



Научно-исследовательский
Центр Физико-технической
информатики



31-я Международная конференция
по компьютерной графике и машинному зрению

ГрафиКон-2021

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия,
27-30 сентября 2021 г.



GraphiCon 2021

31-я Международная конференция
по компьютерной графике
и машинному зрению

Труды конференции

GraphiCon 2021

31th International Conference
on Computer Graphics and Vision

Conference Proceedings

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, 27–30 сентября 2021 года

graphicon.nntu.ru

УДК 004.92
ББК 32.973.26-018.2
G73

G73 **GraphiCon 2021**: труды 31-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Нижний Новгород, 27–30 сент., 2021 г.) / Нижегород. гос. тех. ун-т. – Нижний Новгород, 2021. – 139 с.

ISSN 2618-8317

Настоящий сборник содержит материалы 31-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению. В её подготовке и проведении участвовали специалисты ведущих организаций, отраслевых и академических научно-исследовательских институтов, а также высшей школы.

Цикл «GraphiCon» представляет собой регулярные ежегодные конференции. Он служит международным форумом для исследователей и разработчиков со всего мира, целью которого является обмен новыми идеями, знаниями и опытом в области компьютерной графики, машинного зрения, обработки изображений, систем визуализации и виртуального окружения, систем поддержки принятия решений, облачных вычислений и обработки больших массивов данных.

В сборник включены секционные доклады конференции.

Адресуется сотрудникам научно-исследовательских и образовательных организаций, предприятиям ИТ-индустрии, аспирантам, студентам, а также широкому кругу читателей.

УДК 004.92
ББК 32.973.26-018.2

ISSN 2618-8317

Организационный комитет

Ротков Сергей Игоревич
ННГАСУ

Дмитриев Сергей Михайлович
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Филинских Александр Дмитриевич
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Берберова Мария Александровна
РТУ МИРЭА

Бондарев Александр Евгеньевич
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Будак Владимир Павлович
МЭИ

Волобой Алексей Геннадьевич
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Галактионов Владимир Александрович
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Ерёмченко Евгений Николаевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Жданов Дмитрий Дмитриевич
Университет ИТМО

Захарова Алёна Александровна
ИПУ РАН

Карпов Леонид Евгеньевич
ИСП им. В.П. Иванникова РАН

Конушин Антон Сергеевич
«Исследовательский центр
Самсунг»

Крылов Андрей Серджевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Массель Людмила Васильевна
ИСЭМ им. Л.А. Мелентьева СО
РАН, ИрННТУ

Обоймов Антон Сергеевич
МФТИ, ООО «Лаборатория
Интеллектуальных Систем»

Палташев Тимур Турсунович
Radeon Technology Group

Подвесовский Александр Георгиевич
БГТУ

Толок Алексей Вячеславович
ИПУ РАН, МГТУ «СТАНКИН»

Турлапов Вадим Евгеньевич
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Хранилов Валерий Павлович
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Программный комитет

Галактионов Владимир Александрович
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Барладян Борис Хаимович
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Батурин Юрий Михайлович
ИИЕТ

Беляков Владимир Викторович
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Бобков Валерий Александрович
ИАПУ ДВО РАН

Бондарев Александр Евгеньевич
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Будак Владимир Павлович
МЭИ

Васильев Евгений Павлович
ННГУ им. Н.И.Лобачевского

Ватолин Дмитрий Сергеевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Вехтер Евгения Викторовна
ТПУ

Волобой Алексей Геннадьевич
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Гергет Ольга Михайловна
ТПУ

Гетманская Александра Александровна
ННГУ им. Н.И.Лобачевского

Дебелов Виктор Алексеевич
ИВМиМГ СО РАН

Дубнищев Юрий Николаевич
Институт теплофизики СО РАН

Ерёмченко Евгений Николаевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Ершов Сергей Валентинович
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Жданов Дмитрий Дмитриевич
Университет ИТМО

Жевнерчук Дмитрий Валерьевич
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Желтов Виктор Сергеевич
МЭИ

Захарова Алёна Александровна
ИПУ РАН

Знаменская Ирина Александровна
МГУ им. М.В. Ломоносова

Игнатенко Алексей Викторович
МГУ им. М.В. Ломоносова

Исаев Руслан Александрович
БГТУ

Киричек Андрей Викторович
БГТУ

Конопацкий Евгений Викторович
ДонНАСА

Конушин Антон Сергеевич
«Исследовательский центр
Самсунг»

Коростелев Дмитрий Александрович
БГТУ

Крылов Андрей Серджевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Кузьменко Александр Анатольевич
БГТУ

Лагерев Дмитрий Григорьевич
БГТУ

Лагунова Марина Викторовна
ННГАСУ

Лепский Владимир Евгеньевич
ИФРАН

Макаренко Константин Васильевич
БГТУ

Массель Людмила Васильевна
ИСЭМ им. Л.А. Мелентьева СО
РАН, ИрННТУ

Милов Владимир Ростиславович
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Михайлюк Михаил Васильевич
НИИСИ РАН

Насонов Андрей Владимирович
МГУ им. М.В. Ломоносова

Небаба Степан Геннадьевич
ТПУ

Пак Александр Яковлевич
ТПУ

Панчук Константин Леонидович
ОМГТУ

Пилюгин Виктор Васильевич
МИФИ

Подвесовский Александр Георгиевич
БГТУ

Попов Евгений Владимирович
ННГАСУ

Потемин Игорь Станиславович
Университет ИТМО

Ротков Сергей Игоревич
ННГАСУ

Рябинин Константин Валентинович
ПГНИУ

Сивкова Татьяна Александровна
ООО «СИАМС»

Соколова Элеонора Станиславовна
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Сорокин Дмитрий Васильевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Спасенников Валерий Валентинович
БГТУ

Столбова Ирина Дмитриевна
ПНИПУ

Тикунов Владимир Сергеевич
МГУ им. М.В. Ломоносова

Толок Алексей Вячеславович
ИПУ РАН, МГТУ «СТАНКИН»

Трубаков Андрей Олегович
БГТУ

Трубаков Евгений Олегович
БГТУ

Турлапов Вадим Евгеньевич
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Филинских Александр Дмитриевич
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Фролов Владимир Александрович
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ
им. М.В. Ломоносова

Хвостиков Александр Владимирович
МГУ им. М.В. Ломоносова

Хранилов Валерий Павлович
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Чуприна Светлана Игоревна
ПГНИУ

Шапиро Лев Залманович
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Шкляр Алексей Викторович
ТПУ

Международный программный комитет

Бандрова Теменюшка
UACEG, София, Болгария

Конечны Милан
Университет Масарика, Брно, Чехия

Чанлинь Ван
Институт аэрокосмических
исследований информации (AIR)
Китайской академии наук (CAS),
Пекин, Китай

Штробл Йозеф
Зальцбургский университет,
Австрия, Зальцбург

**Адрес: ГрафиКон-2021, Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.
Тел.: +7-920-040-91-00 E-mail: graphicon@nntu.ru Web Site: graphicon.nntu.ru**



АНО Научное Общество «ГрафиКон»
Организатор



Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева
Организатор



Кафедра Графические
информационные системы
(НГТУ им. Алексеева)
Организатор



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



Брянский государственный
технический университет
Организатор



Национальный исследовательский
ядерный университет "МИФИ"
Организатор



Научно-исследовательский центр
физико-технической информатики
Организатор



ООО «Orion Innovation»
Спонсор



ООО «Два Стахановца»
Спонсор



ООО «Техкомпания Huawei»
Спонсор



ООО «Open Cascade»
Спонсор



Уважаемые коллеги!

Организационный комитет 31-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГрафиКон-2021 приветствует вас в Нижнем Новгороде!

ГрафиКон – крупнейшая в России и странах СНГ международная конференция по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения. В сообщество организаторов конференции ГрафиКон на протяжении многих лет входят ведущие образовательные организации и научно-исследовательские институты мирового уровня.

За свою 30-летнюю историю ГрафиКон постоянно расширяет географию участников, сохраняя старые и приобретая новые традиции. Конференция призвана способствовать развитию областей компьютерной графики, обработки изображений и машинного зрения, совершенствованию системы подготовки специалистов в них, привлечению талантливых студентов, аспирантов, ученых, расширению связей между академической наукой и промышленностью.

Ежегодно к участию в конференции приглашаются мировые лидеры ИТ-индустрии. Например, в 2021 г. свои наработки представили компания AMD (подразделение Radeon Technologies Group), Huawei Technologies Co, отечественные разработчики программных решений и технологий в лице Orion Innovation, Open Cascade, компании «Два Стахановца».

Участников ГрафиКон-2021 принимает Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Мы рады приветствовать Вас на Нижегородской земле в знаковую для нас дату — городу исполнилось 800 лет!

Мы рады всем участникам и гостям конференции и желаем продолжения успешной работы, взаимовыгодных научных дискуссий, приятных встреч и интересного общения с коллегами и партнерами.

*От имени организационного комитета ГрафиКон-2021,
ректор НГТУ им. Р.Е. Алексева
Дмитриев Сергей Михайлович*

Содержание

Интеллектуальные решения в компьютерной графике

<i>В.С. Антонов, М.И. Сорокин, Д.Д. Жданов</i> Метод оценки корректности освещения виртуальных объектов в системах смешанной реальности	10
--	----

Научная визуализация и визуальная аналитика

<i>В.Е. Борисов, А.А. Давыдов, Т.В. Константиновская, А.Е. Луцкий</i> Анализ взаимодействия пары направленных по потоку сверхзвуковых вихрей методами визуализации	23
<i>Е.С. Жарина, Ю.С. Ризен</i> Визуализация информации инструментами сетевых сервисов	32

Геометрическое моделирование. Компьютерная графика в образовании

<i>А.А. Бойков</i> Конструктивные геометрические модели и их применение в проектно-конструкторской деятельности	38
<i>А.В. Власенко, С.С. Александрова, Ф.Г. Садреев, П.А. Воронин</i> Автоматизация создания инженерных учебных WebGL приложений	47
<i>Д.С. Гордеев</i> Модель визуализации и отладки на графовом представлении Cloud-Sisal программ	54
<i>В.В. Карабчевский, А.С. Мазуров</i> Геометрическое моделирование эмоций виртуальных персонажей	63
<i>В.Г. Муфтьев, А. Максименко, Р.И. Ахметшин, А.П. Зелев, Р.А. Зиатдинов, Ф.Т. Зиганишина, Р.И. Набиев, И.М. Фархутдинов, М.М. Фаттахов</i> Прикладные САПР и приложения на основе геометрического ядра C3D для проектирования изделий с функциональными кривыми	75
<i>А.А. Шагалова, Т.Н. Томчинская</i> Применение дополненной реальности при изучении начертательной геометрии	88

Компьютерная графика в материаловедении, светотехнике и дизайне

<i>М.М. Новиков, Л.В. Новикова, Е.В. Саватеева, В.А. Симонова</i> Лазерно-ультразвуковая диагностика пластиковых изделий, изготовленных методом аддитивных технологий ..	94
---	----

Искусственный интеллект, когнитивные технологии и робототехника

<i>А.В. Греченева, Н.В. Дорофеев, М.С. Горячев</i> Результаты Анализа Походки по Данным Акселерометра Мобильного Телефона для Интеллектуальной Системы Аутентификации Пользователя	106
<i>А.А. Карандеев, В.П. Осипов, В.И. Балута</i> Применение метода детектирования границ к задаче распознавания обстановки	114

Графические технологии информационной поддержки жизненного цикла продукта

<i>К.И. Абросимов, Т.В. Львютина, А.С. Суркова</i> Метрики качества генеративных моделей	124
<i>В.П. Хранилов, П.В. Мисевич, Е.Н. Панкратова, А.Э. Ермилов</i> Иерархия концепций и моделей создания и поддержки программного обеспечения в течение жизненного цикла ..	131



Интеллектуальные решения в
компьютерной графике

Intelligent Solutions
in Computer Graphics

GraphiCon 2021

27 – 30 сентября 2021
Нижний Новгород, Россия

Метод оценки корректности освещения виртуальных объектов в системах смешанной реальности

В.С. Антонов¹, М.И. Сорокин¹, Д.Д. Жданов¹

¹ Университет ИТМО, Кронверкский проспект, дом. 49, литер А, Санкт-Петербург, 197101, Россия

Аннотация

Работа посвящена исследованию воздействия виртуальных объектов в системах виртуальной, дополненной и смешанной реальностей на качество зрительного восприятия человека. Описываются особенности работы систем виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, принципы формирования изображения виртуального и реального миров и проблемы их совмещения. Для систем смешанной реальности описываются основные принципы построения систем, их специфика и принципы формирования изображения реального мира. Рассматриваются специфические причины формирования конфликта зрительного восприятия в системах смешанной реальности. Выделено три основные причины конфликта, которые можно побороть в современных системах смешанной реальности: положение и тип источника света; корректное формирование теней от виртуальных источников на изображении объектов реального мира; и интенсивность излучения, включая диаграмму излучения. Предложена методика оценки корректности формирования освещения виртуальных объектов в системе смешанной реальности и влияния ее на качество зрительного восприятия. Для оценки предложенной методики разработан ряд тестовых сцен с корректным и некорректным освещением виртуальных объектов. Оценка качества зрительного восприятия проводилась на тестовой группе из 24 человек, имеющих опыт работы в системах компьютерной графики. Качество оценивалось по шкале хорошо/плохо. По результатам экспертной оценки сформировано заключение, определяющее требование для построения системы освещения виртуальных объектов в системах смешанной реальности.

Ключевые слова

Виртуальная реальность, дополненная реальность, смешанная реальность, визуальное восприятие, зрительный дискомфорт, виртуальных объект, искусственное освещение.

A method for evaluating the correctness of the illumination of virtual objects in mixed reality systems

V.S. Antonov¹, M.I. Sorokin¹, D.D. Zhdanov¹

¹ ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg., St. Petersburg, 197101, Russia

Abstract

The work is devoted to the study of the impact of virtual objects in virtual, augmented and mixed reality systems on the quality of human visual perception. The features of the operation of virtual, augmented and mixed reality systems, the principles of image formation of the virtual and real worlds and the problems of their combination are described. For mixed reality systems, the basic principles of building systems, their specifics and the principles of forming an image of the real world are described. The specific reasons for the formation of the conflict of visual perception in mixed reality systems are considered. There are three main causes of

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: jzolkant@yandex.ru (В.С. Антонов); vergotten@gmail.com (М.И. Сорокин); ddzhdanov@mail.ru (Д.Д. Жданов)

ORCID: 0000-0002-5130-7366 (В.С. Антонов); 0000-0001-9093-1690 (М.И. Сорокин); 0000-0001-7346-8155 (Д.Д. Жданов)

conflict that can be overcome in modern mixed reality systems: the position and type of the light source; the correct formation of shadows from virtual sources on the image of real-world objects; and the intensity of radiation, including the radiation diagram. A method for evaluating the correctness of the formation of illumination of virtual objects in a mixed reality system and its influence on the quality of visual perception is proposed. To evaluate the proposed methodology, a number of test scenes with correct and incorrect lighting of virtual objects have been developed. The assessment of the quality of visual perception was carried out on a test group of 24 people with experience in computer graphics systems. The quality was evaluated on a good/bad scale. Based on the results of the expert assessment, a conclusion was formed that defines the requirement for building a lighting system for virtual objects in mixed reality systems.

Keywords

Virtual reality, augmented reality, mixed reality, visual perception, visual discomfort, virtual object, artificial lighting.

1. Введение

В настоящее время виртуальная (Virtual Reality / VR), дополненная (Augmented Reality / AR) и смешанная реальность (Mixed Reality / MR / MxR) представляют собой достаточно перспективную и развивающуюся индустрию. Активный рост начался лишь в 2012 году, когда были созданы очки виртуальной реальности Oculus Rift.

Поскольку сегодня не существует единого мнения трактования базовых понятий данных реальностей, то данная работа будет придерживаться определений, утвержденных организацией Consumer Technology Association (CTA) в американском национальном стандарте CTA-2069-A (ноябрь, 2020 г.) [2]. Согласно этому документу в индустрии VR/AR/MxR приняты такие термины, как:

- Виртуальная реальность — это среда, создающая мир полностью из искусственных компонентов для имитации воздействия ощущения в ином пространстве настоящими органами чувств. Например, через зрение или слух.
- Дополненная реальность — это среда, которая создается путём наложения виртуальных объектов на реальный мир в реальном времени.
- Смешанная реальность — это окружение, создаваемое сочетанием физического и цифрового миров. Иными словами, это одна из технологий, которая решает вопросы преподнесения виртуальных объектов в реальный мир и обеспечения возможности взаимодействия с ними. Тем самым, смешанная реальность занимается интеграцией вопросов виртуальной реальности в дополненную и наоборот.

Такой характер пространственной свободы в смешанной реальности может приносить ряд преимуществ в различных областях: не только в развлекательных или социальных, но и в образовательных, в развитии медицины, в сфере культуры, но в первую очередь — в науке, исследованиях, моделировании и прототипировании.

Попытки трактования терминов VR/AR/MxR индустрии ведутся и на научном уровне. Например, исследования по данному вопросу можно найти в таких работах, как у В.П. Котенко [3], В.И. Гнатюк [4], В.Г. Горохова [5], Г.Н. Волкова [6], М. Круглова [7], А.Б. Григорьева [8] и др.

Дополненная и виртуальная реальности имеют одну общую черту: они обе обладают замечательной способностью изменять наше восприятие мира. Чем они различаются, так это восприятием нашего присутствия. Виртуальная реальность способна транспонировать пользователя. Другими словами, перенести в другое место. Через темные козырьки или защитные очки VR блокирует комнату и помещает нас в другое место. Oculus Rift, Samsung Gear VR, Google Cardboard, это те немногие имена, которые разрабатывают устройства и алгоритмы для погружения в VR.

Надев гарнитуру виртуальной реальности, люди слепы по отношению к настоящему миру, но при этом, визуально они находятся в совершенно другом месте, при желании даже могут оказаться на вершине горы Килиманджаро или на дне Марианской впадины. Погружение

происходит крайне реалистично: некоторые пользователи сообщают о тех же ощущениях в виртуальной реальности, которые они испытывают, поднимаясь по лестнице или катаясь на американских горках.

Что же касается дополненной реальности, то, за основу она берет нашу текущую реальность и добавляет что-то новое к ней. Она не перемещает в другое место, она лишь расширяет наше текущее восприятие.

Как видно ниже на рисунке 1, Samsung активно разрабатывают свои устройства и уже представили свои очки AR, которые подключаются к телефонам или ПК через WIFI и заменяют экран на этих устройствах. Apple также не остаются в стороне и активно инвестируют в системы дополненной реальности, возможно и от них в скором будущем появятся новые телефоны с новыми возможностями и функциями дополненной реальности.



Рисунок 1: Очки дополненной реальности от Samsung

Развитие технологий создания реальностей дало несколько форм смешанной реальности. Одним из видов MxR является возможность не только накладывать объекты на реальный образ мира, но и взаимодействовать с ними. Это своего рода продвинутый тип AR. Другая интересная форма MxR берет свое начало в полном погружении в виртуальную среду, где реальный мир заблокирован. Сначала можно подумать, что это обычная виртуальная реальность. Но в данном случае наблюдаемая виртуальная среда привязана к реальной среде и как бы перекрывает её.

Смешанная реальность «сплавляет» наложенные объекты дополненной реальности в реальном мире с погружением в цифровой виртуальный мир, позволяющий нам делать вещи, невозможные строго в AR или VR цифровой среде. Ультрасовременный сдвиг парадигмы в MR стал возможным благодаря Microsoft HoloLens — гарнитуре, которая, как следует из названия, позволяет ее пользователям накладывать изображения виртуальных миров поверх обычной привычной нам реальности (гарнитура выглядит как солнцезащитные очки Oakley space-age). По сути, это создает ощущение присутствия в виртуальной среде. На рисунке 2 показаны эти очки смешанной реальности.

Этот тип пересечения реального и виртуального дает совершенно новое пространство, внутри которого есть возможность взаимодействия. Происходит открытие для себя все более новых возможностей по мере развития технологий.



Рисунок 2: Очки смешанной реальности Microsoft HoloLens

2. Различие технологи и области применения

Основные характеристики, наглядно отражающие различия VR, AR, MR-технологий, представлены на рисунке 3.

Characteristics	Virtual Reality	Mixed Reality	Augmented Reality
Augments the real environment with useful information	✗	✓	✓
Combines virtual elements with the real environment	✗	✓	✗
Transports the user to a virtual environment	✓	✓	✗
Completely replaces the real world	✓	✗	✗
Visual example			

Рисунок 3: Базовые характеристики технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности

Виртуальная реальность у многих людей, в первую очередь, ассоциируется с играми. Скорее всего, это происходит потому, что игровая индустрия первой приняла данную технологию и многие из геймеров подключая, например, шлем PlayStation VR, могут получить полный объем впечатлений от виртуальной реальности. Но в современном мире это далеко не единственная сфера, где успешно применяется технология виртуальной реальности. Список ее достаточно обширен и включает:

- **Образование.** Благодаря VR-технологии учебный контент представлен в более увлекательном, и легком для восприятия виде. Он успешно используется не только для обучения школьников и студентов, но и в различных компаниях, для повышения квалификации своих сотрудников.
- **Торговля недвижимостью.** Использование виртуальной реальности дает возможность потенциальным покупателям лучше увидеть все подробности объекта, еще до личного посещения. Виртуальная реальность открыла новые возможности для проведения захватывающих маркетинговых кампаний и привлечения к своим продуктам максимального количества потенциальных пользователей.
- **Дизайн.** Интерьерные и ландшафтные решения обрели новое зрительное восприятие с появлением виртуальной реальности, давая возможность на новом уровне оценить замысел дизайнера.

- **Здравоохранение.** Являясь иммерсивной технологией, виртуальная реальность открывает новые возможности изучения анатомии человека и выбора наиболее эффективных методов лечения.
- **Туризм.** Виртуальные туры стали неотъемлемой частью индустрии туризма по привлечению клиентов, давая им новый уровень восприятия предстоящих путешествий.

Сфера применения AR также очень многообразна и охватывает широкий сегмент человеческой деятельности. Использование дополненной реальности — это реально работающая технология, предлагающая инновационные решения не только для отдельных людей, но и для различных предприятий.

Среди областей применения наиболее распространены:

- **Реклама.** Благодаря интерактивной и привлекательной AR-рекламе маркетологи получили эффективный инструмент воздействия на пользовательскую аудиторию.
- **Производство.** В сфере промышленной индустрии дополненная реальность позволяет повысить производительность, за счет снижения влияния человеческого фактора и дать конкурентное преимущество за счет повышения эффективности работы.
- **Розничная торговля.** Онлайн покупки совершают миллионы людей в нашем мире, что позволяет экономить время и деньги. Но не всегда выбор товара совпадает с желаемым результатом. AR-приложения дают возможность наглядно видеть приобретаемый через интернет продукт и избежать проблем с правильностью выбора.
- **Навигация.** Использование навигационных приложений успели оценить миллионы людей во всем мире. Они позволяют лучше ориентироваться в пространстве, указывая понятные направления к нужным объектам.
- **Сфера технического обслуживания и ремонта.** AR-приложения дают возможность людям, не имеющим профессиональных навыков, выполнить мелкий ремонт при отсутствии поблизости соответствующего сервиса услуг.

До сих пор многие сталкивались со смешанной реальностью только в фильмах или научно-фантастических романах, где герои использовали сложные устройства для «голографической» коммуникации. Теперь технология смешанной реальности приблизила человеческую цивилизацию к еще недавно казавшемуся невероятным будущему. Существует несколько отраслей, использование MR в которых имеет огромный потенциал:

- **Сфера коммуникаций.** Новый вид общения, который открывает MR технология, может помочь более эффективному сотрудничеству между людьми, когда, надев шлем, можно свободно общаться между собой, находясь в пределах реального мира.
- **Образовательные программы.** Смешанная реальность, наравне с VR и AR, может успешно использоваться в сфере образования, давая возможность студентам видеть захватывающие голограммы, интегрированные в реальный мир. Это дает новый опыт в обучении и позволяет лучше понять изучаемые темы. Это эффективно, как для школьного образования, так и для обучения студентов.
- **Производственная сфера.** Технология смешанной реальности способна упростить производственные процессы, предоставив работникам на определенном этапе эффективную помощь. Голографические инструкции позволят снизить риск человеческого фактора, и исключить ошибки, связанные с ним. Это существенно улучшает качество производства, особенно в сфере технического обслуживания или выполнения ремонтных работ в отраслях, требующих большой точности и опыта.

3. Основные проблемы систем смешанной реальности

Смешанная реальность позволяет визуализировать проект в реальной среде, например, показать 3D-модель будущей архитектурной постройки на том месте, где в будущем она будет сооружена. Существуют различные технологии отображения смешанной реальности. Они делятся на три типа:

- Прозрачный дисплей (optical see through display) — это электронный дисплей, который позволяет пользователю видеть то, что отображается на стеклянном экране, но при этом видеть через него;
- Видеодисплей (video see through display) — это электронный дисплей, который позволяет пользователю увидеть реальность через видеокамеру;
- Виртуальный ретинальный монитор (virtual retinal display) — технология устройств вывода, проецирующая изображение непосредственно на сетчатку глаза. В результате пользователь видит изображение, «висящее» в воздухе перед ним [9].

В основном используются первые два вида систем смешанной реальности, т.е. оптически-прозрачные системы смешанной реальности, аналогичные Microsoft HoloLens и видео-прозрачной системы смешанной реальности, использующие оптическую систему устройства виртуальной реальности и две дополнительные камеры для получения изображения реального мира.

Любая технология имеет свои недостатки. Случай VR/AR/MxR — не исключение. Так, например, зафиксировано, что длительные сеансы виртуальной реальности могут вызывать головокружения, тошноту или головные боли. Причиной тому может служить трансляция изображения с некоторой задержкой. Пока мозг и зрительный аппарат пытаются синхронизироваться между реальными и виртуальными мирами, они перенапрягаются. Иными словами, происходит укачивание, равносильное морской болезни.

Важнейшим, до сих пор, пороком входа в среду VR/AR/MxR служит цена всех устройств, поскольку только мощное оборудование способно решать проблемы задержек при воспроизведении.

В работе [10] проводились исследования конфликтов визуального восприятия, проведенного с использованием рендеринга методом обратных фотонных карт, где были выделены и проиллюстрированы основные источники дискомфорта, которые могут возникнуть при использовании оптически-прозрачной и видео-прозрачной систем смешанной реальности.

В первую очередь рождается необходимость создания естественного освещения виртуальных объектов источниками света реального мира.

Во-вторых, затенение и отражение объектов виртуального и реального мира.

В-третьих, выравнивание уровней яркости виртуального и реального окружения.

Данные проблемы дискомфорта актуальны для обоих типов устройств смешанной реальности. С помощью программных средств реалистичной визуализации есть возможность производить исследования на виртуальном прототипе. Иными словами, можно строить все каналы зрительного восприятия от всех изображений с учетом оптики. Это позволяет не использовать дорогостоящее оборудование, а оценивать предлагаемые решения на виртуальных прототипах.

Для решения поставленных проблем дискомфорта и формирования естественных условий освещения для виртуальных объектов, требуется восстановление условий освещения реального мира, что включает в себя восстановление положений источников света, их интенсивности, направленности и диаграммы излучения.

4. Обзор методов решения проблем смешанной реальности

Восстановление оптических источников освещения — это нетривиальная задача. Существует ряд работ, направленных на построение корректного освещения и восстановлением оптических параметров сцены. Среди таких работ встречается те, которые обрабатывают все изображение попиксельно, а также анализируя соседние пиксели и основываясь на их яркости и интенсивности принимают решения и делают выводы о принадлежности данного участка к какому-либо конкретному классу.

Работа [11] представляет собой анализ освещения на открытом воздухе с использованием полносверточной сети. А вот работа [12] проводит анализ панорамных изображений окружающей среды, а затем под такие условия среды проводит встраивание изображения.

Ввиду того, что фотореалистичные изображения визуализируются через стохастическую трассировку лучей формируется значительный шум. Современные алгоритмы фильтрации шума

не всегда решают проблему полностью. Лучше всего подошёл способ модификации самого процесса стохастической трассировки лучей [13].

Случаев адаптации конкретных алгоритмов под определённые задачи освещения достаточно много. Это можно видеть, например, в работах по восстановлению различного освещения для систем дополненной реальности [14], [15].

Работа [16] демонстрирует формирование теней у объектов дополненной реальности. Для создания условий освещения и формирования теней система моделирует купол с различными параметрами источников света. Каждый параметр выявляется из окружающей среды за источником света. Как результат, можно формировать непосредственное влияние изменений условий освещения на формируемые тени от виртуальных объектов.

Статья [17] показывает метод отбора усеченного вида, позволяющих избежать ситуации отрисовки ненужных теней. След за ней можно видеть применение языка затенения nVIDIA Cg [18].

Ключевым требованием добавления объектов в сцену служит корректность их освещения для естественности при восприятии. Поэтому добавляемые виртуальные объекты должны либо соответствовать условиям реального мира, либо следовать чётким правилам виртуального.

Недостатком выше указанных работ является тот факт, что они работают при одном источнике света без восстановления координат существующих.

Так, например, существуют различные работы по восстановлению положения источников света через обучение нейронных сетей [19], [20]. В

этом случае происходит сегментация всей сцены с целью работы с координатами относительно заданной измерительной системы.

Имеются исследования по восстановлению условий освещения реальных объектов. Работа [21] демонстрирует метод оценки освещенности. В ней происходит обучение сетей через сформированные изображения, анализ реальных изображений, а затем (для точности) объединение результатов оценки освещенности от разных результатов нейронной сети. В итоге наблюдаются достаточно точные оценки от анализа изображений реального мира.

Другая сторона вопроса нашла отражение после достижений в области технологий зондирования: снизились затраты и усилия на сканирование трёхмерных объектов, однако появились запросы на фотометрическое конструирование, в частности определения материала и параметров освещения. В одной из работ проблема визуализации решается с помощью итеративной оптимизации наименьших квадратов, восстанавливающих как падающее освещение, так и материалы с диффузными и зеркальными свойствами.

Другими словами, здесь также сначала сегментируется восстановленная геометрия сцены на поверхности с однородными свойствами материала, а затем вычисляется передача излучения на этих сегментах в форме сферических гармоник [22].

От смешения виртуальных и реальных миров, помимо восстановления освещения по всей сцене, до сих пор остаётся проблема добавления виртуальных объектов, которые не имеют достаточной информации о сцене.

Большинство информации, воспринимаемое человеком (порядка 80%), поступает через зрение. Из этого следует, что важной задачей остаётся синтез естественного и корректного изображения виртуальных объектов на сетчатке глаза человека.

Неправильное освещение объектов может вызывать дискомфорт в восприятии. В результате этого значительно снижается время нахождения человека (оператора) в смешанной реальности, что, в свою очередь, ведёт к дальнейшему ограничению практического использования систем смешанной реальности. В данной работе определяются и формулируются основные критерии и факторы, которые позволят снизить утомляемость оператора при добавлении виртуальных объектов в системах смешанной реальности.

5. Метод оценки корректности освещения на тестовых сценах

Первостепенной задачей в построении метода оценки корректности освещения виртуальных объектов в системах смешанной реальности является формирование некоторого набора сцен с

разными заданными параметрами освещения. Это позволит провести синтез (визуализацию) изображений с естественным и некорректным освещением ряда виртуальных объектов.

Для формирования тестовых сцен использовался Lumiscept — гибридное программное обеспечение, позволяющее выполнять численное моделирование распространения света в установленных сценах. Функциональные возможности предназначены как для оптического моделирования, так и для компьютерных изображений, что позволяет пользователям не только анализировать распространение света, но и генерировать фотореалистичные изображения [23].

В качестве тестовых сцен были выбраны интерьерные сцены. В этой ситуации как нельзя кстати приходится обилие повседневных объектов с различными (различаемыми) формами и свойствами поверхностей.

В каждой сцене изначальным типом источником света был выбран точечный, поскольку он является достаточно простым в расчётах и в виртуальной модели будут использоваться, как правило, простые точечные источники с равноинтенсивной или равномерной диаграммой излучения.

Для создания методики оценки корректности освещения виртуальных объектов было выбрано проведение тестирования на группе из 24 человек, имеющих опыт работы в системах компьютерной графики. Сформированные результаты экспертной оценки позволили построить шкалу для анализа хорошо/плохо с точки зрения естественности восприятия, а также сформулировать основные факторы, влияющие на зрительное восприятие при добавлении виртуальных объектов в системах смешанной реальности.

Проведённый опрос состоял из трёх рубрик, каждая из трёх вопросов и была посвящена отдельным темам:

1. Положение источника света
2. Тени
3. Тип источника света и испускаемая мощность

Каждый вопрос предоставлял 2 различных изображения с четырьмя вариантами ответов, результаты опроса представлены в виде цветовых диаграмм:

- 1) 1 вариант (синий цвет – ●)
- 2) 2 вариант (красный цвет – ●)
- 3) Оба варианта комфортны (желтый цвет – ●)
- 4) Оба варианта некомфортны (зеленый цвет – ●)

Требовалось ответить, вызывают ли какие-то из изображений проблемы с восприятием виртуального объекта в сцене, кажутся ли они достаточно естественными. Никакой более информации не предоставлялось.

Опрашиваемые не знали, на каких изображениях проводилось физически корректное освещение, а на каких добавлялись инородные объекты или иные от сцены параметры освещения. Ниже приведены примеры сцен и результаты оценок.

Левое изображение на рисунке 4 содержало инородный объект, при котором источник света испускался из камеры. Правое же изображение на рисунке 4 имело полностью корректное освещение.

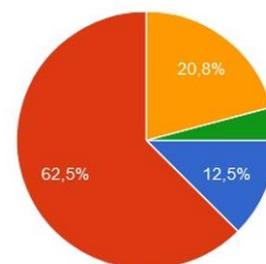
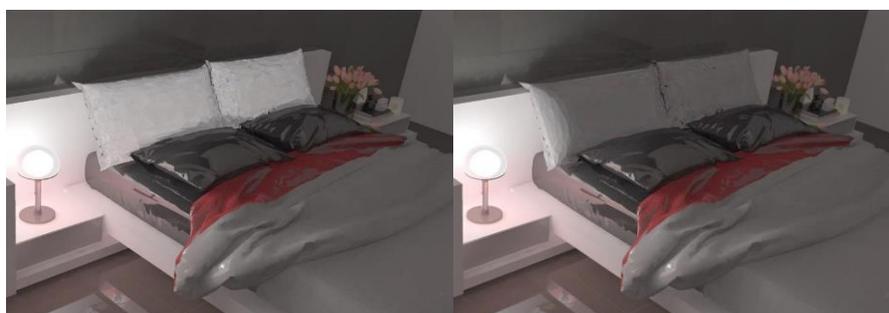


Рисунок 4: Материал вопроса 1 и результаты опроса

Во втором вопросе оба объекта были инородны. На левом изображении источником света служила камера. На правом изображении — источник над объектом. Изображения представлены на рисунке 5.

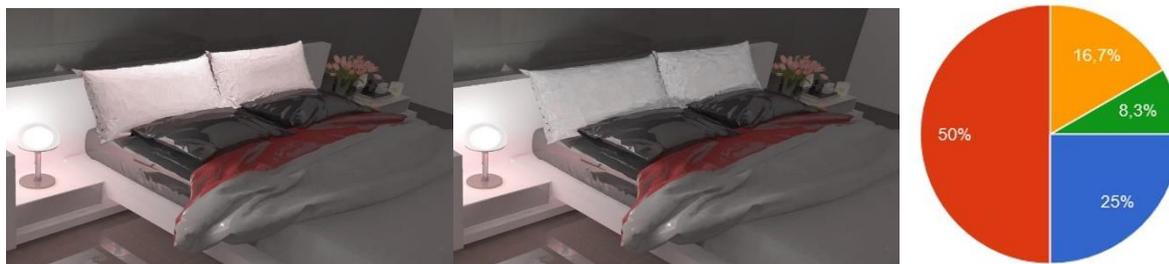


Рисунок 5: Материал вопроса 2 и результаты опроса

Третий вопрос: инородный объект с освещением находился над объектом (практически был виден только контур) на левом изображении и на правом изображении освещение отсутствовало — объект был покрыт стандартной текстурой. Изображения представлены на рисунке 6.



Рисунок 6: Материал вопроса 3 и результаты опроса

В четвёртом вопросе оба изображения были инородными, не имели теней и находились над поверхностью. На левом изображении рисунка 7 объект задевал три поверхности: пол, ближайшую стену и задний объект. На правом изображении рисунка 7 объект задевал только стену.



Рисунок 7: Материал вопроса 4 и результаты опроса

В пятом случае оба инородных объекта содержали равномерное корректное освещение по поверхности, но оба друг у друга имели чужие тени. Левое изображение на рисунке 8 с малой тенью, правое на рисунке 8 с большой.



