964
- [3] Кадушников Р.М., Каменин И.Г., Алиевский В.М., Сомина С.В., Черных С.Е. Метод топологической реконструкции и количественной оценки размеров зерен. Заводская лаборатория, 1997, 4, с.30-34.
- [4] Кадушников Р.М., Каменин И.Г., Алиевский В.М., Черных С.Е., Сомина С.В., Негашев В.С., Петров М.С. Метод морфологического восстановления сетки границ зерен. Цифровая микроскопия. Материалы школы-семинара. Часть 1. Екатеринбург, 2001. с. 32-41.
- [5] Кадушников Р.М., Гроховский В.И., Каменин И.Г., Алиевский В.М., Черных С.Е., Петров М.С. Автоматизированные методы анализа включений графита в чугуне. Цифровая микроскопия. Материалы школы-семинара. Часть 1. Екатеринбург, 2001. с. 42-49.
- [6] Кадушников Р.М. Гроховский В.И., Алиевский В.М. Новые технологии разработки методов анализа металлографических изображений в цифровой микроскопии. XVI Уральская школа металловедов – термистов: «Проблемы физического металловедения перспективных материалов». Тезисы доклада. Уфа.
- [7] Петров М. С., Кадушников Р. М., Каменин И. Г. Алиевский В. М., Алиевский Д. М., Негашев В. С., Нурканов Е. Ю. Методы математической морфологии в задачах анализа изображений. Цифровая микроскопия. Материалы школы-семинара. Часть 1. Екатеринбург, 2001. с. 60-64.
- [8] P. F. Felzenswalb, D. P. Huttenlocher. Efficient graph-based image segmentation. International Journal of Computer Vision, 59(2), 167-181p, 2004.
- [9] Payam S.Rahmdel, Richard Comley, Daming Shi and Siobhan McElduff. A Review of Hough Transform and Line Segment Detection Approaches. VISAPP 2015 – International Conference on Computer Vision Theory and Applications.
- [10] Прохоренок Н. OpenCV и Java. Обработка изображений и компьютерное зрение. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 320 с.
- [11] Сивкова Т.А., Гусев А.О., Губарев С.В., Бритшева А.В., Самойлова А.Ю., Кадушников Р.М. Особенности контроля микроструктуры графита в чугунах. Металлургия машиностроения, 2, 2018г.

7 Об авторах

Сивкова Татьяна Александровна – ведущий специалист компании металлографического направления ООО «СИАМС». E-mail: sivkova@siams.com.

Губарев Семен Викторович – руководитель отдела информационных технологий ООО «СИАМС». E-mail: mnogono@gmail.com.

Проблемы применения компьютерного контроля вермикулярного графита в микроструктуре чугуна

И.Ф. Шаехова¹, А.Г. Панов¹, Н.Г. Дегтярёва², В.А. Иванова³
irrra1603@yandex.ru|panov.ag@mail.ru|dnadegda@list.ru|ivanova-waleriya@mail.ru

¹Казанский федеральный университет, Набережные Челны, Россия;

²Исследовательский центр Модификатор, Набережные Челны, Россия;

³Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

В последние десятилетия наблюдается рост промышленного интереса к чугунам с вермикулярным графитом, обладающим очень широким комплексом свойств, зависящим в большей степени от формы нахождения в нём свободного углерода в виде графита. Вместе с тем, до настоящего времени отсутствуют методики контроля графита в микроструктуре ЧВГ необходимой для производства производительности и точности. В настоящей работе произведена оценка погрешности автоматического расчёта доли вермикулярного графита, связанная с ошибкой автоматической идентификации типа графитовых включений в ЧВГ. Показано, что автоматический расчёт без контроля металловеда увеличивает точность в сравнении с ГОСТ 3443-87, но его погрешность остаётся не приемлемо высокой для задач материаловедения и требует дальнейшего повышения.

Ключевые слова: вермикулярный графит, контроль микроструктуры, автоматический анализатор изображений, погрешность контроля.

Problems of using computer control of vermicular graphite in the microstructure of cast iron

I.F. Shaehova¹, A.G. Panov¹, N.G. Degtyarova², V.A. Ivanova³
irrra1603@yandex.ru|panov.ag@mail.ru|dnadegda@list.ru|ivanova-waleriya@mail.ru

¹Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia;

²Research center Modificator, Naberezhnye Chelny, Russia;

³Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

In recent decades, there has been an increase in industrial interest in compacted graphite iron, which has a very wide range of properties more depended on the graphite form. The same time, to date, there are no methods for controlling graphite in the microstructure of CGI necessary truth. In the present work, the automatic calculation error of the fraction of vermicular graphite is estimated, which is associated with the automatic identification error of the type of graphite inclusion. It is shown that automatic calculation without the metallographist increases accuracy in comparison with GOST 3443-87, but its error remains not acceptably high for materials science tasks and requires further improvement.

Key words: vermicular graphite, microstructure control, automatic image analyzer, control error.

Введение

Уже более 50 лет известно о чугунах с вермикулярным графитом (ЧВГ), обладающих положительными свойствами серых чугунов (высокой демпфирующей способностью и теплопроводностью, малой объёмной усадкой и др.) при более высоких герметичности, прочности, пластичности, ударной вязкости и других служебных свойствах [1].

В то же время, развитие применения ЧВГ до настоящего времени сдерживается большим разбросом значений его потребительских свойств, которые, как известно, во многом определяются структурой материала. Одной из основных причин проблемы сложности управления свойствами ЧВГ является их слабая корреляция с общепринятыми характеристиками микроструктуры ЧВГ, обусловленная, прежде всего, низкой точностью их оценки стандартными методами [1].

Общезвестно, что графитовые включения (ГВ), которые обычно характеризуются размерно-топологическими параметрами (размер, форма, распределение и количество), оказывают существенное влияние на свойства чугуна. Специфические свойства ЧВГ достигаются благодаря наличию в его структуре частиц так называемого вермикулярного графита (ВГ). Частицы в плоскости сечения микрошлифа имеют удлиненную

форму и расположены в случайном порядке так же, как и в сером чугуне, но в то же время они короче и толще и имеют закругленные края [2], что и обеспечивает уникальные свойства.

Определение характеристик микроструктуры ЧВГ в России регламентируется ГОСТ 3443-87, который определяет три параметра вермикулярного графита – его форму, распределение и количество (долю) – методом сравнительного анализа реальных микроструктур с эталонными [3]. В стандарте регламентированы три вида формы, три типа распределения и пять уровней доли ВГ. Практическое значение при этом представляют лишь четыре уровня доли ВГ, поскольку один уровень – значение 100% – фактически никогда не достигается в реальных производственных условиях. При этом погрешность измерения доли ВГ для остальных уровней имеет значения от более 2,5 относительных процентов для самого высокого регламентированного содержания ВГ 98% (а фактически от более 4 относительных процентов, поскольку визуально при анализе реальных микроструктур однозначно определить их соответствие эталону с 98% или 92% ВГ зачастую не удаётся даже опытным металловедам) и до более 14 относительных процентов для самого низкого регламентированного содержания ВГ 70%. Кроме того, достаточно большую сложность для металловедов имеет задача определения значения двух других характеристик (формы и распределения ВГ), поскольку зачастую в реальных микроструктурах ЧВГ встречается разнообразный

графит, не представленный на эталонах стандарта [4-6]. Поэтому оценка структуры в соответствии со шкалами по ГОСТ 3443-87 не обеспечивает надёжного прогноза свойств отливок из ЧВГ.

Отечественный стандарт ГОСТ 3443-78 разработан более 30 лет назад и, очевидно, не отвечает современным требованиям материаловедения и машиностроения и требует обновления. Анализ мировых стандартов, касающихся требований к чугунам с вермикулярным графитом, в том числе содержащих регламент описания их микроструктуры, это подтверждает [7]. В результате анализа выявлено, что первые аналогичные зарубежные стандарты были разработаны примерно в одно и то же время, что и отечественные – в 1980-е годы, однако в отличие от отечественных, они к настоящему времени прошли многократную актуализацию с учётом постоянно появляющихся новых данных как по свойствам, так и по микроструктуре ЧВГ. Особенно активно актуализация происходила последние 13 лет. Изначально как в СССР (России), так и за рубежом, требования к свойствам и микроструктуре ЧВГ регламентировались отдельными стандартами. Однако в 2006 году была издана первая редакция специализированного комплексного международного стандарта на ЧВГ «ISO 16112:2006 (E). *Compacted (vermicular) graphite cast irons – Classification*», который включил как требования к свойствам, к микроструктуре, так и описание усовершенствованного регламента контроля доли ВГ в микроструктуре ЧВГ. Этот стандарт обновлялся каждые 5 лет, последняя редакция вышла в 2017 году, версия 2006 года была использована как основа для разработки стандартов GB/T 26655-2011 (Китай) и JIS G 5505:2013 (Япония)). Такая ситуация с регламентами на ЧВГ, по всей видимости, является следствием его уникальности и ещё не достаточной изученности, в том числе в области контроля вермикулярного графита в его структуре.

В то же время, в последние десятилетия в связи с быстрым ростом компьютерных технологий развивается цифровая микроскопия, в том числе, в направлении расчёта различных измеряемых (количественных) характеристик микроструктуры различных материалов. Современные металлографические комплексы включают автоматические анализаторы изображений (ААИ), позволяющие значительно упростить процесс работы металловеда, обрабатывая одновременно большой массив данных и генерируя отчеты согласно установленным требованиям [8]. С помощью ААИ можно описать структурные составляющие большим набором параметров, чем форма, доля и распределение ВГ. Кроме того, ААИ всегда одинаково воспроизводят математические критерии, назначенные для определения параметров, что позволяет корректно сравнивать изделия, изготовленные по разным технологиям. Современные ААИ имеют возможность рассчитывать большое количество геометрических характеристик объектов, как предложенных ещё до появления компьютеров [9], так и новых, в том числе: площадь объекта, процент площади занимаемой объектом от площади изображения, периметр объекта, максимальный и минимальный диаметры Фере и Мартина, коэффициент заполнения региона, вытянутость, средний диаметр, параметр формы, угол ориентировки, эксцентриситет и др. [4].

Однако, как показывает практический опыт применения различных ААИ авторами настоящей публикации в производственных условиях и как неоднократно отмечалось другими исследователями [10], комбинация и форма структурных составляющих на металлографических изображениях может давать очень сложную картину, для объективной интерпретации которой компьютерной программой в настоящее время *необ-*

ходим контроль металловеда и управление им доступными параметрами [11]. С целью полного исключения человеческого фактора, допускающего непредсказуемую высокую погрешность результата анализа, первоочередной задачей металлографического анализа микроструктуры ЧВГ является разработка полностью автоматического режима анализа полученного изображения без необходимости управления металловедом параметрами программы. Для достижения этой цели необходимо:

- установить требования к резкости, разрешению, допустимым по качеству и количеству дефектам пробоподготовки, а также площади микрошлифа (размер панорамы) получаемого изображения;
- разработать устойчивый алгоритм для автоматического распознавания всех типов частиц графита;
- разработать объективные математические критерии для оптимально точной идентификации и разделения графитовых включений по типам, обеспечивающие оценку морфологии и геометрических размеров каждой частицы с необходимой погрешностью в автоматическом режиме *без вмешательства металловеда*.

В настоящей работе оценивали относительную погрешность расчёта доли вермикулярного графита, вносимую ошибкой автоматической идентификации типа ГВ в ЧВГ, не содержащем пластинчатого графита. В качестве компьютерной программы – ААИ – использовали программный комплекс SIAMS 800 (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург), являющийся одним из наиболее популярных отечественных автоматических анализаторов изображений. Для идентификации ГВ программный комплекс включает методику, основанную на критериях, регламентированных международными стандартами ISO 16112:2017 (E) и ISO 945-1:2019(E) «Microstructure of cast irons - Part 1: Graphite classification by visual analysis». Регламент определяет три типа графита [12]:

- вермикулярный (тип III вермикулярный графит по стандарту ISO 945-1:2019(E)),
- промежуточный (типы IV шиповатый и V вырожденный шаровидного графита по стандарту ISO 945-1:2019(E)),
- шаровидный (тип VI шаровидного графита по стандарту ISO 945-1:2019(E)).