Рисунок 8: Материал вопроса 5 и результаты опроса

В сцене шестого вопроса источник света был сверху у стены, объект визуально над источником, но фактически немного ближе к камере. На левом изображении рисунка 9 демонстрировалась некорректная тень от объекта под источником света. На правом изображении рисунка 9 — физически корректная, но небольшая в углу вдали.

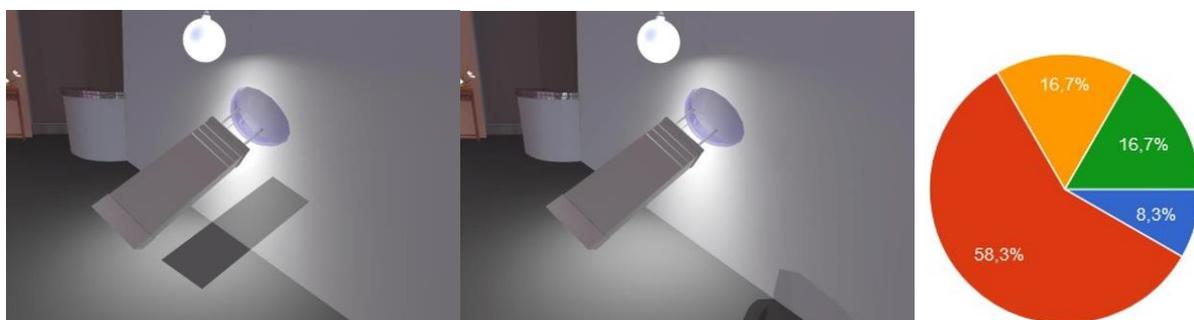


Рисунок 9: Материал вопроса 6 и результаты опроса

Оба варианта седьмого вопроса содержали физически корректное освещение. На левом изображении рисунка 10 использовался протяженный источник света, на правом изображении рисунка 10 — точечный.



Рисунок 10: Материал вопроса 7 и результаты опроса

Восьмой вопрос: общий пересвет сцены со слабым освещением кресла представлен на левом изображении рисунка 11 и пересвет кресла со слабой освещенностью сцены – на правом изображении рисунка 11.

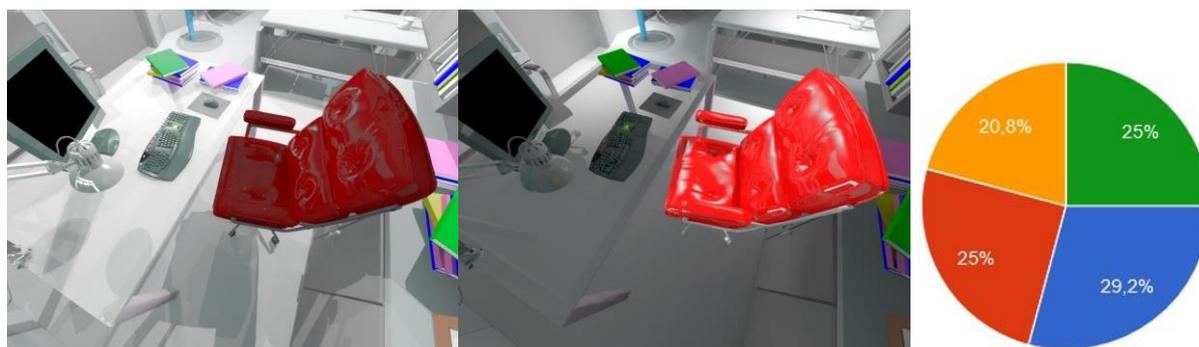


Рисунок 11: Материал вопроса 8 и результаты опроса

Результаты первой группы тестов явно показывают, что направление источника света для освещения объекта смешанной реальности играет значительную роль.

В общем случае опрошенные хорошо отличали физически корректное освещение от некорректного. Однако не было отмечено особого дискомфорта от восприятия инородных объектов, если их освещение было равномерным, находился ли источник света над объектом или был в центре камеры.

Вторая группа тестов определила, что опрошенные испытывают серьёзный дискомфорт от восприятия объекта, который не имеет тени и нарушает условия перспективы. Люди достаточно хорошо видят разницу между корректными и некорректными тенями.

Наличие любой тени от объекта значительно упрощает восприятие, однако теням желательно быть мягкими и небольшими, чтобы не забирали на себя большее внимание, чем на сам объект.

Третья же рубрика вывела иную сторону причин дискомфорта: разительный контраст от типов источника света в сцене и при освещении виртуального объекта. Особенность наблюдается в том, что даже если сама сцена содержит недостаточную или избыточную освещённость, самим объектам желательно учитывать это и иметь схожий тон, чтобы сильно не выделяться на общем фоне изображения.

6. Заключение

В результате работы на базе программного комплекса Lumisert были сформированы и настроены тестовые интерьерные сцены. Были визуализированы различные изображения как с естественным освещением, так и некорректным для ряда объектов в сцене. Были выявлены проблемы и особенности построения таких сцен.

Была создана система тестов, позволяющая построить методику оценки корректности освещения виртуальных объектов в системе смешанной реальности. Сформированные результаты экспертной оценки позволили создать метрики для анализа хорошо/плохо с точки зрения естественности восприятия.

Итоговый результат заключается в формулировании основных факторов, влияющих на зрительное восприятие при добавлении виртуальных объектов в системах смешанной реальности.

Установлено, что в дальнейшем очень важно продолжить улучшать качество восстановления и сегментации геометрии в сцене, а также поиск источников света. В первую очередь это касается определения координат источника света в пространстве, а затем методики формирования корректных теней.

7. Литература

- [1] T. Trout, Collaborative mixed reality (MxR) and networked decision making, Next-Generation Analyst VI. Vol. 10653. International Society for Optics and Photonics, 2018.
- [2] СТА-2069 Definitions and Characteristics of Augmented and Virtual Reality Technologies, Consumer Technology Association Standard, May 2018.

- [3] В.П.Котенко, Техническая реальность: методология анализа II Техническая реальность в XXI веке, Ценологические исследования - Центр системных исследований, вып. 8, 1999.
- [4] В.И. Гнатюк, Теория и методология рангового анализа техноценозов, Калининград: БНЦ РАЕН-КВИ ФПС РФ, 2000.
- [5] В.Г. Горохов, В.М. Розин, Введение в философию техники, М.: ИНФРА-М, 1998.
- [6] Г.Н. Волков, Истоки и горизонты прогресса. Социологические проблемы развития науки и техники, Политиздат, 1976.
- [7] М. Круглов, Основные принципы систем Виртуальной Реальности, Компьютерная газета, Минск: 1999. – № 23 (213) от 15 июня.
- [8] А.Б. Григорьев, Методы и алгоритмы компьютерной графики для моделирования природных явлений и объектов в системах виртуальной реальности, Автореф. дисс. канд. техн. наук. – СПб: 2000.
- [9] M. Livingston, A. Zhuming, and J.W. Decker, Human Factors for Military Applications of Head-Worn Augmented Reality Displays, International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Springer, Cham, 2018.
- [10] J. Kronander, F. Banterle, A. Gardner, E. Miandji, J. Unger, Photorealistic rendering of mixed reality scenes, Computer Graphics Forum, Volume 34, Number 2, page 643--665. May 2015.
- [11] Y. Hold-Geoffroy, K. Sunkavalli, S. Hadap, E. Gambaretto, and J.F. Lalonde, Deep outdoor illumination estimation, In Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017.
- [12] J.F. Lalonde, A.A. Efros, and S.G. Narasimhan, Estimating the natural illumination conditions from a single outdoor image, International Journal of Computer Vision, 2012.
- [13] 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.
- [14] J.M. Frahm, K. Koeser, D. Grest, R. Koch, Markerless Augmented Reality with Light Source Estimation for Direct Illumination, European Conference on Visual Media Production, 2005.
- [15] S. Heymann, A. Smolic, K. Muller, B. Froehlich, Illumination reconstruction from real-time video for interactive augmented reality, International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, 2005.
- [16] P. Supan, I. Stuppacher, and M. Haller, Image Based Shadowing in Real-Time Augmented Reality, 2006.
- [17] C. Everitt, and M.J. Kilgard, Practical and Robust Stenciled Shadow Volumes Hardware-Accelerated Rendering, arXiv preprint, 2003.
- [18] D. Kirk, [CG Toolkit, User's Manual], Nvidia Corporation, Santa Clara, CA, 2002.
- [19] M.I. Sorokin, D.D. Zhdanov, A.D. Zhdanov, Restoration of Lighting Parameters in Mixed Reality Systems Using Convolutional Neural Network Technology Based on RGBD Images, Programming and Computer Software, vol. 46, 2020.
- [20] F. Visin, M. Ciccone, A. Romero, K. Kastner, K. Cho, Y. Bengio, M. Matteucci, A. Courville; ReSeg: A Recurrent Neural Network-Based Model for Semantic Segmentation, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops, 2016.
- [21] D. Mandl, K.M. Yi, P. Mohr, P.N. Roth, P. Fua, V. Lepetit, D. Schmalstieg, and D. Kalkofen, Learning lightprobes for mixed reality illumination, International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2017.
- [22] T. Richter-Trummer, Instant mixed reality lighting from casual scanning, 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2016.
- [23] Lumicept online documentation, 2021. URL: <https://integra.jp/en/products/lumicept>.



Научная визуализация
и визуальная аналитика

Scientific Visualization
and Visual Analytics

GraphiCon 2021

27 – 30 сентября 2021
Нижний Новгород, Россия

Анализ взаимодействия пары направленных по потоку сверхзвуковых вихрей методами визуализации

В.Е. Борисов¹, А.А. Давыдов¹, Т.В. Константиновская¹, А.Е. Луцкий¹

¹ Институт Прикладной Математики им.М.В. Келдыша РАН, Миусская пл., д. 4, Москва, 125047, Россия

Аннотация

В работе выполнены анализ и сравнение взаимодействия пары направленных по потоку сверхзвуковых концевых вихрей при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 3$ с использованием методов визуализации: максимальной завихренности и λ_2 -критерия. Пара сверхзвуковых вихрей генерировалась двумя соосными прямыми крыльями с острыми передней, боковой и задней кромками. Рассмотрены две конфигурации: пара вихрей противоположного вращения и пара вихрей со-направленного вращения. В первом случае угол атаки крыльев был 10° , во втором – угол атаки одного крыла был 10° , второго -10° . Численные данные были получены в области 10 хорд крыльев вниз по потоку от оси крыльев с использованием численной модели на основе URANS уравнений с моделью турбулентности SA. Численные расчеты были проведены на гибридной суперкомпьютерной системе К-60 в Институте Прикладной Математики им. М.В. Келдыша РАН с использованием разработанного пакета программ ARES для моделирования 3D турбулентных течений на высокопроизводительных компьютерных системах. Основные расчеты были проведены с использованием 224 процессоров. Расчеты проводились на неструктурированных сетках с гексагональными ячейками.

Ключевые слова

Идентификация вихря, сверхзвуковой концевой вихрь, пара вращающихся вихрей

Interaction analysis of two streamwise supersonic vortices by visualization methods

V.E. Borisov¹, A.A. Davydov¹, T.V. Konstantinovskaya¹, A.E. Lutsky¹

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047, Russia

Abstract

In this paper we present an analysis and comparison of two streamwise supersonic vortices interaction with using the methods of maximum vorticity and the λ_2 -criterion. Mach number of incoming flow was $M_\infty = 3$. A pair of vortices was generated by two coaxial straight wings with sharp leading, tip and trailing edges. Two configurations are considered: a pair of counter-rotating vortices and a pair of co-rotating vortices. In the case of counter-rotating vortices the wings attack angle was 10 degrees. In the case of co-rotating vortices the attack angle of one of the wings was 10 degrees, the attack angle of other one was -10 degrees. Numerical data were obtained in the domain of 10 wing chords downstream from a wings axis by a computational model based on the URANS equations with SA turbulence model. Numerical simulations were performed on the hybrid supercomputing system K-60 at the Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS using the developed software package ARES for 3D turbulent flows modeling on high performance computing systems. The main

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: narelen@gmail.com (В.Е. Борисов); ryzhiy@list.ru (А.А. Давыдов); konstantinovskaya.t.v@gmail.com (Т.В. Константиновская); alllutsky@yandex.ru (А.Е. Луцкий)

ORCID: 0000-0003-4448-7474 (В.Е. Борисов); 0000-0001-5662-817X (А.А. Давыдов); 0000-0002-1127-503X (Т.В. Константиновская); 0000-0002-4442-0571 (А.Е. Луцкий)

simulation was performed on 224 cores. The simulations were carried out on unstructured grids with hexagonal cells.

Keywords

Vortex identification, supersonic tip vortex, vortex pair

1. Введение

В современном мире с широко и активно развивающимися технологиями сохраняется высокий интерес к развитию сверхзвуковых летательных аппаратов как в военной промышленности, так и в гражданской авиации. В частности, важной задачей аэродинамики является изучение пары концевых вихрей, т.к. различные вихревые структуры образуются при полете любого летательного аппарата (ЛА) на кромках различных элементов ЛА, в том числе, крыльев. Дозвуковые концевые вихри изучены достаточно хорошо, в то время как сверхзвуковые вихри нуждаются в дальнейшем изучении при различных режимах.

Для постобработки, анализа и сравнения полученных данных используются, в частности, специальные методы визуализации вихревых течений. Соответствующие обширные обзоры были сделаны, в частности, в [1-4].

В работе представлены результаты сравнения распространения пары противоположно вращающихся сверхзвуковых концевых вихрей в двух конфигурациях: противоположного вращения и со-направленного вращения. В процессе анализа и сравнения использовались метод максимальной завихренности и λ_2 -критерий визуализации вихревых структур.

2. Конфигурации к сравнению

Методы визуализации применены для проведения сравнительного анализа данных, полученных при моделировании пары противоположно и со-вращающихся сверхзвуковых вихрей при числе Маха набегающего потока $M = 3$. Углы атаки крыльев-генераторов к набегающему потоку для случая противоположного вращения были 10° , а для случая со-вращения угол атаки одного крыла был 10° , а другого -10° .

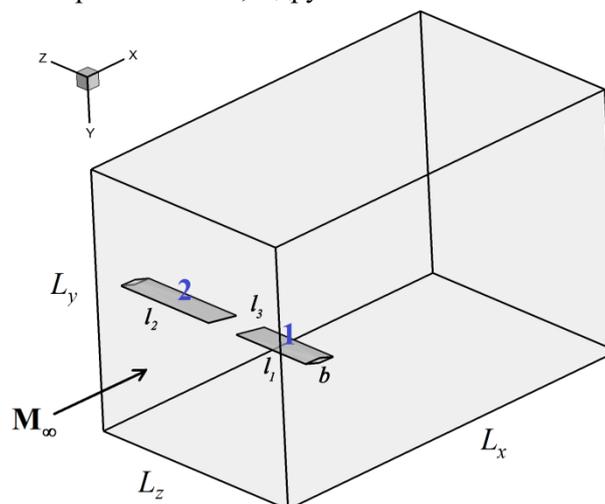


Рисунок 1: Общая схема модели: случай противоположного вращения

Численно исследовались и сравнивались течения за двумя соосными крыльями с острыми передней, задней и боковой кромками и ромбовидным основанием (рис.1). Крылья крепились основанием к стенкам, параллельным направлению потока. Конфигурация модели для случая пары противоположного вращения полностью совпадает с изложенной в [5]. Конфигурация

модели для случая пары со-вращения отличается поворотом одного из крыльев-генераторов до позиции -10° к набегающему потоку (было повернуто крыло 1, рис.1).

Численные расчеты проводились в безразмерных величинах [4], за единицу длины бралось $L = 1$ м. Размеры расчетной области были следующими: $L_x = 0.35$, $L_y = 0.225$ and $L_z = 0.2$. Геометрия используемых крыльев была одинакова для обеих рассмотренных конфигураций: хорда каждого крыла была равна $b = 0.03$, полуразмах первого крыла $l_1 = 0.075$, второго - $l_2 = 0.095$. Толщина ромбовидного основания обоих крыльев равнялась $h = 0.004$. Расстояние между концевыми хордами крыльев составляло $l_3 = 0.03$. Таким образом, ширина области между стенками была $H = 0.2$. Ось x бралась со-направленной набегающему потоку. Ось z совпадала с общей осью крыльев. Ось y была направлена с подветренной стороны крыльев в наветренную сторону. Рассматривалась область длиной 10 хорд крыла вниз по потоку от общей оси крыльев. Число Рейнольдса в расчетах задавалось равным $Re_L = 1 \times 10^7$.

3. Численный расчет

Численное моделирование проводилось с помощью разработанного авторами программного комплекса ARES [6] для расчета трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа на высокопроизводительных вычислительных системах в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН на суперкомпьютере К-60 [7]. Численный метод основан на решении нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса [8, 9]. Для дискретизации уравнений по пространству использовался метод конечных объемов с реконструкциями 2-го (TVD) и 3-го (WENO) порядков. Временная аппроксимация была выполнена на основе явной схемы. Для расчетов использовалась неструктурированная гексагональная сетка, состоящей из 25 774 200 ячеек для случая пары противоположно вращающихся вихрей и 35 763 750 для со-вращающейся пары. Было проведено сгущение сетки в зоне формирования и распространения вихрей для лучшего разрешения. Разница в количестве ячеек связана с перестроением сетки и с тем, что в первом случае сгущение проведено с одной стороны от крыльев, а во втором – с двух сторон. Расчеты проводились на 224 процессорах.

4. Визуализация вихрей

Для определения вихревых структур на гексагональных сетках внутри программного комплекса ARES был разработан отдельный постпроцессинговый модуль расчета данных. В нем реализован метод максимальной завихренности для поиска оси вихря в заданной подобласти расчётной сетки в предположении его единственности внутри подобласти (для однозначности идентификации оси в случае наличия в области нескольких вихрей). Для применения λ_2 -метода вычислены необходимые матрицы. Выходные данные вихревых структур формируются модулем в формате пакета программ Tecplot, с помощью которой в дальнейшем осуществляется визуализация результатов расчетов.

4.1. λ_2 -метод визуализации

λ_2 -метод (или критерий) для идентификации вихревых структур является достаточно широко распространенным и часто применяется при обработке данных. Он был предложен в работе [10]. Согласно данному критерию область вихревого течения определяется исходя из анализа собственных чисел симметричной матрицы $S^2 + \Omega^2$, которые всегда вещественны (здесь S и Ω соответственно тензоры деформации и завихренности течения). Вихревой

областью при этом считается часть пространства, в которой второе собственное число $\lambda_2 < 0$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$).

4.2. Метод максимальной завихренности

Метод максимальной завихренности был предложен в работе [11]. Этот метод основан на одном из определений вихревого течения и заключается в нахождении локального максимума модуля вектора завихренности в плоскости, перпендикулярной направлению этого вектора. Этот метод позволяет определить точную ось продольного вихря в случае достаточного разрешения расчетной сетки.

5. Применение методов визуализации

В этой части работы представлены результаты анализа и сравнения численных данных методами визуализации.

5.1. Противоположно вращающаяся пара сверхзвуковых вихрей.

Применение λ_2 -метода и метода максимальной завихренности визуализации вихревых структур к рассматриваемой конфигурации пары противоположно вращающихся сверхзвуковых вихрей было продемонстрировано в [5]. Повторим здесь основные результаты.

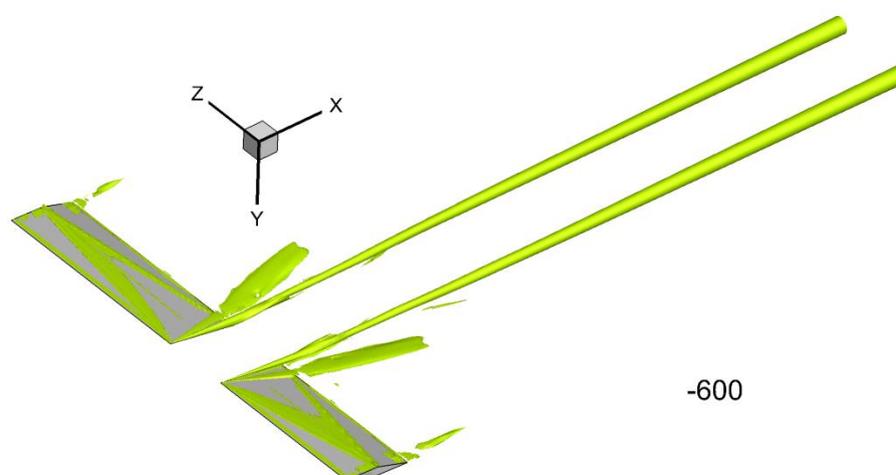


Рисунок 2: Результат применения λ_2 -метода визуализации к паре противоположно вращающихся сверхзвуковых концевых вихрей, изоповерхности уровня $\lambda_2 = -600$

λ_2 -метод позволяет определить область вихревого течения. Результаты его применения к паре противоположно вращающихся сверхзвуковых вихрей показаны на рис. 2, на котором визуализированы изоповерхности $\lambda_2 = -600$.

На рис. 3 показаны линии уровня $\lambda_2 = -600$ в сечениях, перпендикулярных направлению набегающего потока: $x = 0.1$ (синий круг), $x = 0.2$ (зеленый круг), $x = 0.3$ (черный круг). Наблюдается увеличение диаметра вихревого ядра о мере удаления вниз по потоку от оси крыльев-генераторов.

Отмечено смещение противоположно вращающихся сверхзвуковых вихрей в подветренную сторону, что соотносится с данными других авторов [12], и их отталкивание друг от друга на рассмотренной дистанции вниз по потоку от оси крыльев.

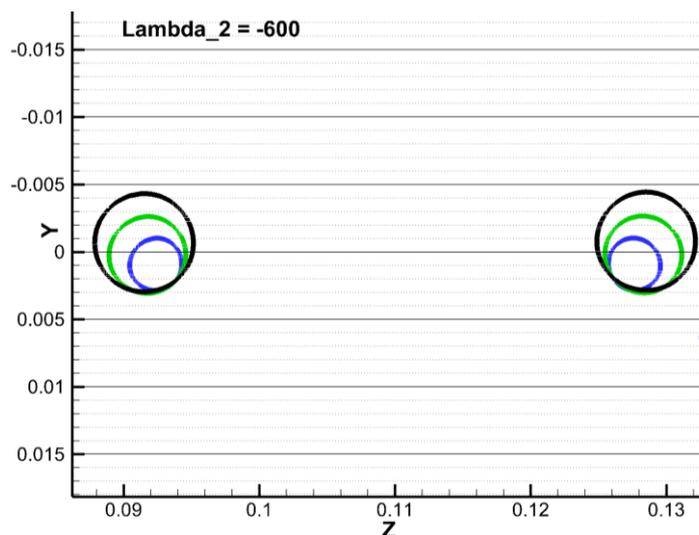


Рисунок 3: Линии уровня $\lambda_2 = -600$ в поперечных сечениях $x = 0.1$ (синяя линия), $x = 0.2$ (зеленая линия), $x = 0.3$ (черная линия), противоположно вращающиеся вихри

Результат применения метода максимальной завихренности к паре противоположно вращающихся сверхзвуковых вихрей показан на рисунке 4, им определены оси вихрей.

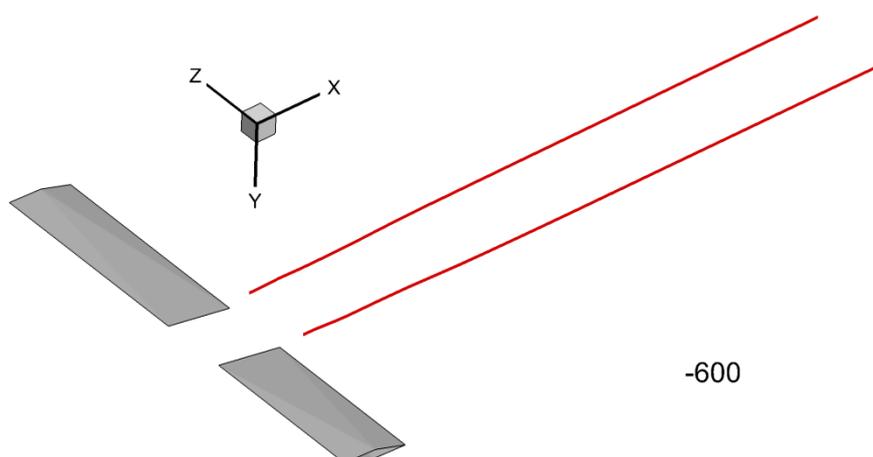


Рисунок 4: Определенные методом максимальной завихренности оси противоположно вращающихся сверхзвуковых вихрей (красные линии)

На рис. 5 представлены графики вертикальной координаты y осей противоположно вращающейся пары вихрей и переменной S (расстояние между координатой z оси вихря и концевой хордой соответствующего крыла-генератора). Эти графики, так же, как и рис. 3, демонстрируют смещение осей вихрей.

На рис. 6 показаны результаты суперпозиции метода максимальной завихренности и λ_2 -критерием научной визуализации, примененных к паре противоположно вращающихся сверхзвуковых вихрей: красные линии оси вихрей расположены внутри желто-зеленой области вихрей (изоповерхности $\lambda_2 = -600$). Оба метода показывают соотносящиеся друг с другом результаты и дополняют друг друга.

5.2. Со-вращающаяся пара сверхзвуковых вихрей.

Далее в работе представлены результаты применения двух указанных методов визуализации к паре со-вращающихся сверхзвуковых вихрей.

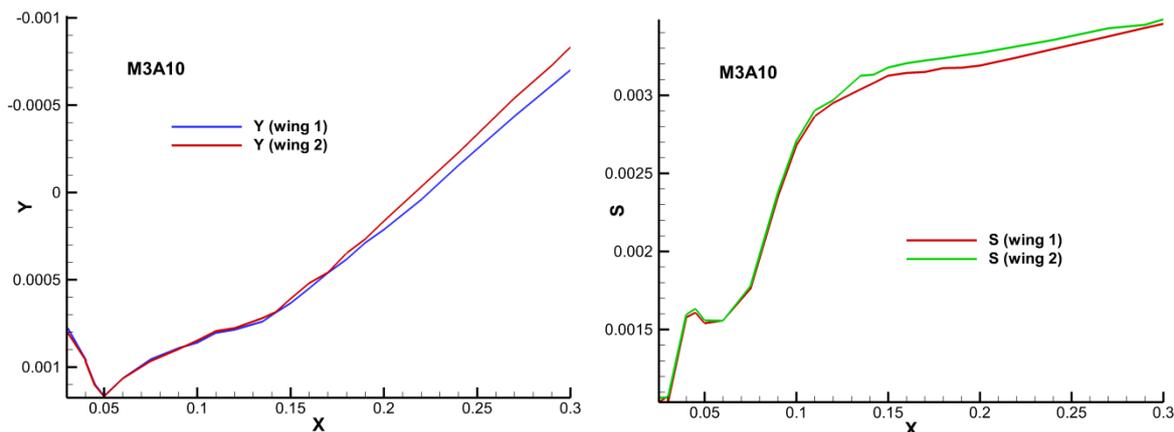


Рисунок 5: Графики осей координат пары противоположно вращающихся вихрей, определенных методом максимальной завихренности: вертикальная координата y (слева) и переменная S (справа).

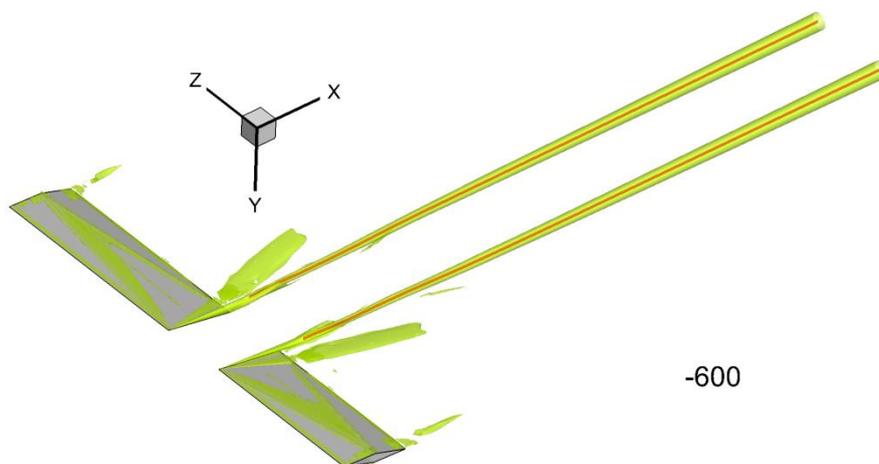


Рисунок 6: Результат суперпозиции осей пары противоположно вращающихся вихрей (красные линии), найденных методом максимальной завихренности, и области вихрей, полученной λ_2 -методом, изоповерхности $\lambda_2 = -600$

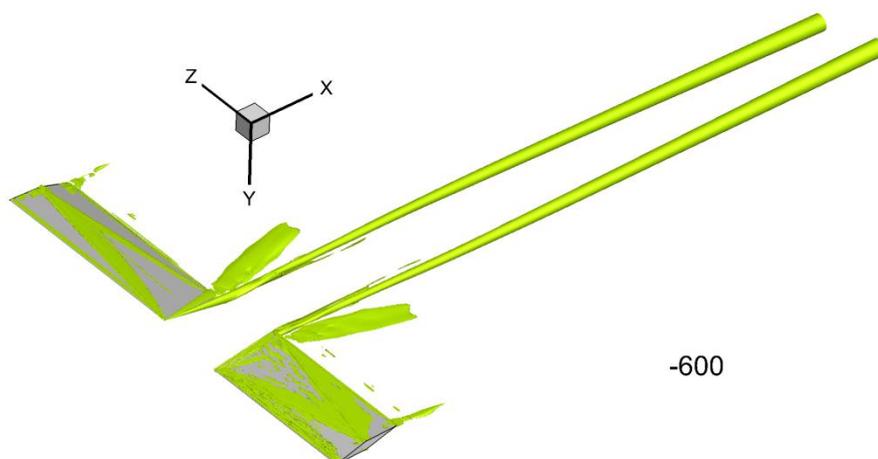


Рисунок 7: Результат применения λ_2 -метода визуализации к паре со-вращающихся сверхзвуковых концевых вихрей, изоповерхности уровня $\lambda_2 = -600$

На рис. 7 показаны области распространения вихрей, определенные λ_2 -методом визуализации, отображены изоповерхности $\lambda_2 = -600$.

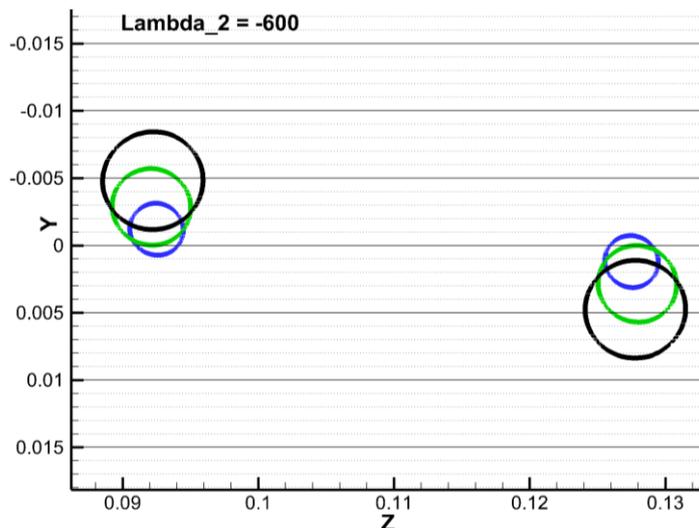


Рисунок 8: Линии уровня $\lambda_2 = -600$ в поперечных сечениях $x = 0.1$ (синяя линия), $x = 0.2$ (зеленая линия), $x = 0.3$ (черная линия), со-вращающиеся вихри

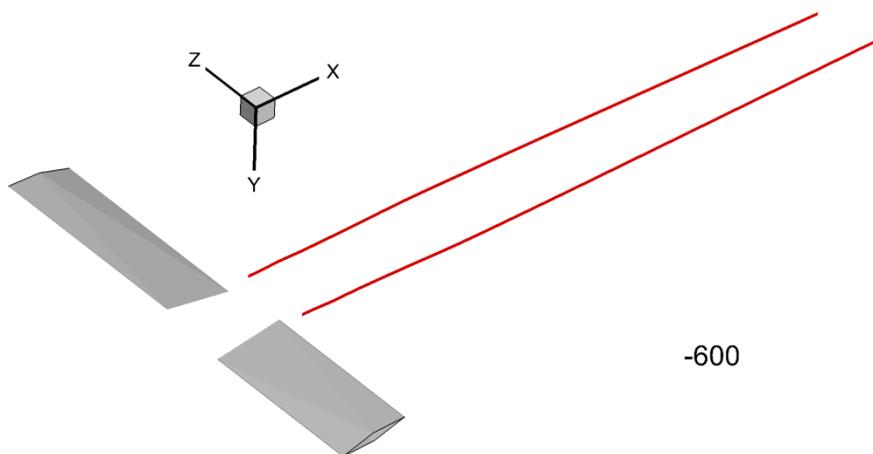


Рисунок 9: Определенные методом максимальной завихренности оси со-вращающихся сверхзвуковых вихрей (красные линии)

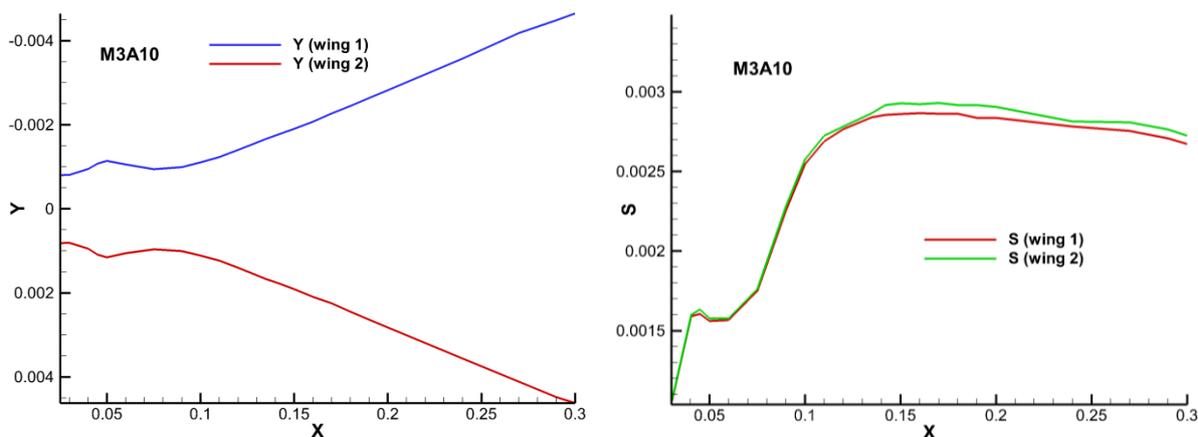


Рисунок 10: Графики осей координат пары со-вращающихся вихрей, определенных методом максимальной завихренности: вертикальная координата y (слева) и переменная S (справа).

На рис. 8 изображены линии уровня $\lambda_2 = -600$ в поперечных направлении основного потока сечениях $x = 0.1$ (синяя линия), $x = 0.2$ (зеленая линия), $x = 0.3$ (черная линия). Диаметр вихревых ядер увеличивается по мере удаления вниз по потоку от крыльев-генераторов.

Отмечено круговое смещение со-вращающихся сверхзвуковых вихрей в направлении, совпадающем с направлением вращения вихрей. Это соотносится с данными других авторов [13].

Результат определения осей пары со-вращающихся сверхзвуковых вихрей, полученных методом максимальной зависимости визуализации вихревых структур, показан на рис. 9.

Рис. 10 демонстрирует графики смещения осей пары со-вращающихся сверхзвуковых вихрей согласно изменению вертикальной координаты y и переменной S (расстояние между координатой z оси вихря и концевой хордой соответствующего крыла-генератора).

На рис. 11 показано совместное положение осей пары со-вращающихся сверхзвуковых вихрей, определенных методом визуализации максимальной завихренности (красные линии) и области сформировавшихся вихрей, определенных λ_2 -критерием (желто-зеленые изоповерхности $\lambda_2 = -600$). Результаты применения обоих методов научной визуализации хорошо согласуются друг с другом.