С помощью программного комплекса и оптического микроскопа НЕОРНОТ32 получали отдельные изображения микроструктур площадью 4,75 мм² ЧВГ, не содержащих пластинчатого графита и с различной долей вермикулярного и шаровидного графита. На каждом полученном изображении по отдельности проводили автоматическую идентификацию частиц графита по типам с последующим расчётом доли ВГ по суммарной площади включений. Пример цифровой фотографии исходной микроструктуры и модельного изображения после автоматической идентификации вермикулярного и шаровидного графита по типам представлен на рисунке 1.

Сравнение исходных микроструктур и их модельных изображений с идентифицированным графитом выявило следующие закономерности.

Некоторый вклад в погрешность расчёта доли вермикулярного графита могут вносить граничные объекты (чёрные включения на рисунке 1,б), которые не учитываются в автоматическом режиме, поскольку априори считается, что программа не может их правильно идентифицировать из-за неполноты информации (площади включения), в то время как многие граничные объекты специалисту-металловеду идентифицировать удастся вполне однозначно.

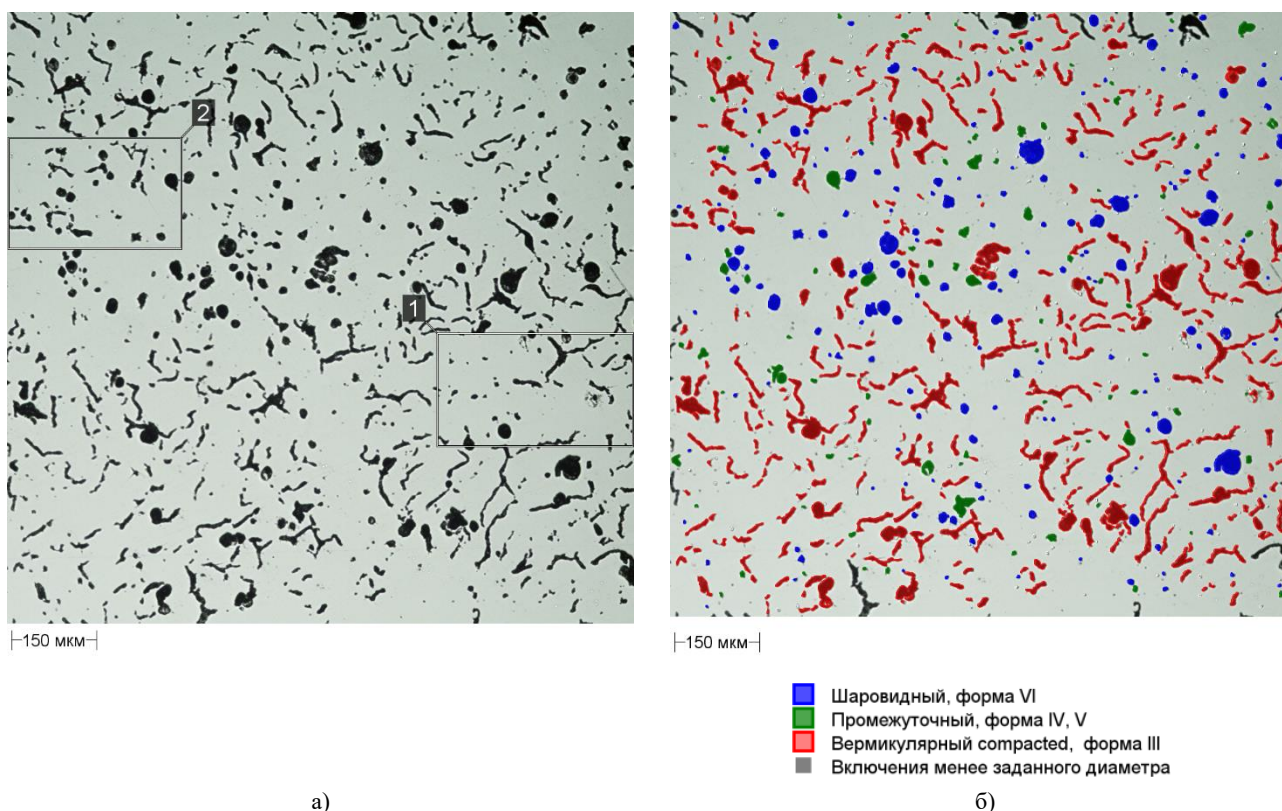


Рис. 1. Цифровые изображения микроструктуры ЧВГ: а) исходное цифровое фото; б) модельное изображение после применения инструмента «ISO 16112:2006 (E). Компактный (вермикулярный) графит в чугуна. Классификация» ААИ SIAMS 800

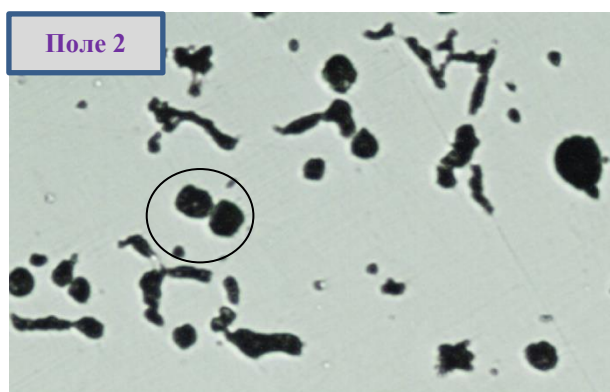
Достаточно часто некоторые объекты распознаются программой как вермикулярный графит, но при детальном рассмотрении исходных фотографий микроструктур удастся определить, что они на самом деле являются слипшимися включениями шаровидного графита (рисунок 2) и которые необходимо рассматривать отдельно, в том числе путём использования параметра «разрезание слипшихся частиц», имеющийся в арсенале комплекса SIAMS 800. Однако этот параметр не использован в применённой методике по рекомендациям разработчиков стандарта ISO 16112:2017(E).

Иногда при подготовке шлифа в металлической основе вокруг неметаллических включений образуются ямки, изображение которых в автоматическом режиме идентифицируется как графитовая частица (рисунок 3), поскольку программа не может отличить пору от частицы графита т.к. распознавание идет по яркости, и ошибочно учитывается при последующих расчётах.

Для оценки относительной погрешности определения доли вермикулярного графита, связанной с ошибкой автоматической идентификации типа ГВ, самостоятельно вручную с помощью специального программного инструмента перераспределяли (перекрашивали) объекты, присваивая им другие типы графита, которые, по мнению авторов настоящей публикации, более подходили этим объектам, а в автоматическом режиме были определены не корректно, после чего производили повторный скорректированный расчёт. Разницу в расчётах принимали как абсолютную погрешность от ошибки идентификации включений. Результаты исследования погрешностей представлены на рисунке 4 и в таблице.

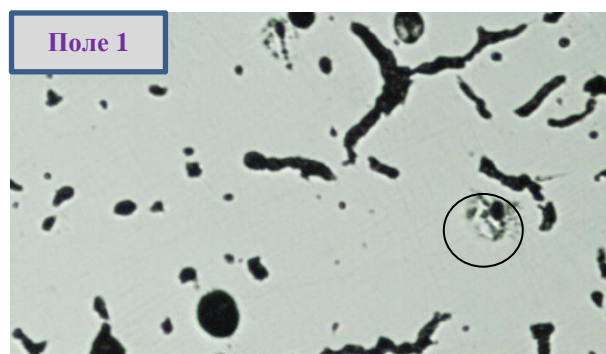
Как следует из приведённых данных, для структур ЧВГ с высокой долей ВГ значения относительной погрешности как по эталонному методу в соответствии с ГОСТ 3443-87 (величину абсолютной погрешности принимали равной половине цены деления шкалы эталонов стандарта, которая включает значения 100, 98, 92, 85 и 70 процентов ВГ), так и с помощью компьютерного метода оказались примерно одинаковы и составили порядка 3%, что можно считать вполне приемлемым для задач материаловедения. С уменьшением доли ВГ в ЧВГ, начиная с 85%, относительные погрешности определения доли ВГ обоими методами растут. При этом компьютерный метод является более точным, даже несмотря на возникающие ошибки идентификации частиц графита по типам. Его погрешность не превысила 13% во всём исследованном диапазоне значений доли ВГ. Вместе с тем, величина погрешности на уровне 13% остаётся достаточно высокой и требует дальнейших разработок, направленных на её снижение.

Таким образом задачи разработки методик контроля структурных составляющих материалов, основанного на современных геометрических принципах [13-15], в частности, методик оценки параметров графитовой фазы, по-прежнему актуальны и требуют срочного решения. При этом применение программных комплексов позволяет в отдельных случаях существенно уменьшить погрешность определения доли ВГ, что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития применения данных методов для оценки структуры ЧВГ.



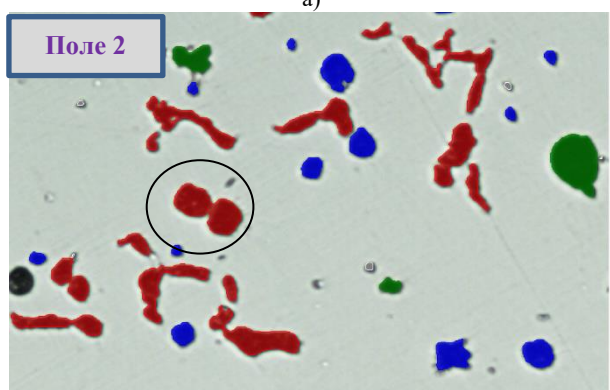
50 мкм

а)



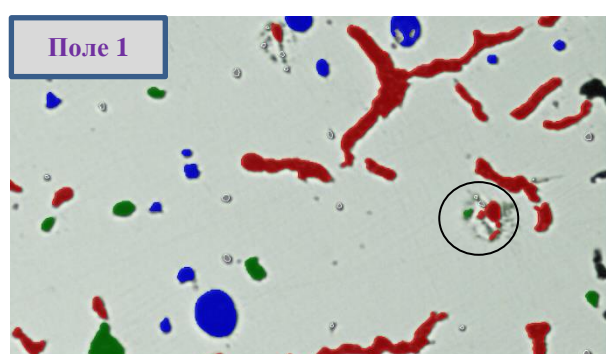
50 мкм

а)



50 мкм

б)



50 мкм

б)