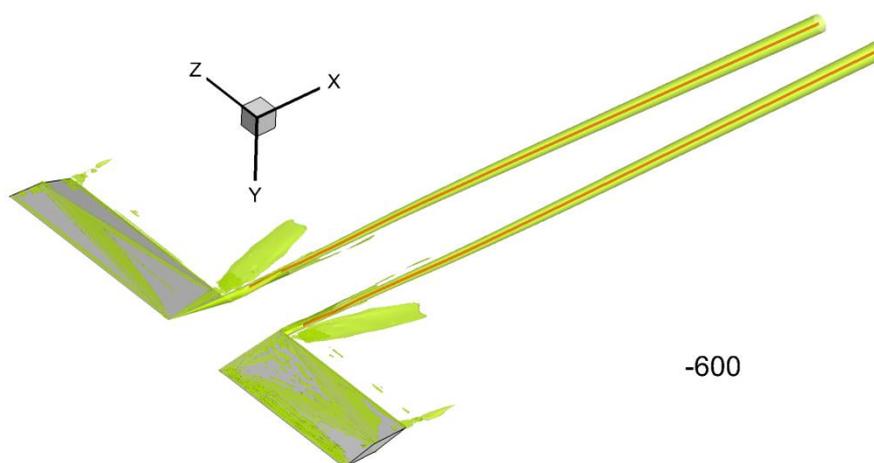


Рисунок 11: Результат суперпозиции осей пары со-вращающихся вихрей (красные линии), найденных методом максимальной завихренности, и области вихрей, полученной λ_2 -методом, изоповерхности $\lambda_2 = -600$

6. Выводы

В работе отражены результаты проведенного анализа и сравнения взаимодействия пары сверхзвуковых вихрей методами научной визуализации при числе Маха набегающего потока $M = 3$. Использовано два метода: λ_2 -критерий и метод максимальной завихренности. Рассмотрены две конфигурации: пары противоположно и со- вращающихся вихрей.

Для численных расчетов анализируемых данных использовался разработанный пакет программ ARES расчета трехмерных турбулентных течений. Расчеты проводились на 224 процессорах гибридной суперкомпьютерной системы К-60 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Получено, что в обоих случаях вихри представляют собой продольные конусообразные структуры, чей диаметр постепенно расширяется по мере удаления вниз по потоку от оси крыльев-генераторов.

Определены оси вихрей методом максимальной завихренности визуализации течений. После зоны немонотонности, связанной с зоной формирования вихрей, показано смещение вихрей для обоих рассмотренных случаев на рассмотренных дистанциях. Для случая противоположно вращающихся вихрей наблюдается их смещение в подветренную сторону крыльев-генераторов и легкое их расхождение друг от друга. Для случая со-вращающихся вихрей наблюдается вращение вихрей друг вокруг друга в направлении совпадающем с

направлением вращения в теле вихрей. Таким образом, наблюдается взаимное влияние вихрей друг на друга при их совместном распространении.

7. References

- [1] C.D. Hansen, C.R. Johnson (Eds.), *The Visualization Handbook*, NY: Academic Press, 2004, 984 p.
- [2] P. Chakraborty, S. Balachandar, R. G. Adrian, On the relationships between local vortex identification schemes, *J. Fluid Mech.* (2005), volume 535, 189-214.
- [3] V. Kolář, *Brief Notes on Vortex Identification*, Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat and Mass Transfer and Biology, WSEAS Press, 2011, pp 23-29.
- [4] К. Н. Волков, Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач, *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики* (2014), том 14 (3).
- [5] V.E. Borisov, A.A. Davydov, T.V. Konstantinovskaya, A.E. Lutsky, Application of scientific visualization tools in the study of supersonic vortex pair, *Scientific Visualization* (2020) volume 12, number 4, 46 - 55, doi: 10.26583/sv.12.4.05 Communications of the ACM 50 (2007) 36–44. doi:10.1145/1188913.1188915.
- [6] В.Е. Борисов, А.А. Давыдов, И.Ю. Кудряшов, А.Е. Луцкий, Программный комплекс AREС для расчета трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа на высокопроизводительных вычислительных системах (2019). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019667338, выдано 23.12.2019.
- [7] <https://www.kiam.ru/MVS/resources/k60.html>
- [8] В.Е. Борисов, А.Е. Луцкий, Моделирование перехода между регулярным и маховским отражением ударных волн с помощью неявной схемы на основе методов LU-SGS и BiCGStab, *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша* (2016), № 68, 36 с.
- [9] S. R. Allmaras, F. T. Johnson, P. R. Spalart, Modifications and Clarifications for the Implementation of the Spalart-Allmaras Turbulence Model, 7th Int. Conf. on CFD (ICCFD7) 2012, Big Island, Hawaii (9-13 July 2012), ICCFD7-1902.
- [10] J. Jeong, F. Hussain, On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics* (1995), volume 285, pp. 69–94.
- [11] R.C. Strawn, D.N. Kenwright, J. Ahmad, Computer visualization of vortex wake systems, *AIAA Journal* (1999), volume 37(4), pp. 511–512.
- [12] K. J. Forster, T. J. Barber, S. Diasinos, G. Doig, Interaction of a counter-rotating vortex pair at multiple offsets, *Experimental Thermal and Fluid Science J.* (2017), volume 86, pp. 63-74.
- [13] Y. Wang, P. Liu, T. Hu, Q. Qu, Investigation of co-rotating vortex merger in ground proximity, *Aerospace Science and Technology* (2016), volume 53, pp. 116-127.

Визуализация информации инструментами сетевых сервисов

Е.С. Жарина¹, Ю.С. Ризен²

¹ Томский Политехнический Университет, Проспект Ленина 2, Томск, 634028, Россия

Аннотация

Визуализация данных находит свое применение во многих дисциплинах как современный эквивалент визуальной коммуникации, и наряду с этим не принадлежит ни одной из конкретных областей, а имеет свою значимость в представлении информации, готовых данных посредством использования инструментов визуализации.

В процессе научной коммуникации возникает проблема возможности методов представления информации, которая будет понятна пользователю. Поэтому в процессе экспоненциального роста документального потока информации, возрастает потребность в сжатии информации, наглядности, сохраняя целостность отображения главной мысли и компактного обобщения данных. В статье рассматривается визуализация данных как способ представления информации и варианты использования интерактивных сетевых сервисов для визуализации контекстной информации. На конкретных примерах тестируется и представляется применение таких технологий (сервисов) для представления готовых данных или информации, которая является более наглядным, доступным способом для восприятия, понимания и запоминания.

Изучение онлайн сервисов как инструментов визуализации данных могут применяться и иметь практическую ценность в образовательных процессах.

Целью исследования было: поиск и изучение эффективных методов представления данных и наглядно продемонстрировать использование данного метода посредством онлайн сервисов как инструментов визуализации данных.

Актуальность работы состоит в применении методов представления информации в качестве сервисов и инструментов для автоматизации представления анализа, этапов или результатов работы.

Ключевые слова

Визуализация данных, информация, онлайн сервисы, образовательный процесс, инструменты, автоматизация, результаты.

1. Введение

1.1 Понятийный аппарат

1.1.1 Определение визуализации данных

Визуализация данных является методом представления данных в живописной или графической форме, а также методом представления данных или информации с помощью их кодирования. Визуализация данных является основой современного информационного проекта. Без соответствующих графических образов нельзя представить информацию, научные исследования, технические разработки и т.д. [1].

Проблематикой методологии визуализации данных занимались многие ученые, дидактики и классики, такие как: Я. А. Коменский, М.И. Махмутов, Дж Дьюи, К.Д. Ушинский и т.д. [2].

Поскольку данные методы не относятся к одной определенной области деятельности или дисциплине, а могут использоваться во многих сферах, в зависимости от поставленных задач, реципиента и функции представляемого контента, и чтобы отнести объект или информацию к той или иной категории необходимо опереться на ряд задач, критериев и оценки [3].

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: esz13@tpu.ru (Е.С.Жарина); yulja_vit@tpu.ru (Ю.С.Ризен);

ORCID: 0000-0003-3943-7325 (Е.С.Жарина); 0000-0003-4533-3370 (Ю.С.Ризен)

По целям представления данных визуализация подразделяется на несколько категорий: презентационная – представление данных для конкретной аудитории (в рамках учебных работ, доклады или аналитические новости), исследовательская – для анализа и обработки набора данных (обнаружение закономерностей) и гибридная – т.е. презентация с заложенной информацией, в дополнении которой, создается возможность наиболее подробно изучить набор данных посредством интерактивных элементов [4].

2. Задачи визуализации данных

2.1 Прикладная тематика

Визуализация данных решает большое количество задач они из них: производство, наука, журналистика, исследование, педагогика, статистика, образование [5]. Исходя из решения задач, которые может осуществить данный метод, в рамках проведенного исследования и выявление практической значимости визуализации данных в использовании инструментов сетевых сервисов и их применение в образовательном (учебном) процессе.

На сегодняшний день в современном образовании изменяются цели и задачи, где внимание акцентируется в большей степени на «усвоении знаний» и формировании «компетентности». Адаптация новых методов и приемов к процессу образования необходима, поскольку все это, как и в целом мир, развивается спиралеобразно, улучшая, модернизируя существующие приемы – одним из таких является визуализация.

Большинство психологов сходятся во мнении что, визуальная информация намного лучше усваивается и запоминается тогда, когда знания закрепляются в визуальной - пространственной памяти, а представление информации в структурированном виде помогает быстро и качественно усвоить новые понятийные системы и способы их работы.

Примеры наглядности достаточно давно применяются в образовании, насчитывается более сотни таких методов визуального структурирования – от традиционных диаграмм и графов до стратегических карт, схем-пауков и таблиц и пр.

Набор инструментов визуализации достаточно обширен – от простых линейных графиков до сложных отображений множества связей. На сегодняшний момент один из популярных методов это использование онлайн сервисов. Использование таких сервисов поможет как ученикам, так и студентам в образовательном процессе, структурировать свой материал, проводить анализ полученной информации, находить решения необходимых задач, а также грамотно представлять результаты своих работ, плюсом ко всему обрести новые знания и умения в работе с новыми платформами. Такие платформы также могут стать одними из инструментов использования студентов направлений дизайна, когда еще не получено навыков использования инструментов компьютерной графики, а структуру и результаты промежуточных этапов работы, представления данных нужно сдать. На основании собранных данных, среди существующих примеров было изучено более 100 сервисов, главным критерием которых изначально было возможность визуализировать данные. Для того, чтобы выбрать наиболее эффективные, простые, доступные для большинства пользователей сервисы, был выдвинут ряд критериев, представленный в таблице 1, а также посредством использования метода экспертной оценки с помощью платформы «гугл-опрос» участие в котором приняли больше 110 человек в возрасте от 14 до 58 лет, среди них: школьники, студенты (большая часть), преподаватели и интернет-пользователи заинтересованные в изучении новых платформ. После проведенного исследования было выбрано несколько платформ, решающие ряд определённых задач, в том числе доступные для большинства пользователей, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Выбранные онлайн-сервисы и их критерии

	Название сервисов			
Задачи:	Canva [6]	Piktochart [7]	Venngage [8]	Visme [9]

Интуитивно понятный интерфейс	+	+	+	+
Подходит для всех пользователей	+	+	+	+
Подходит больше для дизайнеров	+			+
Импорт своих имеющихся данных	+	+	+	+
Возможность экспорта в необходимые форматы (jpg, pdf, PowerPoint, MP4, GIF)	+	+	+	+
Наличие шаблонов и шрифтов	+	+	+	+
Языковая версия (англ., Русский)	+	+	+	+
Возможность хранения информации	+	+	+	+
	(лимит)	(лимит)	(лимит)	(лимит)
	(платная версия-больше памяти)	(платная версия-больше памяти)	(платная версия-больше памяти)	(платная версия-больше памяти)

Каждый сервис, представленный в таблице, имеет интуитивно понятный дизайн, который не требует предварительных изучений или базовых знаний для использования. В каждом из данных платформ есть разделы необходимые под решения определённых задач: презентации, баннеры, диаграммы, схемы, анимация (видео-формат) для этого необходимо только перейти на страницы данных платформ выбрать необходимую категорию, далее откроется существующие шаблоны, которые можно править и можно работать.

Данные онлайн сервисы обладают как бесплатными версиями, так и платными, в платный соответственно больше доступный функционал, но и в бесплатной версии можно решить все необходимые задачи в грамотной подаче данных.

3. Применение

Для наглядности и возможности использования сервисов, на практике были протестированы данные платформы, для решения определенных задач одного из учебных проектов, в котором необходимо было получить промежуточные данные и грамотно представить их в графическом виде.

6. Разработка рабочей конструкторской документации		35	
7. Сопровождение	1	35	
Итого:		247	

Прогноз финансовых результатов деятельности предприятия промышленного типа «Фьюжен» представлен в таблице 18

Таблица 18 – План доходов и расходов

Наименование статьи	Величина показателя по годам проекта		
	1-й год	2-й год	3-й год
1. Объем продаж, тыс. руб.	12	20	23
2. Цена за выключатель, тыс. руб.	247	247	290
3. Выручка от продаж, тыс. руб.	2964	4940	6670
4. Условно-переменные затраты	41,4	69	79,33
5. Условно-постоянные затраты	4406,4	4406,4	4406,4
7. Прибыль до вычета налогов	-1483,8	464,6	2184,65
10. Налог на прибыль		92,98	436,93
11. Чистая прибыль		371,62	1748,62

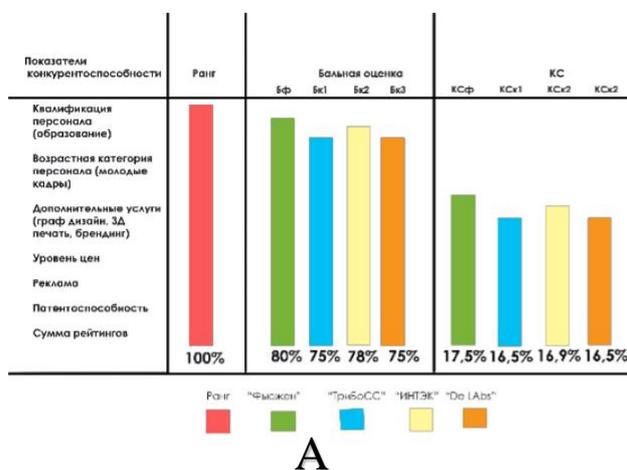
Следующим этапом было проведение анализа безубыточности, цель которого заключалась в определении точки безубыточности, момента, когда предприятие перестает нести убытки. Есть два способа определения

A



B

Рисунок 1: A) без применения онлайн-платформ B) с использованием платформы Visme



A



B

Рисунок 2: A) без применения онлайн-платформ B) с использованием платформы Canva

4.3. Заключение

Таким образом, из проведенного исследования удалось выявить и определить об эффективности использования сетевых сервисов в образовательном процессе, которые помогут ученикам и студентам доступно и интересно представить необходимые результаты данных, а также своих работ.

Можно сделать вывод о том, что не стоит игнорировать визуализацию, так как она не только автоматизирует учебную работу, а наоборот способствует развитию образно-эмоциональной памяти обучающихся и формирует множество новых умений и навыков.

Поэтому с помощью использования новых методов таких как сетевые сервисы можно модернизировать учебный процесс, так как они предлагают множество новых перспектив и возможностей. Одно из таких важных и широких направлений применения и использования визуализации данных, дает возможности визуализации практически любой информации, а также активизировать образовательный процесс за счет усиления наглядности и сочетания логического и образного усвоения информации и ее представления.

5. Литература

- [1] Н.Б. Паклин, В.И Орешков, Визуализация данных, бизнес-аналитика. От данных к знаниям. 2-е изд. СПб, стр. 11-17 (2013).
- [2] Ю. Ветров, Визуализация данных: классификация стр. 18-24, (2015). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualizatsiya-informatsii-sredstvami-setevykh-servisov/viewer>
- [3] Г.А. Никулова, А.В. Подобных, Средства визуальной коммуникации – инфографика и метадизайн, Международный электронный журнал КНИТУ «Образовательные технологии и общество» (Educational) – Т. 13, стр. 55-77, (2010).
- [4] Н.Н. Лукашенко. Научный журнал «NovaInfo», Инфографика как средство визуализации информации, используемой в педагогическом процессе (2016). URL: <http://novainfo.ru/article/9499>
- [5] О.Н. Ивашова, Е.А. Яшкова, Применение облачных технологий в образовательном процессе, Наука и перспективы (2015). URL: <http://nip.esrae.ru/>
- [6] Canva кроссплатформенный сервис для графического дизайна (2012). URL: <https://www.canva.com/>
- [7] Piktochart веб-инструмент графического дизайна (2012). URL: <https://piktochart.com/>
- [8] Vanngage сервис для создания визуального контента (2011). URL: <https://ru.venngage.com/>
- [9] Visme инструмент онлайн-дизайна (2010). URL: <https://www.visme.com/>



Геометрическое моделирование.
Компьютерная графика в образовании

Geometric Modelling.
Computer Graphics in education

GraphiCon 2021

27 – 30 сентября 2021
Нижний Новгород, Россия

Конструктивные геометрические модели и их применение в проектно-конструкторской деятельности

А.А. Бойков¹

¹РТУ МИРЭА, Проспект Вернадского, д. 78, г. Москва, 119454, Российская Федерация

Аннотация

Анализируются особенности проектно-конструкторской деятельности. Отмечается, что значительная ее часть состоит в создании геометрической составляющей электронных моделей изделий. Делается вывод об актуальности разработки алгоритмов и программных средств, которые упрощают создание и повышают качество геометрической части электронных моделей изделий. Анализируются понятия, введенные ГОСТом, и показывается, что на разных этапах проектно-конструкторской деятельности геометрическая часть электронной модели включает в себя множество геометрических и графических моделей. При этом с точки зрения конструктивного геометрического моделирования, тесно связанного с проектно-конструкторской деятельностью, нет принципиальной разницы между плоскими и трехмерными геометрическими моделями и их следует рассматривать единообразно. Вводится понятие конструктивной геометрической модели, позволяющее объединить электронные геометрические модели и электронные чертежи. Конструктивная геометрическая модель может одновременно содержать плоские, трехмерные и многомерные геометрические данные, которые по необходимости отображаются с применением тех или иных средств компьютерной графики. Для представления конструктивных геометрических моделей предлагается использовать визуальную и текстовую формы, приводятся их особенности и области применения. Показывается применение конструктивных геометрических моделей для автоматизации создания электронных геометрических моделей, а также проверки электронных чертежей и моделей.

Ключевые слова

CAD-системы, конструктивные геометрические модели, язык геометрических построений, автоматическая проверка

Constructive geometric models and their application in design and engineering activities

A.A. Boykov¹

¹MIREA — Russian Technological University, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russian Federation

Abstract

The features of design and engineering activities are analyzed. It is noted that the main part of the design and engineering activity belongs to the development of the geometric component of electronic product model. It is concluded that the development of algorithms, methods and software to simplify the creation or improve the quality of geometric data is relevant. The terms introduced by the State Standard are analyzed and it is shown that at different stages of design and engineering activities, the geometric component of electronic product model includes a plurality of geometric and graphic models. At the same time, from

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: alborph@mail.ru (А.А. Бойков)

ORCID: 0000-0002-2068-1267 (А.А. Бойков)

the point of view of constructive geometric modeling, closely associated with design and engineering activities, there is no fundamental difference between flat and three-dimensional geometric models, and they should be considered uniformly. The concept of a constructive geometric model, combining electronic geometric models and electronic drawings, is introduced. A constructive geometric model can simultaneously contain flat, three-dimensional and multidimensional geometric data, which can be displayed using different computer graphics tools. Text and visual forms are offered to represent constructive geometric models. The features and areas of applying a visual and text presentation of constructive geometric models are given. The article considers the use of constructive geometric models to automate the creation of electronic geometric models, as well as verification of electronic drawings and models.

Keywords

CAD, constructive geometric model, geometry constructions language, automatic verification

1. Введение

Проектно-конструкторская деятельность занимает центральное место в жизни общества, поскольку, в широком смысле, затрагивает (инициирует) любые перемены в окружающей человека среде [1]. При этом очевидна тенденция к усложнению проектно-конструкторской деятельности – от кустарного производства к чертежному способу и к современным компьютеризированным *CALS*-технологиям, предметом которых оказывает уже не только сам предмет проектирования, но весь его жизненный цикл.

Непосредственно проектно-конструкторская деятельность может быть связана с проектированием и конструированием нового объекта (по образцу, модели, требованиям или замыслу) либо с преобразованием образца (нескольких образцов) для получения новых (заданных) свойств [2], и в любом случае состоит в решении комплекса проблемных задач – конструкторских (достижения оптимальной формы и структуры, улучшение свойств изделия, устранение вредных явлений и др.) и/или технологических (выбор технологии для производства, улучшения качества изделия, сокращения времени или ресурсов и др.).

Современное проектирование сконцентрировано вокруг электронной модели изделия и связанных с ним процессов, составляющих жизненный цикл изделия, которая в свою очередь содержит одну или несколько геометрических и графических моделей (модель геометрической формы изделия и составляющих его частей, модели для инженерных расчетов, аддитивного производства или изготовления на станках с ЧПУ, электронные макеты для презентаций и рекламы, комплект конструкторских, технологических чертежей и пр.). Проектно-конструкторская деятельность в самом общем виде состоит из этапа поиска и анализа, на котором собирается необходимая информация и вынашивается образ будущего изделия, и этапа синтеза, в ходе которого создается, преобразуется и улучшается информационная модель изделия. Именно геометрическая составляющая электронной модели изделия играет ключевую роль для проектно-конструкторской деятельности [3], поскольку впоследствии определяет экономические, технологические, эксплуатационные и др. аспекты проектного решения.

Сказанное позволяет сделать вывод об актуальности разработки программных средств, алгоритмов и методов, упрощающих создание и повышающих качество геометрической составляющей электронной модели изделия. Этим вопросам посвящена настоящая статья.

2. Конструктивные геометрические модели

2.1. Геометрические модели в проектно-конструкторской деятельности

Рассмотрим подробнее, что из себя представляет геометрическая составляющая электронной модели изделия с позиций проектировщика.

ГОСТ вводит следующие понятия:

- электронный документ (ГОСТ 2.051);

- электронная модель изделия, электронная геометрическая модель, твердотельная модель, поверхностная модель, каркасная модель, электронный макет (ГОСТ 2.052);

- электронная модель детали, электронная модель сборочной единицы (ГОСТ 2.102).

Также, в соответствии с ГОСТ 2.102, «все графические документы (чертежи, схемы) могут быть выполнены в электронной форме как электронные чертежи и (или) как электронные модели изделия».

Таким образом, в соответствии с ГОСТ, геометрическая составляющая в составе электронной модели изделия на разных этапах его проектирования может быть представлена множеством «моделей» и графических документов.

С точки зрения проектировщика все эти геометрические и графические модели представляют собой файлы с векторными изображениями (чертежами и диаграммами) или 3D-моделями в том или ином формате. Между файлами могут как существовать, так и отсутствовать так называемые ассоциативные связи (которые обеспечивают обновление данных в одних файлах в ответ на изменения данных в других файлах). При этом большая часть времени проектировщика уходит на создание, преобразование и проверку таких моделей.

Все многообразие геометрических моделей, которые используются на практике, может быть сведено к пяти типам [4], из которых при создании трехмерных моделей изделий используют, как правило, граничную (из точек, линий и отсеков поверхностей) и конструктивно-блочную (объединения и вычитания базовых объемов). Электронные чертежи представляют собой наборы плоских примитивов, заданных своими параметрами. Синтез трехмерной модели на основе данных чертежа выполняется в создании человека, читающего чертеж. Технологии компьютерного синтеза трехмерных моделей на основе чертежей составляют основу так называемых несвязанных систем геометрического моделирования и машинной графики 2-го рода [3, 5], но они не получили достаточно широкого распространения на практике.

Как отмечается в [4], имеется принципиальное сходство в моделировании трехмерной геометрии средствами чертежа и компьютерными способами. Например, при граничном представлении (*B-rep.*) твердотельных моделей множество ограничивающих объем кусков поверхностей задают этот объем, то есть выступают в роли своеобразного репера (определителя), но также и геометрические задачи на чертеже решаются на основе представления трехмерных объектов своими определителями – парами проекций, группами точек и линий [6, 7].

Такие возможности открывает так называемое конструктивное геометрическое моделирование [7]. Его основу составляет манипулирование геометрическими объектами и их множествами, что, как показано в [8], имеет тесную связь с процессом создания компьютерных геометрических моделей в *CAD*-системах. При этом использование различных реперов одного объекта для решения одного класса задач сводится к использованию разных вариантов конструктивного алгоритма.

Таким образом, с точки зрения конструктивного геометрического моделирования, а также с точки зрения представления геометрических данных в файлах плоских чертежей или трехмерных моделей *CAD*-систем, нет принципиальной разницы между моделью, представленной чертежом, и «истинной» трехмерной моделью. Не удивительно, что многие *CAD*-системы соединяют в себе функции 2D- и 3D-редакторов. Различие состоит в том, с каким интерфейсом – 2D или 3D – имеет дело проектировщик. При этом для решения задачи используется одна или другая последовательность команд геометрического редактора (конструктивный алгоритм).

2.2. Структура конструктивной геометрической модели

Как показано в [7, 8, 9, 10], объединение возможностей конструктивного геометрического моделирования и *CAD*-систем позволяет во многих случаях упростить создание и повысить качество геометрических моделей. Здесь под геометрическим моделированием понимается «электронное геометрическое моделирование», а под геометрическими моделями – «электронные геометрические модели» в соответствии с [11]. В проектно-конструкторской деятельности электронные геометрические модели составляют основу геометрической

составляющей электронных моделей изделий и графической части конструкторских документов, но, как отмечается в [11], формируются на основе аналитического метода геометрического моделирования. В действительности же проектировщик не прибегает для получения ЭМИ или чертежа к вычислению координат точек модели к помощи формул или уравнений (аналитический подход), наоборот, выполняет построение геометрических объектов, достраивает новые к уже существующим (конструктивный подход). И, хотя реализуются эти построения при помощи вычислений, геометрическая модель, с которой взаимодействует проектировщик, отличается от аналитической примерно как язык высокого уровня отличается от языка ассемблера. Для формализации электронной геометрической модели этого типа вводится понятие конструктивной геометрической модели [9, 12].

Определение. **Конструктивная геометрическая модель** (КГМ) – это совокупность идентифицированных (именованных) элементов (геометрических и вспомогательных) с их параметрами и атрибутами и связей между ними. С формальной точки зрения КГМ представляет собой кортеж вида

$$M = \langle O, R, G, A, E \rangle$$

где O – множество идентифицированных элементов (различаются значением *ключ*), составляющих решение, R – множество связей между объектами, G – множество видов связей (допустимые значения *связи*), A – множество видов объектов или **алфавит** (допустимые значения *вида фигуры*), E – совокупность свойств пространства, в котором рассматриваются объекты O и связи R .

Каждый элемент 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

Отметим, что множество видов связей, видов объектов (алфавит) и свойства пространства остаются неизменными для некоторого класса моделей, причем свойства пространства E определяют алфавит A , и с алфавитом – состав возможных связей G . Будем называть тройку $J = \langle G, A, E \rangle$ **контекстом** для некоторого класса моделей. Будем называть КГМ вида $M = \langle O, R \rangle^J$ КГМ в контексте J .

Из введенного определения следует, в частности, что электронный чертеж и трехмерная модель, в общем случае, различаются именно контекстами. Также из определения следует, что КГМ, создаваемые в одной CAD-системе, в общем случае, имеют общий контекст.

2.3. Представление конструктивной геометрической модели

Элементы КГМ для удобства применения в проектно-конструкторской деятельности должны иметь человеко-ориентированное представление.

Человек в своей деятельности привык использовать две формы представления информации – визуальную и текстовую. Каждое из этих представлений обладает как достоинствами, так и недостатками. Для КГМ подходят обе эти формы, поэтому далее рассмотрим их подробнее.

Визуальное представление. Поскольку элементами КГМ являются, в конечном счете, геометрические фигуры (точки, линии, области, куски поверхностей, тела-примитивы, значки и пр.), очевидно, что такая модель может быть представлена, как это обычно делается в векторном редакторе или редакторе CAD-системы. Для этого достаточно, чтобы каждый из элементов алфавита A с заданным символом a_i мог быть отрисован на экране. Соответствующим образом организуется диалог с проектировщиком – отрисованный объект можно указать (select), изменить его параметры и атрибуты, удалить, используя команды редактора, создать новый. При этом могут быть использованы все возможности современных систем плоской и трехмерной компьютерной графики – ортогональные, параллельные и центральные проекции, прозрачность, удаление невидимых частей объекта и пр.

Кроме того, ничто не мешает использовать и иные способы визуализации, например, группы плоских объектов отображать отдельно, трехмерных (многомерных) – отдельно, и вообще разделить объекты при помощи «виртуальных» слоев или видов, так чтобы объекты разных групп при отображении не смешивались. С информационной точки зрения такие объекты легко помещаются в одной КГМ и могут воздействовать на геометрию друг друга посредством ассоциативных связей. Речь идет лишь о способе представления геометрических данных для проектировщика, то есть об интерфейсе управления геометрической моделью. На рис. 1 показаны примеры «гибридных» представлений геометрической модели, когда в качестве основного используется плоское изображение, но сама модель является трехмерной и соответствующее отображение может быть активировано в любой момент.

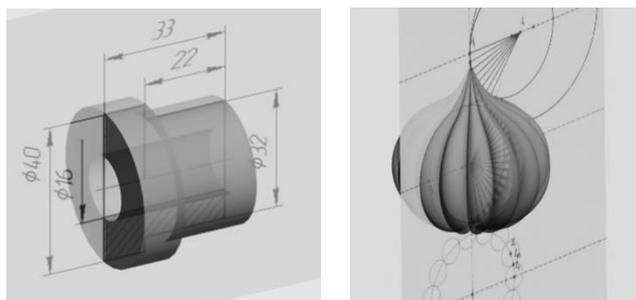


Рисунок 1: «Гибридное» плоско-трехмерное представление геометрической модели

Текстовое представление. Существует большое количество форматов графических файлов, которые могут отображаться и редактироваться при помощи текстовых редакторов. К ним, например, относятся – формат векторной графики *SVG*, форматы трехмерных моделей *VRML*, *X3D* или *STEP*. Отметим, что на самых ранних этапах становления машинной графики были широко распространены так называемые «дисплейные файлы» [13], как программы специального дисплейного процессора, система команд которого реализовывала отображение графических объектов. С этой точки зрения современные графические и геометрические файлы представляют собой именно программы соответствующих трансляторов.

Легко описать способ представления элементов КГМ в виде последовательности строк определенного формата так, чтобы обеспечить однозначное взаимно-обратное преобразование КГМ в текст и наоборот.

Представление КГМ в виде текста может быть полезным для обеспечения возможности поиска элементов по текстовым значениям атрибутов или редактированию модели способом копирования отдельных строк и фрагментов.

Еще больше возможностей открывается, если среди элементов КГМ используются специальные управляющие объекты – объекты, копирующие по определенному правилу связанные с ними фигуры (аналоги цикла), или отображающие ту или иную фигуру в зависимости от условий (аналоги ветвлений), параметризованные макроэлементы (аналоги подпрограмм). Очевидно, все перечисленное уже сейчас является набором инструментов *CAD*-системы, где есть команды-массивы или возможность параметризации блоков (*AutoCAD*) или макроэлементов (Компас). С этих позиций КГМ в виде программы может служить удобной формой записи макроса для повторного многократного использования, а возможность редактирования в виде текста – позволяет повысить гибкость автоматически генерируемых элементов модели [10].

3. Применение конструктивных геометрических моделей

3.1. Применение конструктивных геометрических моделей для создания геометрической составляющей электронной модели изделия

Текстовое представление элементов КГМ является, по сути, некоторым языком программирования с системой операторов и синтаксических конструкций, соответствующих геометрическим фигурам и связям между ними. Это может быть как расширение известного

языка программирования геометрическими командами (*FreeCAD+Python*, *AutoCAD+AutoLISP*) или полностью новый язык. Обзор подходов к символическому представлению геометрических построений ранее приводился в [10].

Использование существующего языка имеет один важный недостаток – требует специфических знаний и навыков, не связанных с геометрией (иерархии классов в объектной модели приложения, правил работы с памятью, переменными, типами данных и т.п.) Так выглядит построение окружности средствами языка *Python* в системе *FreeCAD*:

```
import Draft
pl=FreeCAD.Placement()
pl.Rotation.Q=(0.0,0.0,0.0,1.0)
pl.Base=FreeCAD.Vector(x, y, 0.0)
circle = Draft.makeCircle(radius=r, placement=pl, face=False, support=None)
```

– где вместо x , y , r нужно подставить значения координат центра и радиуса.

Из примера видно, что написание сценариев для такой системы потребует по крайней мере разобраться, что такое *FreeCAD*, *Draft*, *Placement.Rotation.Q*, *Placement.Base*, почему значения в *FreeCAD.Vector* передаются списком, а в *Draft.makeCircle* с указанием *radius*, *placement* и т.п.

Построение окружности на языке геометрических построений, показанном в [8, 10] выглядит так (значения параметров также подставляются вместо x , y , r):

$$c = \text{схув}(x, y, r)$$

Поскольку обычно объекты требуют указания довольно большого числа параметров и атрибутов (например, тип и толщина линии, цвет и др.), для достижения компактности предложений предполагается использование значений «по умолчанию», которые хранятся в соответствующих элементах алфавита и грамматики КГМ.

В [8, 9] показывается использование КГМ в форме программ на языке геометрических построений для создания моделей некоторых поверхностей конструктивным способом (рис. 2).

В [10] предложения языка геометрических построений используются как средство анализа и разработки команд *CAD*-системы.

В [14] показывается один подход к реализации использования КГМ в форме программ на языке геометрических построений в *CAD*-системе, в частности, обсуждается автоматическое формирование такой КГМ на основе параметризованной модели *CAD*-системы.

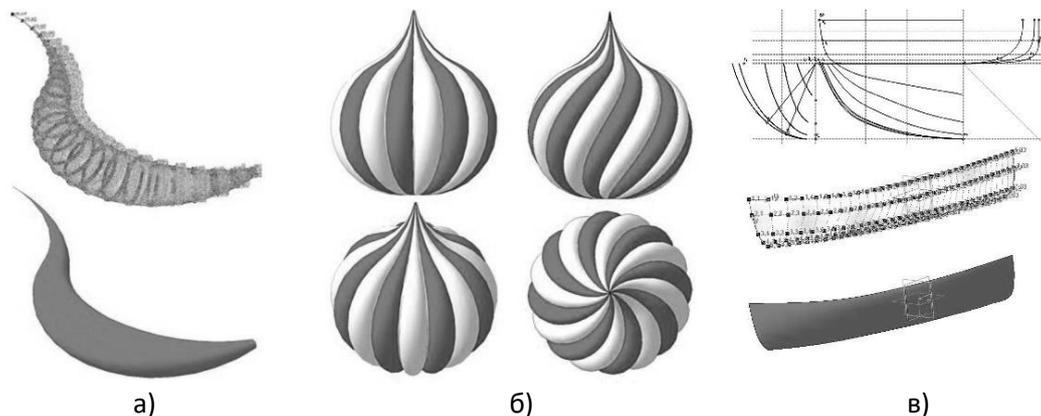


Рисунок 2: Модель элемента купола (а), модели некоторых луковичных куполов (б) и модель фрагмента судовой поверхности (в), построенные на основе КГМ в форме программы из работ [8, 9]

Возможности этого подхода не исчерпываются только задачами создания моделей кривых и поверхностей, поскольку весь спектр команд *CAD*-системы, в том числе компоновка готовых деталей в составе сборки, может быть представлен при помощи КГМ и, соответственно, предложений геометрического языка. Также становится возможным соединение произвольного числа «плоских» КГМ, управляющих трехмерной геометрией модели изделия, как это предлагается в [5].

3.2. Применение конструктивных геометрических моделей для проверки геометрической составляющей электронной модели изделия

Вторая частная задача проектно-конструкторской деятельности, решение которой может быть упрощено при помощи КГМ, – это проверка созданной модели на соответствие некоторому набору требований.

Как бы ни была совершенна CAD-система и каким бы большим ни был опыт проектировщика, при создании чертежа или трехмерной геометрической модели существует вероятность допустить ошибку, часто малозаметную, такую, что поиск ее может потребовать большого числа дополнительных измерений и проверок.

Основу подхода, предложенного в [12, 15], составляет формализация требований к создаваемой модели в виде эталонной КГМ, с которой затем созданная модель сопоставляется. Проверка выполняется в полностью автоматическом режиме.

Использование в качестве эталона КГМ, содержащей специальные управляющие фигуры, позволяет проверять не только точное соответствие значений параметров и атрибутов объектов эталонным, но осуществлять проверку в форме своеобразных геометрических «запросов» к проверяемой модели.

Тот факт, что эталонная и проверяемая модели могут принадлежать разным контекстам, то есть отличаться алфавитом, грамматикой и даже размерностью пространства, делает возможным сопоставление эталонных чертежей и проверяемых 3D-моделей и наоборот.

Это, в частности, позволяет для создания эталонной модели использовать инструменты какого-либо геометрического редактора, например, блоки системы AutoCAD для задания довольно сложной структуры эталонной КГМ, в том числе управляющие процессом проверки «специальные» фигуры [15].

В [16] рассматривается внедрение команд проверки в CAD-систему (сама проверка при этом реализуется размещенной в сети Интернет проверяющей системой).

В [17] рассматривается применение этого подхода к проверке графической части чертежей для одного класса деталей в составе общей задачи нормоконтроля (рис. 3).

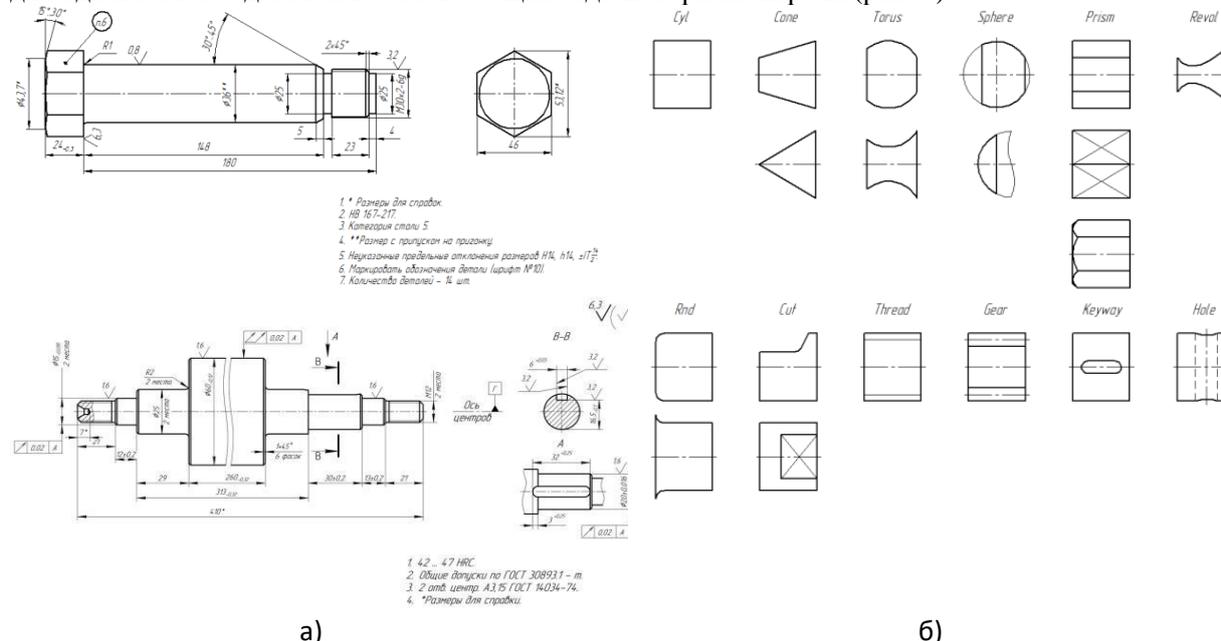


Рисунок 3: Примеры деталей проверяемого класса (а) и типовые элементы формы, распознающие группы фигур на чертеже (б), из работы [17]

Создание систем проверки на основе КГМ может быть полезно не только непосредственно на разных этапах проектно-конструкторской деятельности, но и при создании специализированных учебных центров по работе с CAD-системами, 3D-редакторами, векторными редакторами и т. п. В настоящее время такое обучение, как правило, проводится в

форме текстовых или видеоуроков, а сдача квалификационных экзаменов на получение сертификата пользователя – в форме тестирования. Предлагаемый подход позволяет «на лету» проверять типовые задания на построение фигур и объектов.

4. Заключение

В приведенной работе сделана попытка обобщить решение некоторых задач, возникающих в проектно-конструкторской деятельности. В первую очередь, обобщение касается единства геометрической информации, которая формируется в ходе геометрических построений, будь то построения циркулем и линейкой или выполнение команд трехмерного или плоского геометрического редактора. Объединить плоские и трехмерные геометрические модели позволяет введение понятия конструктивных геометрических моделей, не зависящих, строго говоря, от размерности пространства и состава используемых геометрических фигур.

Две формы представления конструктивных геометрических моделей – визуальная и текстовая позволяют создавать их в ходе построений в геометрическом редакторе (визуальная форма) или как программы на языке геометрических построений (текстовая форма).

Сами по себе конструктивные геометрические модели могут затем использоваться как средство анализа и расширения инструментов CAD-системы, как средство автоматизации создания геометрической составляющей электронной модели изделия и как способ представления требований к геометрическим моделям в ходе их проверки.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках научной темы № 140-ИРТС РТУ МИРЭА.

6. Литература

- [1] Дж. К. Джонс Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 326 с.
- [2] В. М. Заенчик, А. А. Карачев, В. Е. Шмелев Основы творческо-конструкторской деятельности: методы и организация. М.: Академия, 2004. 256 с.
- [3] С. И. Ротков Средства геометрического моделирования и компьютерной графики пространственных объектов для CALS-технологий: Дис. докт. техн. наук: 05.01.01. Н.Новгород, 1999. 287 с.
- [4] Е. В. Попов, С. И. Ротков Кратко о сути компьютерной геометрии и графики // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и ин-новации (КГП-2016). Пермь, 2016. С. 62–67.
- [5] А. А. Бойков О несвязанных системах геометрического моделирования и машинной графики 2-го рода в контексте возможностей современных САПР // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2020. С. 138–141.
- [6] В. А. Пеклич Высшая начертательная геометрия. М.: АСВ, 2000. 344 с.
- [7] Д. В. Волошинов Конструктивное геометрическое моделирование. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2010. 355 с.
- [8] A. A. Boykov Development and application of the geometry constructions language to building computer geometric models // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Volume 1901 (012058). DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012058 .
- [9] А. А. Бойков Некоторые вопросы автоматизации конструктивных алгоритмов формирования геометрических моделей для CAD-систем // SCVRT'2018. Международная научная конференция Московского физико-технического института (государственного университета). Москва-Протвино, 2018. С. 281–290.
- [10] А. А. Бойков Язык геометрических построений и его применение в разработке функций САД-систем // SCVRT'2019. Международная научная конференция МФТИ (ГУ) ИФТИ. Нижний Новгород, 2019. С. 42–50.

- [11] Геометрическое моделирование в инженерной и компьютерной графике. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 460 с.
- [12] А. А. Бойков, А. М. Федотов Автоматическая проверка решений задач инженерной геометрии // ГРАФИКОН'2016 Труды 26-й Международной научной конференции. Москва-Протвино, 2016. С. 352–356.
- [13] У. Ньюмен, Р. Спрулл Основы интерактивной машинной графики. М.: Мир, 1976. 576 с.
- [14] А. А. Бойков Об одном способе автоматизации конструктивных алгоритмов формирования геометрических моделей в среде САД-систем // СРТ2019 Международная научная конференция НГАСУ и НИЦ ФТИ. Нижний Новгород, 2019. С. 393–399.
- [15] А. А. Бойков, А. М. Федотов Использование чертежей с разметкой для проверки электронных чертежей и трехмерных моделей // ГРАФИКОН'2018 Труды 28-й Международной научной конференции. Томск, 2018. С. 328–331.
- [16] А. А. Бойков, А. М. Федотов Внедрение средств автоматической проверки решений конструктивных задач инженерной геометрии в САД-систему // GraphiCon 2019: труды 29-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Брянск, 23–26 сент. 2019 г.). Брянск, 2019. С. 172–175.
- [17] А. А. Бойков О реализации автоматического нормоконтроля графической части конструкторских документов для одного класса чертежей деталей // СРТ2020. 8-я Международная конференция «Физико-техническая информатика». Часть 2. Нижний Новгород, 2020. С. 339–346.

Автоматизация создания инженерных учебных WebGL приложений

А.В. Власенко¹, С.С. Александрова¹, Ф.Г. Садреев¹, П.А. Воронин¹

¹ Московский авиационный институт (МАИ), Оршанская улица дом 3, г.Москва, 121359, Россия

Аннотация

В статье рассматривается дополнение (аддон) для Blender 3D 2.9x, написанное на языке Python 3.9.2, с использованием библиотек Pandas, Jinja2, math и др., которое позволяет автоматизировать операции по созданию анимации болтов, шайб, гаек. Позволяет вставлять из внешних файлов дополнительные инструменты (отвертки, ключи, стрелки и т.п.), участвующие в процессе анимации. Наносить материалы из внешней библиотеки, которая представляет собой *.blend файл с набором материалов, исходя из названий объектов в сцене. Экспортировать полученную сцену в WebGL 2.0, с использованием фреймворка Babylon.js, с возможностью проигрывания полученной анимации, которая включает в себя традиционные кнопки управления анимацией, задания скорости воспроизведения, возможности перемещения по кадрам анимации, а также доступ к виду из камеры Blender 3D, там, где имеет место ее анимация. В html странице создается интерактивный список объектов сцены, который был автоматически сгенерирован из имен объектов сцены Blender 3D при помощи Jinja2, при нажатии на галочку элементов списка объект скрывается/отображается. В качестве примеров оценки работы аддона использовались машиностроительные сборки редукторов, импортированные из T-FLEX CAD 3D 17 в формате *.stl. Разбираются некоторые особенности создания аддонов для Blender 3D. Приводится сравнение библиотеки Three.js и фреймворка Babylon.js с целью их использования для создания инженерных интерактивных приложений. Рассмотренный в работе аддон для Blender 3D может быть использован не только при разработке учебных инженерных приложений, но и как элемент подготовки при создании, например ИЭТР.

Ключевые слова:

WebGL, T-FLEX CAD 3D, Blender 3D, Python, Three.js, Babylon.js, 3D графика.

1. Введение

Традиционно программное обеспечение, специализирующееся на создании интерактивной 3D анимации промышленных изделий и конструкций является частью экосистемы компаний разработчиков САПР (система автоматизированного проектирования) или компаний занимающихся разработкой ИЭТР (интерактивных электронных технических руководств). В этой области можно отметить такие программные продукты как Cortona3D, SolidWorks Composer, Solid Edge 3D Publishing, SimLab Composer и др.

Для создания учебного контента в этой области, данные программы довольно дорогостоящи (за исключением возможно SimLab Composer), требовательны к ресурсам компьютера, обладают избыточным функционалом, например помимо 3D анимации также позволяют делать 2D иллюстрации, и в большинстве своем не имеют учебных версий, не так гибки в настройках по 3D анимации, и нет открытого доступа к API продуктов. Некоторые продукты, например, Cortona3D требуют в процессе работы для достижения определенного функционала интеграции с CAD, PDM (Product Data Management) системами.

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: moluk@yandex.ru (А.Н. Власенко); sweta.sergeeva@gmail.com (С.С. Александрова); sadreevfg@yandex.ru (Ф.Г. Садреев); heyholygrampage@yandex.ru (П.А. Воронин)

ORCID: 0000-0002-8820-9954 (А.Н. Власенко)

С другой стороны, мы имеем традиционные программы полигонального моделирования и анимации, такие как 3Ds Max, Blender 3D, Maya, Cinema4D и др., которые в первую очередь ориентированы на создание рендера сцены в виде одиночного растрового изображения или набора изображений для последующей записи в видео.

В тоже время, для создания интерактивного 3D контента в дополнение к программам моделирования и анимации используются чаще всего так называемые игровые движки, например такие как, Unity3D, Unreal Engine, Godot Engine, Unigine и др., направленные прежде всего на создание игр различных жанров. Игровые движки поддерживают компиляцию приложения под многие существующие платформы (ПК – Windows, Linux, игровые консоли, мобильные системы – Android, iOS и др.), а для создания логики приложения используют в основном такие языки программирования как C++ и C#.

Во время пандемии и после нее возросла роль в создании интерактивного учебного контента, ориентированного прежде всего на web платформы. Для создания интерактивных 3D приложений в браузере в настоящее время используется кроссплатформенный API – WebGL (Web-based Graphics Library) версий 1.0 и 2.0, а также язык программирования низкого уровня WebAssembly для стековой виртуальной машины, спроектированный как портативная цель компиляции для высокоуровневых языков, таких как Си, C++, C# и др. Второй вариант используют игровые движки, в том числе и для портирования в web старых приложений (игр), разработанных на C++, OpenGL и т.п. [1, 2].

2. Общее описание проекта

Для создания промышленных изделий традиционно используют твердотельные CAD (Computer-aided design) программы. В качестве примеров были взяты сборки планетарного и червячного редукторов, спроектированных в T-FLEX CAD 3D. Так как Blender 3D корректно не поддерживает импорт CAD форматов, в отличие от 3Ds MAX, то сборки были экспортированы в виде набора из отдельных *.stl файлов при помощи T-FLEX CAD 3D.

После импорта набора тел в единую сборку в Blender 3D, модели, как правило, требуют сглаживания. В Blender для этих целей есть быстрая команда, которая называется «Гладкое затенение» (Shade Smooth), но она не всегда работает корректно из-за неправильного задания угла наклона нормалей граней, производимого автоматически. Это можно исправить, задав вручную для каждого тела угол автосглаживания, который по умолчанию равен 30° . Однако, если в сборке более 100 деталей, то для каждого объекта нужно выполнить предыдущих два действия, что занимает довольно продолжительное время. Как раз для подобных однотипных, повторяющихся операций и существует возможность автоматизации процесса с использованием «оболочки» (wrap) для API Blender 3D, которая использует язык программирования Python.

Программа Blender 3D поставляется с полноценной версией Python (3.7.7 в Blender 2.92 и 3.9.2 для будущих версий Blender 2.93 и 3.x), на который можно устанавливать дополнительно практически любые библиотеки, не относящиеся к самому Blender, например Pandas, Jinja2 и др.

Основным модулем для программирования в Blender, является bpy (акроним от blender python). Написание скриптов можно делать в Blender при помощи встроенного редактора текста, но в нем нет автозаполнения и подсветки синтаксиса кода в случае ошибок, как это сделано в большинстве IDE. Для восполнения данного недостатка можно вручную установить библиотеку автодополнения bpy (англ. autocomplete) с помощью штатного установщика pip install fake-bpy-module-2.91 в зависимости от версии Blender, и использовать привычную IDE, например PyCharm, VS Code и др.

Об ошибках программы можно только узнать, вызвав окно системной консоли Blender. Консоль по умолчанию использует кодировку cp1251 (если мы рассматриваем работу в Blender под MS Windows), из-за этого кириллические тексты отображаются в виде непонятных символов. Устранить эту проблему можно, указав кодовую страницу UTF-8 в консоли cmd до запуска самого Blender или создать *.bat файл сценария запуска Blender.

Сам модуль bpy не имеет ни свойств, ни методов, а служит неким пространством имен, отделяющим модули Blender от модулей Python, т.е. например, обращение к объектам (mesh) сцены blend-файла происходит так: **bpy.data.objects**. Чтобы, например, получить список

выделенных объектов обращаемся так: `bpy.context.selected_objects`, т.е. мы получаем доступ к свойствам объектов в контексте выполнения, а сам контекст зависит от того, над какой областью находится курсор мыши, или какой(ие) объект(ы) выделен(ы) мышью. Посмотреть, как называются другие подмодули bpy можно, обратившись к официальной справке по Python API Blender [3, 4] или посмотреть в журнале операций (в Blender это окно называется «Информация»), который отображает в виде кода практически все наши действия в Blender. Также можно поднести курсор мыши к любому элементу в меню и во всплывающей подсказке помимо описания, также будет написан код этого элемента.

Далее рассмотрим некоторые отдельные элементы меню, созданного в правой боковой панели свойств элементов (так называемой N-панели, по быстрой клавише, которая ее вызывает) сцены Blender.

2.1. Модуль анимации

В рассмотренных в качестве примера сборках планетарного и червячного редукторов наибольший интерес представляет автоматическое выделение однотипных объектов и их последующая автоматическая анимация при процессе сборки и разборки, а также добавление в сцену инструментов, которые необходимы для сборки и разборки (ключи, отвертки и прочее). Рассмотрим, например, крепежные элементы (болты, гайки, шайбы).

Внешний вид интерфейса модулей панели инструментов и анимации приведен на рисунке 1:

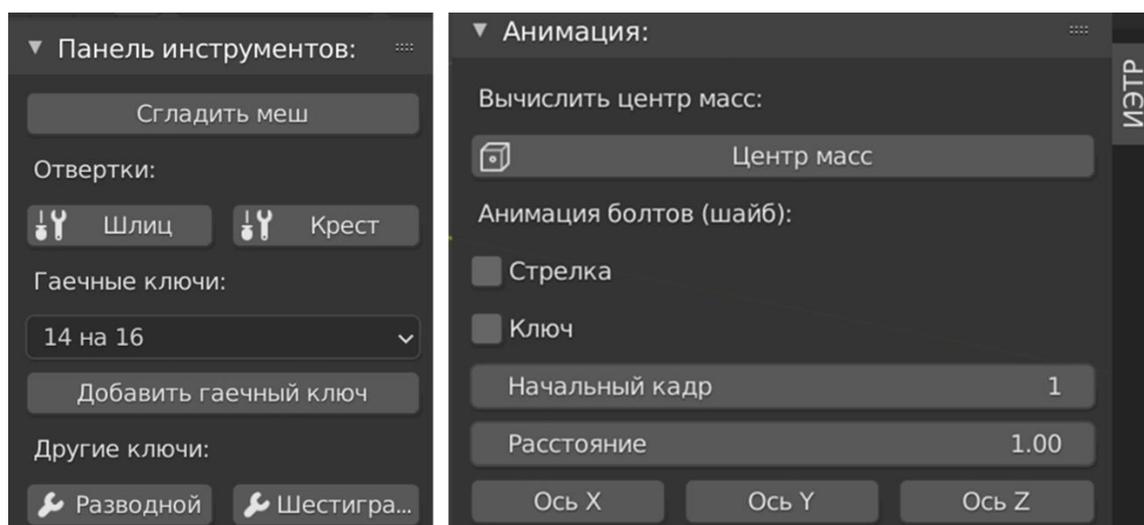


Рисунок 1: Пример интерфейсной формы модулей панели инструментов и анимации

Перед началом анимации осуществляется расчет центра масс объектов (болтов, гаек, шайб) сцены с использованием штатной команды Blender: `bpy.ops.object.origin_set(type='ORIGIN_CENTER_OF_VOLUME', center='MEDIAN')`. Координаты центра масс объектов сохраняются в отдельный датафрейм. После расчета центра масс:

- выделяем мышкой нужные для анимации болты;
- задаем начальный кадр анимации, сама анимация занимает 60 кадров (2.5 сек);
- задаем расстояние (в Blender расстояния выражаются в так называемых unit единицах, один unit по умолчанию равен 1 м, это можно изменить в настройка Blender), на которое будут разноситься объекты, причем если расстояние положительное или отрицательное, то это будет дополнительно указывать направление оси координат, например X или -X;
- нажимаем на нужную ось координат (в сцене Blender красная ось – это X, зеленая – Y) относительно которой будет происходить разбор элементов.

Автоматически в процессе анимации будут выделены относящиеся к болтам их шайбы и гайки, также в зависимости от направления оси будет анимирован угол выкручивания болта (гайки). Дополнительно также можно вставить в сцену вспомогательные элементы в виде гаечного ключа и стрелки, которая указывает направление выкручивания. Эти инструменты будут автоматически размещены напротив первого выделенного болта.

Автоматический выбор болтов и гаек происходит на основе запросов с использованием библиотеки Pandas к датафрейму с координатами центра масс объектов и выделении близких по значениям объектов. Близость определяется нахождением функции минимума координат шайб и гаек по отношению к координатам выделенных болтов.

2.2. Модуль нанесения материалов

Помимо анимации, для более реалистичного представления элементов сборки, необходимо нанести соответствующие материалу объектов текстуры (например, металл, окрашенный металл, металл с признаками старения и пр.)

Внешний вид панели по нанесению материалов приведен на рисунке 2:

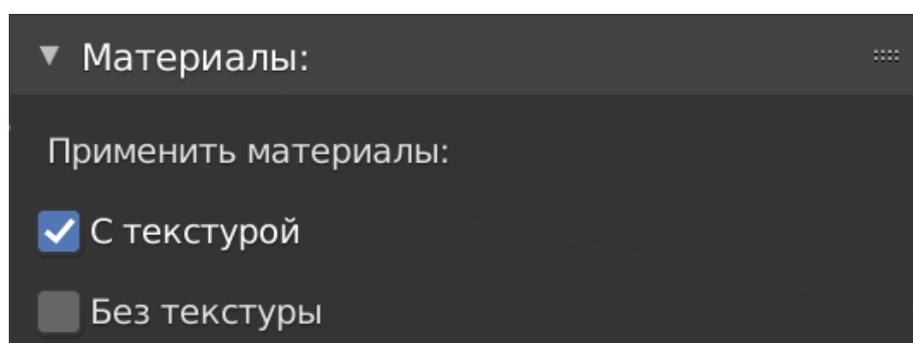


Рисунок 2: Пример интерфейсной формы модуля нанесения материалов

Сами материалы содержатся во внешнем blend-файле и по умолчанию наносятся на объекты исходя из их названия. Названия объектов и соответствующих им материалов хранятся в таком типе данных Python как словари. В словарях есть возможность обращаться к конкретному имени объекта, и они обладают достаточным быстродействием. При нанесении материала также автоматически создается UV-развертка объектов там, где она необходима. Конечно, автоматически сгенерированная UV развертка уступает по качеству ручной или сделанной в специальных программных продуктах типа UVLayout Pro и др., но, например для создания шероховатости на металлических поверхностях вполне подходит.

Так как модели в дальнейшем будут экспортироваться в WebGL, то материалы в зависимости от размера модели и требуемого уровня детализации сцены выбраны двух типов: с текстурой и без текстуры, с нанесенным обычным цветом. Материалы, которые с текстурой, представляют собой материалы на основе PBR (Physically based rendering) рендеринга. В PBR материалы включены следующие параметры (текстуры):

- Основной цвет (Base Color);
- Металличность (Metalness) для металлических поверхностей;
- Шероховатость (Roughness) имитация на поверхности неровностей и шероховатостей;
- Карта нормалей (Normal map) карта неровностей.

2.3. Модуль экспорта в WebGL

Внешний вид панели экспорта в WebGL приведен на рисунке 3:

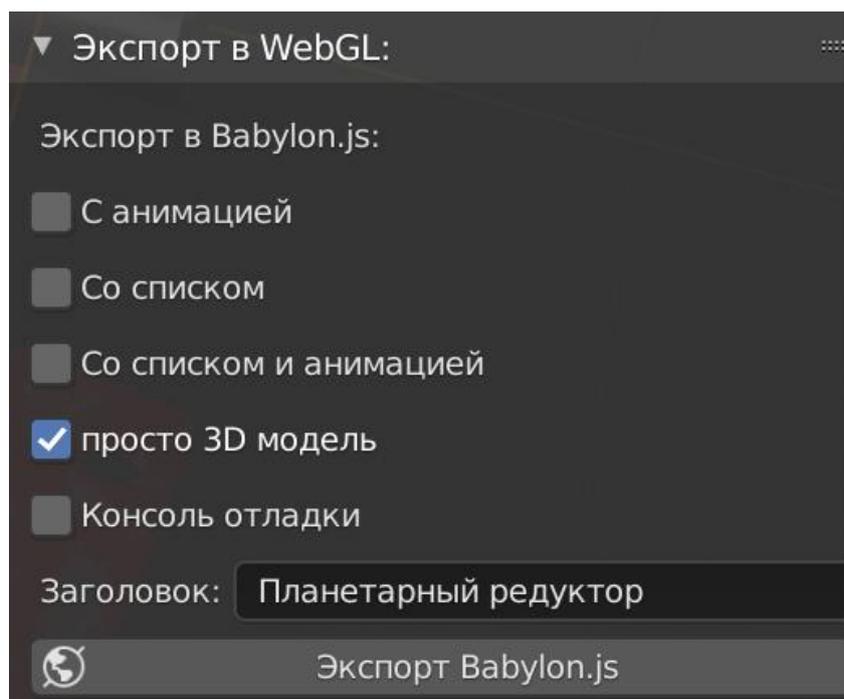


Рисунок 3: Пример интерфейсной формы модуля экспорта в WebGL

Для экспорта в WebGL использовался фреймворк Babylon.js. В таблице 1 приведено сравнение Babylon.js с наиболее популярной библиотекой Three.js.

Таблица 1

Сравнение библиотеки Three.js и фреймворка Babylon.js

Параметр сравнения	Babylon.js	Three.js
Консоль разработчика (для отладки приложения)	Есть	Нет
Наличие своего GUI (graphical user interface)	Есть	Используется внешняя библиотека dat.gui
Названия объектов в сцене после экспорта в формате GIFT из Blender	Названия такие же, как и в программе	Пробелы заменяются нижним подчеркиванием, точки убираются совсем
Формат карт окружения (environment map)	Рекомендуется CubeMap *.dds или *.env	Любой формат
Среда для разработки приложений, без использования кода	Babylon.JS Editor (offline на базе Electron.js)	Three.JS Editor (on-line, offline)
Экспорт из Blender	Свой аддон или штатный экспорт в gltf	штатный экспорт в gltf
Экспорт из 3Ds Max	Свой плагин (формат *.Babylon или gltf)	Нет
Экспорт из Maya	Свой плагин (формат *.Babylon или gltf)	Нет
Экспорт из Cinema4D	Свой плагин (формат *.Babylon или gltf)	Нет
Возможность создания нативного приложения	Есть	Нет
Нодовый редактор материалов	Есть	Нет

Разработчики	MS Microsoft + сообщество	Сообщество
Основные разработчики	Дэвид Катуш (David Catuhe), Дэвид Руссе (David Rousset) и др. сотрудники Microsoft	Рикардо Мигель Мистер Дуб Кабелло (Ricardo Mr.Doob Cabello)
Дата выхода (выпуска)	2015	2013
Дополнительные особенности	Имеется своя on-line среда разработки, интеграция с Visual Studio, есть свой официальный канал на YouTube и форум	Самая популярная WebGL библиотека в мире, больше всего реализованных примеров и учебных материалов

Как видим из таблицы, фреймворк Babylon.js [5,6], в отличие от библиотеки Three.js обладает возможностью экспорта сцены в формате GTF (Graphics Language Transmission Format or GL Transmission Format) из всех наиболее популярных пакетов по 3D моделированию и анимации. Необходимо также обязательно помнить и о некоторых различиях, отраженных в таблице, между библиотеками при экспорте в данном формате. Помимо стандартизованного формата GTF можно использовать и специальный формат фреймворка *.Babylon, который отличается возможностью экспорта дополнительных свойств (материалов, освещения, анимации, возможности по группировке объектов и др.) присущих каждому из пакетов в отдельности, из-за этого размер файла по сравнению с GTF может вырасти в несколько раз. Также фреймворк предоставляет очень удобную консоль разработчика для наглядного управления многими свойствами объектов, которые довольно проблематично подобрать при помощи кода, например настройка положения и свойств камеры, настройки параметров материалов, освещения и т.п.

У фреймворка Babylon.js есть и своя библиотека по созданию как традиционного 2D интерфейса, которая представляет собой слой canvas поверх WebGL, так и 3D GUI (англ. graphical user interface) внутри сцены, который может быть использован в том числе и в VR (англ. virtual reality) проектах.

Что касается библиотеки Three.js [7,8], то это одна из самых популярных на сегодняшний день WebGL библиотек в мире по данным GitHub. На ней реализовано наибольшее количество проектов, а также огромное количество разнообразных учебных материалов, отчасти это обусловлено и более ранним появлением библиотеки по сравнению с Babylon.js. Библиотека более легковесная, если сравнивать размеры файлов, по сравнению с Babylon.js. Синтаксис ближе к нативному WebGL, из-за меньшего количества абстракций в некоторых случаях пишется гораздо большее количество кода, по сравнению с Babylon.js. К недостаткам или особенностям библиотеки следует отнести выход новой версии буквально через каждый месяц-два, помимо добавления нового функционала часто меняется синтаксис уже традиционных функций, что не всегда полезно для длительных проектов. Из-за этого возникают разного рода проблемы по воспроизведению кода, например из разных учебных материалов. В Babylon.js эта проблема решена путем создания специальной интерактивной on-line среды (или песочницы, <https://playground.babylonjs.com/>), с подсветкой синтаксиса кода и автозаполнения которая поддерживает разные версии фреймворка и может быть использована бесплатно в том числе и для учебных целей.

При экспорте сцены используется шаблонизатор кода Jinja2, на базе него было создано несколько шаблонов: по управлению анимацией и создания интерактивного списка объектов сцены. На рисунке 4 приведен пример сгенерированного приложения с меню анимации и со списком, а также включенной консолью разработчика Babylon.js.

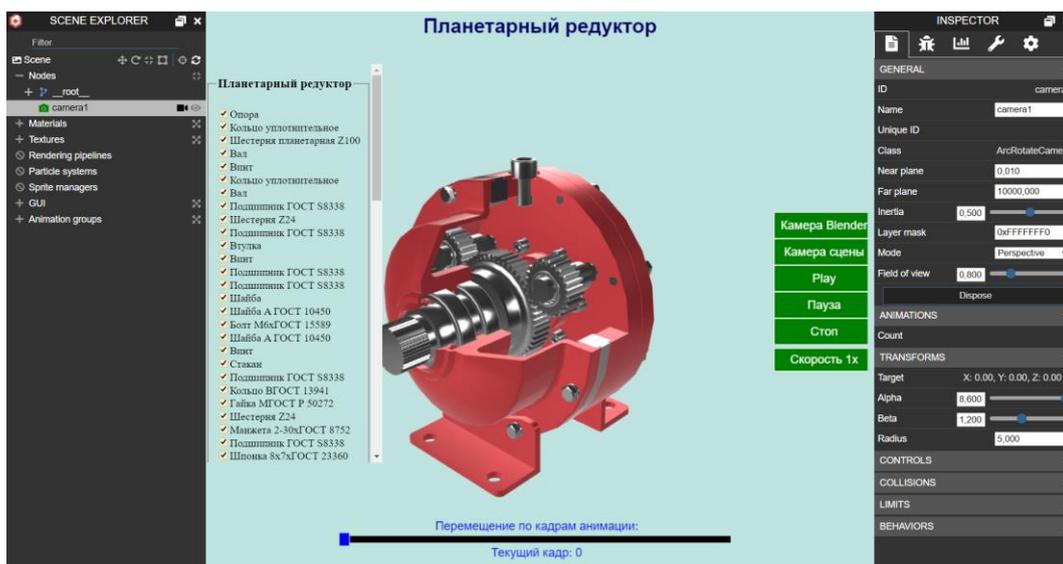


Рисунок 4: Пример сгенерированного приложения с меню анимации и со списком, а также включенной консолью разработчика

Список объектов сцены в Babylon.js был автоматически сгенерирован из имен объектов сцены Blender при помощи Jinja2, при нажатии на галочку объект скрывается/отображается. Меню анимации включает в себя традиционные кнопки управления анимацией, задания скорости воспроизведения, возможности перемещения по кадрам анимации, а также доступ к виду из камеры Blender, там, где имеет место ее анимация.

3. Заключение

Рассмотренный в работе аддон для Blender может быть также использован не только при разработке учебных инженерных приложений, но и как элемент подготовки при создании, например ИЭТР. В дальнейшем планируется развивать данное приложение с целью создания полностью автоматизированного процесса анимации промышленных изделий, включающей такие элементы конструкции как кабели, гибкие шланги и т.п.

4. Литература

- [1] А.Н. Власенко, В.В. Степанов Использование WebGL в образовательном процессе при подготовке специалистов в области сварочного производства. Дистанционное и виртуальное обучение. 2016. № 12 (114). С. 115-121.
- [2] Е.В. Тетюев, Ю.А. Жук Использование WebGL для визуализации учебных материалов в образовательном процессе. Труды 30-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению (Санкт-Петербург 22–25 сентября 2020 г.). Том 1 / Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН. – Санкт-Петербург, 2020. С. 59 – 66.
- [3] Blender Python API, документация разработчика, URL: <https://docs.blender.org/api/current/index.html>
- [4] Witold Jaworski Programming Add-Ons for Blender 2.8 - version 2.0 URL: <http://airplanes3d.net/downloads/pydev2/pydev-blender-en.pdf>
- [5] Официальная документация по фреймворку Babylon.js URL: <https://doc.babylonjs.com/>
- [6] Julien Moreau-Mathis Babylon.js Essentials. Packt Publishing Ltd, 2016, 200p.
- [7] Официальная документация по библиотеке Three.js URL: <https://threejs.org/docs/>
- [8] Jos Dirksen Learn Three.js: Programming 3D animations and visualizations for the web with HTML5 and WebGL, 3rd Edition. Packt Publishing Ltd, 2018, 528 p.

Модель визуализации и отладки на графовом представлении Cloud-Sisal программ

Д.С. Гордеев¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем информатики им. А.П. Ершова Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Академика Лаврентьева, 6, г. Новосибирск, 630090, Российская Федерация

Аннотация

В работе описывается решение задач визуализации графов внутреннего представления Cloud Sisal программ, визуализации процесса вычислений и отладки Cloud Sisal программ. Приведены формальные определения графа с портами и графовой модели с портами и атрибутами. Описана модель визуализации графовой модели с портами и атрибутами с помощью статических изображений в формате векторной графики SVG. Описана модель отображения изменений графовой модели с портами и атрибутами с помощью анимаций, поддерживаемых форматом векторной графики SVG. Соединение графических анимаций, отображающие изменения в визуальных стилях и изменений в атрибутах графовой модели с портами реализовано с помощью безопасных сетей Петри. Описано моделирование вычислений, соответствующих функциям заданной Cloud Sisal программы с помощью иерархических сетей Петри, где переходы соответствуют функциям, а места аргументам и параметрам соответствующих функций. Также описаны модификации иерархических сетей Петри, обеспечивающие реализацию функциональности точек останова и редактирования аргументов или результатов функций при активированных точках останова в целях отладки с помощью добавления дополнительных мест и переходов. Таким образом для полученных сетей Петри рассматривается возможность изменения разметки мест в процессе функционирования.

Keywords¹

Cloud Sisal, Sisal, внутреннее представление, визуализация графовых моделей, динамический граф, сети Петри.

Visualization and debugging on internal representation graph of Cloud-Sisal programs

D.S. Gordeev¹

¹ A.P. Ershov Institute of Informatics Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6, Acad. Lavrentjev pr., Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract

This paper describes the solution of the tasks of visualizing the graphs of the internal representation of Cloud Sisal programs, visualizing the process of computing and debugging Cloud Sisal programs. The formal definitions of the graph with ports and the graph model with ports and attributes are shown. A model of the visualization of the graph model with ports and attributes is described using static images in the SVG format. A model of displaying changes in the graph model with ports and attributes using animations

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия
EMAIL: gds@iis.nsk.su (Д.С. Гордеев)
ORCID: 0000-0003-1623-9553 (Д.С. Гордеев)

supported by the SVG vector graphics format is described. The connection of graphic animations displaying changes in visual styles and changes in the attributes of the graph model with ports is implemented using Petri nets. It describes the modeling of calculations corresponding to the functions of a given Cloud Sisal program using the hierarchical Petri nets, where the transitions correspond to the functions, and the places of arguments and the parameters of the corresponding functions. Also described modifications of hierarchical Petri nets, ensuring the functionality of the breakpoints and editing the arguments or the results of functions at activated breakpoints for debugging purposes by adding additional places and transitions. Thus, for the obtained Petri nets, the possibility of changing markup of places in the process of functioning is considered.

Keywords

Cloud Sisal, Sisal, internal representation, graph model visualization, dynamic graph, Petri nets.

1. Введение

В рамках развития проекта облачной системы параллельного программирования CPPS [1], целью которой является предоставление возможности решения вычислительно-ёмких задач с помощью доступных по сети супервычислителей, интегрированных с системой CPPS, широкому кругу пользователей без прямого доступа к вычислителям большой мощности, но имеющих выход в Интернет, где пользователи создают и отлаживают программы на языке Cloud Sisal [2] с помощью вебприложения, а решение вычислительных задач осуществляется на поддерживаемом системой супервычислителя после предварительной адаптации с помощью настраиваемого компилятора из комплекта системы CPPS, возникает задача поддержки процесса программирования и отладки Cloud Sisal программы на локальной системе пользователя перед запуском на супервычислителе.