Рис. 2. Слипшиеся ГВ шаровидной формы, идентифицированные программой как ВГ

Рис. 3. Частично выкрошившееся неметаллическое включение с ямкой на шлифе

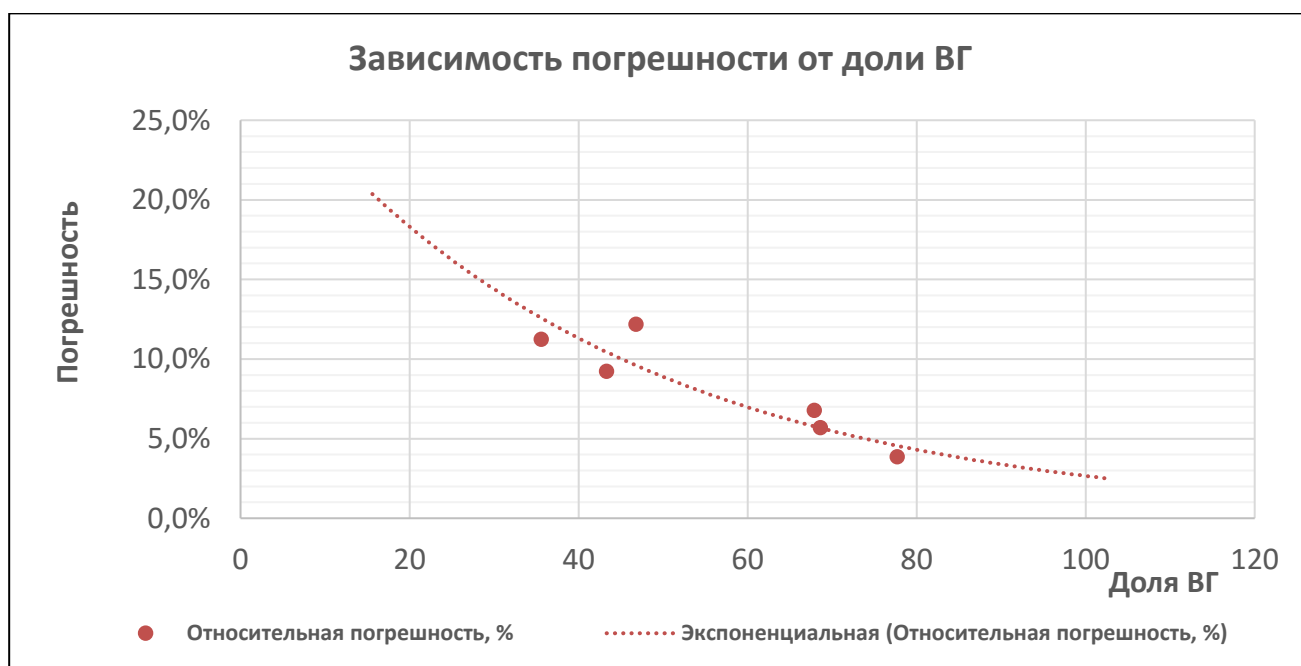


Рис. 4. Зависимость значений относительной погрешности определения доли ВГ, связанной с ошибкой автоматической идентификации типа ГВ

Таблица 1

Сравнение погрешностей определения доли ВГ разными методами

Доля ВГ	Абсолютная погрешность		Относительная погрешность, %	
	ГОСТ3443	SIAMS 800	ГОСТ3443	SIAMS 800
98	2,5	2,7	2,55%	2,76%
92	2,5	2,9	2,72%	3,15%
85	5,0	3,0	5,88%	3,53%
70	10,0	3,9	14,29%	5,57%
60	не регламентировано	4,1	не регламентировано	6,83%
50	не регламентировано	4,4	не регламентировано	8,80%
40	не регламентировано	4,5	не регламентировано	11,25%

Благодарности

Авторы выражают благодарность Татьяне Александровне Сивковой, специалисту ООО «СИАМС» за ценные замечания и рекомендации по настоящей работе.

Литература

- [1] Панов А.Г. О целях и задачах конференции / Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль: тезисы докладов МНТК (Наб. Челны, 17–18 окт. 2017 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 6-7 с.
- [2] Стив Доусон. Особенности структуры ЧВГ и свойства, определяющие перспективы его применения в машиностроении / Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль: тезисы докладов МНТК (Наб. Челны, 17–18 окт. 2017 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 12-13 с.
- [3] ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.
- [4] Shaekhova I.F., Panov A.G., Nazipova A.I., Chentaeva A.E. Microstructure image processing with automatic analyzer tools ImageExpertPro 3 // Astra Salvensis. – 2017. – vol. 2017, pages 471-480.
- [5] Макаренко К.В., Илюшкин Д.А. Фрактальный анализ микроструктур графитизированных чугунов / Вестник Брянского государственного технического университета № 1(49) 2016. – 34-43 с.
- [6] Методы повышения металлургического качества заготовок машиностроения из высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом: учебное пособие / А.Г. Панов, Э.Р. Галимов, Н.Н. Сафронов, В.И. Астащенко, Л.Н. Шафигуллин. – М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2018. – 288 с.
- [7] Иванова В.А., Побегалова Е.О. О необходимости актуализации требований к чугунам с вермикулярным графитом (ЧВГ) / Наука и технологии модифицирования чугуна: тезисы докладов МНТК (Наб. Челны, 15–19 окт. 2018 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 33-34 с.
- [8] Казаков А. А., Ковалев П. В., Рябошук С. В. и др. Металлургическая экспертиза как основа определения природы дефектов металлопродукции // Черные металлы. 2007. Июль—август. С. 17–23.

[9] Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - 3-е изд. - М.: Металлургия, 1970, 376 с., ил.

[10] Куц Ю.В., Повстяной А.Ю. Современные методы исследования микроструктуры с помощью компьютерного материаловедения с использованием прикладных программ / Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» Випуск №45. Луцьк, 2014. – С. 329-336.

[11] Сивкова Т.А., Гусев А.О., Губарев С.В., Бритшева А.В., Самойлова А.Ю., Кадушников Р.М. Особенности контроля микроструктуры графита в чугунах автоматическими методами // Металлургия машиностроения. – 2018. – №2. – 34-38 с.

[12] ISO 16112:2006 (E). Компактный (вермикулярный) графит в чугуне. Классификация.

[13] Pantelev V.G. Metrological provision for image analyzers / Pantelev V.G., Slaev V.A., Chunovkina A.G. // Measurement Techniques - 2008. Т. 51. № 1. P. 107-112.

[14] Макаренко К.В. Идентификация графитовых включений в чугунах // Литейное производство. – 2009. – №4. – С. 2-6.

[15] Макаренко К.В. Моделирование процесса кристаллизации чугуна с шаровидным графитом // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. - № 11. - С. 16–20.

Об авторах

Шаехова Ирина Фаридовна, аспирант кафедры материалов, технологий и качества Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального университета. E-mail: irna1603@yandex.ru.

Панов Алексей Геннадьевич, д.т.н., профессор кафедры материалов, технологий и качества Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального университета. E-mail: panov.ag@mail.ru.

Дегтярёва Надежда Георгиевна, главный металлург ООО «Исследовательский центр Модификатор». E-mail: dnadegda@list.ru.

Иванова Валерия Анатольевна, д.т.н., заведующая кафедрой технологии материалов, стандартизации и метрологии Ярославского государственного технического университета. E-mail: ivanova-waleriya@mail.ru.



Искусственный интеллект,
КОГНИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
автоматизация и робототехника

Artificial Intelligence,
Cognitive Technologies,
Automation and Robotics

GraphiCon 2019

23–26 сентября 2019
Брянск, Россия

Методы машинного обучения для классификации текстовой информации

Н.А. Кривошеев¹, В.Г. Спицын¹
nikola0212@mail.ru | spvg@tpu.ru

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Рассматривается метод классификации текстовой информации на основе аппарата сверточных нейронных сетей. Приведен алгоритм предобработки текста. Предобработка текста состоит из: лемматизации слов, удаления стоп-слов, обработки символов текста и т.д. Производится пословное преобразование текста в плотные вектора. Тестирование проводится на базе текстовых данных «The 20 Newsgroups». Данная выборка содержит коллекцию примерно из 20 000 новостных документов на английском языке, которая разделена (приблизительно) равномерно между 20 различными категориями. Точность лучшей из применявшихся в данной работе сверточной нейронной сети на тестовой выборке составила ~ 74%. Приведена топология лучшей нейронной сети. Точность голосования нейронных сетей алгоритмом Бэггинга составила ~ 81.5%. На основе проведенного обзора аналогичных решений приведено сравнение со следующими алгоритмами классификации текста: методом опорных векторов (SVM, 82.84%), наивным байесовским классификатором (81%), алгоритмом k ближайших соседей (75.93%), мешком слов.

Ключевые слова: нейронный сети, Бэггинг, классификация текста, база данных «The 20 Newsgroups».

Machine Learning Methods for Classification Textual Information

N.A. Krivosheev¹, V.G. Spitsyn¹
nikola0212@mail.ru | spvg@tpu.ru

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

A method for classifying textual information based on the apparatus of convolutional neural networks is considered. The text preprocessing algorithm is presented. Text preprocessing consists of: lemmatizing words, removing stop words, processing text characters, etc. The word-by-word conversion of the text into dense vectors is performed. Testing is carried out on the basis of the text data of "The 20 Newsgroups". This sample contains a collection of approximately 20,000 news stories in English, which is divided (approximately) evenly between 20 different categories. The accuracy of the best convolutional neural network used in this work on the test set was ~ 74%. The topology of the best neural network is given. The accuracy of voting of neural networks by the Bagging algorithm was ~ 81.5%. Based on a review of similar solutions, a comparison is made with the following text classification algorithms: the support vector method (SVM, 82.84%), the naive Bayes classifier (81%), the k nearest neighbors algorithm (75.93%), and the word bag.

Keywords: neural networks, Bagging, text classification, database "The 20 Newsgroups".

1. Введение

На данный момент одной из наиболее популярных задач является понимание текста. К данной задаче относятся: классификация, перевод, ответы на вопросы и др. Задача классификации является одной из традиционных в машинном обучении, в связи с чем были созданы базы текстовых данных для обучения нейронных сетей.

Существует множество решений задачи классификации текстов [1, 3, 5, 12], которые используют различные методы преобразования текста в вектора, такие как: посимвольное преобразование, N-граммы символов, преобразование слов, Word2vec, мешок слов и другие. Существует множество алгоритмов для классификации текстов: нейронные сети, метод опорных векторов (SVM), k ближайших соседей, наивный байесовский классификатор и др.

В данной работе рассматривается задача классификации текстов с помощью многослойного перцептрона и сверточной нейронной сети. Рассмотрена предобработка текстовых данных в виде пословного преобразования текста в вектора. Рассмотрено голосование нейронных сетей методом Бэггинга [11]. Приведены результаты обучения и тестирования нейронных сетей на тестовой выборке «The 20 Newsgroups» [14, 15], проведено сравнение с аналогами. Все программы реализованы на языке Python, с использованием библиотеки Keras.

Далее будут рассмотрены возможные решения задачи классификации текстов с описанием результатов тестирования на базе текстовых данных «The 20 Newsgroups» [14, 15]. На основе проведенного обзора

аналогичных решений приведено сравнение со следующими алгоритмами классификации текста: методом опорных векторов (SVM, 82.84%), наивным байесовским классификатором (81%), алгоритмом k ближайших соседей (75.96%), мешком слов.

2. Обучающая выборка

Для обучения, тестирования и сравнения с аналогами была выбрана обучающая выборка «The 20 Newsgroups» [14, 15]. Данная выборка содержит коллекцию примерно из 20 000 новостных документов на английском языке, которая разделена (приблизительно) равномерно между 20 различными категориями. К данным классам относятся такие темы как: религия, наука, политика, спорт и др. Коллекция «The 20 newsgroups» стала популярным набором данных для экспериментов с техниками машинного обучения для текстовых приложений, таких как классификация текста.

3. Обоснование выбора сверточной нейронной сети

Сверточная нейронная сеть (СНС) в последние годы становится все более популярной и используется в решении различных задач. СНС хорошо показала себя в решении задач, связанных с обработкой естественного языка. Данный алгоритм является очень гибким и может использоваться для классификации с использованием различных методов предобработки текста. СНС классифицирует текстовые данные значительно лучше многослойного перцептрона [2].

Основной особенностью СНС является использование фильтров чувствительных к определенной последовательности слов.

Предшественниками свёрточных нейронных сетей были модели когнитрона и неокогнитрона. Свёрточные нейронные сети в современном виде были представлены в работах Ле Куна [7-9] и А. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton [6]. Основными слоями, используемыми в свёрточных сетях, являются: свёрточный слой, слой субдискретизации и полносвязный слой.

Сочетание функции классификации с функцией выделения признаков с помощью ядер свёртки, получаемых в процессе обучения, позволяет выделять оптимальный набор признаков. Получить данный набор признаков, подбирая метод извлечения признаков вручную, является практически невозможной задачей.

Исходя из вышесказанного, было выдвинуто предположение, что аппарат свёрточных нейронных сетей может показать высокую эффективность в решении задачи классификации текстовых данных.

Полученные результаты необходимо сравнить с другими подходами, не использующими нейронные сети, по точности решения поставленной задачи.

4. Предобработка данных

Первичная предобработка заключается в переводе текста в нижний регистр, в удалении малоинформативных и редких символов. К редким символам относятся символы, используемые во всей выборке не более нескольких десятков раз. Проводится замена на пробелы следующих символов: табуляция, перевод строки, длинная последовательность одинаковых символов (например, множество из трех и более звездочек). Проводится удаление стоп-слов. Производится лемматизация [13] всех слов в тексте (см. рис. 1).

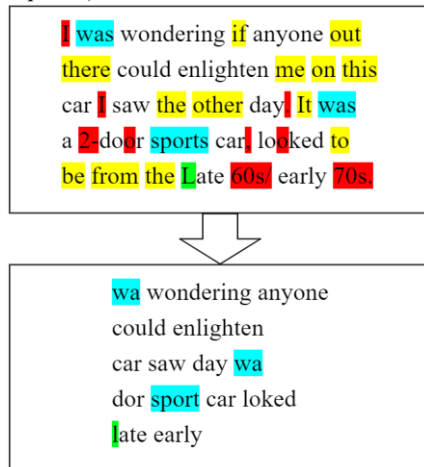


Рис. 1. Пример обработки текста.

В данной работе производится пословное преобразование текста в вектор. Проводится подсчет количества упоминаний каждого слова. Очень редкие и короткие слова удаляются. Составляется словарь слов, в котором каждому слову назначается индивидуальное число для последующей подачи на нейронную сеть.

Следует отметить, что точность свёрточных нейронных сетей существенно зависит от составленного словаря, так если не провести удаление относительно редких слов или неправильно подобрать порог частоты упоминания, то точность сети значительно снижается и может снизиться почти в 2 раза. В данной работе порог частоты упоминания слова в тексте подбирается экспериментальным путем. Если слово упоминается меньшее число раз, чем в каждом $25 \times N$ тексте (где N - количество классов), то оно удаляется.

Данная формула выведена экспериментально для данной выборки и является ее приближением. При изменении обучающей выборки может потребовать корректировки.

Следующим этапом предобработки является преобразование текста в вектор, в данной работе используется автоматическое преобразование в плотные вектора фиксированного размера. Данное преобразование производится за счет слоя Embedding библиотеки Keras.

После предобработки все тексты стандартизируются (обрезаются или заполняются) до заданной длины. В данной работе все тексты стандартизованы до длины текста в 300 слов. Если длина текста меньше 300 слов, то недостающая часть вектора заполняется нулями.

5. Результаты обучения и тестирования нейронных сетей

В данной работе протестированы свёрточные нейронные сети различных топологий. Был применен алгоритм Бэггинга.

Все топологии нейронных сетей обучались с помощью метода NADAM [10] с использованием категориальной функции потерь (categorical_crossentropy). Во всех скрытых слоях нейронной сети используется функция активации RELU [4]. Выходной слой использует функцию активации softmax [16].

Алгоритм Бэггинга использует голосование 7-ми свёрточных нейронных сетей. Голосование проходит путем поэлементного перемножения выходных векторов нейронных сетей.

Топология лучшей из применявшихся в данной работе свёрточной нейронной сети приведена на рис. 2.

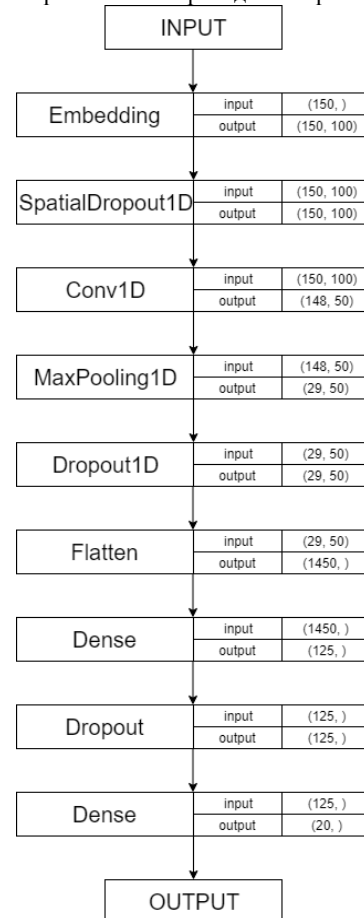


Рис. 2. Топология свёрточной нейронной сети, лучшей из применявшихся в данной работе.

Топологии сверточных нейронных сетей различны (количество слоев, число нейронов в слое, размер окна свертки и т.д.).

В данной работе было проведено тестирование нейронных сетей на тестовой выборке «The 20 Newsgroups» [14, 15] с использованием пословного преобразования текста в плотные вектора.

Точность распознавания лучшей используемой сверточной нейронной сети на тестовой выборке составляет ~74%. Средняя точность используемых нейронных сетей составляет ~71.9%. При использовании голосования сверточных нейронных сетей методом Бэггинга, точность классификации возрастает до ~81.5%.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что алгоритм Бэггинга значительно повысил точность классификации.

6. Сравнение с аналогами

Существует множество аналогов для решения задачи классификации текстов, которые были протестированы на базе текстовых данных «The 20 Newsgroups» [1, 3, 5]. В представленных аналогах используются такие методы как: многослойный перцептрон, сверточные нейронные сети, наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов (SVM).

Методы предобработки текста в аналогах могут различаться между собой и не совпадать с методом предобработки текста в данной статье, который был описан выше.

В статье [3] автор использует мешок слов и многослойный перцептрон в качестве классификатора. В указанной статье автор использует три класса из обучающей выборки: comp.graphics, sci.space, rec.sport.baseball. Точность нейронной сети, используемой в статье [3] составила 75%.

В данной работе было проведено тестирование голосования нейронных сетей (алгоритма, описанного выше) на данных указанных в статье [3], точность на тестовой выборке составила ~95.5%. Точность голосования сверточных нейронных сетей значительно превышает точность алгоритма, указанного в статье [3]. Сравнение точности алгоритмов представлено на рис. 3:

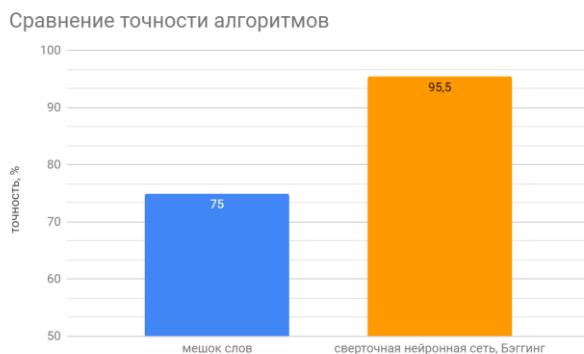


Рис. 3. Сравнение точности алгоритма с аналогом из статьи [3].

В статье [5] автор провел тестирование следующих алгоритмов: метод опорных векторов (SVM), k ближайших соседей, наивный байесовский классификатор и др. В статье автор использует все 20 классов из обучающей выборки. Точность классификатора, основанного на методе опорных векторов, составляет 82.84%, данный алгоритм является лучшим из представленных в статье [5] при обучении и тестировании на выборке «The 20 Newsgroups» [14, 15]. Точность метода опорных векторов превышает точность классификатора, основанного на голосовании сверточных

нейронных сетей. Точность наивного байесовского классификатора, представленного в статье [5] составляет 81%, что значительно превосходит алгоритм k ближайших соседей, который был протестирован в статье [5]. Точность алгоритма k ближайших соседей составляет 75.93%.

В данной работе было проведено тестирование голосования нейронных сетей методом Бэггинга на данных указанных в статье [5], точность на тестовой выборке составила ~81.5%. Сравнение точности алгоритмов представлено на рис. 4:

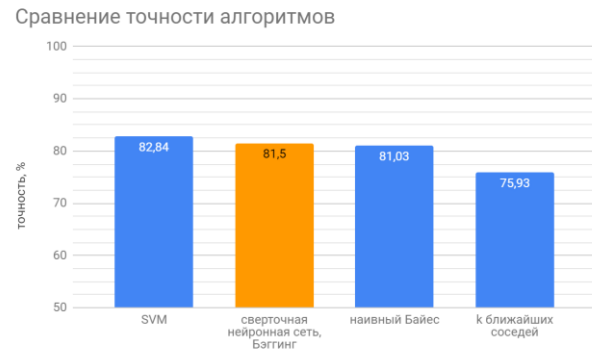


Рис. 4. Сравнение точности алгоритма с аналогами из статьи [5].

В статье [1] автор провел тестирование следующих алгоритмов: наивный байесовский классификатор и метод опорных векторов (SVM). В указанной статье автор использует четыре класса из обучающей выборки: alt.atheism, comp.graphics, sci.med, soc.religion.christian. Точность наивного байесовского классификатора, используемого в статье [1] составила 83.4%. Точность метода опорных векторов (SVM), используемого в статье [1] составила 91.2%.

В данной работе было проведено тестирование голосования нейронных сетей методом Бэггинга на данных указанных в статье [1], точность на тестовой выборке составила ~92%, что незначительно превосходит метод опорных векторов (SVM, 91.2%). Сравнение точности алгоритмов представлено на рис. 5:

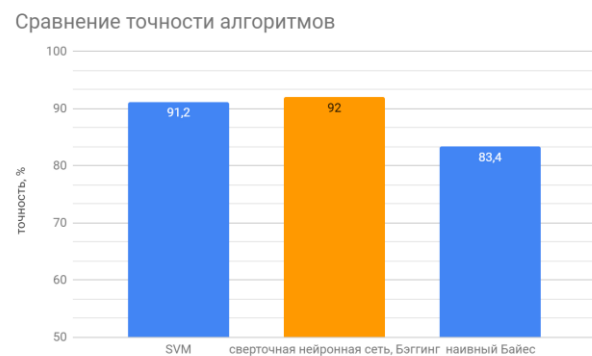


Рис. 5. Сравнение точности алгоритма с аналогами из статьи [1].

На основе проведенного сопоставления с аналогами можно сделать вывод, что голосование нейронных сетей методом Бэггинга может конкурировать с такими методами как наивный байесовский классификатор и метод опорных векторов (SVM).

7. Заключение

В данной работе реализовано и протестировано голосование сверточных нейронных сетей алгоритмом Бэггинга. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что голосование сверточных нейронных сетей с использованием Бэггинга показало существенный рост

точности классификации по сравнению с ранее полученными результатами [2] и может конкурировать с другими представленными алгоритмами, предназначенными для классификации текста. В дальнейшем планируется поиск новых и улучшение используемых способов решения данной задачи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00977 А.

8. Литература

- [1] Вережкина О. Работа с текстовыми данными в scikit-learn [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://habr.com/ru/post/264339/> (20.05.2019).
- [2] Кривошеев Н.А., Спицын В.Г. Алгоритмы понимания текста методами глубокого обучения нейронных сетей // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» – Томск, 2018 г., с. 82–83.
- [3] Мескита Д. Общий взгляд на машинное обучение: классификация текста с помощью нейронных сетей и TensorFlow [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://tproger.ru/translations/text-classification-tensorflow-neural-networks/> (21.11.2018).
- [4] Петренко С. Это нужно знать: Ключевые рекомендации по глубокому обучению (Часть 2) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://datareview.info/article/eto-nuzhno-znat-klyuchevyie-rekomendatsii-po-glubokomu-obucheniyu-chast-2/> (20.05.2019).
- [5] Cardoso A. Datasets for single-label text categorization [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://ana.cachopo.org/datasets-for-single-label-text-categorization> (03.06.2019).
- [6] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // Advances in neural information processing systems. 2012, pp. 1097–1105.
- [7] LeCun Y. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition // Neural computation. 1989, Vol. 1(4), pp. 541–551.
- [8] LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradientbased learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. 1998, Vol. 86(11), pp. 2278–2324.
- [9] LeCun Y. Efficient backprop // Neural Networks: Tricks of the Trade: Lecture Notes in Computer Science / G. Montavon, G. B. Orr, K.-R. Muller (Eds.) – Springer, 2012, pp. 9–48.
- [10] Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://ruder.io/optimizing-gradient-descent/index.html#nadam> (22.11.2018).
- [11] Бэггинг [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=%D0%91%D1%8D%D0%B3%D0%B3%D0%B8%D0%BD%D0%B3> (25.08.2019).
- [12] Классификация текста с помощью нейронной сети на Java [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://habr.com/post/332078/> (21.11.2018).
- [13] Лемматизация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1313114/%D0%9B%D0%B5%D0%BC%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (26.08.2019).
- [14] 20 Newsgroups [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://qwone.com/~jason/20Newsgroups/> (10.09.2019).
- [15] sklearn.datasets.fetch_20newsgroups [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.datasets.fetch_20newsgroups.html (22.11.2018).
- [16] Softmax [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://medium.com/@congyuzhou/softmax-3408fb42d55a> (20.05.2019).