При трансляции программы на языке Cloud Sisal создаётся граф внутреннего представления IR входной программы, который представим в виде иерархического ориентированного графа [3]. При отладке программы полезно иметь визуальное изображение процесса исполнения для понимания движения данных по графу, а также об отображении функций на вычислительные узлы. При этом возникает задача отображения графа, и свойств вершин и дуг этого графа с помощью графических примитивов, таких как многоугольники, ломаные линии, цветовые стили, и визуального отображения изменений атрибутов вершин или дуг. Данная задача является нетривиальной, так как основным пользователем системы является человек, и ожидания пользователя должны совпадать с наблюдением за отображением изменений, чтобы возникло корректное представление о том, как происходило вычисление для заданной программе. Для удобства пользователя часто применяется плавное отображение изменений с помощью анимаций, например, с помощью SVG-анимаций в системе VisuAlgo [4].

Результатом визуализации динамический граф, и для его визуализации в основном применяются два семейства техник визуализации: автономная (offline) и интерактивная (online) [5]. В первом случае строится последовательность изображений графа, при визуализации которой между двумя соседними изображениями используются техники интерполяции для получения промежуточного изображения, и набор таких промежуточных изображений описывает трансформацию между двумя соседними автономными изображениями графа. Во втором случае используется динамическое вычисление очередного изображения по текущему состоянию графовой модели и следующему событию, которое следует графически отобразить. Для этого способа требуется выделение множества событий для отображения [6].

В данной работе обсуждается реализация модели визуализации динамических графов для решение задачи отображения процесса вычислений и отладки программ на языке Cloud Sisal с помощью сетей Петри [7] в рамках проекта развития облачной системы параллельного программирования CPPS.

2. Внутреннее представление

Текст Cloud Sisal программы транслируется внутреннее представление IR, которое описывается как иерархический ориентированный граф с портами. Формально такой граф описывается следующим образом. Пусть задан граф,

$$G = (V, P, F_{p,i}^v, F_{p,o}^v, E) \quad (1)$$

где V это непустое конечное множество вершин, P это непустое конечное упорядоченное множество портов, представимое в виде объединения двух непересекающихся множеств P_i и P_o . $F_{p,i}^v$ это функция $F_{p,i}^v: P_i \rightarrow V$, $F_{p,o}^v$ это функция $F_{p,o}^v: P_o \rightarrow V$, E это подмножество декартового произведения $(P_o \times P_i)$.

Множество P_i называется множеством входных портов, и с помощью функции $F_{p,i}^v$ позволяет говорить об упорядоченном множестве входных портов для каждой вершины из графа G . Аналогично множество P_o называется множеством выходных портов, и с помощью функции $F_{p,o}^v$ позволяет говорить об упорядоченном множестве выходных портов для каждой вершины из графа G .

В случае если функции $F_{p,i}^v$ и $F_{p,o}^v$ являются тождественными, то каждая вершина имеет ровно один входной порт и ровно один выходной порт, и граф G эквивалентен классическому определению графа $G' = (V', E')$, где E' есть подмножество декартового произведения $(V' \times V')$.

Для вершины v из V и ребра (p_o, p_i) из E будем говорить о инцидентности, если и только если $F_{p,i}^v(p_i) = v$ или $F_{p,o}^v(p_o) = v$. Для вершин v_1 и v_2 из V будем говорить о смежности вершин, если и только если существует ребро (p_o, p_i) из E такое, что $(F_{p,o}^v(p_o) = v_1$ и $F_{p,i}^v(p_i) = v_2)$ или $(F_{p,o}^v(p_o) = v_2$ и $F_{p,i}^v(p_i) = v_1)$.

Каждая вершина графа G внутреннего представления IR соответствует функции Cloud Sisal программы, по которой построен граф внутреннего представления. Входные порты P_i вершины v отвечают аргументам соответствующей функции, а выходные порты P_o вершины v отвечают результатам вычислений соответствующей функции. Дуга e в графе G , соединяющая выходной порт p_o^1 и p_i^2 , обозначает передачу данных из выходного порта p_o^1 во входной порт p_i^2 .

3. Графовая модель

При визуализации вершины графов обычно представляются геометрическими фигурами, такими как прямоугольники, окружности или более сложные многоугольники. Дуги часто представлены в виде ломаных или гладких кривых. Порты, в зависимости от применения изображения графа, могут отображаться с помощью кругов или более мелких квадратов, относительно вершины. Причём обычно порты располагаются на границах многоугольников, представляющих вершины. При записи решения задачи с помощью языка программирования часто функции вызывают другие функции. На графе внутреннего представления это отражается наличием вложенных графов, причём вложенные графы могут быть как связными, так и несвязными. В таких случаях принято считать, что вершина имеет атрибут, значением которого является вложенный граф, а саму вершину принято называть составной. Графы по отношению существования вложенного графа образуют иерархию графов внутреннего представления.

Также для определения стилей визуального отображения геометрических фигур требуется хранить информацию об атрибутах вершин и их значениях. Далее будем рассматривать графовую модель G' , расширяющую определение графа G (1) атрибутами. Пусть

$$G' = (V, P, F_{p,i}^v, F_{p,o}^v, E, A_v, A_p, A_e) \quad (2)$$

где $A_v: V \rightarrow \{(n_v, u_{n_v})\}$, где n_v это уникальное имя атрибута, а u_{n_v} это значение атрибута с именем n_v . Аналогично $A_p: P \rightarrow \{(n_p, u_{n_p})\}$ и $A_e: E \rightarrow \{(n_e, u_{n_e})\}$. Для вершин, например,

именем атрибута может быть “форма” со значениями “прямоугольник” или “окружность”, “цвет границы” со значениями цвета соответственно, “цвет фона” также со значениями цвета или “подграф” со значением графа, удовлетворяющего определению (2).

4. Визуальное представление

В каждом программном проекте существует подсистема вывода информации. В рамках данной работы подсистема вывода является графическим интерфейсом, основанным на технологии SVG², которая поддерживается большинством современных браузеров. Обычно для изображения элементов графов используются различные геометрические фигуры. Для описания двумерной векторной графики существует язык SVG, который также является расширением языка XML³. Язык SVG поддерживает такие фигуры как эллипсы, прямоугольники и более сложные фигуры, задаваемые с помощью последовательностей точек.

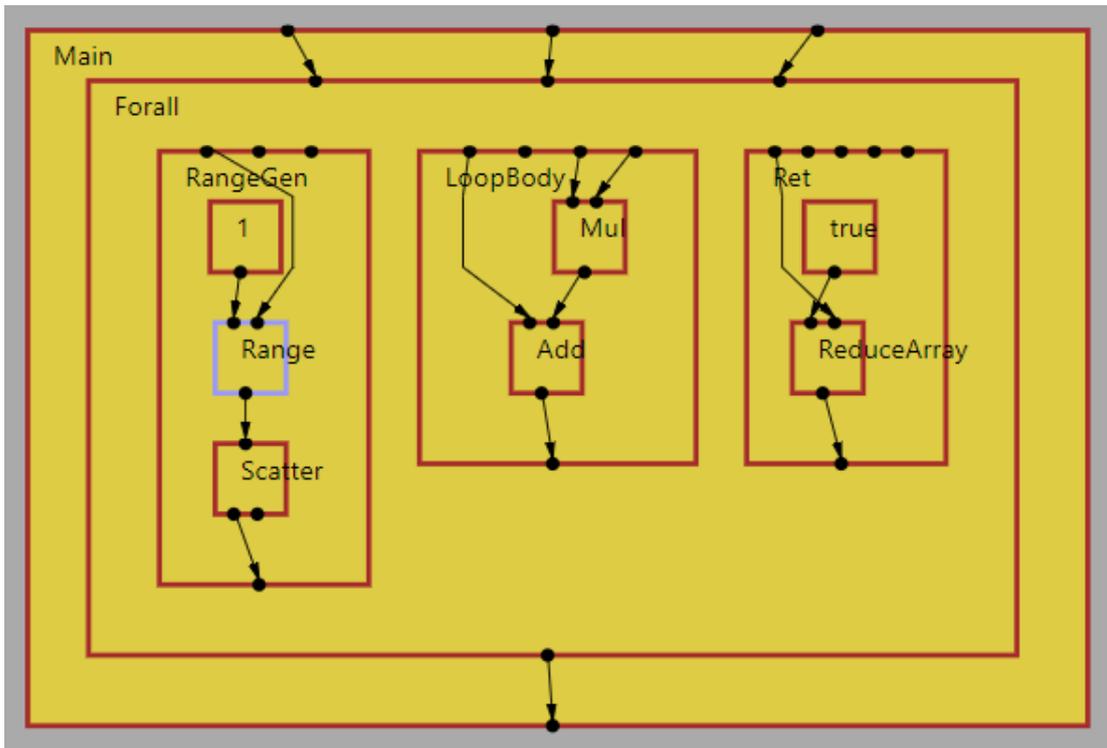


Рисунок 1: Пример IR-графа внутреннего представления программы, содержащей цикл.

Данный язык поддерживается основными браузерами, что делает его подходящим для представления графов при визуализации в контексте реализации облачного сервиса. Будем строить изображение графов по следующим правилам. Вершины будем представлять с помощью прямоугольников с границей. Порты будем представлять с помощью точек с координатами, заданными относительно содержащих их вершин. Порты вершин будем располагать только на верхних или нижних гранях прямоугольников, изображающих вершины. Координаты вершин также задаются относительно содержащих их вершин-графов. Дуги будем представлять с помощью ломаных линий или кривых Безье. Последние поддерживаются форматом SVG естественным образом. Кроме того, следует отметить, что при использовании SVG изображений в браузерах, изображения естественным образом включаются в DOM⁴ модель документа. Данное обстоятельство позволяет использовать стандартные методы для обеспечения интерактивного взаимодействия с построенным изображением. Например, это позволяет с помощью стандартных браузерных событий реализовать сворачивание и

2 Scalable Vector Graphics. <https://www.w3.org/TR/SVG2/>

3 Extensible Markup Language. <https://www.w3.org/TR/xml/>

4 Document Object Model. <https://www.w3.org/DOM/DOMTR/>

разворачивание вершин графа, что облегчает навигацию по изображению. Также естественное включение в DOM позволяет использовать существующие средства для поиска вершин в графе по заданным значениям атрибутов, например, по имени функции [8]. На Рис. 1 представлен пример изображения внутреннего представления IR программы языка Cloud Sisal с помощью технологии SVG [9].

5. Визуализация изменений модели

При отладке программы полезно иметь визуальное отображение исполнения для представления движения данных по графу и того, на каких узлах вычислителя осуществляются вычисления тех или иных функций. При этом возникает задача отображения изменений значений атрибутов элементов графа, которые отображаются в изменение визуальных стилей графических примитивов, соответствующих вершинам, портам или дугам графовой модели. Методы визуализации процесса вычислений зависят от решаемой задачи и её предметной области. В данном случае это предметная область графов потока данных, где результатом визуализации в том или ином виде является последовательность изображений состояния графовой модели со всеми графически отображаемыми атрибутами. Рассмотрим последовательность изображений состояния графовой модели как последовательность событий, где каждое событие соответствует изменению одного атрибута для одного элемента графа. Так, например, событие заполнения входного порта значением, соответствует изменению значения атрибута «значение» с «пусто» на «существует», или с 0 на 1.

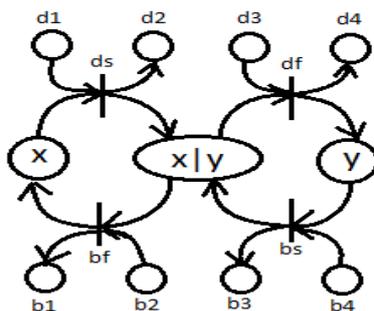


Рисунок 2: Сеть Петри, моделирующая процесс изменения значения атрибут элемента графа.

На Рис. 2 представлена сеть Петри, моделирующая изменение некоторого атрибута со значения X на значение Y. Место с пометкой X соответствует значению X некоторого атрибута, например, атрибута заполненности порта значением. Место с пометкой Y соответствует значению Y для того же самого атрибута того же порта. Место с пометкой X-Y соответствует промежуточному состоянию, когда значение изменяется от X к Y или от Y к X. Опишем процесс функционирования данной сети, когда места d_i и b_i могут получать фишки в процессе функционирования сети. Будем считать, что место d_1 получает фишку, когда получена команда изменить значение атрибута с X на Y и при этом значение атрибута равно X. В этом случае срабатывает переход d_s , место X-Y получает фишку, обозначая промежуточное состояние, и место d_2 получает фишку, обозначая сигнал для запуска анимации на SVG изображении. Например, это может быть анимация изменения цвета порта со значения «чёрный» на значение «белый», которые обозначают отсутствие и наличие значения, соответственно. Когда анимация изменения завершается, место d_3 получает фишку, разрешая сработать переходу d_f . Место Y получает фишку, обозначая завершение изменения значения атрибута порта. Место d_4 получает фишку, что предназначено для соединения с местом d_1 другой аналогичной сети, соответствующей изменению состояния инцидентной дуги. Аналогичным образом сеть может сработать в направлении от b_4 к b_1 для изменения значения порта с «заполненного» состояния

на «пустое», если потребуется произвести изменения значений в обратном направлении. Кроме того, если рассмотреть входной порт и инцидентную дугу и пары значений «пусто»-»заполнено» для порта, и «ожидание»-»передача значения», то место d_4 сети, относящейся к порту, может быть соединено с местом d_1 аналогичной сети, относящейся к дуге, и таким образом анимация заполнения порта значением будет синхронизирована с анимацией передачи значения по дуге. Продолжая аналогичные построения можно построить композицию сетей, представленных на Рис. 2, для всего графа программы Cloud Sisal, позволяя тем самым отображать распространение значений по дугам от порта к порту и от вершине к вершине в виде SVG-анимаций. Значения для мест X и Y определяются значениями из соответствующего трассировочного события. На Рис. 3. представлен результат работы композиции таких сетей.

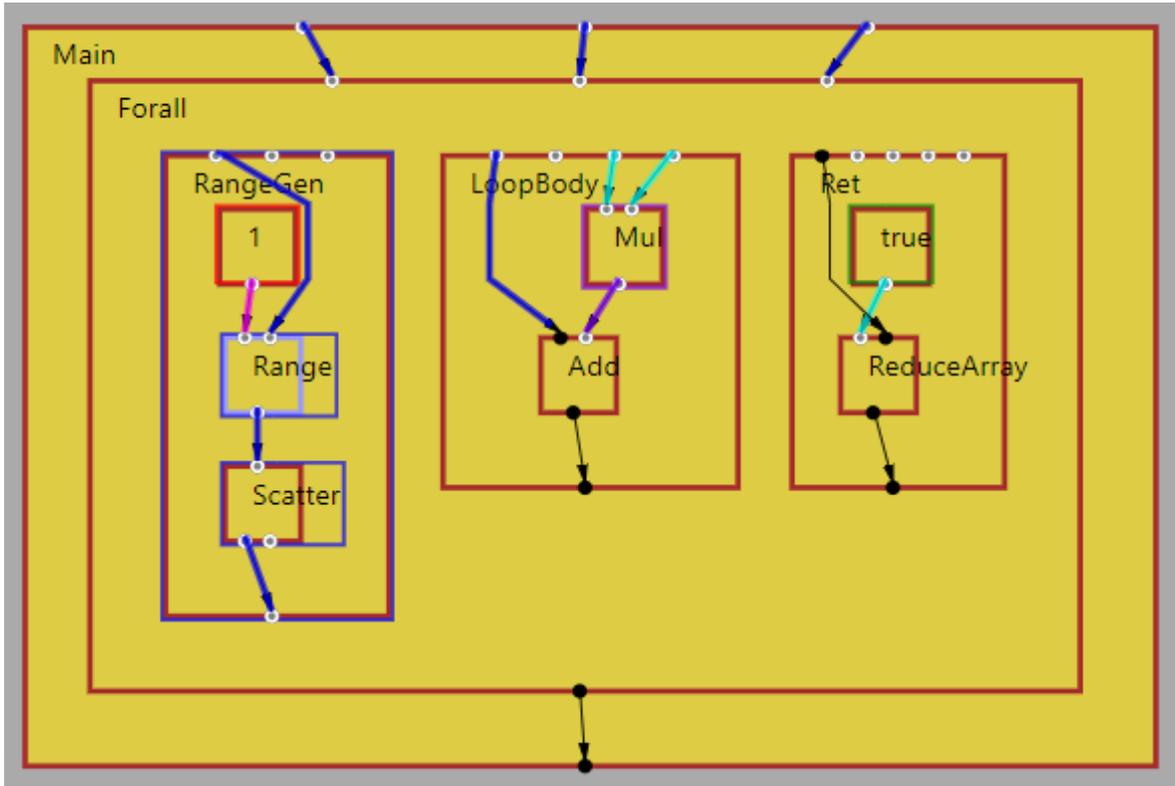


Рисунок 3: Пример отображения локальных данных при активированной точке останова.

В сравнении с Рис. 1 можно видеть, как распространение значений по дугам отображается утолщением линий, изображающей дугу. Заполненные порты имеют более светлый оттенок при изображении, тогда как пустые порты отображаются тёмными точками или кругами. Для вершин с помощью дополнительных линий отображается промежуточное состояние между «ожидает начала вычислений» и «вычисления завершены». Например, на Рис. 3 для вершины “Mul” (умножение), содержащейся в вершине тела цикла («LoopBody»), видно, что утолщённые линии покрыли прямоугольник, изображающий вершину, что отражает завершенность вычислений на данной вершине. Кроме того, на Рис. 3 видны дополнительные линии разных цветов, изображающие распространение значений по графу программы. Этот приём визуализации показывает, что вычисления соответствующего элемента произведены в разных вычислительных потоках среды исполнения, где один и тот же цвет означает вычисления на одном и том же вычислительном потоке. Информация об идентификаторе вычислительного потока предоставляется в рамках трассировочного события.

6. Отладка

Рассмотрим некоторую функцию F , принимающую два аргумента, и возвращающую три результата. Например, это может быть функция одновременно вычисляющая минимум,

максимум и среднее значение от двух целых чисел. Пусть IR граф для этой функции состоит из одной вершины, имеющей два входных и три выходных порта. Для такого IR графа построим сеть Петри, состоящую из одного перехода, помеченного функцией F , двух входных мест и трёх выходных, причём будем считать, что входные и выходные места перехода упорядочены соответственно входным и выходным портам вершины графа IR. На Рис. 4 элементы данной сети выделены чёрным цветом. При срабатывании перехода, помеченного функцией F , выходные места заполняются результирующими значениями функции F для значений, заданных во входных местах. Если IR граф построен так, что существуют дуги, передающие значения из одной вершины в другую, то для каждой такой дуги в сеть Петри добавляем две дуги и переход, для передачи значения из места, соответствующего порту-источнику, в место, соответствующее порту-приёмнику. Таким образом достигается моделирование вычислений исходной Cloud Sisal программы через сети Петри. Для решения задачи визуализации распространения значений по графу программы во время вычислений модифицируем полученную сеть Петри следующим образом.

Для входных и выходных мест перехода добавим по одному переходу, при срабатывании которых места-источники продолжают содержать значения-аргументы. Также добавленные переходы снабдим входное место, гарантирующее срабатывание перехода ровно один раз. На Рис. 4 добавленные элементы помечены серым цветом.

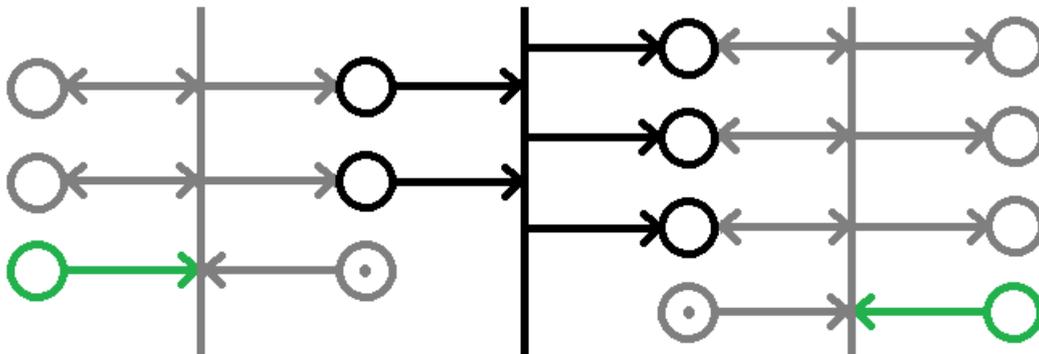


Рисунок 4: Пример сети Петри для функции принимающей два аргумента и возвращающей три результата.

Данные переходы позволяют применить функции с побочными эффектами для сохранения трассировочных данных, при этом не нагружая основной переход. Если для моделирования функции F достаточно одного перехода, то возможно добавить функции для сохранения трассировочных данных. Однако, если функция F является составной и моделируется составным IR графом, и следовательно более сложной сетью Петри, то удобнее добавить отдельные переходы для сбора трассировочных данных в общем случае.

Таким образом для проведения отладки Cloud Sisal программ можно использовать трассировочные данные. Однако часто для отладки используется механизм точек останова, когда есть возможность приостановить вычисления, прочитать данных из локальных переменных, изменить значения, и продолжить вычисления с изменёнными значениями. Для достижения этого добавим к трассировочным переходам ингибиторную дугу и место. На Рис. 4 добавленные элементы выделены зелёным цветом. Если в процессе работы сети Петри в место точки останова добавить метку, и при этом трассировочных переход ещё не сработал, то процесс работы сети остановится до удаления метки из места точки останова. Это справедливо как для перехода входных мест, так и для перехода выходных мест. При проведении отладки это позволяет приостановить вычисления всей программы как перед началом вычисления функции F , так и после. При активированной точке останова вместо локальных переменных для чтения доступны значения из мест сети Петри, а для изменения доступны значения только для мест, где значения уже были заданы. На Рис. 5 представлен пример для точек останова, активированных для оператора умножения (справа) и для оператора сложения (слева).

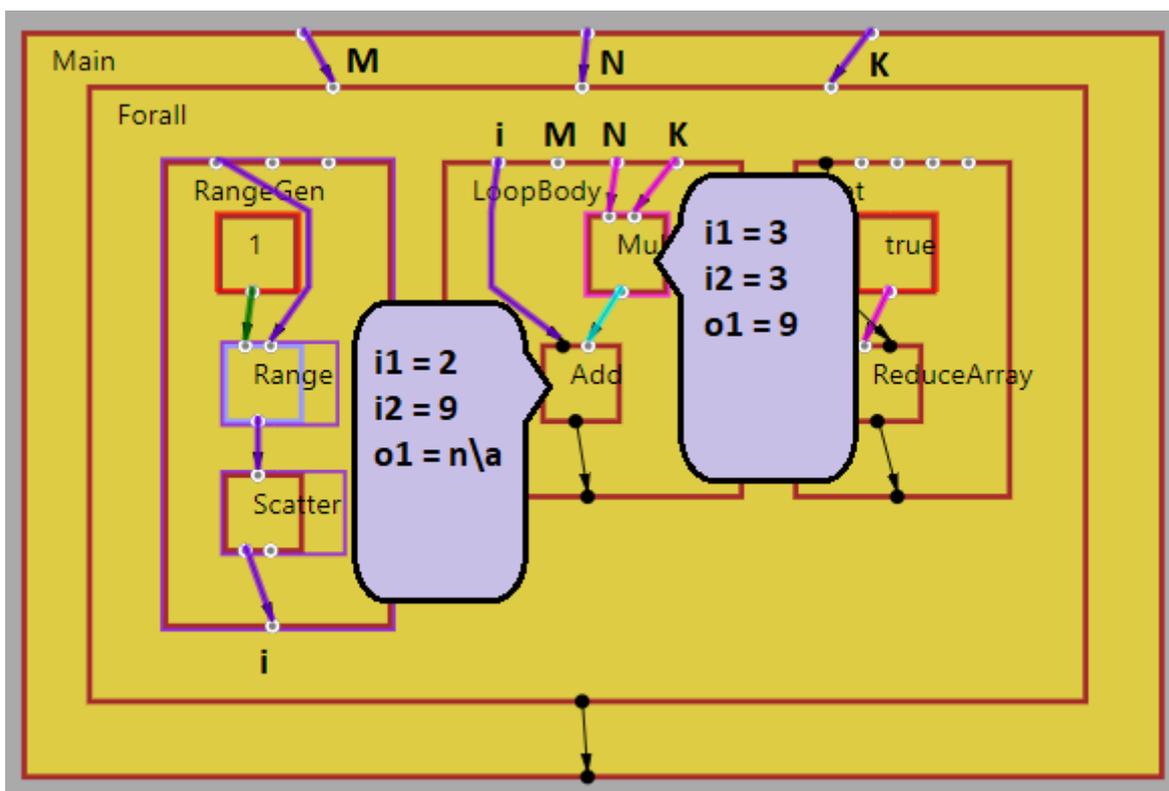


Рисунок 5: Пример отображения локальных данных при активированной точке останова.

7. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 18-11-00118).

8. Заключение

Целью данной работы является описание решения задачи визуализации и отладки Cloud Sisal программ с помощью моделирования процесса вычислений через сети Петри. Предложенная модель описания Cloud Sisal программ позволяет производить вычисление по заданной программе, сбор трассировочных данных, осуществлять отладку с помощью точек останова, а также строить визуальное представление процесса вычислений, как процесса распространения значений по иерархической графовой модели программы. Распространение значений по вершинам, портам и дугам графа отражается на визуальном отображении анимацией графических стилей элементов графа. Вершины графа представлены геометрическими фигурами, а дуги ломаными или гладкими кривыми с помощью технологии SVG, а анимация графических стилей вершин, портов и дуг с помощью SVG-анимаций, что делает возможным и удобным визуализацию вычислений Cloud Sisal программ, отладку программ с точками останова, чтением и изменением значений в портах при включенных точках останова в рамках интернет среды.

9. Литература

- [1] В. Н. Касьянов, Е. В. Касьянова, Методы и система облачного параллельного программирования, материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», Алматы, 2018, сс. 298-307.

- [2] В. Н. Касьянов, Е. В. Касьянова, Язык программирования Cloud Sisal, препринт 181, ИСИ СО РАН, Новосибирск, 2018.
- [3] В. Н. Касьянов, В. А. Евстигнеев, Графы в программировании: обработка, визуализация и применение, БХВ-Петербург, Санкт-Петербург, 2003.
- [4] S. Halim, VisuAlgo-Visualising Data Structures and Algorithms Throug Animation, volume 9 of Olympiads in Informatics, 2015, pp. 243-245.
- [5] Д. С. Гордеев, Обзор техник визуализации алгоритмов на графах, Научная визуализация (2018), Том 10, 18-48, doi:10.26583/sv.10.1.02.
- [6] C. Demetrescu, I. Finocchi, J. T. Stasko, Specifying Algorithm Visualizations: Interesting Events or State Mapping?, in: Diehl S. (eds) Software Visualization, volume 2269 of Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, pp. 16-30, doi:10.1007/3-540-45875-1_2.
- [7] В. Е. Котов, Сети Петри, Наука, 1984.
- [8] M. Bostock, V. Ogievetsky, J. Heer, D3: Data-Driven Documents, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011.
- [9] Д. С. Гордеев, Визуализация внутреннего представления программ на языке Cloud SISAL, Научная визуализация (2016), Том 8, 98–106.

Геометрическое моделирование эмоций виртуальных персонажей

В.В. Карабчевский¹, А.С. Мазуров¹

¹Донецкий национальный технический университет, Артема, 58, Донецк, 83001, Украина

Аннотация

Рассмотрены методы и средства моделирования эмоций виртуальных компьютерных персонажей. Особое внимание уделяется трехмерному моделированию свода черепа, нижней челюсти и зубов, а также лицевых мышц и языка. Моделирование выполнено с помощью программы ZBrush с использованием информации об анатомическом строении черепа и лицевых мускулов, таких как затылочная и височная мышцы, мышца гордецов, депрессор, жевательная мышца, малая скуловая мышца, большая скуловая мышца и мышца, поднимающая угол рта, мышца, опускающая угол рта, мышца, поднимающая верхнюю губу и крыло носа, подбородочная мышца и мышца, опускающая нижнюю губу. Полученная высокополигональная модель была, затем подвергнута ретопологии с уменьшением количества полигонов. Приведен пример моделирования головы персонажа. Анимация выполнена в программе Autodesk Maya, которая взята на вооружение многими крупными кинематографическими и анимационными студиями и среди профессиональных 3D-художников используется чаще других. Описаны принципы риггинга (добавления к модели цифрового скелета и элементов его управления) и скиннинга (прикрепления вершин поверхности, моделирующей кожу, к соответствующим участкам цифрового скелета). Приведены анатомические признаки проявления основных эмоций и описано управление полученной моделью для проявления некоторых эмоций.

Ключевые слова

Моделирование эмоций, череп, лицевые мышцы, анимация, Autodesk Maya

Geometric modeling of emotions of virtual characters

V.V. Karabchevsky¹, A.S. Mazurov¹

¹Donetsk National Technical University, Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine

Abstract

Methods and tools for modeling emotions of virtual computer characters are considered. Particular attention is paid to 3D modeling of the cranial vault, mandible and teeth, as well as facial muscles and tongue. Modeling was performed using the ZBrush program using information about the anatomical structure of the skull and facial muscles, such as the occipital and temporal muscles, the arrogant muscle, the depressor, the masseter muscle, the small zygomatic muscle, the zygomaticus major muscle and the muscle lifting the angle of the mouth, the muscle lowering the angle of the mouth, the muscle that lifts the upper lip and the wing of the nose, the chin muscle and the muscle that lowers the lower lip. The resulting high-poly model was then retopologized with a decrease in the number of polygons. An example of modeling the character's head is given. Animation is made in Autodesk Maya, which is adopted by many large film and animation studios and is used more often among professional 3D artists. The principles of rigging (adding a digital skeleton and its controls to the model) and skinning (attaching the vertices of the surface that simulate the skin to the corresponding areas of the digital skeleton) are described. The anatomical signs of the

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: karabchevski@mail.ru (В.В. Карабчевский); itidze@gmail.com (А.С. Мазуров)

ORCID: 0000-0003-2941-9916 (В.В. Карабчевский); 0000-0002-0702-6161 (А.С. Мазуров)

manifestation of basic emotions are given and the control of the obtained model for the manifestation of some emotions is described.

Keywords

Emotion modeling, skull, facial muscles, animation, Autodesk Maya

1. Введение

При обучении студентов по направлению подготовки «Информационные системы и технологии», профиль и магистерская программа «Информационные технологии в медиаиндустрии и дизайне», значительное внимание уделяется изучению технологий и инструментов трехмерного моделирования и анимации [1]. Знания и умения, полученные при изучении соответствующих учебных дисциплин, могут быть применены в ходе НИРС и дипломного проектирования. Ниже описывается моделирование эмоций виртуального персонажа, основанное на анимации трехмерной модели черепа, лицевой мускулатуры и закрепленной на мышцах кожи.

2. Моделирование персонажа

Модель должна быть создана таким способом, чтобы она деформировалась легко и естественно. Поверхность модели персонажа можно создать несколькими способами: с помощью полигонов, патчей или NURBS поверхностей (В-сплайн). Полигональные модели просты в конструировании и их можно использовать практически в любой области

Для создания точных моделей применяется высокополигональное моделирование. Оно позволяет создавать модели с хорошей детализацией. Процесс создания высокополигональной трехмерной модели называют цифровым скульптингом. Для практических целей необходимо создание упрощенной модели с уменьшением количества полигонов. Этот процесс называется ретопологией [2].

2.1 Скульптинг черепа

Для создания черепа была использована программа ZBrush [3], и объект DynaMesh, который может деформироваться в любую форму благодаря равномерной сетке. Была создана деформация сетки путем вращения (инструмент Rotate) определенной группы полигонов, а также вдавливание (инструмент Move) (рисунок 1).

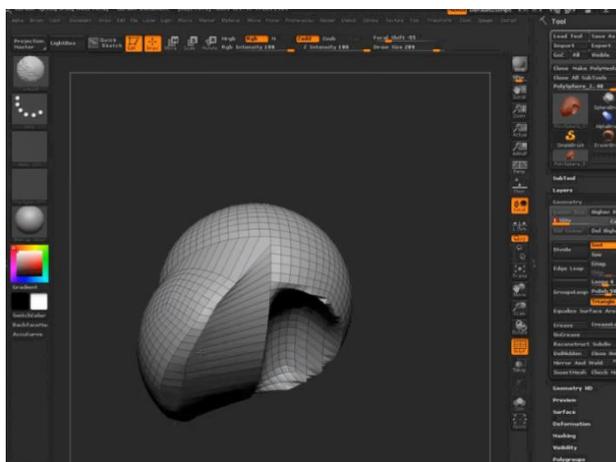


Рисунок 1: Работа с объектом DynaMesh

Далее была применена кисть TrimDinamic, которая позволила вдавить полигоны по одной оси координат и изменить форму модели с использованием той же кисти, только с меньшей интенсивностью (Intensity) и размером кисти (DrawSize). Произведено сужение нижней части челюсти путем использования инструмента Move. Так же был применен инструмент сглаживания (Smooth) (рисунок 2).

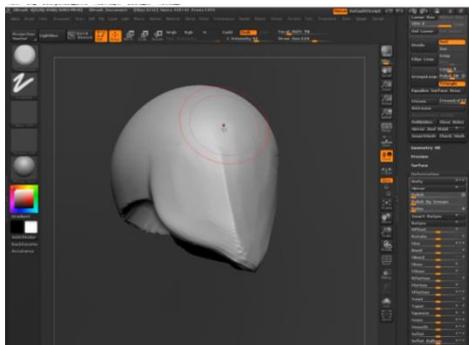


Рисунок 2: Применение кисти TrimDinamic

Были прорисованы основные линии лица по пропорциям, примерно соответствующим женскому типу черепа [4] (рисунок 3).



Рисунок 3: Прорисовка основных линий лица

Затем были созданы: глазницы, расположение скул при помощи кистей Move и Standard (рисунок 4).



Рисунок 4: Глазницы и расположение скул

Была создана височная ямка, носовое отверстие и скуловая кость, (использованы инструменты «Smooth» и «Move»), были также использованы такие кисти, как «Clay», «ClayTubes», «Inflat», «DamStandard» (рисунок 5). Для движения кисти использована сплошная линия «FreeHand».

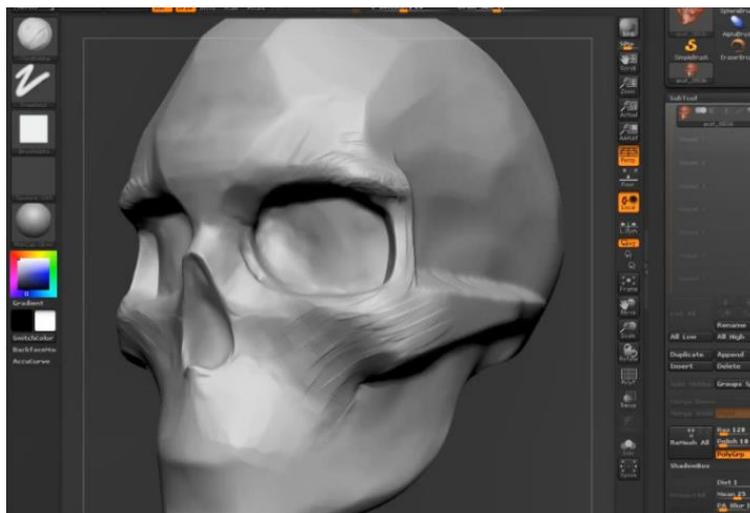


Рисунок 5: Моделирование черепа

Далее была изолирована нижняя часть – челюсть и преобразована в новый объект, добавлен объект для зубов (рисунок 6).

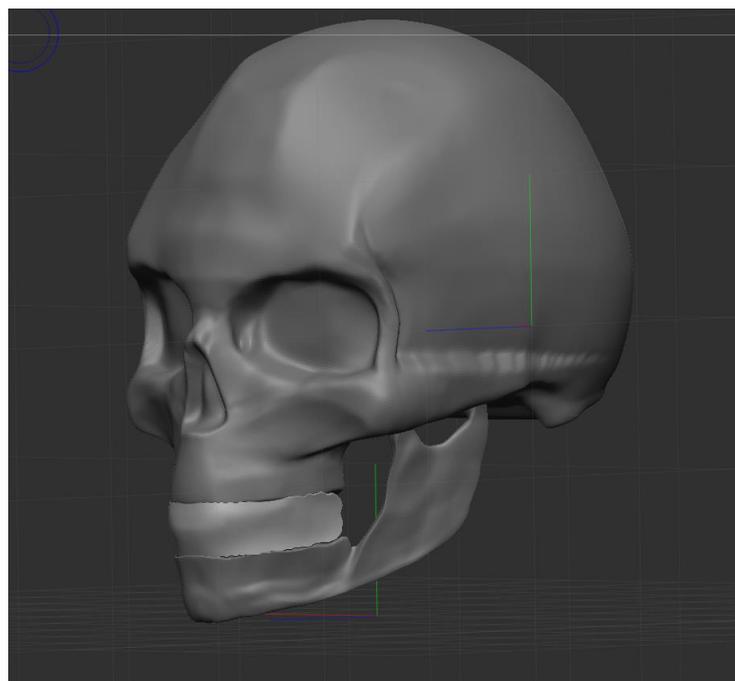


Рисунок 6: Подготовка к размещению зубов

Затем создавались зубы. Достаточно было создать 5 типов зубов: резцы, клыки, малый коренной зуб, большой коренной зуб. В итоге, если считать все зубы, верхние и нижние вышло 8 резцов, 4 клыка, 8 малых коренных зуба и 12 больших коренных зуба (рисунок 7).

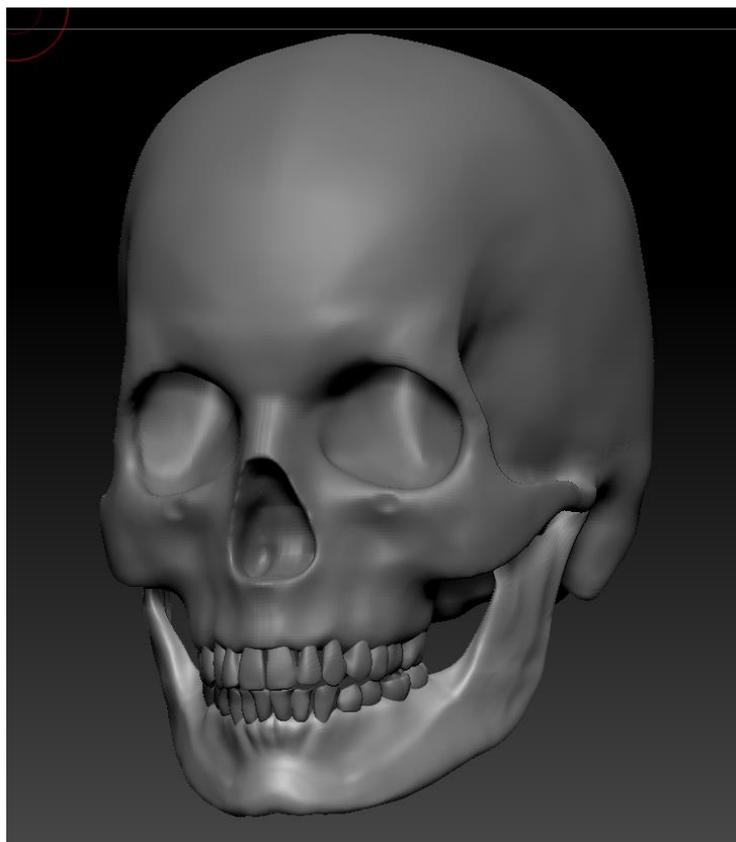


Рисунок 7: Модель черепа женщины

Создав женскую модель черепа, создадим таким же образом мужской череп и череп старика (рисунок 8).

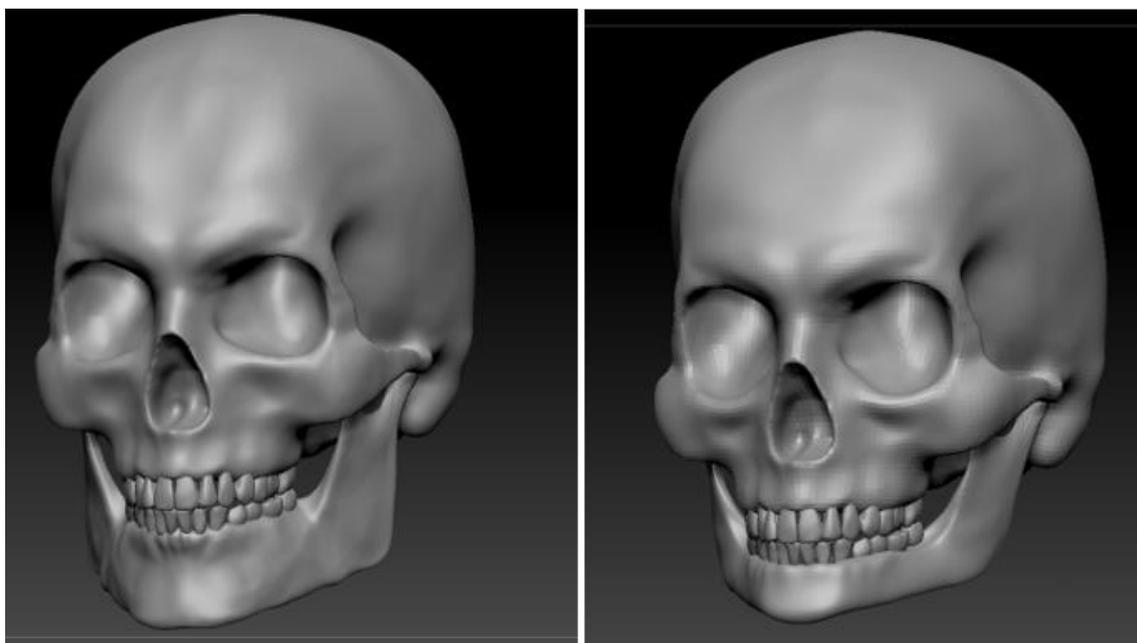


Рисунок 8: Модели черепов мужчины (слева) и старика (справа)

2.2 Скульптинг мышц лица

Голова и в частности лицо персонажа имеют достаточно сложную структуру и для их моделирования необходимо знать анатомические особенности их строения [5]. Если персонаж создается для последующей анимации, то это должно учитываться при создании модели. Правильно созданная модель лица играет огромную роль в передаче эмоциональной составляющей персонажа. Лицо представляет собой сложный набор мышц, которые тянут и растягивают кожу различными способами. Знание этих мышц и их функций необходимо для создания головы и лица персонажа. Группы мышц делятся на два вида: мышцы нижней части лица, которые контролируют рот и челюсть, и верхние мышцы лица, контролирующие глаза и брови. После создания черепа нужно разместить маркеры (рисунок 9) для того, чтобы обозначить пределы мышц и тканей лица. Толщина слоя может достигать 12 мм.

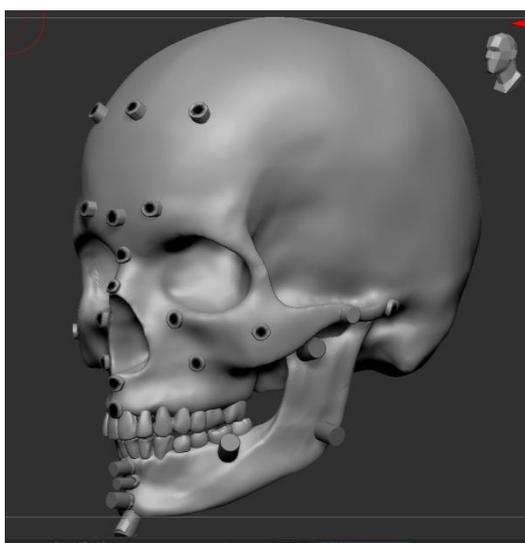


Рисунок 9: Маркеры на модели черепа

Начнем с создания затылочной и височной мышц, далее создадим мышцу, сморщивающую бровь, мышцу гордецов и мышцу депрессор. После этого приступим к моделированию мимических мышц лица: жевательная мышца, малая скуловая мышца, большая скуловая мышца и мышца поднимающая угол рта, мышца, поднимающая верхнюю губу, мышца, опускающая угол рта, мышца, поднимающая верхнюю губу и крыло носа, подбородочная мышца и мышца, опускающая нижнюю губу (рисунок 10).

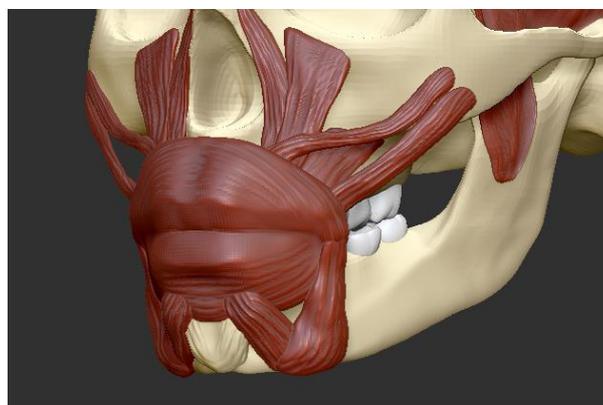


Рисунок 10: Мимические мышцы лица

Добавим жевательную мышцу и щечный мускул (рисунок 11).

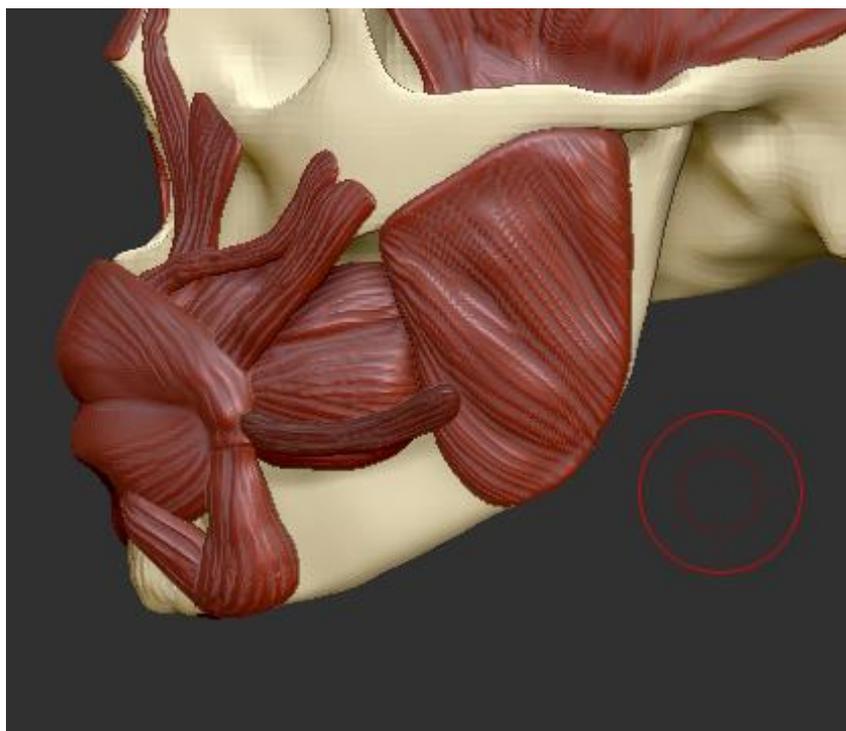


Рисунок 11: Жевательная мышца и щечный мускул

Затем добавим мышцы носа: поперечная носовая мышца, мышца, опускающая перегородку носа и крыльная часть носовой мышцы (рисунок 12).

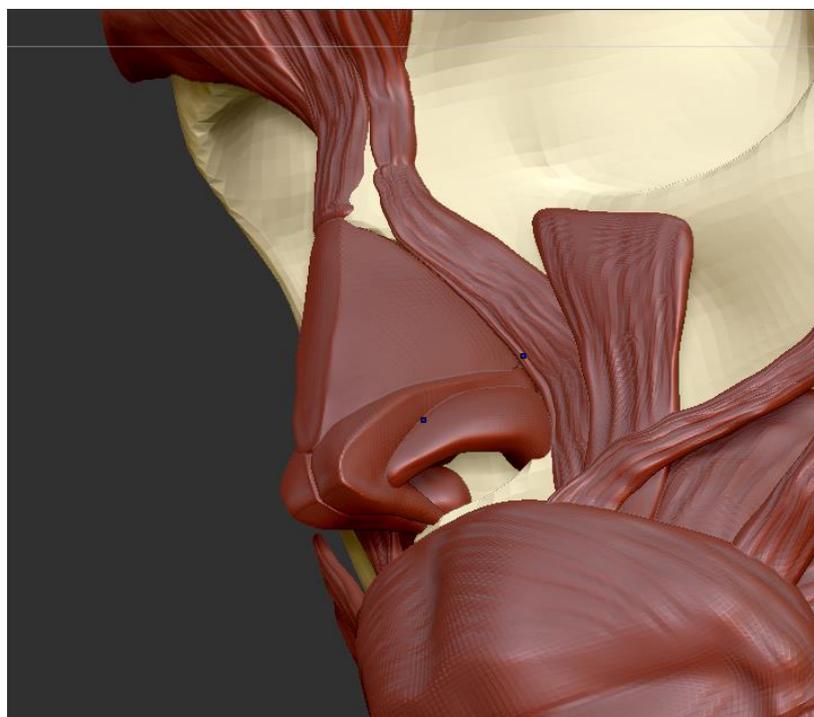


Рисунок 12: Мышцы носа

Затем добавим круговую мышцу глаза и ухо. После чего, все основные мышцы лица готовы.

3. Риггинг и скиннинг

Autodesk Maya предоставляет достаточно широкий инструментарий для работ по созданию скелета персонажа и последующей анимации [6]. Скелетная анимация подразумевает перемещение вершин поверхности моделей и соответствующее изменение формы персонажей. Скелет состоит из костей (bones) и суставов (joints). Не следует однозначно отождествлять эти объекты с биологическими элементами организма. Во многих пакетах, предназначенных для анимации, управление осуществляется посредством манипулирования костями, однако в Maya основным средством управления являются суставы. Кость находится между двумя суставами и отображается для удобства работы.

Среди профессиональных 3D-художников пакет Autodesk Maya используется чаще других. Этот трехмерный редактор взят на вооружение многими крупными кинематографическими и анимационными студиями.

После того, как моделирование персонажа закончено, следует этап подготовки к анимации. Этот процесс называется риггинг (от англ. rigging — оснастка), он заключается в добавлении к модели цифрового скелета и элементов его управления, чтобы аниматор впоследствии мог манипулировать персонажем и анимировать его. Скелет создается посредством создания системы костей персонажа и установкой иерархической зависимости между костями и суставами модели.

Главная задача риггинга — максимально упростить работу аниматора, организовать движение каждой группы костей и создать удобный интерфейс для управления. Правильно построенный скелет позволяет быстро и просто манипулировать всеми частями анимируемой модели.

Удобство скелетной анимации заключается в том, что она позволяет манипулировать большим количеством элементов с помощью малого количества управляемых контроллеров.

Обычно скелеты для персонажей человека или животного создают на основе их анатомического строения с небольшими изменениями. Эти изменения в большинстве случаев связаны с учетом особенностей поведения костей в трехмерной среде. Иногда необходимо создание дополнительных костей, которых нет у человека, для более правильной и реалистичной деформации модели. От сложности структуры рига зависит его гибкость и правдоподобность анимации. Но, с другой стороны, чем больше костей в структуре скелета, тем сложнее с ним будет работать.

Скелет состоит из набора сгруппированных и правильно размещенных узлов, называемых суставами (joints). Именно с их помощью осуществляются манипуляции над персонажем. А кости в системе скелета задают лишь расстояние между суставами, а также делают систему более наглядной.

Далее для суставов задаются значения трансформации и создаются возможные углы поворота и вращений, которые позволяют избежать противоестественных трансформаций, например, чтобы руки и пальцы не гнулись в ненужном направлении.

Благодаря тому, что между костями персонажа устанавливается иерархическая зависимость, перемещение каждой кости, зависимой от другой, представляет собой набор ее собственных трансформаций и трансформаций родительской кости. Правильная настройка этих зависимостей упрощает процесс анимации, например, позволяет указывать траекторию смещения одних костей, которые будут тянуть за собой другие, находящиеся в иерархическом подчинении.

Риггинг персонажа «старик» начнем с размещения костей на лице (рисунок 13).

От того, в каких местах будут расположены кости, зависит будущая анимация, для этого и пригодятся знания анатомии мышц лица.

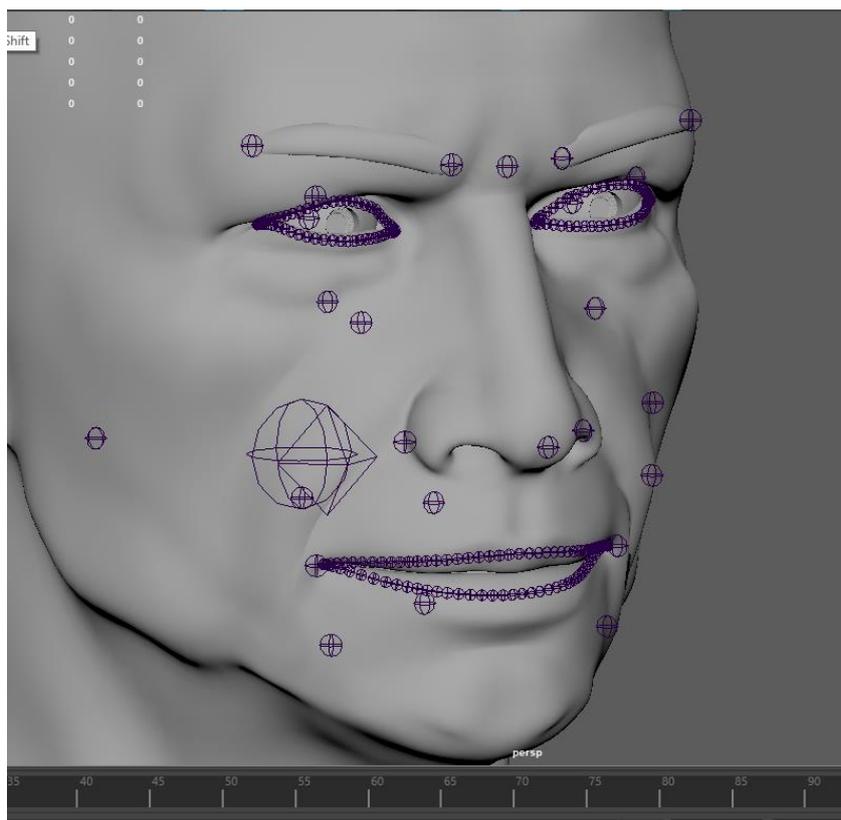


Рисунок 13: Риггинг персонажа «старик»

После того как управляющие элементы готовы, необходимо связать их с моделью, чтобы при анимации она двигалась за костями скелета. Этот процесс называется скиннинг (от англ. skinning — буквально “натягивание кожи”). Скиннинг заключается в связывании вершин поверхности персонажа с костями. Участки модели крепятся к соответствующим участкам скелета (рисунок 14).

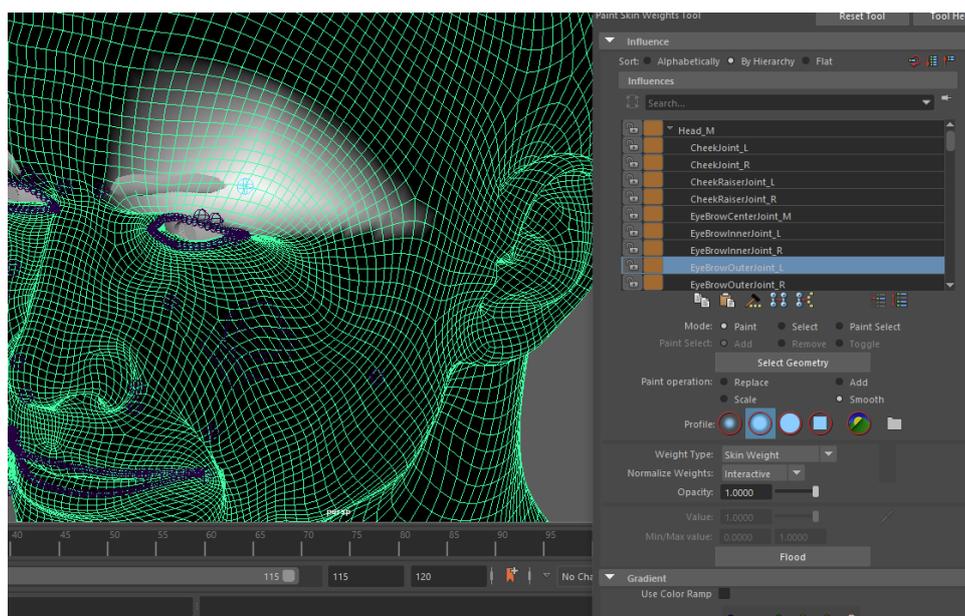


Рисунок 14: Скиннинг модели

После настройки скиннинга персонажа создадим контроллеры для верхней части модели и для языка (рисунок 15).

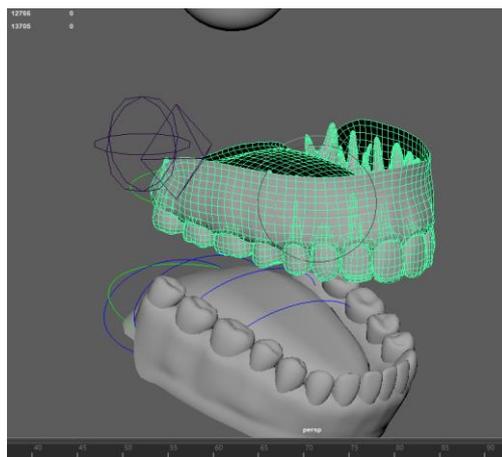


Рисунок 15: Контроллеры для языка

Контроллеры необходимы для удобства управлением персонажа, чтобы аниматору не приходилось перемещать сами суставы. Настройка контроллеров заключается в создании связей между узлами различных объектов. Это позволяет получить анимацию одного объекта на основе анимации другого. Этого можно добиться с помощью ограничений (constraints) и управляемых ключей (drivenkey). Ограничения создают прямую связь между различными атрибутами объекта-источника и объекта-мишени. А управляемые ключи устанавливают связи между объектами сцены, позволяющие создать управления различными частями персонажа.

С помощью этих двух инструментов осуществляется связывание костей и контроллеров. На перемещение контроллеров можно устанавливать ограничения, например ограничить натяжения щеки, чтобы деформация была естественной.

Работа с суставами ведется последовательно, сначала челюсть, затем рот, глаза, веки, брови, нос и щеки. В лицевом риггинге важно учитывать, что все элементы будут между собой связаны, например, при поднятии и опускании брови за ней движется так же и веко, эти мелочи позволяют получить правдоподобную модель

4. Управление эмоциями персонажа

Множество возможных выражений лица можно разбить на несколько основных категорий: ярость, отвращение, страх, радость, грусть и удивление. Когда лицо выражает ярость, глаза широко открыты, брови опущены. Рот обычно открыт, губы напряжены, зубы обнажены. Челюсть может быть опущена. При отвращении все лицо напряжено, глаза сужены, участок между бровями слегка опущен. Рот закрыт, верхняя губа напряжена, образуя презрительную усмешку.

Если человек испытывает страх, обычно рот широко открыт, его нижние углы оттянуты назад. Челюсть опущена, глаза широко открыты, брови подняты. В момент радости губы изогнуты вверх, образуя улыбку. Видны верхние зубы, щеки приподняты. Брови, как правило, расслаблены.

При грустном выражении нижние углы рта оттянуты вниз, нижние зубы обнажены. Глаза сощурены и могут закрываться во время плача. Внутренние уголки бровей приподняты. Когда персонаж удивляется чему-то, глаза широко открыты, брови подняты, но не образуют морщин. Рот расслаблен, челюсть свободно висит.

Верхняя часть лица вносит основной вклад в создание выражения персонажа. Один из способов быстро изменить выражение лица состоит в изменении положения бровей. Их положение, зачастую лучше, чем любая другая часть лица, способствует передаче эмоции. При поднятых бровях лицо становится более открытым, и персонаж выглядит радостным. Опущенные брови, как правило, соответствуют отрицательным эмоциям, например, ярости [7].

Придадим элементам модели положения, соответствующие некоторым эмоциям (рисунки 16-19).



Рисунок 16: Грусть

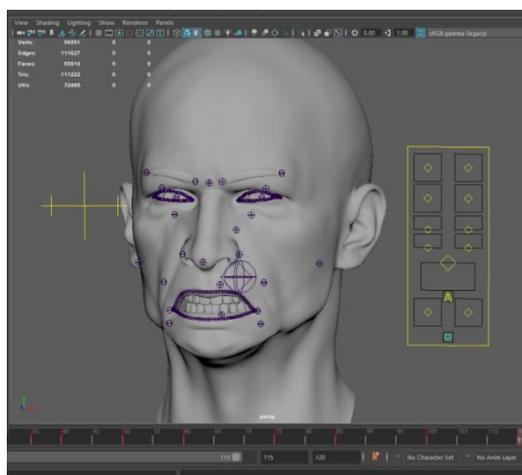


Рисунок 17: Отвращение

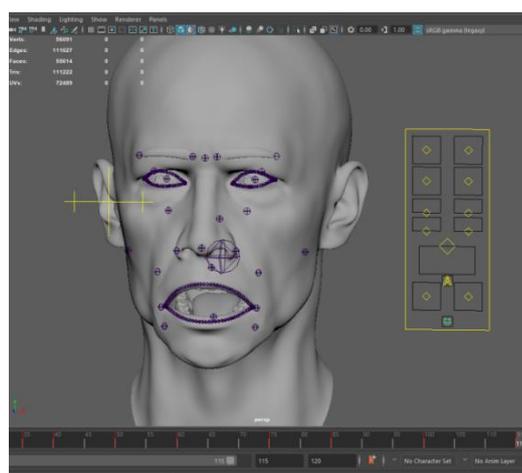


Рисунок 18: Страх



Рисунок 19: Удивление

5. Выводы

Проведенные исследования позволяют заключить, что чем больше требования к реалистичности персонажа, тем более близкой к реальности должна быть его трехмерная модель, что приводит к необходимости привлечения данных об анатомии и физиологии организма. Сформированные в ходе графической подготовки студентов компетенции [1], а также полученные при моделировании персонажей знания и умения могут быть использованы при разработке анимационных роликов, компьютерных игр, обучающих программ.

6. Литература

- [1] Vitaly Karabchevsky, Methodological foundations for teaching computer graphics for students in IT areas, in: CEUR Workshop Proceedings Volume 2744, 2020 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision, GraphiCon 2020; Saint Petersburg; Russian Federation. doi: [10.51130/graphicon-2020-2-4-28](https://doi.org/10.51130/graphicon-2020-2-4-28).
- [2] Уильям Воган, Руководство по топологии, 1-е издание. – М.: Gumroad, 2018. – 68с.
- [3] Эрик Келлер, Введение в ZBrush. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 754 с.
- [4] А.Ф. Шумбель, Основы рисунка. – М.: Высш. шк., 1994. – 159 с.
- [5] Мышцы и фасции головы. – Минск: Белорусский государственный медицинский университет, 2017. URL: https://www.bsmu.by/downloads/kafedri/k_anatomia/stud/2017-2/mr12.pdf.
- [6] Сергей Цыщын, Понимая МАЯА, –М.: ООО «Арт Хаус медиа», 2019. – 702 с.
- [7] Джадд Симантов, Лицевой риг персонажа, 2013. URL: <https://perevodvsem.ru/threads/cg-workshops-character-facial-rigging-eng-rus.124/>.

Прикладные САПР и приложения на основе геометрического ядра C3D для проектирования изделий с функциональными кривыми

В.Г. Муфтеев¹, А. Максименко¹, Р.И. Ахметшин², А.П. Зелев³, Р.А. Зиятдинов⁴, Ф.Т. Зиганшина³, Р.И., Набиев², И.М. Фархутдинов⁵, М.М. Фаттахов³

¹C3D Labs, Алтуфьевское шоссе, д.1, г. Москва, 127106, Российская Федерация

²Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса, д. 12, г. Уфа, 450008, Российская Федерация

³Уфимский государственный нефтяной технический университет, Улица Космонавтов 1, г. Уфа, 450064, Российская Федерация

⁴Кафедра промышленной инженерии, Университет Кемён, г. Тэгу, Южная Корея

⁵Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматриваются методы геометрического моделирования функциональных кривых, качество которых определяет проектные характеристики промышленного изделия. Устанавливается проблема невысокого качества существующих методов геометрического моделирования функциональных кривых. Для решения данной проблемы предлагается использовать функционал геометрического ядра C3D FairCurveModeler, разработанного для моделирования кривых высокого качества по критериям плавности (кривых класса F). В основе функционала геометрического ядра C3D FairCurveModeler лежат методы инженерной геометрии, вычислительной геометрии и теория NURBS кривых. C3D FairCurveModeler обладает большим потенциалом применения в области моделирования промышленных изделий, так как позволяет существенно повысить их характеристики за счет улучшения качества формы. Для ускорения внедрения в инженерную практику функционала C3D FairCurveModeler предлагаются приложения-релизы C3D FairCurveModeler на платформах CAD-систем и Microsoft Excel, облачный продукт WebFairCurveModeler, разработанные на основе библиотек геометрического ядра C3D. Предлагаются специализированные прикладные САПР и приложения, разработанные на основе приложений-релизов C3D FairCurveModeler, для моделирования рабочей поверхности плуга, аэродинамического профиля, моделирования профилей лопаток газотурбинных двигателей и паровых турбин, моделирования профиля плоского кулачка, трассы дорог и эстетических кривых.

Ключевые слова

C3D Labs, C3D FairCurveModeler, эстетические кривые, плавные кривые, кривые класса F

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: muftejev@mail.ru (В.Г. Муфтеев), artem.maximenko@c3dlabs.com (А. Максименко), ahmetshin@bk.ru (Р.И.Ахметшин), zelev7@mail.ru (А.П. Зелев), ziatdinov@kmu.ac.kr (Р.А. Зиятдинов – *루산 지아디노프), fairusa85@mail.ru (Ф.Т.Зиганшина), dizain55@yandex.ru (Р.И. Набиев), ildar1702@mail.ru (И.М. Фархутдинов), adtsp@yandex.ru (М.М. Фаттахов);
ORCID: 0000-0003-4352-3381 (В.Г. Муфтеев); 0000-0002-3822-4275 (Р.А. Зиятдинов);

Applied CAD Systems and Applications Based on the C3D Geometric Modeling Kernel, Used For the Design of Products with Functional Curves

V.G. Muftejev^{*,1}, A. Maximenko¹, R.I. Akhmetshin², A.P. Zelev³, Rushan Ziatdinov^{**,4}, F.T. Ziganshina³, R.I. Nabiyev², I.M. Farkhutdinov⁵, M.M. Fattakhov³

¹ C3D Labs, Altuffjevskoe shosse 1, 127106 Moscow, Russian Federation

²Ufa State Aviation Technical University, K. Marksa Street, 12, 450008 Ufa, Russian Federation

³Ufa State Petroleum Technological University, Cosmonavtov Street 1, 450064 Ufa, Russian Federation

⁴Department of Industrial Engineering, Keimyung University, 704-701 Daegu, Republic of Korea

⁵Bashkir State Agrarian University, 50-letia Octiabria Street, 34, 450001 Ufa, Russian Federation

Abstract

The following article illustrates the methods of geometric modelling of functional curves; the quality of which determines the design characteristics of an industrial product. The problem with the low quality of existing methods in geometric modelling of functional curves is identified. To solve this problem, the article proposes the use of the features of the C3D FairCurveModeler geometric modelling kernel developed for high-quality curve modelling, according to smoothness criteria (class F curves). The features of the C3D FairCurveModeler geometric modelling kernel are based on engineering and computational geometry, as well as the NURBS theory. The C3D FairCurveModeler has a great potential for industrial modelling applications, as it can improve a product's characteristics by refining its shape quality. The C3D FairCurveModeler release applications for CAD and Microsoft Excel platforms; the WebFairCurveModeler cloud product developed based on libraries of the C3D geometric modelling kernel are offered to accelerate the implementation of the C3D FairCurveModeler features in the engineering practice. Specialized CAD applications, as well as applications based on the C3D FairCurveModeler, are presented for modelling of a plough working surface, an aerodynamic profile, gas turbine engine, steam turbine blade profiles, flat cam profile, a road and aesthetic curves.

Keywords

C3D Labs, C3D FairCurveModeler, Fair Curves, Smooth Curves, Class F Curves

1. Введение

Плоские и пространственные кривые, определяющие некоторую функциональную характеристику объекта промышленного дизайна, целесообразно именовать *функциональными кривыми* [1, 4]. Эти кривые применяются для решения проектных задач, возникающих в разных инженерных отраслях. С целью заинтересовать читателя, приведем несколько простых примеров [1, 4]:

- профиль крыла самолета создает подъемную силу, поэтому при моделировании кривой профиля необходимо максимизировать подъемную силу с учетом минимизации лобового сопротивления;
- трасса дороги должна обеспечивать комфортную и безопасную езду на транспортном средстве с определенной скоростью, поэтому форма трассы дороги должна быть максимально плавной при имеющихся ограничениях;

* Please contact the author for correspondence in Russian language.

** Please contact the author for correspondence in English language.

- профиль кулачка определяет перемещение толкателя с клапаном для обеспечения необходимого закона газораспределения, поэтому при его конструировании возникает необходимость безударного плавного движения клапана;
- кузовные поверхности автомобиля, архитектурные формы здания можно отнести к функциональным поверхностям, если эстетические качества и красоту рассматривать как проектную характеристику изделия, определяющую его потребительские свойства.

В семействе функциональных кривых можно выделить подсемейство инженерных аналитических кривых, единственным оптимальным образом обеспечивающих некоторую проектную характеристику объекта. К ним, например, можно отнести эвольвенту окружности, применяемую при дизайне профиля зубьев зубчатого колеса, брахистохрону — кривую наискорейшего спуска, используемую для транспортировки предметов [2]. Цепная линия для моделирования поверхности купола или висячих конструкций, а также клотоида, используемая для конструирования участков виража с линейным изменением центробежной силы, начиная с нуля [3], — всё это примеры инженерных аналитических кривых.

Независимо от специфических особенностей проектируемых объектов, можно ввести универсальные требования к качеству геометрических форм функциональных кривых. В работе [4] был предложен обобщенный список требований к качеству форм функциональных кривых, инвариантных относительно специфических особенностей проектируемого объекта: порядок гладкости не ниже 4-х; плавное кручение пространственной кривой; ограничения на максимальные значения кривизны и скорости её изменения; минимизация функционала потенциальной энергии. Функциональные кривые, удовлетворяющие этим требованиям, называются *кривыми класса F* [5]. Именно этим они отличаются от кривых класса A [17].

На основе предшествующих теоретических исследований, разработанных методов и программ геометрического моделирования функциональных кривых [6] разработан новый раздел геометрического ядра C3D Modeler, позволяющий строить кривые класса F. Полное описание функционала дается в руководстве пользователя [7].

Проблема: методы геометрического моделирования изделий с функциональными кривыми в настоящее время неудовлетворительны.

Как продвинуть в коллективы инженеров, проектирующих изделия с функциональными кривыми, инструментарий C3D FairCurveModeler? Ожидать, когда разработчики САПР внедрят в свои системы функционал C3D FairCurveModeler?

Поставлена цель: ускорить внедрение функционала C3D FairCurveModeler в практику проектирования изделий с функциональными кривыми.

Для реализации этой цели поставлены следующие задачи: (1) Разработать приложения САД-систем (назовем их релизами C3D FairCurveModeler), дополняющие набор штатных команд командами моделирования кривых класса F, (2) На основе САД-систем с релизами C3D FairCurveModeler разработать специализированные прикладные САПР и приложения для выполнения типовых проектных задач по отраслям.

2. Решение поставленных задач

Авторами был реализован следующий подход к структуре приложений-релизов. Все команды C3D FairCurveModeler реализуются в одной внешней программе. Для приложений-релизов разрабатывается только интерфейс обращений к командам C3D FairCurveModeler. При таком подходе первая задача разделяется на ряд подзадач:

- разработатка COM-компонента, реализующего функционал C3D FairCurveModeler;
- разработатка облачного релиза C3D FairCurveModeler на базе COM-компонента;
- разработатка приложения-релиза C3D FairCurveModeler на базе COM-компонента на платформах САД-систем;
- разработатка приложения-релиза C3D FairCurveModeler на базе COM-компонента на платформе Excel;

- разработатка технологии интеграции приложений-релизов C3D FairCurveModeler с системами компьютерной математики Mathcad, Mathematica, WolframCloud.

2.1. Разработка COM-компонента, реализующего функционал C3D FairCurveModeler по технологиям COM-автоматизация и ActiveX

Разрабатывается COM-компонент WebFairCurveExe.exe – DLL-программа в формате исполнения EXE. WebFairCurveExe.exe регистрирует себя в реестре при выполнении от имени администратора.

DLL-программа разрабатывается на языках программирования C++ на базе MFC и является инвариантным “геометрическим решателем” всех видов релизов FairCurveModeler. Проект выполняется на Visual Studio с обращением к библиотеке Math.lib геометрического ядра C3D.

2.2. Приложения-релизы C3D FairCurveModeler

Приложения-релизы C3D FairCurveModeler расширяют и улучшают базовый функционал CAD-системы. В данном случае набор штатных команд дополняется командами моделирования кривых высокого качества по критериям плавности.