Об авторах

Кривошеев Николай Анатольевич, магистрант отделения информационных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: nikola0212@mail.ru.

Спицын Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор отделения информационных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: spvg@tpu.ru.

Использование искусственных нейронных сетей для решения задачи классификации текста

Е.С. Попова¹, В.Г. Спицын¹, Ю.А. Иванова¹
 esp9@tpu.ru|spvg@tpu.ru|jbolotova@tpu.ru

¹Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, Томск, Россия

Статья посвящена нейросетевым алгоритмам классификации текстов. Актуальность данной темы обусловлена постоянно растущим объемом информации в интернете и потребностью в ней ориентироваться. В данной работе помимо алгоритма классификации, так же приводится описание способов предобработки и векторизации текста, данные этапы являются стартовой точкой для большинства NLP задач и делают нейросетевые алгоритмы эффективным на небольших наборах данных. В работе в качестве набора данных для обучения и тестирования нейронной сети будет использоваться выборка состоящая из 50 000 обзоров фильмов IMDB на английском языке. Для решения поставленной задачи был использован подход основанный на использовании свёрточной нейронной сети. Максимально достигнутая точность для тестовой выборки составила 90.16%.

Ключевые слова: понимание текстов, обработка естественных языков, сверточные нейронные сети, классификация текстов.

Using artificial neural networks to solve text classification problems

E.S. Popova¹, V.G. Spitsyn¹, Yu.A. Ivanova¹
 author1@domain|author2@domain|author3@domain

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The article is devoted to neural network text classification algorithms. The relevance of this topic is due to the ever-growing volume of information on the Internet and the need to navigate it. In this paper, in addition to the classification algorithm, a description is also given of the methods of text preprocessing and vectorization, these steps are the starting point for most NLP tasks and make neural network algorithms efficient on small data sets. In the work, a sampling of 50,000 English IMDB movie reviews will be used as a dataset for training and testing the neural network. To solve this problem, an approach based on the use of a convolutional neural network was used. The maximum achieved accuracy for the test sample was 90.16%.

Keywords: text comprehension, natural language processing, convolutional neural networks, text classification.

1. Введение

Задачи обработки естественных языков (natural language processing, NLP) становятся все более актуальными в связи с постоянно растущим объемом информации в интернете и потребностью в ней ориентироваться. Одной из широко используемых задач по обработке естественного языка и контролируемому машинному обучению является классификация текстов. При этом для обучения классификатора используется маркированный набор данных, содержащий текстовые документы и их метки.

Целью является автоматическая классификация текстовых документов по одной или нескольким предопределенным категориям. Ниже приведены частные случаи задачи классификации текстов:

1. Понимание настроения аудитории из социальных сетей.
2. Обнаружение спама.
3. Автоматическая пометка запросов клиентов.
4. Категоризация новостных статей на предопределенные темы.

Классификация текста широко используется в sentimentальном анализе (IMDB, классификация обзоров YELP), анализе фондового рынка, в «умном» ответе по электронной почте GOOGLE. Сфера обработки естественных языков является активно развивающейся областью исследований, как в академических кругах, так и в промышленности.

На сегодняшний день помимо классических алгоритмов интеллектуального анализа текстов, большое распространение получили методы, основанные на глубоком обучении нейронных сетей (deep learning), которые предлагают гибкий, универсальный и обучаемый

подход для представления окружающей среды в виде визуальной и лингвистической информации.

Далее приведены нейросетевые архитектуры, которые могут быть применены для решения задачи классификации текстов:

1. Сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network, CNN).
2. Рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network, RNN).
3. Иерархическая сеть внимания (Hierarchical Attention Network, HAN).

В данной статье для решения поставленной задачи будут использованы сверточные нейронные сети, которые впервые были представлены в 1998 году французским исследователем Яном Лекуном, как развитие модели неокогнитрона и предназначены для эффективного распознавания изображений.

CNN обычно используются в компьютерном зрении, однако в последнее время они стали активно применяться к различным задачам NLP и исходя из статьи [2] от коллектива авторов из Intel и Carnegie-Mellon University подходят для этого даже лучше, чем рекуррентные нейронные сети, которые безраздельно властвовали в этой области на протяжении последних лет.

В данной статье для решения поставленной задачи используется фреймворк машинного обучения Keras и язык программирования Python.

2. Обучающая выборка

В качестве набора данных для обучения и тестирования нейронной сети будет использоваться набор данных, состоящий из 50 000 обзоров фильмов IMDB на

английском языке, специально отобранных для анализа тональности.

Тональность в выборке двоичная, т.е. IMDb – рейтингу менее 5 была сопоставлена оценка 0, а рейтингу не менее 7 – оценка 1. На каждый фильм приходится не более 30 обзоров. Также необходимо отметить, что в выборке отсутствуют обзоры, имеющие рейтинги 5 или 6, так как их нельзя однозначно отнести к положительным или отрицательным отзывам, следовательно, они не вписываются в бинарную модель классификации. Все обзоры в выборке перемешаны в случайном порядке. Набор данных имеет следующую структуру:

1. Id – уникальный идентификатор каждого отзыва.
2. Sentiment – настроение обзора (1 за положительные отзывы и 0 за отрицательные отзывы).
3. Review – текст обзора.

3. Предобработка текста

Предобработка текста позволяет уменьшить исходное пространство признаков без потери полезной информации. Это положительно сказывается на качестве понимания и скорости обучения выбранного алгоритма.

Ниже приведены основные методы морфологической и синтаксической предобработки текста, входящие в состав лингвистического анализа, который является базовым для многих современных подходов к интеллектуальному анализу текста, и включает в себя следующие этапы [3]:

1. Токенизация – это самый первый шаг при обработке текста. Заключается в разбиении длинных строк текста на более мелкие: абзацы делим на предложения, предложения – на слова.
2. Нормализация – для качественной обработки текст должен быть нормализованным. Все слова приводятся к одному регистру, удаляются знаки пунктуации, расшифровываются сокращения, числа приводятся к их текстовому написанию и т.д. Нормализация необходима для унификации методов обработки текста.
3. Стэмминг – это устранение приращков к корню, то есть отделение суффикса, приставки, окончания и приведение слова к основе.
4. Лемматизация – близка к стеммингу. Отличие в том, что лемматизация приводит слово к смысловой канонической форме слова (инфинитив для глагола, именительный падеж единственного числа – для существительных и прилагательных). Например, зафрахтованный – фрахтовать, ценами – цена, лучший – хороший.
5. Удаление стоп-слов. Стоп-слова – слова, которые не несут никакой смысловой нагрузки. Их еще называют шумовыми словами. Например, в английском языке это артикли, в русском – междометия, союзы и т.д.

В данной работе для достижения лучшего качества классификации будут использованы некоторые из перечисленных выше методов.

Необходимо, чтобы в исходных текстах содержалось как можно меньше данных, не несущих полезной информации, например, в выборке встречаются HTML теги, такие как `
`, аббревиатуры и пунктуация.

Для удаления HTML тегов использовалась Python библиотека BeautifulSoup Package. Для удаления символов пунктуации был использован пакет регулярных выражений. Далее вся выборка была приведена к нижнему регистру.

Также в выборке присутствуют стоп-слова, такие как «а», «and» «is» «the» и другие, которые не несут смысловой нагрузки. Для их удаления использовалась библиотека Natural Language Toolkit (NLTK).

4. Векторное представление слов

Векторное представление считается стартовой точкой для большинства NLP задач и делает глубокое обучение эффективным на небольших наборах данных. Также оно лежит в основе многих систем обработки естественного языка, таких как Amazon Alexa, Google translate и т.д.

Данный метод соотносит текстовому слову некоторый числовой вектор фиксированной размерности. Вектора строятся таким образом, что встречающиеся в схожих контекстах слова имеют схожие векторные представления.

Векторные представления слов обладают разнообразными полезными свойствами, и могут быть использованы следующим образом:

1. Для поиска синонимов или опечаток в поисковых запросах.
2. Отражения семантической близости между словами.
3. В качестве признаков для решения следующих задач:
 - 3.1. Выявление именованных сущностей;
 - 3.2. Тэгирование частей речи.
 - 3.3. Машинный перевод.
 - 3.4. Кластеризация документов.
 - 3.5. Ранжирование документов.
 - 3.6. Анализ тональности текста.

Ниже представлены алгоритмы получения векторных представлений слов:

1. One-hot encoding.
2. SVD.
3. Topic modeling.
4. Word2vec, GloVe, FastText, StarSpace.

Рассмотрим подробнее технику векторного представления GloVe [9] от Стэнфордского университета, которая часто используется для задач NLP.

GloVe – предназначена для статистической обработки больших массивов текстовой информации. GloVe собирает статистику по совместному появлению слов в фразах, после чего методами нейронных сетей решает задачу снижения размерности и выдает на выходе компактные векторные представления слов, в максимальной степени отражающие отношения этих слов в обрабатываемых текстах.

Для более удобной работы с векторными представлениями в данной работе была использована предварительно обученная модель GloVe, которая представляет собой файл, содержащий токены и связанные с ними вектора слов. В частности, будет использована 100-мерная версия модели GloVe состоящей из 400 тыс. слов, рассчитанная на данных английской Википедии за 2014 год с 6 миллиардами токенов.

5. Сверточные нейронные сети для задачи классификации текстов

Существует несколько подходов с использованием сверточных нейронных сетей для задачи классификации текстов. В данной работе был применен подход, основанный на кодировании слов, описанный в статье [3].

В этом подходе каждому слову в тексте сопоставляется вектор фиксированной длины. Затем из полученных векторов для каждого фрагмента выборки составляется двумерная матрица, которая подается на вход сверточной нейронной сети.

На рисунке 1 приведен пример сверточной нейронной сети с использованием кодирования слов.

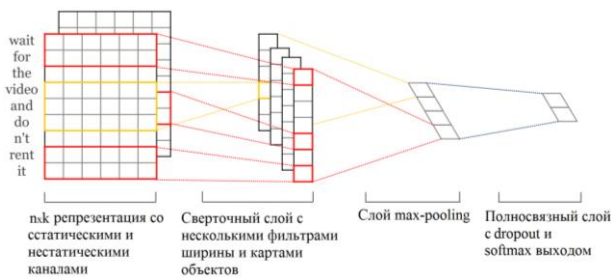


Рис. 1. Пример CNN с использованием кодирования слов.

В таблице 1 представлена конфигурация сверточной нейронной сети с использованием алгоритма GloVe, описанного в разделе 4, для классификации данных.

Получившаяся конфигурация состоит из 3 сверточных слоев, каждый из которых содержит 128 карт признаков и имеет окно свертки 5×5 и 3 подвыборочных слоя с размером окна подвыборки 5×5 и 35×35 на последнем слое.

Сеть также включает в себя слой решейпинга и 2 полносвязных слоя. Функция активации на всех слоях, кроме последнего, – Relu, на последнем – Softmax.

Таблица 1. Конфигурация сверточной нейронной сети

Тип слоя	Функция активации	Кол-во настраиваемых параметров
Входной слой	–	0
Слой векторизации	–	8420100
Слой свертки, кол-во карт признаков:128, ядро свертки: 5x5	ReLU	64128
Слой подвыборки, кол-во карт признаков: 128, окно подвыборки: 5x5	–	0
Слой свертки, кол-во карт признаков:128, ядро свертки: 5x5	ReLU	82048
Слой подвыборки, кол-во карт признаков: 128, окно подвыборки: 5x5	–	0
Слой свертки, кол-во карт признаков:128, ядро свертки: 5x5	ReLU	82048
Слой подвыборки, кол-во карт признаков: 128, окно подвыборки: 35x35	–	0
Вспомогательный слой решейпинга	–	0
Полносвязный слой, кол-во нейронов:128	ReLU	16512
Полносвязный слой, кол-во нейронов: 2	Softmax	258
Общее кол-во настраиваемых параметров		8 665 094

6. Результаты тестирования

Ход экспериментов были получены следующие результаты. На рисунках 2 и 3 показаны графики изменения точности распознавания и ошибки в ходе обучения сверточной нейронной сети с использованием алгоритма GloVe, для 10 эпох обучения и размером мини-выборки равном 128. Из рисунка видно, что максимальная точность

распознавания на тестовой выборке достигается на 7 эпохе обучения и равна 88.88%.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что выбранное количество эпох обучения является избыточным, и дальнейшее увеличение точности распознавания может быть достигнуто за счет более точной настройки гиперпараметров сети, таких как размер мини-выборки, размер окна свертки, количество карт признаков.

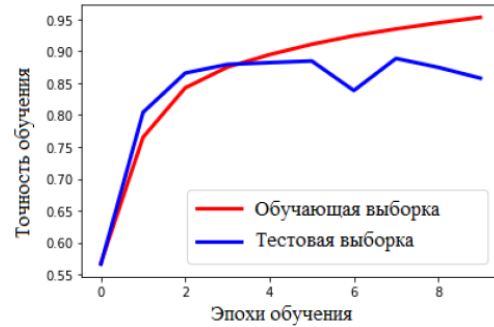


Рис. 2. Изменение точности распознавания тональности текста для CNN с размером мини-выборки 128

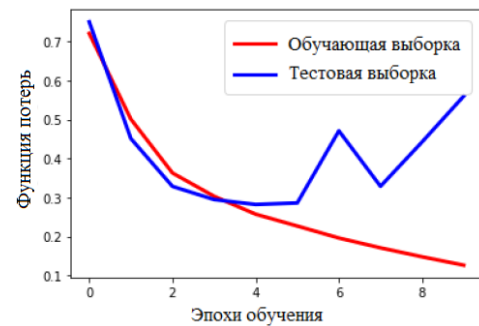


Рис. 3. Изменение ошибки распознавания тональности текста для CNN с размером мини-выборки 128

На рисунках 4 и 5 приведены результаты обучения сети для размера мини-выборки 64 и 256 для 10 эпох обучения.

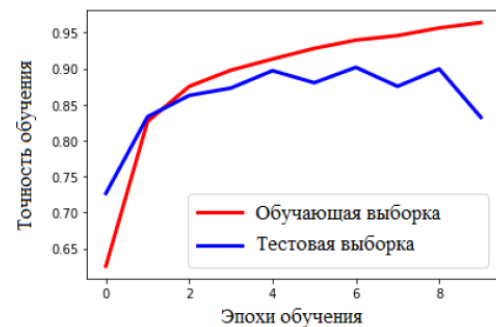


Рис. 4. Изменение точности распознавания тональности текста для CNN с размером мини-выборки 64

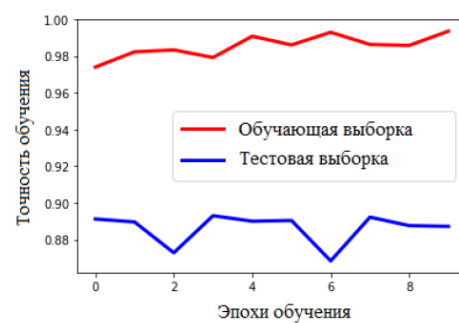


Рис. 5. Изменение точности распознавания тональности текста для CNN с размером мини-выборки 256

Из полученных данных видно, что уменьшение размера мини-выборки позволило повысить точность классификации до 90%, в то время как увеличение дало более стабильный результат на протяжении всех эпох обучения, однако не дало значительного прироста в точности.

7. Результаты тестирования

В результате проведенного исследования были выявлены основные группы задач NLP, рассмотрены методы предобработки и векторизации текстов. Также в ходе исследования была изучена возможность применения сверточных нейронных сетей для задачи классификации текстов.

В ходе обучения и тестирования сети обучающая и тестовая выборки были разделены на 20000 и 5000 образцов соответственно. Для тестовой выборки максимально достигнутая точность составила 90.16%.

Значение точности вычисляется по формуле:

$$R = \frac{n}{N} = \frac{4508}{500} = 0.9016,$$

где R – точность распознавания, n – количество правильно классифицированных текстов, N – количество элементов в выборке.

Можно сделать вывод, что сеть справилась с задачей определения эмоциональной тональности предложенных текстов, однако, исходя из полученных результатов, для достижения большей точности классификации в дальнейшем необходимо:

1. Более тонкая настройка гиперпараметров: размера мини-выборки, размера окна свертки, количества карт признаков.
2. Дополнительное улучшение предобработки текста.
3. Использование dropout-слоев.

8. Благодарности

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТПУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00977 А.

9. Литература

- [1] Введение в анализ естественных языков / Учебно-методическое пособие / И.В. Смирнов, 2014 г.
- [2] Спицын В.Г., Интеллектуальные системы: учебное пособие /В.Г. Спицын, Ю.Р. Цой; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.–176 с.
- [3] Федюшкин Н.А., Федосин С. А. Понятие, проблемы и разновидности интеллектуального анализа текста – Проблемы и достижения в науке и технике. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции – № 3 – г. Омск, 2016 – 206 с.
- [4] Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс, 2006. - 1104 с.
- [5] Bai, S., Kolter, J. Z., & Koltun, V. (2018). An Empirical Evaluation of Generic Convolutional and Recurrent Networks for Sequence Modeling. arxiv.org/abs/1803.01271.
- [6] Kim, Y. (2014). Convolutional Neural Networks for Sentence Classification. Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2014), 1746–1751.
- [7] LeCun, Y. Efficient BackProp in Neural Networks: Tricks of the trade / Y.LeCun, L. Bottou, G. Orr, K. Muller – Springer, 1998.
- [8] LeCun, Y. Scaling learning algorithms towards AI / Y.LeCun, Y. Bengio – MIT Press, 2007.

- [9] Pennington, J., Soche, R., D. Manning, C. GloVe: Global Vectors for Word Representation [Электронный ресурс] Точка доступа: <https://nlp.stanford.edu/projects/glove>.
- [10] Zhang, X. Character-level convolutional networks for text classification / Xiang Zhang, Junbo Zhao, Yann LeCun // In Advances in Neural Information Processing Systems. - 2015. - Feb. - 649-657pp.

Об авторах

Спицын Владимир Григорьевич, д.т.н., профессор инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: spvg@tpu.ru.

Иванова Юлия Александровна, к.т.н., доцент инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: jbolotova@tpu.ru.

Попова Екатерина Сергеевна, аспирант инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. E-mail: esp9@tpu.ru.

Аниматронная модель руки на базе ESP8266

И.С. Стародубцев^{1,2}, Р.Ф. Самедов², И.М. Гайниyarov², И.Н. Обабков¹, И.В. Антипина¹, Я.В. Золотарева¹,
А.А. Сибогатова¹

starodubtsevis@robolab.tk|rustam.samedov.99@mail.ru|i.m.gainiarov@imm.uran.ru|i.n.obabkov@urfu.ru
irinaant_99@mail.ru|yanazolotereva@gmail.com|as2010alisa@gmail.com

¹ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия;

²ИММ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Технология 3D-печати по-новому ставит вопрос аугментации в сферах реабилитации, предоставления обрат-ной связи и взаимодействия с реальными объектами. Быстрое и доступное производство как прототипов, так и промышленных образцов приводит к тому, что появляются новые области массового применения технологии 3D-печати. Так, например, уже существуют ориентированные на детей протезы рук или аниматронные модели для коммуникативного взаимодействия. В каждой из подобных задач встает вопрос об управлении физической конструкции руки. В данной работе представлена антропоморфная кисть, закреплённая на стенде. Основной фокус направлен на программное решение по воспроизведению запрограммированных жестов. Для решения этой задачи был разработан формат описания жестов. В качестве отладочного прототипа была доработана открытая модель руки InMoov. В статье будет представлена оригинальная часть модели в виде схемотехники и 3D модели стенда. Вопрос управления антропоморфных конечностей носит универсальный характер и особенно остро встает в системах с тонким взаимодействием. В данном случае модель покрывает это проблемное поле.

Ключевые слова: аниматроника, 3D-печать, аугментация, обратная связь, жесты.

Animatronic hand using ESP8266

I.S. Starodubtsev^{1,2}, R.F. Samedov², I.M. Gajniyarov², I.V. Antipina¹, Y.V. Zolotareva¹, A.A. Sibogatova¹
starodubtsevis@robolab.tk|rustam.samedov.99@mail.ru|i.m.gainiarov@imm.uran.ru|i.n.obabkov@urfu.ru
irinaant_99@mail.ru|yanazolotereva@gmail.com|as2010alisa@gmail.com

¹Yeltsin UrFU, Yekaterinburg, Russia;

²IMM UB RAS, Yekaterinburg, Russia

3D-printing technology puts the question of augmentation in rehabilitation, feedback providing and real objects interaction fields. Rapid manufacturing of prototypes and industrial designs leads to new fields appearance for 3D-printing technology. For example, there are hand prostheses, which are child-oriented, or animatronic models for communication. It is raises the question of managing physical hand in each of these tasks. This work presents the anthropomorphic hand, which is stand mounted. The main focus is on the software solution for gestures simulation. Special gesture format was developed to solve this problem. Prototype was developed by modifying open hand model "InMoov" as a debug realization. The article presents original model part as a circuitry and 3D stand model. The issue of anthropomorphic limb control is universal. The problem is most acute among systems with accurate interaction. Our model covers this problem field.

Keywords: animatronics, 3D printing, augmentation, feedback, gestures.

1. Введение

3D-печать позволяет посмотреть на вопрос аугментации в сферах реабилитации, предоставления обратной связи в новом ключе.

Под аугментацией в данной работе подразумеваются физические устройства, которые позволяют взаимодействовать большим числом способов с физическим миром, либо получать более разнообразную информацию через симуляцию движений.

В качестве конкретных примеров можно привести следующие разработки по областям. В оперативном вмешательстве это роботы-помощники типа Omnicell M5000 Introduction или робот-хирург da Vinci. Они представляют узкопрофессиональные решения. В протезировании это YouBioPic и Моторика [7, 8]. Отличительной особенностью детского протезирования является то, что дети быстро вырастают из своих протезов. При этом время производства протеза и персонализированность являются ключевыми параметрами.

Это решается лучше всего решается технологией 3D-печати. В коммуникации [1] – это разработки для обучения людей методом демонстрации [4, 9] или общения через язык жестов [5, 13]. В промышленности – манипуляторы для перемещения, сборки, сварки, обработки древесины и других работ. Для этих целей существуют решения от компаний KUKA и FANUC.

В открытом доступе имеются открытые модели, которые можно дорабатывать под собственные нужды. Например, LIME, InMoov[11], Brunel Hand, Ada Hand. В данной работе используется модифицированная модель руки InMoov. В отличие от оригинала предлагается дополнение в виде резинок-разгибателей пальцев.

Наш стенд хорошо подходит для образовательных целей так как имеет набор хорошо изученных движений. На его основе можно проводить обучающие занятия в школах, колледжах, университетах и других учебных заведениях для изучения основ мехатроники, аниматроники и алгоритмов, используемых в обработ-

ке данных, полученных из систем захвата движений. В данной работе рассматривается захват движения с использованием микроэлектромеханических сенсоров, однако не ограничивается только этим способом. Каждому методу присущи уникальные погрешности в измерении.