2.2.1. Облачный релиз Web FairCurveModeler

В настоящее время одной из популярных тенденций развития информационных технологий является использование облачных вычислений. Это также применимо к CAD-системам и их приложениям. Для программной реализации облачного продукта Web FairCurveModeler [8] используется технология Visual Studio ASP NET 4. Определяется общая структура web-приложения. На стороне Сервера размещается “геометрический решатель” в виде DLL-компонента WebFairCurveExe.exe. Интерфейсная часть программы реализуется в Visual Studio ASP NET 4, используются языки программирования JScript, C#.

В web-релизе C3D FairCurveModeler моделирование и редактирование кривой осуществляется с помощью пяти видов геометрических определителей: опорной ломаной, касательной ломаной, геометрического определителя Эрмита, GB-полигона сплайновой кривой Безье, S-полигона B-сплайновой кривой.

Интерактивный графический интерфейс моделирования и редактирования вершин геометрических определителей реализуется с помощью контрольных точек в виде синих кружков на графическом поле дисплея, показанный на Рисунке 1.

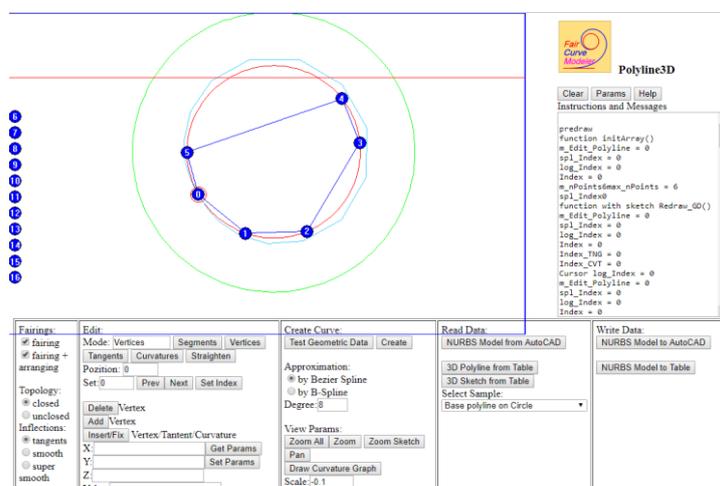


Рисунок 1: Графический интерфейс Web FairCurveModeler. Построение B-сплайновой кривой восьмой степени на опорной ломаной с опцией гармонизации распределения опорных точек.

С помощью графического интерфейса осуществляется:

- построение и редактирование опорной или касательной ломаной представлено на Рисунке 1;
- редактирование касательных векторов в точках перегиба кривой, касательных векторов и значений кривизны в концевых точках опорной ломаной;
- на Рисунке 2 представлено редактирование касательных векторов и значений кривизны во всех точках опорной ломаной геометрического определителя Эрмита;
- редактирование фиксированных точек перегиба на касательной ломаной.

Разрабатываются функции отображения графиков кривой и её кривизны. На Рисунке 1 и 2 графики кривизны отображаются как график над кривой и как функция вида $y=F(x)$.

Можно отметить следующие преимущества web-релиза. Облачный продукт Web FairCurveModeler есть по сути реклама геометрического ядра C3D и функционала C3D FairCurveModeler. Пользователи могут посмотреть и опробовать команды в рекламном варианте web-релиза, а потенциальные покупатели геометрического ядра C3D имеют возможность быстрого ознакомления с функционалом C3D FairCurveModeler.

Предоставление САПР-услуг

В web-релизе выполняются практически все команды C3D FairCurveModeler. Инженеры могут использовать облачный релиз для проектирования изделий с функциональными кривыми и поверхностями.

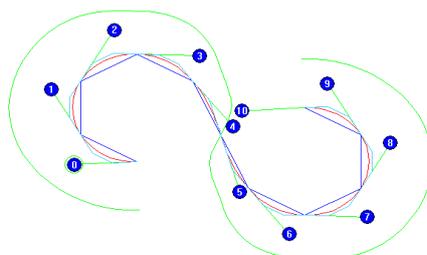


Рисунок 2: Построение кривой на геометрическом определителе Эрмита в Web FairCurveModeler.

После построения кривой высокого качества можно вывести в CAD-систему модель кривой в формате DXF, а после построения поверхности высокого качества можно получить модель поверхности в формате IGES.

Для КОМПАС 3D модель поверхности можно вывести в виде таблицы управляющих точек S-фрейма B-сплайновой поверхности. Это дает возможность дальнейшего редактирования B-сплайновой поверхности в среде КОМПАС 3D штатными командами.

Обучение в образовательной системе

Академический вариант облачного релиза позволяет легко построить обучение методам моделирования функциональных кривых. Встроенные HELP'ы можно использовать как методические указания. Академический вариант является полнофункциональным, поэтому web-релиз может использоваться для НИР и ОКР в образовательных учреждениях.

2.2.2. На платформах CAD-систем

2.2.2.1. КОМПАС 3D

Интерфейс разрабатывается средствами КОМПАС-Мастер. Функционал реализуется COM-компонентом WebFairCurveModeler.exe. На Рисунке 3 показано построение кривой на касательной ломаной.

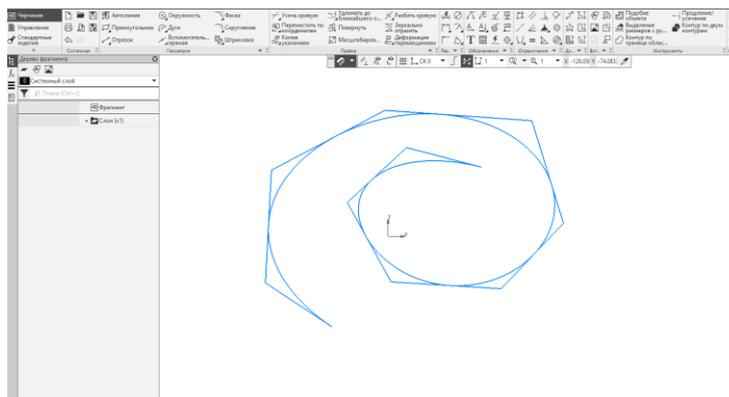


Рисунок 3: Построение кривой на касательной ломаной в приложении-релизе на платформе КОМПАС.

2.2.2.2. Релизы на платформах AutoCAD, nanoCAD

Интерфейс релиза разрабатывается на AutoLISP. Команды выполняет COM-компонент WebFairCurveModeler.exe. В AutoCAD и nanoCAD работает одно и то же приложение. Преимуществом такой структуры организации является то, что нет необходимости для каждой новой версии AutoCAD, nanoCAD приобретать ARX, NRX-средства разработки API. Приложение работоспособно во всех версиях AutoCAD, nanoCAD, включая будущие версии.

В графических средах AutoCAD и nanoCAD удобно работать с пространственными кривыми, которые показаны на Рисунке 4.

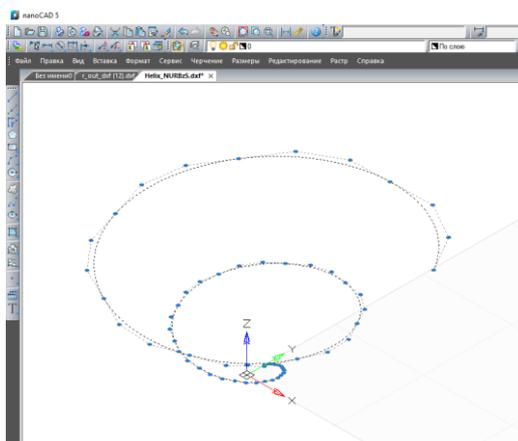


Рисунок 4: Изогеометрическая аппроксимация конической спирали в приложении-релизе на платформе nanoCAD.

2.2.3. Релиз на платформе Microsoft Excel

Релиз имеет следующие преимущества:

- доступность Microsoft Excel и простота освоения приложения;
- простота разработки приложений с использованием Microsoft Excel и VBA;
- возможность использования рабочих страниц Microsoft Excel как базы данных кривых и поверхностей;
- легкость перехода к использованию стандартной базы данных Microsoft Access.

На Рисунке 5 показан геометрический определитель Эрмита для клотоиды, на Рисунке 6 график клотоиды и её кривизны.

7	X	Y	Z	DX	DY	DZ	CVT	VCVT										
8	203,577	11,1153	0	885,3	145,88	0	0,00159664	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	390,14	85,3253	0	715,615	541,233	0	0,00317927	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	493,009	254,678	0	101,928	891,43	0	0,00476891	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	413,428	430,436	0	-764,231	470,094	0	0,00635854	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	229,93	403,506	0	-568,886	-701,914	0	0,00794118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	263,287	228,826	0	802,395	-401,498	0	0,00953081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	405,952	317,017	0	-52,3119	895,713	0	0,0111134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 5: Таблица с параметрами геометрического определителя Эрмита в Microsoft Excel.

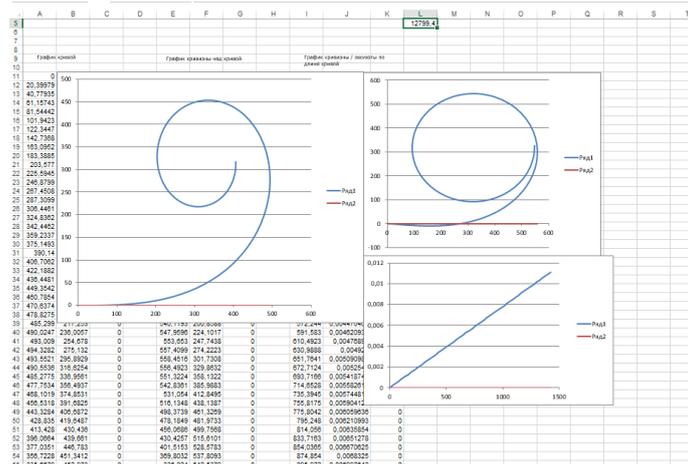


Рисунок 6: Построение графиков клотоиды и её функции кривизны в приложении-релизе на платформе Microsoft Excel.

2.2.3.1. Интеграция релизов с системами компьютерной математики Mathcad, Mathematica, WolframCloud

Разработаны приложения на платформах Mathcad, Mathematica, WolframCloud, позволяющие вычислять сложные аналитические кривые и геометрический определитель на кривых; выполнять тонкий анализ качества кривых, сопряженный с вычислением высших производных. Пользователям рекомендуется использовать интеграцию облачной системы компьютерной математики WolframCloud с Web FairCurveModeler.

Интегрированная система позволяет вычислять аналитические кривые любой сложности, геометрический определитель Эрмита, экспортировать геометрический определитель Эрмита в Web FairCurveModeler и аппроксимировать аналитическую кривую посредством NURBS кривой, что представлено на Рисунке 7.

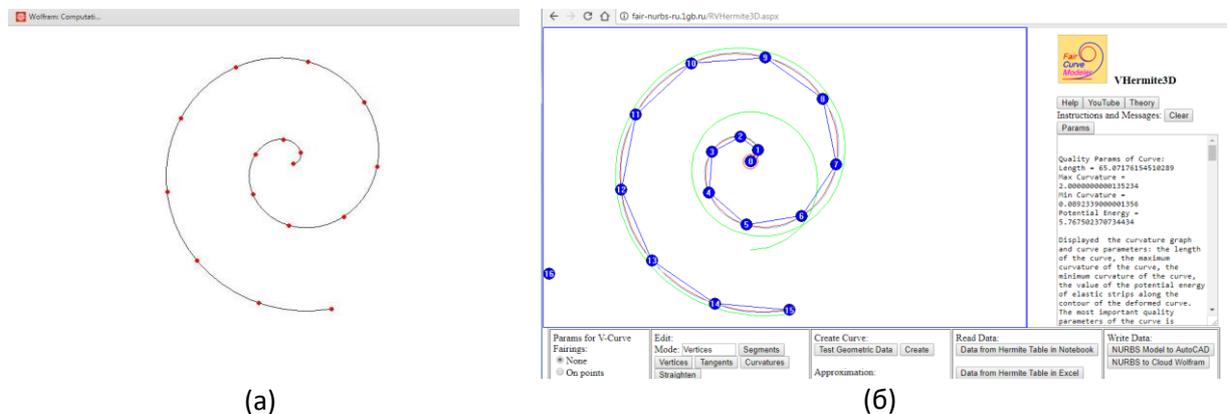


Рисунок 7: а) Визуализация суперспирали Зиатдинова в Wolfram Cloud; б) Экспорт модели в Web FairCurveModeler.

3. Разработка специализированных САПР и приложений

Приложения САД-систем можно подразделить на универсальные и специализированные. Функционал универсальных приложений расширяет или улучшает базовый функционал САД-систем. Например, к универсальным приложениям относятся релизы C3D FairCurveModeler на различных платформах. Приложения-релизы C3D FairCurveModeler улучшают и расширяют базовый функционал САД-систем.

Разработку специализированных прикладных САПР и приложений можно вести в двух направлениях:

- разработка специализированного функционала;
- разработка методики решения конкретных инженерных задач на основе штатного функционала САД-системы.

Кроме того, возможны смешанные типы прикладных САПР и приложений. В настоящее время прикладные САПР и приложения на основе C3D FairCurveModeler разрабатываются техническими университетами г. Уфы (УГНТУ, УГАТУ, БГАУ). Отметим, что при разработке специализированных прикладных САПР и приложений появляются новые методы, которые являются вполне универсальными и в дальнейшем переносятся в функционал C3D FairCurveModeler. В этом смысле, технические университеты являются, своего рода, инновационным полигоном компании C3D Labs.

3.1. Прикладная САПР плуга

Прикладная САПР плуга разрабатывается на основе релиза C3D FairCurveModeler на платформе AutoCAD и nanoCAD. Прикладная САПР относится к смешанному типу, и включает в себя несколько специализированных функций:

- построение направляющей кривой плуга в виде участка клотоиды, вписанной в заданный соприкасающийся треугольник;
- построение поверхности плуга;
- анализ "задира" отвалом плуга пласта почвы и определение разрешенной зоны для контуров отвала на рабочей поверхности плуга.

Для проверки концепции "хорошая геометрия – хорошее изделие" была улучшена форма стандартного плуга. Благодаря улучшенной форме стандартного плуга было повысилось качество вспашки и, одновременно, сэкономлено топливо [9].

3.2. Моделирование аэродинамических профилей

Метод Эббота использовался для создания аэродинамических профилей NASA Digit 4 [10]. Он представляет собой отображения эталонного профиля в виде кривой Безье восьмой степени на среднюю линию профиля. Его недостатком является низкий порядок гладкости средней линии.

Нами предлагается улучшение метода Эббота в рамках рекомендованной концепции. Улучшение метода заключается в использовании более плавных кривых, построенных методами из C3D FairCurveModeler. По предложенному методу выполняется реконструкция и улучшение аэродинамических характеристик авиационного профиля ЦАГИ Р-II-12, что показано на Рисунке 8.

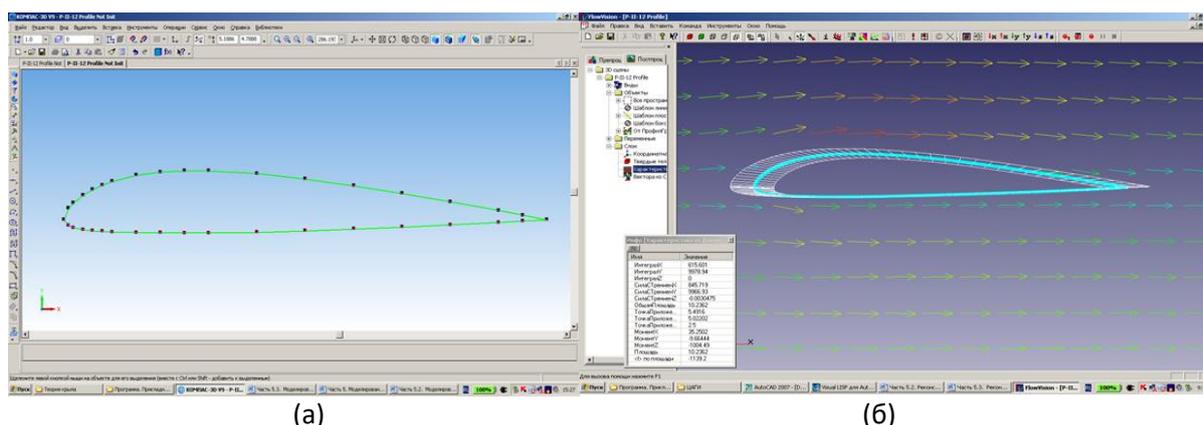


Рисунок 8: а) Авиационный профиль ЦАГИ Р-II-12; б) Испытание авиационного профиля в системе FlowVision.

В результате вычислительного эксперимента, аэродинамическое качество улучшенного авиационного профиля ЦАГИ Р-II-12 повысилось на 8.884% относительно исходного профиля.

По предложенному методу выполняется реконструкция и улучшение аэродинамических характеристик корневого профиля лопатки газотурбинного двигателя (ГТД). На Рисунке 9 показана модель лопатки ГТД была предоставлена Уфимским моторостроительным заводом.

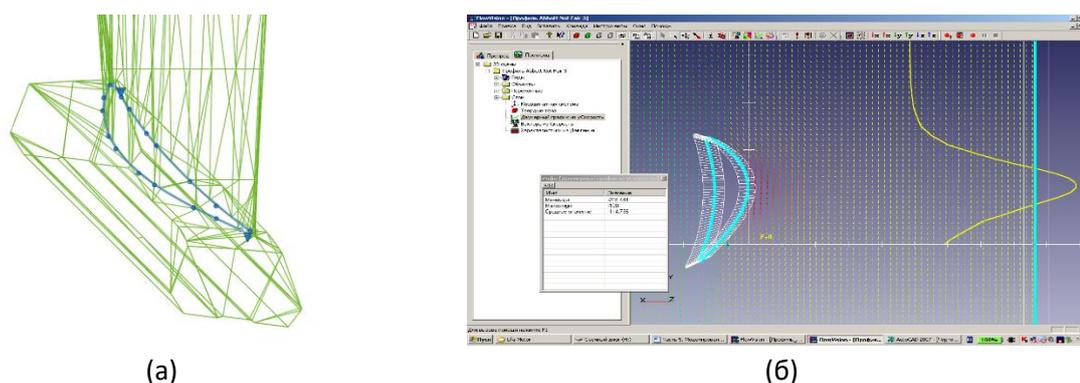


Рисунок 9: а) Модель лопатки ГТД; б) Испытания профиля в системе FlowVision.

Аэродинамическое качество улучшенного профиля повысилось на 7.233% относительно исходного профиля.

3.3. Моделирование профиля плоского кулачка

При моделировании профилей плоских кулачков необходимо решить две проблемы [15, 16]:

- кривые выстоя толкателя должны геометрически точно совпадать с окружностями;
- переходные кривые подъёма и опускания должны сопрягаться с кривыми выстоя с порядком гладкости не менее трёх, во избежание рывка.

Методы C3D FairCurveModeler позволяют строить профили кулачков с этими требованиями. Они обеспечивают построение кривых, геометрически точно моделирующих конические кривые, а также дают возможность построения переходных участков до девятого порядка гладкости. Конструктору остается лишь правильно построить эти кривые надлежащей формы, обеспечивающей необходимую функцию газораспределения. Отметим, что метод построения плавной кривой на касательной ломаной дает возможность прямого построения профиля кулачка с тарельчатым толкателем.

3.4. Моделирование профилей лопаток паровых турбин

В работе [6] был описан метод прямого улучшения. Нами предлагается более общий метод построения межлопаточного канала, который представлен на Рисунке 10 и предлагается метод улучшения отображением на среднюю линию канала графика радиусов соприкасающихся окружностей по длине средней линии.

1. Строится множество соприкасающихся окружностей в межлопаточном канале.
2. На ломаной линии центров окружностей строится плавная средняя линия.
3. Измеряется длина от начала средней кривой до центра окружности, откладывается длина по оси X и восстанавливается высота Y, равная радиусу текущей окружности. Затем по построенным точкам проводится плавная кривая графика радиусов окружностей.
4. На Рисунке 10 показано как находятся точки кривых, огибающих множество окружностей снизу и сверху. Окружности строятся по плавному графику радиусов на плавной средней линии.
5. Так же на Рисунке 10 представлено как по точкам огибающих кривых строятся плавные кривые профиля лопатки.
6. Проводятся вычислительные эксперименты в системе KompasFlow. Результаты испытаний показаны на Рисунке 11.

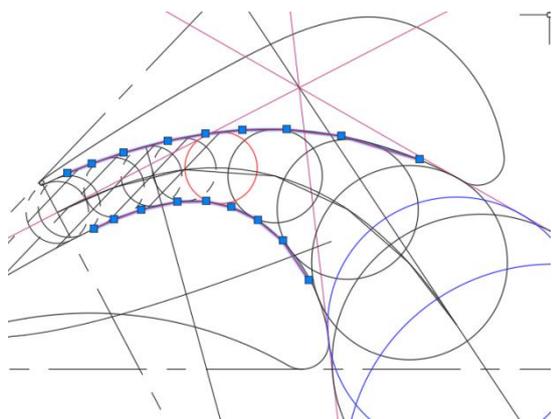


Рисунок 10: Модель межлопаточной области.

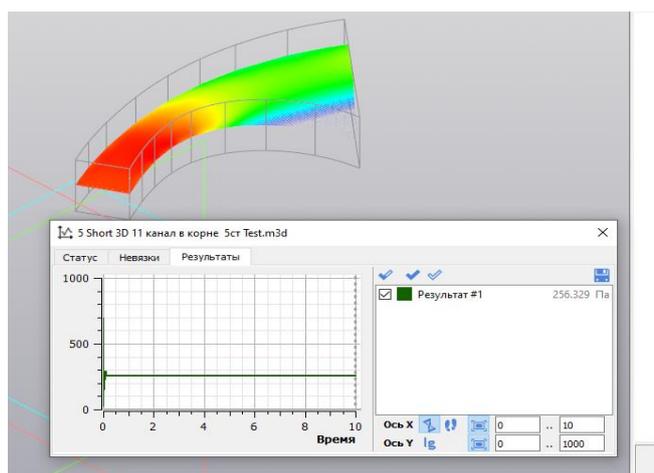


Рисунок 11: Результаты вычислительного эксперимента в системе KompasFlow.

В результате вычислительного эксперимента в системе KompasFlow выходное среднее давление у исходного профиля – 254.951 Па, у улучшенного профиля – 256.329 Па. Основное преимущество второго метода в том, что он даёт большую свободу при моделировании межлопаточного канала. В частности, есть возможность изменять форму графика радиусов и форму средней линии. Данный метод может стать гибким инструментом в руках опытного проектировщика.

В приведенном примере, по сути, была выполнена реконструкция существующей модели, и он подтверждает концепцию, согласно которой можно улучшить форму лопатки паровой турбины, улучшив плавность формы средней линии и графиков радиусов кривизны.

3.5. Моделирование трассы дороги

В практике моделирования трасс широко используется технология тангенциального трассирования, при использовании которой в ломаную теодолитных ходов вписываются закругления.

“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, следствием которых являются «жесткие» трассы с многочисленными отрезками прямых и кривых малого радиуса, не обеспечивающие зрительной плавности, ясности и гармоничности проектируемых автомобильных дорог” [11].

Существующая схема моделирования трассы вписыванием в углы ломаной теодолитных ходов триад “клотоида – окружность – клотоида” имеет множество недостатков. По мнению Бойкова В.Н., одного из основателей САПР Дороги IndorCAD, назрела необходимость представить трассу в виде одной плавной кривой, “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” [11].

Команда функционала C3D FairCurveModeler построения кривой высокого качества по критериям плавности на касательной ломаной идеально подходит к технологии тангенциального трассирования по теодолитным ходам. То есть проектировщик пользуется привычным инструментом задания оси трассы.

Продемонстрированный авторами [1] эффект влияния потенциальной энергии кривой линии траектории движения материальной частицы (транспортного средства) с трением на энергозатраты на перемещение материальной точки (транспортного средства) даёт проектировщикам важный критерий оптимизации трассы дороги.

Глобальный плавный сплайн, вписанный в касательную ломаную, естественно, будет иметь меньшую длину, за исключением экстремальных конфигураций трассы. Высокий порядок гладкости и малые вариации кривизны трассы гарантируют:

- возможность перевозки хрупких грузов;
- комфортность и безопасность перевозок;
- прямой экономический эффект из-за меньшей длины трассы.

3.6. Моделирование эстетических кривых

В случае если эстетические параметры формы изделия определяют его потребительские свойства, такие поверхности и кривые являются функциональными эстетическими кривыми и поверхностями. Функциональные эстетические кривые необходимо оценивать, прежде всего, по базовым критериям качества функциональных кривых [4]. В работе [12] дается экспертная оценка эстетичности кривых с различными параметрами плавности, наиболее высокая оценка дается кривым, удовлетворяющим базовым критериям плавности.

Приложение для моделирования эстетических кривых реализовано на следующих основных положениях и разработках:

- Функционал приложения основан на концепции единства красоты изделия с его функциональностью.
- Представление В-поверхности S-фреймом в открытом формате позволяет моделировать в системе топологически сложные поверхности по методу Форреста [13].
- Разработаны технологии вычисления аналитических эстетических кривых в системах компьютерной математики и их высокоточной аппроксимации в приложениях-релизах C3D FairCurveModeler.
- Введены в функционал важные эстетические кривые (клотоида и сектриса Маклорена [14]).
- Разработаны техники моделирования прямолинейных участков В-сплайновых кривых, построения сопряжений высокого порядка гладкости.

4. Заключение

Рассмотрен новый раздел C3D FairCurveModeler геометрического ядра C3D Modeler. C3D FairCurveModeler – это библиотека моделирования плавных кривых, которая используется в инженерных проектах в разных отраслях техники для моделирования функциональных

кривых. Для ускорения внедрения в инженерную практику функционала C3D FairCurveModeler предложены приложения-релизы C3D FairCurveModeler на платформах CAD-систем (КОМПАС 3D, nanoCAD, AutoCAD), приложение на платформе Microsoft Excel, облачный продукт WebFairCurveModeler. Разработаны технологии интеграции приложений-релизов с системами компьютерной математики (Mathcad, Mathematica, Wolfram Cloud). Предложены специализированные прикладные САПР и приложения для моделирования рабочей поверхности плуга, профилирования плоского кулачка, аэродинамических профилей и профилей лопаток ГТД и паровых турбин, трассирования оси дороги, а также для моделирования эстетических кривых, разработанные на основе приложений-релизов C3D FairCurveModeler.

При разработке функционала C3D FairCurveModeler, приложений-релизов, прикладных САПР использовались методы инженерной геометрии, вычислительной геометрии, теория NURBS кривых [14, 18-24].

5. Литература

- [1] В.Г. Муфтеев, С.Г. Мударисов, И.М. Фархутдинов и др., Обоснование выбора оптимальной формы функциональной кривой динамической поверхности технического изделия, Известия международной академии аграрного образования, Выпуск 17 (2013) 90-93.
- [2] В. Е. Павлов, Брахиостхона применительно к сортировочной горке. Применение современных математических методов в эксплуатации железных дорог, в: Сб.науч. тр., ЛИИЖТа, 1969, сс. 138-146.
- [3] А. А. Савелов, Плоские кривые. Систематика, свойства, применения: Справочное руководство, Физматлит, Москва, 1960.
- [4] В. Г. Муфтеев, Р. А. Зиатдинов, Функциональность и эстетичность кривых линий в промышленном дизайне: многокритериальный подход к оценке качества форм в CAD-системах будущего, Вестник машиностроения, 7 (2018) 23-27.
- [5] В.Г. Муфтеев, Г.И. Михалкина, А.Н. Романюк и др., Моделирование кривых и поверхностей класса F в интегрированной среде CAD-система + FairCurveModeler + Mathematica, в: Материалы науч.-практ. конф., посвященной 60-летию кафедры "Трактора и Автомобили", ФГБОУ ВПО БГАУ, '13, Изд-во БГАУ, Уфа, 2013, сс. 282-291.
- [6] Валериян Муфтеев, Артем Максименко, Функциональные кривые высокого качества — инновация в геометрическом моделировании от C3D Labs, Журнал 'САПР и Графика', Май, (2021), 63-71.
- [7] В.Г. Муфтеев, Инструкция по работе с C3D FairCurveModeler. URL: http://fair-nurbs.com/DOC/C3D/14_Тестирование_методов_моделирования_кривых.htm
- [8] В.Г. Муфтеев, А.Р. Марданов, А.Н. Романюк, В.Г. Турта, И.М. Фархутдинов, Программа изогеометрического моделирования кривых линий высокого качества. Web-приложение CAD-систем, в: Материалы международной научно-технической интернет-конференции, Компьютерная графика и распознавание изображений, '12, Винница, 2012, сс. 127-139.
- [9] И.М. Фархутдинов, Совершенствование лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга на основе моделирования технологического процесса вспашки, Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук, Башкирский государственный аграрный университет (БГАУ), Уфа, РФ, 2012.
- [10] W. Boehm, Bézier presentation of airfoils, Computer Aided Geometric Design, 4 (1987) 17-22.
- [11] В.Н. Бойков, Методология и практические методы автоматизированного трассирования реконструируемых автомобильных дорог, диссертация на соискание доктора технических наук, Московский государственный автомобильно-дорожный институт, Москва, 2002.

- [12] Raphael Linus Levien, From Spiral to Spline_Optimal Techniques in Interactive Curve Design, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 2009.
- [13] A.R. Forrest, A unified approach to geometric modelling, in: SIGGRAPH, '78, New York, ACM, 1978, pp. 264-270.
- [14] И.И. Котов, Начертательная геометрия, Высшая школа, Москва, 1970.
- [15] А.П. Рожков, Кулачок привода клапана, Авторское свидетельство №1237778, приоритет от 5 сентября 1983 г., зарегистрирован 15 февраля 1986, с 1 июля 1991 выдан патент взамен авторского свидетельства.
- [16] M. Neamtu, H. Pottmann, LL Schumaker, Designing NURBS cam profiles using trigonometric splines, Journal of Mechanical Design 120 (2) 175-180.
- [17] Farin, G. Class A Bézier curves, Computer Aided Geometric Design, 23 (2006) 573–581
- [18] Н.Н. Голованов, Геометрическое моделирование, КУРС: ИНФРА-М, Москва, 2019.
- [19] А. Фокс, М. Пратт, Вычислительная геометрия, Мир, Москва, 1989.
- [20] D.L. Gardon, T-Spline Simplification, Brigham Young University, 2007.
- [21] Ф. Препарата, М. Шеймос, Вычислительная математика, Мир, Москва, 1989.
- [22] M.E. Mortenson, Geometric Modeling, Industrial Press Inc, New York, 2006.
- [23] Les Piegl, Wayne Tiller, The NURBS Book, Springer, 1997.
- [24] К. Де Бор, Практическое руководство по сплайнам, Радио и связь, Москва, 1985.

Применение дополненной реальности при изучении начертательной геометрии

А.А. Шагалова¹, Т.Н. Томчинская¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603155, Россия

Аннотация

В статье анализируются проблемы развития пространственного мышления студентов при освоении дисциплины «Начертательная геометрия», решении проекционных задач и предлагается их решение с использованием технологии дополненной реальности. Рассмотрены понятие и технология дополненной реальности, технологии трекинга. Дано обоснование актуальности и своевременности использования технологии дополненной реальности для поддержки образовательных процессов, а также выявлена цель работы. В статье исследуется использование технологий дополненной реальности в обучении студентов пространственному мышлению, что позволяет сэкономить время на передачу и усвоение информации, полученной студентами в рамках данной дисциплины. Проведен анализ существующих исследований в области применения технологии дополненной реальности при преподавании дисциплины «Начертательная геометрия». Показана возможность использования технологии дополненной реальности в образовании с целью наглядного представления учебного материала. Рассмотрен проект разработки мобильного AR-приложения для визуализации задач учебно-методического пособия по начертательной геометрии на базе платформы Vuforia. Предлагаемый программный продукт реализован на мобильной платформе с операционной системой Android. При разработке программного обеспечения используется язык программирования C# для написания скриптов для реализации требуемого функционала, в частности интерактивного взаимодействия с трехмерными объектами.

Ключевые слова

Дополненная реальность, 3D - моделирование, пространственное мышление, начертательная геометрия, маркер, трекинг

Application of augmented reality to study descriptive geometry

A.A. Shagalova¹, T.N. Tomchinskaya¹

¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva, st. Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russia

Abstract

This article analyzes the problems of the development of spatial thinking of students in the development of the discipline "Descriptive geometry", solving projection problems and proposes their solution using the technology of augmented reality. The concept and technology of augmented reality, tracking technologies are considered. The substantiation of the relevance and timeliness of its use to support educational processes is given. The article explores the use of augmented reality technologies in teaching students' spatial thinking, which saves time on the transfer and assimilation of information received by students within the framework of this discipline. The analysis of existing research in the field of application of augmented reality technology in teaching the discipline "Descriptive geometry" is carried out. The possibility of using augmented reality technology in education for the purpose of

Графикон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября, 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: stasya3019@yandex.ru (А.А. Шагалова), tonchinskaya@mail.com (Т.Н. Томчинская)
ORCID: 0000-0002-5997-9140 (А.А. Шагалова); 0000-0002-4693-7478 (Т.Н. Томчинская)

visual presentation of educational material is shown. A project for the development of a mobile AR application for visualizing the tasks of a textbook on descriptive geometry based on the Vuforia platform is considered. The proposed software product is implemented on a mobile platform with the Android operating system. When developing software, the C# programming language is used to write scripts to implement the required functionality, in particular, interactive interaction with three-dimensional objects.

Key words

Augmented reality, 3D modeling, spatial thinking, descriptive geometry, marker, tracking

1. Introduction

Currently, there is a rapid growth of software products that use the latest modern technologies, including augmented reality technologies, for various fields of human activity: medicine, education, entertainment and tourism, engineering, etc. Such popularity of this technology can be explained by human interaction with three-dimensional objects in three-dimensional space. This article discusses the problems of the development of spatial thinking of students in the study of the discipline "Descriptive geometry", and offers their solution using the technology of augmented reality.

The development of spatial thinking is an urgent problem of modern engineering education. The process of studying the discipline "Descriptive Geometry" is significantly difficult, some topics are especially difficult for students to master. This is due to the fundamental difference between the drawings of Euclidean geometry and descriptive geometry, as well as insufficient training of students. Teachers do not always have layouts at their disposal, with the help of which they can visually show a particular task. Often even layouts do not allow you to fully understand the essence of projection mapping tasks. With the use of the proposed application with augmented reality, the student can always comprehend the task in a calm atmosphere, in contrast to the use of the layout, which can be considered for a limited time in the classroom, because the 3D model is always nearby, since almost everyone has a mobile device.

The purpose of the work is to develop a mobile application using augmented reality technology for visualizing the tasks of descriptive geometry based on a teaching aid, and thereby to demonstrate the possibility of developing students' spatial thinking skills.

2. Marker and markerless augmented reality technologies

Augmented reality is currently an advanced technology, and one of the most promising areas of modern projects in the IT industry.

Augmented reality (AR - "augmented reality") is a technology that allows you to superimpose various information, for example, text, graphics, audio and other virtual objects on real objects in real time. The use of AR technology in many spheres of human life provides an opportunity to interact with virtual and real objects, which makes it possible to build the processes of studying disciplines in a more visual and interesting way, and makes it possible to automate the process of obtaining the necessary information for specialists in many industries.

The development of modern AR applications is based on the use of marker, "markerless" or spatial tracking technology. The most popular is marker technology, which involves the use of an image - a template within a frame. Each such template is associated with its own specific three-dimensional object. When the camera of a mobile device is pointed at a template, it is recognized and the corresponding model is reproduced, which is tied to this template within the software product.

On the other hand, tags are not required for markerless technology to work. The application scans the surrounding landscape with the camera and imposes a specific grid on which software algorithms calculate the control points, to which, in turn, three-dimensional objects will be snapped. Spatial tracking technology is based on the spatial location of certain objects. This technology is based on the

use of GPS / GLONASS data and compass, which are built into the mobile device. The coordinates determine the location of the three-dimensional object in space. As soon as the user's coordinates match the coordinates set in the augmented reality program, the application will be activated.

Undoubtedly, the using of augmented reality technology contributes to the development of a student's spatial thinking. Spatial thinking is a type of human mental activity that provides the creation of spatial images and their operation in solving practical and theoretical problems in the educational process. Spatial thinking implies constant re-coding of images, i.e. constant transition from three-dimensional images to two-dimensional, and vice versa [1]. Thanks to the use of elements of augmented reality in educational processes, the user gets the opportunity to interactively interact with three-dimensional objects - move them, rotate, scale, view from different angles. Such a principle of work, definitely, gives a great impetus to the development of spatial thinking, allows a deeper study of the subject of research.