Это выражается следующим образом: при захвате движения есть дрейф нуля гироскопа и дрейбг акселерометра, которые компенсируются различными алгоритмами, например, Маджвика. Стенд производит опорные данные, которые можно проверить как визуально, так и программно. Сравнивая визуализацию жеста и опорные данные можно отлаживать сами алгоритмы визуализации жестов с точки зрения точности и скорости работы. Общий принцип применения стенда для визуализации можно посмотреть на рис. 1.

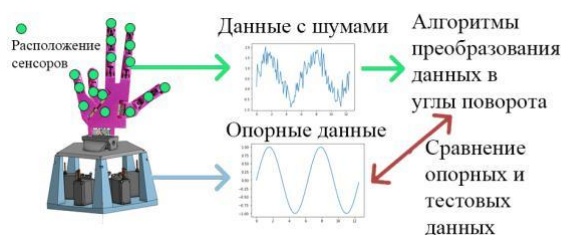


Рис. 1. Схема использования модели руки при обучении алгоритмам преобразования данных гироскопа и акселерометра в углы.

В данный момент большинство отладочных платформ используют только один сенсор. Выглядит это как визуализация поворотов плоских плиток. В работе предлагается расширить подход для многосенсорной визуализации.

Для отладки алгоритмов преобразования сырых данных можно использовать живых людей. Однако выполнение однообразных жестов является монотонной работой, в ходе которой люди быстро устают. Помимо этого страдает и точность выполнения жестов. Данный стенд позволяет выполнять строго запрограммированные жесты в нужной последовательности с точностью в рамках, указанных в характеристиках сервоприводов.

В данный момент реальное выполнение жеста можно увидеть без специальных средств визуализации. Это снижает требования к системе как средству представления жестов.

2. Постановка задачи

Существующие модели рук представлены от моделей, которые максимально точно стараются копировать биомеханику руки до промышленных образцов с нетипичной механикой, но большим числом степеней свободы движений (DoF).

Аниматроника в основном применяется в таких областях как медицина, индустрия развлечений и коммуникации. Если рассматривать подробнее, то можно выделить следующие области применения:

1. Анимация игровых и художественных персонажей.

2. Протезирование человеческих конечностей. В этом пункте можно выделить косметические, тяговые и биоэлектрические разработки.
3. Ассистирование во время реабилитации.
4. Применение промышленных роботов, с разнообразной, сложной и часто сменяющимся профилем деятельности. Возможно использование в агрессивной для человека среде без переоснащения самой линии производства.

Во всех представленных случаях существует ряд проблем, с которыми сталкиваются разработчики антропоморфных роботов:

1. Дефицит управляющей информации. Данная проблема решается разработкой заранее разработанного набора действий, которые может производить конечное устройство. В случае с протезами наиболее популярным вариантом считается снятие информации с остаточных мышц. Однако это только маскирует данную проблему.
2. Несоответствие между реализованной механикой изготовленной модели и биомеханикой руки. В промышленном варианте есть отклонения в пользу более удобного выполнения заданных операций с увеличенным или уменьшенным числом степеней свободы. В случае с протезированием этот вопрос встает более остро, так как конечным пользователям более естественным будет вариант наиболее точно копирующий оригинальную биомеханику руки.
3. Компактность. В случае с промышленным исполнением этот вопрос не отягощает разработчиков значительно, так как здесь мы можем закрепить устройство в стационарном варианте на достаточной площади. Завод проектируется под производственную линию. В случае с протезированием и коммуникацией ситуация обратная. Есть значительные ограничения по весу и объему разработки.
4. Приведение в движение частей устройства. От того как именно приводятся в движение модель конечности многое зависит. Например, от типа двигателей и их числа. От количества приводящих механизмов.
5. Проблема оцувствление в промышленном секторе не стоит вовсе. Однако в случае с протезами от этого зависит точность управления самим протезом. Чем более качественно предоставлять обратную связь от протеза к человеку, тем лучше он её управляет [10].

Каждая из представленных проблем влияет на разработку управляющей логики [2, 3, 15]. Именно на этом сфокусирована существующая разработка.

В качестве прототипа была доработана модель руки InMoov для отладки способов управления жестами антропоморфной руки.

Так же есть проблемы при множественном воспроизведении человеком жестов. Это низкая повторяемость каждого жеста и усталость.

Важно отлаживать алгоритмы совместно со всеми сенсорами, так как односенсорные стенды рассматривают только самый простой случай, не учитывающий взаимосвязей устройств оцифровки движений.

3. Техническая реализация

В качестве набора жестов были выбраны представленные на рис. 2.

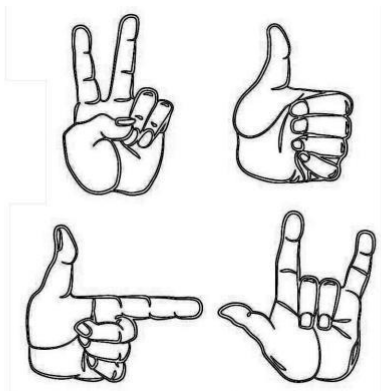


Рис. 2. Воспроизводимые жесты.

Для управления используется 5 сервоприводов MG945 с максимальным вращающим моментом 12 кг/см, плата NodeMCU v3 с Wi-fi модулем ESP8266, блок питания с избыточной мощностью на 300W и приводящие струны. Общая схема включения представлена на рис. 3. Рабочее напряжение 5В.

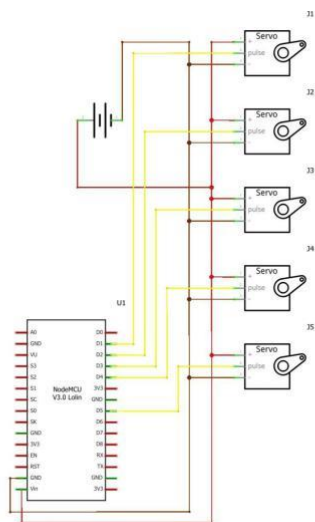


Рис. 3. Схема подключения сервомоторов к NodeMCU.

Сервомоторы и ESP8266 подключены параллельно к блоку питания. Между ними есть согласованные по напряжению управляющие линии связи. Для имитации человеческих мышц сгибателей-разгибателей используются приводящие струны. Материал имеет наименьший коэффициент трения и вес среди аналогов.

После выбора и расчета элементной базы был выполнен этап моделирования. Моделирование производилось в OnShare. Суммарное время печати составило порядка 30 часов. Модель стенда можно посмотреть на рис. 4.

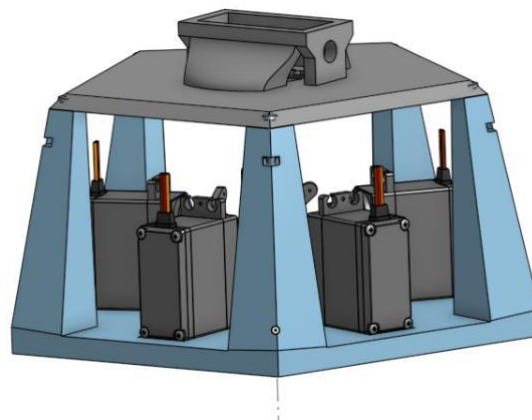


Рис. 4. 3D-модель стенда с сервоприводами.

После выбора и расчета элементной базы был выполнен этап моделирования. Собранный прототип аниматронной руки можно посмотреть на рис. 5. Печать всех элементов производилась по технологии FDM.

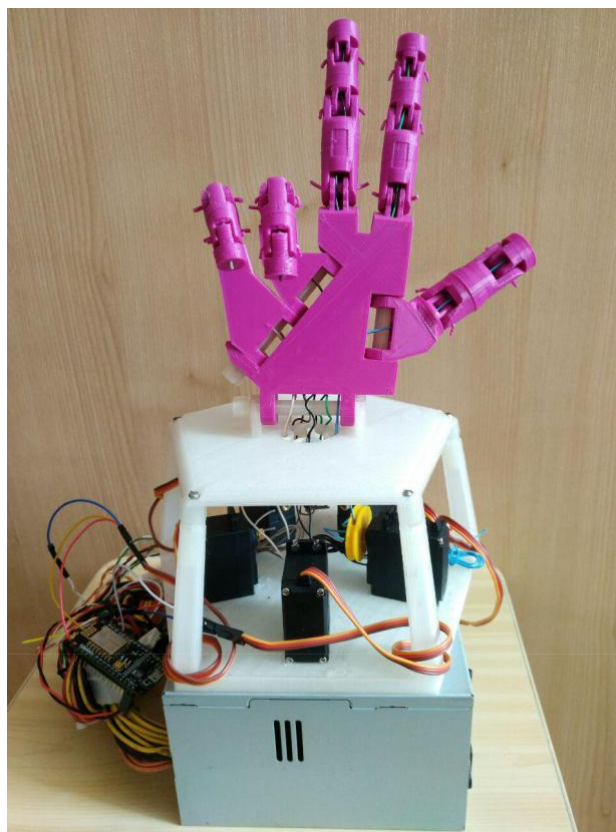


Рис. 5. Аниматронная рука на стенде.

Печать производилась PLA пластиком, так как данный тип пластика обладает достаточной прочностью на изгиб – при 20% заполнении порядка 70-80 Мпа [6], что сопоставимо с породами дерева.

Ниже представлено сравнение аналогов аниматронной руки, которые могут выполнять аналогичные функции в случае их согласования с базовым стендом.

В табл. 1 сравниваются число используемых соединений, количество степеней свободы руки и применяемый механизм, приводящий движения пальцев в движение.

Подробное сравнение можно найти у авторов, также разрабатывающих собственную модель руки [16].

Таблица 1. Сравнение роботизированных кистей рук.

	Число соединений	DoF	Привод
Dextrus Hand	15	5	Трос
InMoov Hand	11	5	Трос
Bebionic Hand	11	6	Шарнирный механизм
iLimb Hand	11	6	Червячная передача
Vincent Hand	11	6	Шарнирный механизм
iCub Hand	19	12	Трос
Athens Hand	4-12	1	Трос
Alaris Hand	6	1	Шарнирный механизм
De Beir Hand	16	5	Трос

В данном случае была выбрана исходная модель руки InMoov для последующей доработки, так как она предоставляет необходимое число степеней свободы для воспроизведения заданного числа жестов, имеет небольшое число соединений и конструкция позволяет доработать модель. В данном случае были добавлены резинки-разгибатели пальцев.

4. Программная реализация

Программирование платы Node MCU v3 производилось в среде разработки Arduino IDE. Для управления сервомоторами применялась стандартная библиотека Servo.h.

Для реализации движения пальцев руки был разработан алгоритм. На вход подаются конечные положения сервоприводов. Каждое значение отвечает за движение определенного пальца. Этот алгоритм работы основан на зависимости разности положений угла сервопривода от фиксированного времени установки конечного положения каждого пальца.

Для имитации плавного движения пальцев необходимо плавно поворачивать вал сервопривода. Осуществление такого поворота происходит за счет быстрой и частой смены угла [14]. На каждой итерации сервопривод поворачивается на заранее рассчитанный угол, который не может быть больше максимального угла. Максимальный угол составляет от 1 до 5 градусов. Количество итераций зависит от общего времени установки конечного положения руки и времени на одну итерацию. Все эти величины являются константами.

Алгоритм работы программы в виде псевдокода можно посмотреть на рис. 6. Были проведены тесты на соответствие поворота сервоприводов сгибанию и раз-

гибанию каждого пальца. Результаты этих тестов дали понять, что необходима поправка угла поворота сервопривода внутри программы выполнения работы. Удалось установить реальный угол поворота сервопривода и сделать поправку внутри программы.

```

1 Function Установка положений пальцев для
   заданного жеста
2   install_position_time
3   rotation_time
4   steps_number =  $\frac{\text{install\_position\_time}}{\text{rotation\_time}}$ 
5   one_step_angle =  $\frac{\text{New\_hand\_angl} - \text{Hand\_angl}}{\text{steps\_number}}$ 
6   for ( $Angle_{\text{pinky}}, Angle_{\text{ring}}, Angle_{\text{middle}},$ 
    $Angle_{\text{index}}, Angle_{\text{thumb}} \in \text{Hand\_angl}$  do
7     for one_step  $\in$  steps do
8       Servo_rotation =
9         one_step · one_step_angle
10    end
11 end

```

Рис. 6. Псевдокод функции управления положением пальцев аниматронной руки.

Здесь:

1. **install_position_time** – время установки положения руки.
2. **rotation_time** – общее время поворота сервопривода.
3. **steps_number** – количество шагов сервопривода.
4. **one_step_angle** – угол поворота за один шаг сервопривода.
5. **New_hand_angl** – новое положение руки.
6. **Hand_angl** – старое положение руки.
7. **Servo_rotation** – функция поворота сервопривода на указанный угол.

5. Будущие исследования

В перспективе разработки лежат исследования анатомии человеческой руки с точки зрения биомеханики. Например, имитация мышц сгибателей и разгибателей пальцев будет более точной и управляемой [12] или имитация приводящих, отводящих мышц пальцев или червеобразных и межкостных мышц.

Для управления аниматронным протезом планируется реализовать интерактивный интерфейс, который позволит пользователю на виртуальной модели руки создать собственный жест. Также планируется создать удаленное управление с помощью перчатки на инерциальных микро электромеханических сенсорах.

Дополнительной возможностью будет являться организация удаленного доступа к образовательному комплексу. Будет возможность генерировать реальные данные в момент подключения к комплексу. Не надо будет пользоваться историческими или синтетическими данными. Подходящего набора данных может не оказаться. В данном комплексе можно будет генериро-

вать набор данных, который будет соответствовать запрограммированному жесту.

Полученный формат данных позволит помимо реальной демонстрации жеста получить визуальное представление на компьютере. Будет использована поворотная модель кисти.

Планируются дальнейшие работы по использованию результатов проекта в областях человеко-машинного взаимодействия и умного протезирования.

6. Заключение

На данном этапе разработки протеза было реализовано управление аниматронной рукой так, чтобы проверить достижимость различных положений пальцев руки. Для демонстрации протеза были выбраны несложные жесты, которые не требуют действия мышц плеча и предплечья, а также первой тыльной межкостной мышцы.

Также, из-за особенностей распечатанной модели кисти, было учтено, что у пальцев нет возможности сгибаться в «суставах» более чем на 90°. У Мизинца и безымянного пальца за счет имитации пястных костей есть возможность отгибаться назад на 45 градусов. У большого пальца проксимальная фаланга дает возможность сгибаться вперед, во внутрь, на 65 градусов и назад, наружу, на 10 градусов от плоскости руки. Ввод данных о положении каждого пальца осуществляется с помощью клавиатуры, т.е. задаются углы поворота сервоприводов. На каждом итоговом положении известно, на какой угол повернут сервопривод в данный момент за счет обратной связи сервоприводов.

Данный проект рассматривается как первый этап исследований в области захвата движений. Стенд будет представлять из себя контрольное оборудование для оценки качества алгоритмов захвата и распознавания жестов.

7. Благодарности

и Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

8. Литература

- [1] Арутюнян М. Г. Модель антропоморфной роботизированной кисти для коммуникативного взаимодействия //Научные труды Центрального научно-исследовательского института русского жестового языка. – 2018. – С. 133-145.
- [2] Воробьев Е. И., Дорофеев В. О., Михеев А. В. Антропоморфные биороботы и биопротезы //Инженерный вестник. – 2015. – №. 6. – С. 9-9.
- [3] Воробьев Е. И., Скворчевский А. К., Сергеев А. М. Проблемы создания алгоритмов управления антропоморфными биопротезами рук и ног //Медицина и высокие технологии. –2012. –№.1. –С. 7-12.
- [4] Зельдин Л. Развитие движения при различных формах ДЦП. – Litres, 2019.

- [5] Лобанов А. С. Обзор методов распознавания жестов //Южно-Уральские научные чтения. – 2015. – №. 1. – С. 48-53.
- [6] Лысыч М. Н., Шабанов М. Л., Качурин А. А. Обзор современных технологий 3d печати //Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №. 6. – С. 26-30.
- [7] Перваков И. В., Семенцова К. Р. Детское протезирование: технология и культурологические аспекты //Культурологический журнал. –2018. –№.4(34).
- [8] Чех Илья Игоревич. Функциональные протезы рук для решения бытовых задач. Режим доступа: <https://motorica.org>. Дата обращения: 12.05.19.
- [9] Alessandro C. et al. Motor control and learning theories //Emerging Therapies in Neurorehabilitation II. – Springer, Cham, 2016. – С. 225-250.
- [10] Belter J. T. et al. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review //Journal of Rehabilitation Research & Development. – 2013. – Т. 50. – №. 5.
- [11] Gael Langevin. Open source 3D printed life-size robot. Режим доступа: <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/>. Дата обращения: 12.05.19.
- [12] Gupta A. et al. Wireless animatronic arm. – 2016.
- [13] Homburg D. et al. RoboTalk-Prototyping a Humanoid Robot as Speech-to-Sign Language Translator //Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences. – 2019.
- [14] Keadr S. F. et al. Development of Zigbee Based Tele Operated Multipurpose Robotic Arm with Hand Gesture Recognition //Technology. – 2017. – Т. 8. – №. 8. – С. 1275-1286.
- [15] Wang X., Zhao J., Yang D., et al. Biomechatronic Approach to a Multi-fingered Hand Prosthesis. Proc. of 2010 3rd IEEE RAS & EMBS Inter. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Tokyo, Japan. Sep. 26-29, pp. 209—214.
- [16] Krausz, N. E., & Rorrer, R. A. (2015). Design and fabrication of a six degree-of-freedom open source hand. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 24(5), 562-572.

Об авторах

Стародубцев Илья Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент УрФУ. Старший научный сотрудник ИММ УрО РАН.

E-mail: starodubtsevis@robotlab.tk.

Самедов Рустам Фирудин оглы, программист ИММ УрО РАН. E-mail: rustam.samedov.99@mail.ru.

Гайниyarов Игорь Мадыхатович, младший научный сотрудник ИММ УрО РАН. E-mail: i.m.gainiarov@imm.uran.ru.

Обабков Илья Николаевич, директор ИРИТ-РтФ УрФУ. E-mail: i.n.obabkov@urfu.ru

Антипина Ирина Владимировна, бакалавр УрФУ. E-mail: irinaant_99@mail.ru.

Золотарева Яна Вячеславовна, бакалавр УрФУ. E-mail: yanazolotereva@gmail.com.

Сибогатова Алиса Альбертовна, бакалавр УрФУ. E-mail: as2010alisa@gmail.com.

Авторский указатель

В

Bondarev A.E. 12

С

Charnine M. 48

Chernigin A. 12

G

Galaktionov V.A. 12

Gazizov I. 12

Gowda K.N. 12

К

Kabanov P.A. 149

Klokov A. 48

Krylov A.S. 12

Р

Paltashev T.T. 12

Pavelyeva E.A. 117

S

Safronova E.I. 117

Sokolov E. 48

Sukhodoev M.S. 149

А

Абадонова Д.Ю. 163

Абдуллин М.М. 169

Анашкина Е.В. 206

Антипина И.В. 274

Арбузов В.А. 53, 58

Арбузов Э.В. 53, 58

Ахтамзян А.И. 87

Б

Бабичев А.Ю. 21

Баженов В.Г. 113

Барладян Б.Х. 42

Белусов К.И. 93

Бердников В.С. 53

Богданов Н.Н. 26, 42

Бойков А.А. 172

Бордодымов А.Н. 70

Будак В.П. 209

В

Васильев Е.П. 122

Васин Д.Ю. 152

Ватолин Д.С. 12

Вехтер Е.В. 223

Викуллова М.А. 213

Вирясов М.С. 159

Вихрев И.Б. 122

Внук В.В. 176

Г

Гайнияров И.М. 274

Глазков С.А. 62

Глазычев А.О. 169

Голенцов Д.А. 108

Гонахчян В.И. 32

Гончарова М.В. 242

Горбушин А.Р. 62

Готина А.Н. 217

Громов В.П. 159

Губарев С.В. 255

Гудков В.Ю. 126

Д

Давыдова Е.М. 220, 237

Дворецкий А.Т. 181

Дегтярёва Н.Г. 260

Денисова Т.В. 181

Дергачева Е.А. 12

Дубнищев Ю.Н. 53, 58

Дудченко А.В. 122

Ж

Жданов А.Д. 26, 42

Жданов Д.Д. 26, 42

Желтов В.С. 209

Жилина Н.Д. 185

З

Зелянская Н.Л. 93

Знаменская И.А. 66

Золотарева Я.В. 274

Золотов В.А. 37

Золотухина О.С. 53, 58

И

Иванов И.Э. 66

Иванова В.А. 260

Иванова Ю.А. 131, 270

Ипполитов Е.В. 176

К

Канаева И.А. 131

Канкеева Н.С. 220

Карабчевский В.В. 188

Карпов Л.Е. 12

Кислицын С.А. 53

Князь В.В. 70

Козырев М.И. 70

Колесник М.А. 87

Конопацкий Е.В. 191

Копелиович Д.И. 12

Кошлаков Д.М. 104

Кравцов А.Н. 62

Кривошеев Н.А. 266

Крохина В.А. 163

Крысько В.А. 113

Кустикова В.Д. 122

Кучерова К.Н. 74

Л

Лагунова М.В. 201

Ладилова А.А. 247

Лебедев Л.И. 159

Липкина А.Л. 136

Лобанов Г.В. 163

Лукашенко О.В. 143

Лукашов В.В. 58

М

Местецкий Л.М. 136

Мешкова Т.В. 209

Мещеряков С.В. 74

Молотков А.А. 78

Морозов С.В. 37

Мошкова Т.В. 185, 201

Муфтеев В.Г. 169

Н

Новиков М.М. 176

О

Обабков И.Н. 274

П

Павлов И.Н. 82

Павлова А.А. 223

Панов А.Г. 260

Попова Е.С. 270

Поройков А.Ю. 108

Потемин И.С. 26, 42

Прокопишин Р.В. 163

Р

Расковская И.Л. 82

Решетников М.К. 196

Ризен Ю.С. 206, 234

Ринкевичюс Б.С. 82

Роменский С.А. 185

Ротков С.И. 185, 191, 201

Рудинская А.А. 226

Рябинин К.В. 87, 93

Рязанов С.А. 196

С

Самедов Р.Ф. 274

Сапронов М.В. 99

Семёнов В.А. 37

Сибогатова А.А. 274

Сивкова Т.А. 255

Скорнякова Н.М. 99

Сляднев С.Е. 249

Сорокин М.И. 26, 42

Спицын В.Г. 266, 270
Стародубцев И.С. 274
Ступак Д.С. 62
Сударикова Е.В. 87

Т

Талыпов М.А. 169
Тенина А.В. 62
Ткачева Л.Ю. 230
Третьякова О.Н. 78
Трифанков Ю.Т. 104
Турлапов В.Е. 249
Тюрина В.А. 185, 201

У

Утешев А.Ю. 242
Уткин К.Д. 122

Ф

Фаныгина А.Д. 234
Фаттахов М.М. 169
Федоров П.А. 169
Федотов А.М. 172
Фланден В.С. 108
Фомин В.М. 62
Фролов В.А. 21

Х

Хмелевский Ю.П. 213, 217, 226, 230
Хозяенко Н.Н. 62

Ч

Чембаев В.Д. 209
Черобыло С.А. 176
Черняев С.Д. 143

Чуприна С.И. 93

Ш

Шаехова И.Ф. 260
Шуткин В.Н. 37

Щ

Щемелинин Д.А. 74

Ю

Юриков В.В. 237

Я

Яковлева Т.В. 113

Научное издание

GraphiCon 2019

29-я Международная конференция
по компьютерной графике
и машинному зрению

Труды конференции

Издается в авторской редакции

Компьютерная вёрстка: *Исаев Р.А., Коростелёв Д.А., Трубакова О.Р.*

Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7