The absence or minimally developed spatial representations of a person are an obstacle, overcoming which, one can solve the problem of the formation of spatial thinking. In order for the student to be able to independently read and draw a drawing, to solve projection problems, it is necessary to develop his spatial imagination. The study of many engineering disciplines, including descriptive geometry, is one of the most important means of developing human thinking [2].

The use of AR technology in teaching various disciplines should lead to the next stage of the student's development, stimulate the transition from concrete-figurative thinking to abstract thinking. Using AR allows you to apply graphics, animation and audio in an interactive way, which allows you to expand the scope of the principle of visibility. This makes it possible to transmit information to the student in the most understandable and logical way, allows to increase the amount of information received, contributes to the development of spatial thinking and intuition [3]. With the help of AR learning technologies, invisible objects and phenomena, particles, sound, abstract theoretical concepts can be visualized, i.e. a didactic image was created.

3. Development of a mobile application for studying descriptive geometry

Many educational institutions still use various techniques and warm-ups that develop spatial "vigilance" in students, modeling (making paper models of various objects), etc. Despite the rapidly growing popularity of augmented reality technology, the use of this technology in training systems is still not widespread enough, and the introduction of any innovation requires a fairly large amount of time.

At the same time, in educational processes, it is important to ensure a consistent transition from physical volumetric models to digital three-dimensional objects, and from digital to images that students can independently depict on paper, while developing their spatial thinking. After that, gradually complicate the actions themselves with volumetric figures - from the formation and accumulation of spatial images, the ability to operate them to the activation of mental activity when performing various projects [4].

After analyzing the problems of the development of students' spatial thinking in solving educational problems, in order to achieve the set goal of the work, a solution is presented using the use of augmented reality technology. As a result, a mobile application was developed on OC Android with elements of augmented reality for visualizing the tasks of the educational-methodological manual "Descriptive geometry", prepared by the teachers of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva I.Yu. Skobeleva, I.A. Shirshova and M.L. Mukhina. Mobile application development is based on the following technologies and tools:

- tracking marker technology was used;
- a mobile device (Android smartphone or tablet) is used as a display device.

The following stack of software products was chosen to develop the application. The most optimal platform for the development of this training system is the Vuforia SDK. Vuforia SDK is a free library that is constantly being modernized and allows you to create cross-platform applications using a special

game engine Unity [5], has good documentation and many instructions for working with it. Modeling and animation of three-dimensional objects are performed in Autodesk Maya software. It is in this software product that the bulk of the work is created. Also one of the advantages of this program is an easy way to export models to Unity using the .fbx format.

An example of capturing a single label in Unity based on the model from the figure of the tutorial is shown in Figure 1.

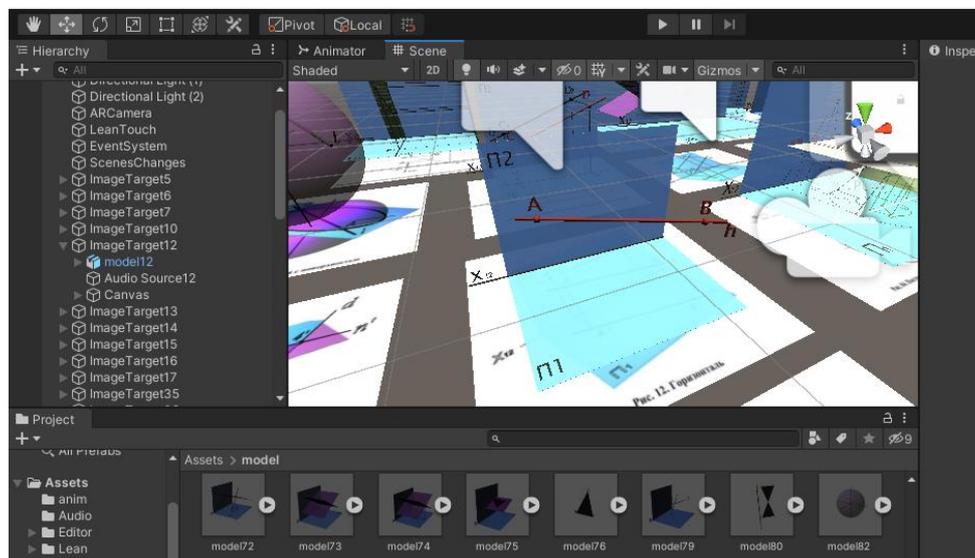


Рисунок 1: Application Scene in Unity

It is also worth adding that the use of such applications in educational institutions is offered only as an auxiliary tool in solving problems of projection display, and is in no way aimed at excluding the teacher from educational processes, modeling or replacing drawing tools, etc.

Figure 2 shows an abstract example of rendering a model when the camera of a mobile device is hovering over a tag.

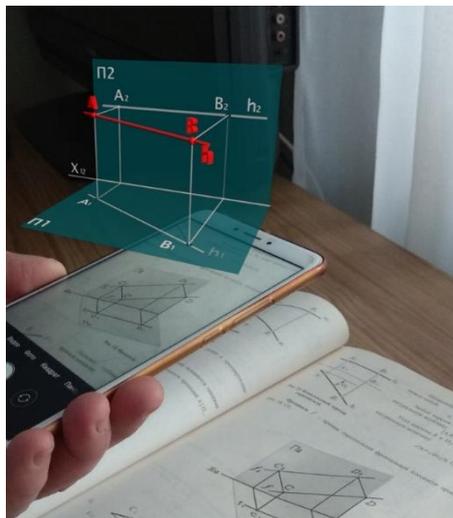


Рисунок 2: Visualization of the tutorial illustration

4. Conclusion

In such a way, the main advantage of using augmented reality technology in teaching processes is the development of spatial thinking in students. Based on the developed prototype of the application, we can already say that students will be able to easily see three-dimensional objects, which usually had

to be represented, calculated and built using traditional methods on paper. With the help of virtual controls, you can animate 3D objects. Also, the three-dimensional model is accompanied by a sound explanation of a particular task. In this case, the sound can be turned off if only a visual representation of the object is required.

Ultimately, this kind of mobile applications using augmented reality technology can be used as an auxiliary tool in solving problems within the framework of a cognitive-visual approach to teaching descriptive geometry and other engineering disciplines.

5. References

- [1] O.S. Zamazyi, Graphic preparation of students in the study of descriptive geometry, engineering graphics // Bulletin of TulSU. Humanitarian sciences. 2011. No. 3-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/graficheskaya-podgotovka-studentov-pri-izuchenii-nachertatelnoy-geometrii-inzhenernoy-grafiki> (date of access: 03/15/2021).
- [2] L.P. Rusinova, Spatial thinking of students in the study of descriptive geometry / L.P. Rusinova. - Text: direct // Young scientist. - 2010. - No. 11 (22). - T. 2. - S. 144-148. - URL: <https://moluch.ru/archive/22/2302/> (date of access: 03/15/2021).
- [3] Yu.A. Veprintseva, Application of visual teaching aids in technology lessons / Yu. A. Veprintseva, T.A. Gorshkova // Scientific-methodical electronic journal "Concept". - 2016. - T. 11. - P. 2516–2520.
- [4] S.V. Terentyeva, Development of spatial thinking in teaching mathematics, Russia, Yekaterinburg, 2020.
- [5] Manual Unity - URL: <https://docs.unity3d.com> (date accessed: 22.11.2020)
- [6] M.V. Voronina, M.A. Chernova and A.V. Semyonova, Augmented reality in the practice of teaching descriptive geometry, engineering and computer graphics - Text: electronic // Scientific library eLIBRARY.RU: Internet portal. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42384613> (date of access: 10/24/2020).



Компьютерная графика в
материаловедении, светотехнике и
дизайне

Computer Graphics in Materials Science,
Lighting Engineering and Design

GraphiCon 2021

27 – 30 сентября 2021
Нижний Новгород, Россия

Лазерно-ультразвуковая диагностика пластиковых изделий, изготовленных методом аддитивных технологий

М.М. Новиков¹, Л.В. Новикова¹, Е.В. Саватеева¹, В.А. Симонова²

¹Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» 140700 г.Шатура, МО, ул. Святоозерская, д.1 Россия

²Научный центр волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (филиал), 123007 г.Москва, 5-я Магистральная ул., 11 Россия

Аннотация

В настоящей работе рассматриваются применения методов неразрушающего контроля и дефектоскопии пластиковых изделий, изготовленных методом аддитивных технологий. Современное развитие аддитивных технологий, связанное с активным переходом от изготовления прототипов и тестовых образцов, к изготовлению функциональных изделий, увеличивает требования к повышению качества изготовления и проведению неразрушающей диагностики готовых изделий, в том числе и из пластиковых материалов. Общая производительность производственного процесса может быть повышена за счет увеличения выхода, обусловленного снижением количества брака, что обеспечивается контролем процесса и качества готовых изделий. Метод лазерно-ультразвуковой диагностики позволяет проводить контроль и дефектоскопию изделий из разных материалов с хорошим пространственным разрешением, что не всегда возможно, например, томографическим сканированием. Таким образом, основной целью данной работы является оценка возможности использования лазерно-ультразвуковых методов для обнаружения потенциальных дефектов и отслеживание влияние технологического процесса аддитивного производства на качество пластиковых изделий.

Ключевые слова

Аддитивные технологии, лазерно-ультразвуковая диагностика, компьютерная графика, лазерная стереолитография, дефектоскопия.

Laser-ultrasound diagnostics of plastic products made by the additive technologies

M.M. Novikov¹, L.V. Novikova¹, E. V. Savateeva¹, V. A. Simonova²

¹ Research Center Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences 140700 Shatura, MO, Svyatoozerskaya str., 1, Russia

² Scientific Center for Wave Research of the Federal State Budgetary Institution of Science of the A. M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences (branch), 123007 Moscow, 5th Main street, 11, Russia

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: novikov@rambler.ru (М.М. Новиков); lrnov@mail.ru (Л.В.Новикова); evsav@mail.ru (Е.В. Саватеева); varvara.simonova@gmail.com (В.А. Симонова)

ORCID: 0000-0003-0626-793X (М.М. Новиков); 0000-0002-7856-6202 (В.А. Симонова)

Abstract

This paper discusses the application of methods of non-destructive testing and flaw detection of plastic products manufactured by additive technologies. The modern development of additive technologies associated with the active transition from the manufacture of prototypes and test samples to the manufacture of functional products increases the requirements for improving the quality of manufacturing and conducting non-destructive diagnostics of finished products, including plastic materials. The overall productivity of the production process can be increased by increasing the yield due to a decrease in the number of defects, which is ensured by process control and the quality of finished products. The method of laser-ultrasound diagnostics allows monitoring and flaw detection of products made of different materials with good spatial resolution, which is not always possible, for example, by tomographic scanning. Thus, the main purpose of this work is to evaluate the possibility of using laser-ultrasonic methods to detect potential defects and to track the impact of the additive manufacturing process on the quality of plastic products.

Keywords

additive technologies, laser-ultrasound diagnostics, computer graphics, laser stereolithography, defectoscopy

1. Введение

Развитие лазерной техники, компьютерных систем трехмерного моделирования, разработка специальных материалов и оборудования сделали возможным прямое изготовление трехмерной компьютерной модели с любой геометрической формой методами добавления материала. Развитие таких технологий в настоящее время позволяет реализовать процесс создания объекта из разных материалов (жидкого полимера, порошка металлов, пластика, бумаги) при помощи разных технологических процессов (отверждение светом фотополимера, тепловое склеивание полимерных нитей, лазерное спекание металлических порошков ...), обеспечивая требуемые параметры: необходимые размеры (от микрон до метров) и их точность, сложность геометрии, качество поверхности, скорость изготовления и функциональность. Сейчас эти технологии шагнули далеко вперед, найдя множество применений на производстве, приближаясь помимо изготовления прототипов и копий к созданию полноценных функциональных моделей. Поэтому в настоящий момент они получили общее название «аддитивное производство». Анализ современного состояния аддитивных технологий, основанных на процессе фотополимеризации [1-2], показывает, что они не только успешно развиваются, осваивая новые ценовые сегменты, но и разрабатываются новые перспективные материалы и оригинальные применения. Разработка новых фотополимерных композиций, обеспечивающие высокие функциональные свойства изделий, изготовленных методом лазерной стереолитографии имеет большое значение для развития аддитивного производства. Основным достоинством этой технологии является возможность быстрого создания изделий и построения моделей сложной формы с высокой точностью. После появления этой технологии в 1981 [3-4] значительные успехи были достигнуты в разработке фотополимерных композиций для создания изделий, обладающих высокими физико-химическими характеристиками [5-7]. Для увеличения производительности производственного процесса и повышения качества изготавливаемых изделий требуется развитие бесконтактных методов обнаружения потенциальных дефектов и отслеживание влияния технологического процесса на качество конечного изделия. В работе [8] было представлено использование магнитно-резонансной томографии (МРТ) для мониторинга, изучения выходного качества пластиковых моделей на основе акрилата, изготовленных с использованием стереолитографии. Было изучено влияние параметров сборки и влажной среды на однородность образца, распределение плотности сшивки, стабильность и образование дефектов. Качественная информация, полученная с помощью визуализации МРТ, была дополнена количественными измерениями времени релаксации ядерного магнитного резонанса и его спектров. Различные типы дефектов в образцах были обнаружены и классифицированы; некоторые дефекты возникли из-за локальных нарушений непрерывности матрицы (частичное застывание отвержденной смолы внутри полимера или образование

пузырьков), в то время как другие дефекты были обнаружены в виде объемного наслоения. Визуализация МРТ в сочетании с релаксометрией и 1-часовой спектроскопией паттернов позволила отслеживать распределение воды внутри образца и наблюдать эффекты набухания, разрыва и химического разложения только при их взаимодействии с водой. В данной работе рассматривается применение лазерной ультразвуковой томографии для исследования пластиковых моделей, полученных методом лазерной стереолитографии для получения более точных данных о геометрии дефектов без длительного взаимодействия с водой.

2. Лазерная стереолитография и лазерная ультразвуковая томография

Лазерная стереолитография является одной из аддитивных технологий. Трехмерный объект при этом формируется послойно воспроизведением каждого слоя на поверхности жидкой фотополимеризирующейся композиции (ФПК) с помощью лазерного излучения, как правило, ультрафиолетового диапазона. ФПК под действием лазерного излучения полимеризуется, образуя тонкую полимерную пленку. Переход к следующему слою осуществляется путем погружения платформы, на которой размещается объект, в емкость с жидкой ФПК на глубину, равную толщине следующего слоя. При полимеризации последующего слоя он приклеивается к предыдущему, что обеспечивает жесткость всего изделия. Формирование слоя осуществляется путем воспроизведения внешних и внутренних контуров и заполнения пространства между ними соответствующей штриховкой. Так как плотность ФПК в жидком состоянии меньше, чем в твердом, то при изготовлении объекта происходит объемная усадка. Этот процесс в свою очередь может приводить к деформации и искажениям формы объекта. Чем протяженней длина штриха и чем больше заполняемая площадь, тем более существенными могут быть деформации, вызванные объемной усадкой. Для уменьшения влияния усадки на искажение геометрии изделия используются разнообразные технологические приемы, связанные с формированием специализированных методов заполнения формирующих слоев [7]. Для диагностики возможных дефектов, связанных с технологией формирования объемных пластиковых изделий методом лазерной стереолитографии, в данной работе использовалась лазерная ультразвуковая томография.

В традиционном ультразвуковом эхо-импульсном методе короткий акустический зондирующий импульс используется для зондирования объекта, а зарегистрированное обратно рассеянное акустическое поле - для восстановления внешней границы и внутренних акустических неоднородностей (рассеивателей) [9]. Лазерный ультразвуковой (ЛУ) метод диагностики основан на генерации звуковых волн лазерным импульсом. Этот импульс поглощается в поверхностном слое исследуемого объекта или в специальном материале, называемым оптико-акустическим (ОА) генератором. Временная форма и амплитуда зондирующего ультразвукового импульса, возбужденного ОА генератором, определяются коэффициентом поглощения света в генераторе, временной зависимостью интенсивности лазерного импульса и плотностью поглощенной лазерной энергии.

ЛУ метод похож на традиционный ультразвуковой метод контроля, однако вместо использования пьезоэлектрических преобразователей для генерации и приема короткого акустического зондирующего импульса в ЛУ методе используется короткий (обычно <10 ns) лазерный импульс для генерации короткого (<100 ns) и широкополосного (1–9 МГц) акустического зондирующего импульса за счет оптико-акустического эффекта [9]. В этом случае хорошо задемпфированные пьезоэлектрические преобразователи могут использоваться для приема обратно рассеянного акустического поля в широком диапазоне частот [9–11]. ЛУ метод - эффективный и быстродействующий, поскольку для генерации зондирующего ультразвукового сигнала используется лазерный импульс, а ширина полосы зондирующего импульса может быть достаточно широкой (от единиц до десятков МГц). При этом ультразвуковые преобразователи могут быть оптимизированы для широкополосного приема и лучшей акустической связи, поскольку они не используются для генерации ультразвука. Это позволяет проводить широкополосный ультразвуковой контроль объектов и эффективно разделять генерацию и обнаружение ультразвуковых сигналов для увеличения отношения сигнал / шум. Кроме того, поперечный профиль акустического пучка повторяет гладкий

поперечный профиль освещающего лазерного луча, таким образом, практически устраняя боковые лепестки [10]. Появление фокусированных пьезоэлементных антенных решеток и активное развитие средств вычислительной техники существенно расширяют возможности лазерно-ультразвуковой (ЛУ) томографии внутренней структуры горных пород, композитных материалов, биологических и других гетерогенных сред [12-15].

2.1. Дефектоскопия пластиковых дисков

Для тест-объекта использовалась модель тонкого диска диаметром 40мм и толщиной 2,5мм, форма диска имеет минимальные деформации, связанные с объемной усадкой, а малая толщина позволяет в одном эксперименте исследовать всю структуру модели, верхние и нижние слои формирования объекта (Рисунок 1).

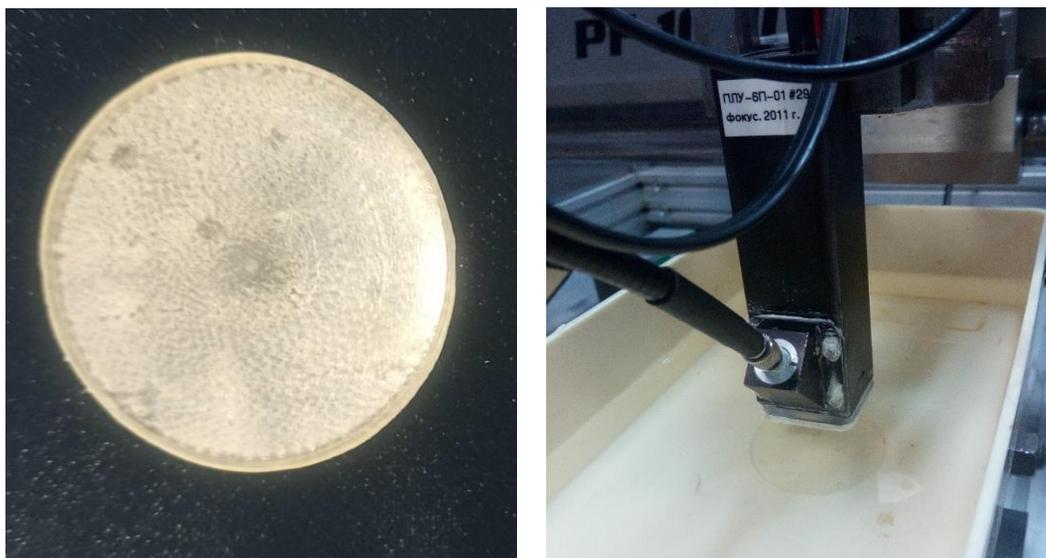


Рисунок 1: Фотография объекта контроля и системы автоматического лазерного сканирования фокусированным преобразователем модели ПЛУ-6П-01.

Технологический стиль формирования объекта.

;Шаг штриховки по X Y

h.step=0.25 0.25

;Цикл смещения X Y

h.shiftstep=2 2

;псевдоЭквидистанта

h.psevdoEquid=0.05

;Отступ штриховки

h.otstup=0.03

;Порядок штриховки (режим): 0/1/2/3 = X/Y/XY/X-Y

h.order=2

;Черезслойная инверсия направления штриховки 1/0 - да/нет

h.iversion=1

;Параметры штриховки верхних и нижних плоскостей

;Шаг штриховки по X Y

hU.step=0.15 0.15

;Цикл смещения X Y

hU.shiftstep=2 2

;псевдоЭквидистанта

hU.psevdoEquid=0.05

;Отступ штриховки

hU.otstup=0.03

;Порядок штриховки (режим): 0/1/2/3 = X/Y/XY/X-Y

hU.order=3.

Образцы изготавливались слоями 150мкм, полное число слоев 17, расчетная глубина полимеризации нижняя плоскость 180мкм, внутренняя штриховка 120мкм, верхняя плоскость 160мкм. В группу образцов входили модели с разным временем задержки лазера на точку, промаркированы соответственно 1 образец – 2 точки, 2 образец – 3 точки, 3 образец - 4 точки. Результаты структуроскопии представляют из себя набор срезов по плоскостям XZ, YZ и XY. Анализ данных сканирования проводится послойно в программе ADC View. На рисунке 2 представлена вкладка программы с результатами контроля **образца №1** со срезами, проходящими через центр образца: в окнах 1-3 представлены срезы XY, YZ и XZ соответственно, окно 4 – окно задания фильтра, в окне 5 представлен сигнал, зарегистрированный в точке поверхности с координатами X и Y, выбранными в окне 1 перекрестием красных маркеров. Все образцы промаркированы. Верхняя поверхность образцов более гладкая. На нижней поверхности образцов видны следы подпорок. Исходно первый нижний слой образцов изготовлялся с более высокой дозой на точку для прочности всего образца, доза последнего верхнего слоя также была чуть выше дозы всех слоев (но меньше, чем доза самого первого нижнего слоя) для обеспечения гладкой поверхности у образца.

В группу образцов входили модели с разным временем задержки лазера на точку, промаркированы соответственно 1 образец – 2 точки, 2 образец – 3 точки, 3 образец - 4 точки. Результаты структуроскопии представляют из себя набор срезов по плоскостям XZ, YZ и XY. Анализ данных сканирования проводится послойно в программе ADC View. На Рисунке 2 представлена вкладка программы с результатами контроля **образца №1** со срезами, проходящими через центр образца: в окнах 1-3 представлены срезы XY, YZ и XZ соответственно, окно 4 – окно задания фильтра, в окне 5 представлен сигнал, зарегистрированный в точке поверхности с координатами X и Y, выбранными в окне 1 перекрестием красных маркеров.

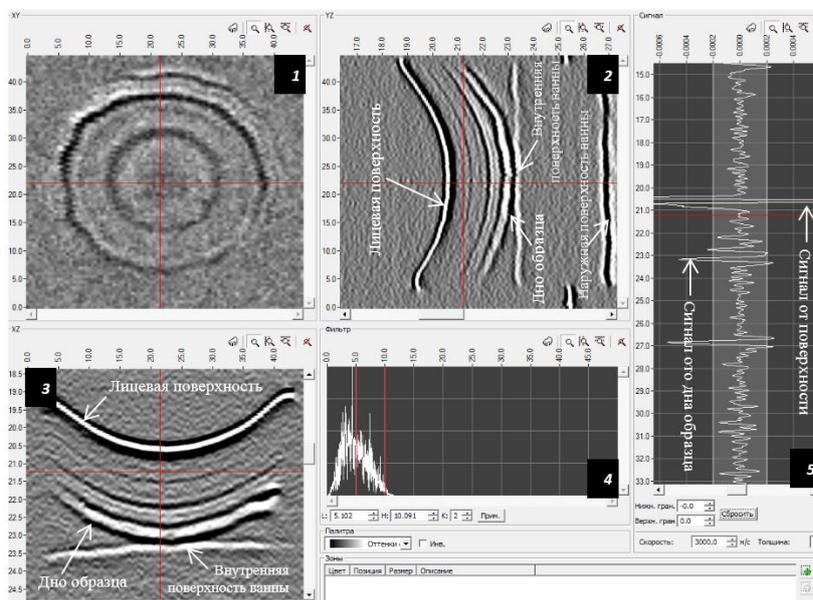


Рисунок 2: Результаты сканирования **образца №1** в программе CLUE-AutoScan: 1 – окно со срезом вдоль осей XY, 2 – окно со срезом вдоль осей YZ, 3 – окно со срезом вдоль осей XZ, 4 – окно задания фильтра, 5 – сигнал, выбранный в окне 1 перекрестием.

Лицевая поверхность тестируемого образца изображается яркой белой линией, отражение от свободной донной поверхности (как и от любой несплошности) представляется интенсивно-темной линией. На Рисунке 2 отмечены лицевая поверхность образца, его дно, а также в окне 5 отмечены соответствующие им

регистрируемые сигналы. В центральной части образца хорошо прослеживается внутренняя структура: можно насчитать 7÷8 слоев. Чем больше разница импедансов соседних слоев, тем сильнее заметна граница между ними. В окнах 1-3 границы между слоями отображаются темными линиями. Видно, что границы более интенсивно-темного цвета наблюдаются вблизи донной поверхности (сам же придонный слой отображается ярко-белой полосой), что говорит о том, что придонные слои являются значительно более жесткими по сравнению с остальными. Расположение особенностей по глубине пересчитывается исходя из скорости распространения ультразвука в материале и соответствует реальным значениям в мм. Невооруженным глазом видно, что образец не является плоским. Любые нарушения в периодичности картины на срезах говорят о наличии неоднородностей внутренней структуры.

На Рисунке 3 предоставлены результаты тестирования со срезами, проходящими через обнаруженные неоднородности внутренней структуры. Эти особенности отображаются в окне 1 темными пятнами, в окнах 2 и 3 проседанием сигнала от границы между придонными слоями (отмечены во всех окнах красными стрелками). В окне 5 видно, что сигнал от неоднородности превышает амплитуду донного сигнала (который, в свою очередь, ослаблен по сравнению с сигналом, представленным на рисунке 2), и тем самым данная особенность, скорее всего, является несплошностью.

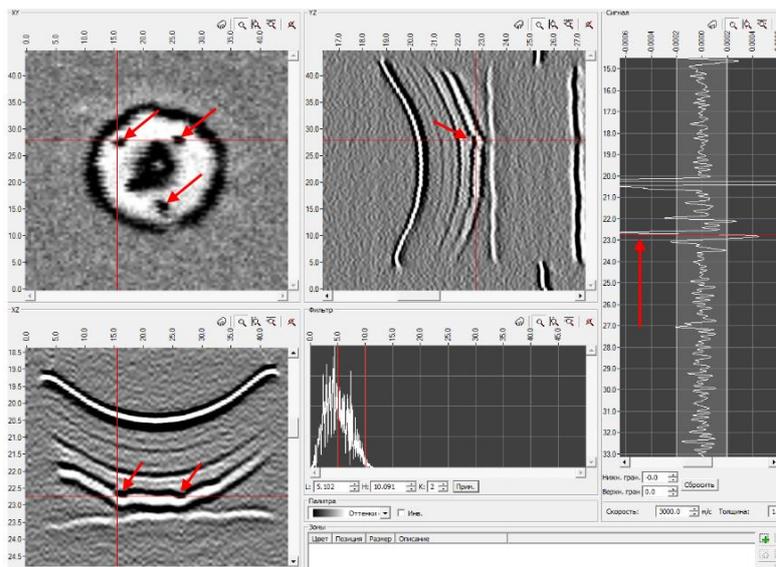


Рисунок 3: Результаты сканирования образца №1 со срезами, проходящими через несплошность.

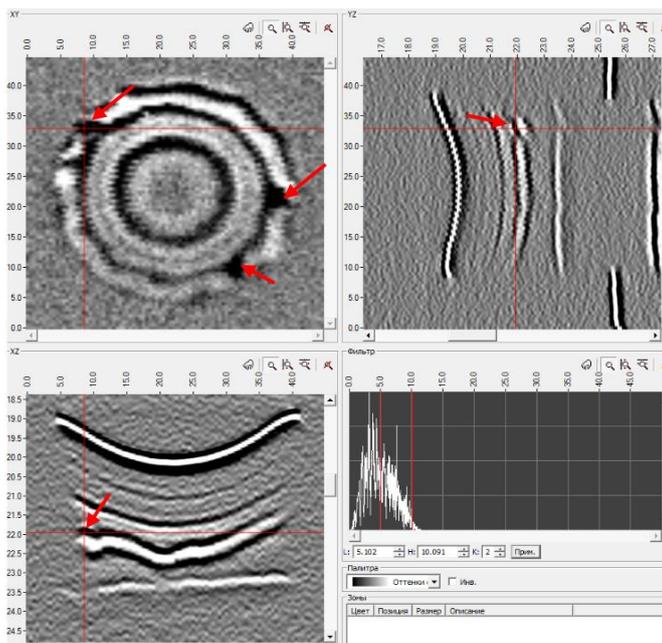
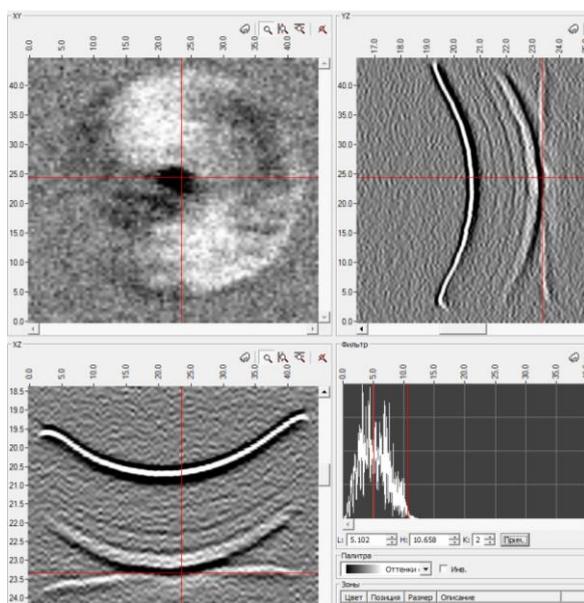


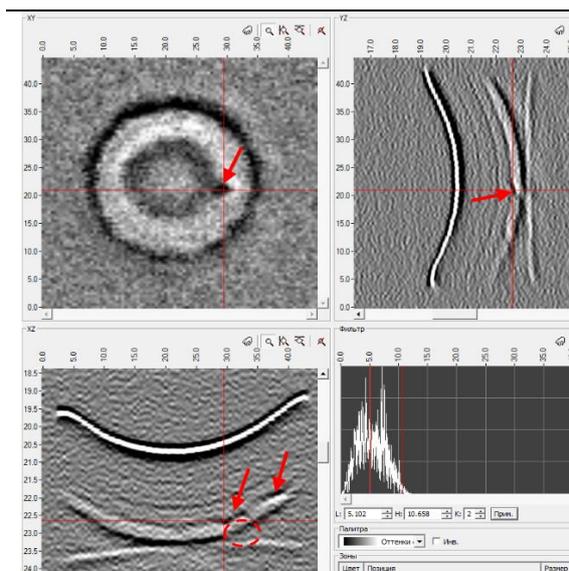
Рисунок 4: Результаты сканирования образца №1 с срезам, проходящими через особенность внутренней структуры.

На Рисунке 4 представлен еще один комплект срезов, проходящих через неоднородности внутренней структуры образца №1. Сигнал от границы придонного слоя «проседает» (отмечено красными стрелками на XZ и YZ-срезах, на рисунке 3 то же самое), что говорит о неоднородности внутренней структуры в объеме предпоследнего слоя. Проседание сигнала отмечено на рисунке красными стрелками. Линия дна повторяет профиль вышеупомянутой границы между слоями. Несмотря на обнаруженные особенности, донный сигнал наблюдается во всем объеме образца. Эти особенности являются несплошностями и расположены на границе между придонными слоями. Особенностей структуры такого типа в образце достаточно много.

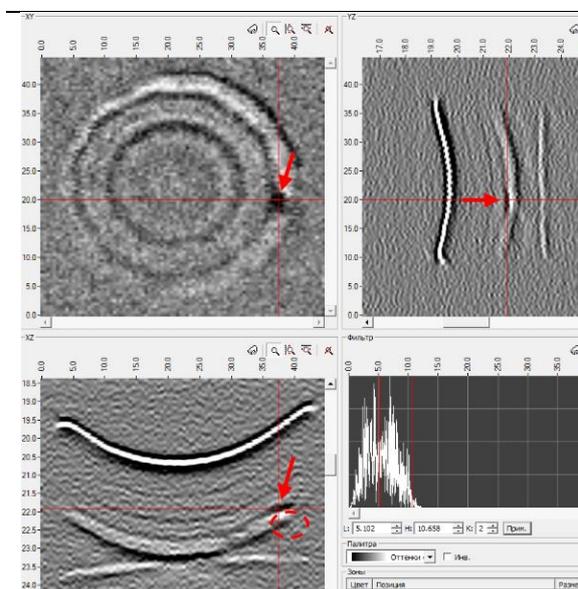
На Рисунке 5 представлены результаты сканирования образца №2.



а) Комплект срезов, проходящих через центр образца. Видна однородная внутренняя структура. Границы между слоями не столь заметны, как в предыдущем диске. Однако придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями.



б) Комплект срезов, проходящих через особенность внутренней структуры, являющейся несплошностью (отмечено красными стрелками). Донный сигнал «под» особенностью отсутствует или сильно ослаблен. Несплошность расположена между придонными слоями.

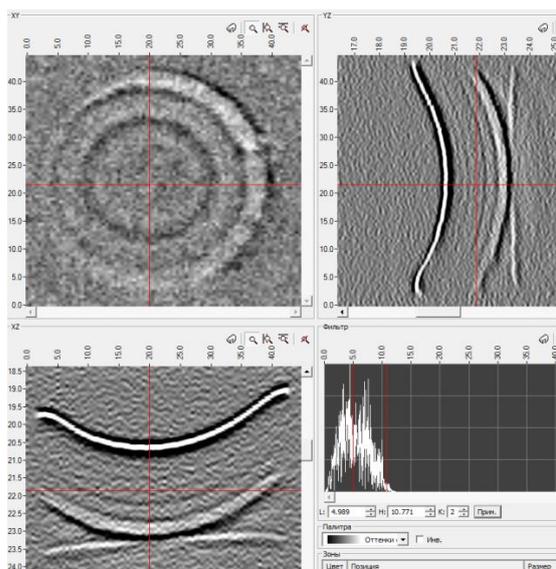


в) Комплект срезов, проходящих через особенность внутренней структуры, являющейся несплошностью (отмечено красными стрелками). Донный сигнал «под» особенностью сильно ослаблен. Несплошность расположена между придонными слоями на периферии образца.

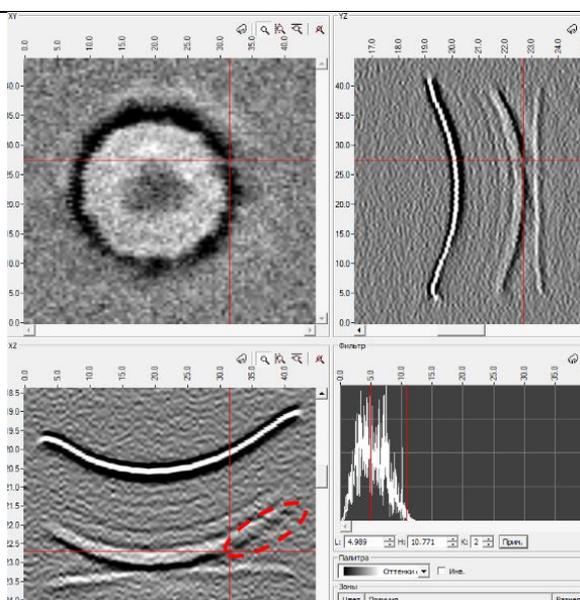
Рисунок 5: Результаты сканирования **образца №2** со срезами: а) проходящими через центр образца, б) и в) проходящими через особенности внутренней структуры.

Образец №2 обладает достаточно однородной структурой, присутствует несколько особенностей типа «несплошность».

На Рисунке 6 представлены результаты сканирования **образца №3**.



а) Комплект срезов, проходящих через центр образца. Видна однородная внутренняя структура. Границы между слоями не столь заметны, как в образце №1. Придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями.



б) Комплект срезов, проходящих через периферию образца. Донный сигнал ослаблен, местами пропадает. Скорее всего, это связано с повышенным рассеянием на неоднородностях придонного слоя, поскольку несплошностей не обнаружено.

Рисунок 6: Результаты сканирования **образца №3** со срезами: а) проходящими через центр образца, б) проходящими через периферию диска.

Образец №3 обладает достаточно однородной структурой, особенностей типа «несплошность» не обнаружено.

3. Заключение

Лазерно-ультразвуковым методом была проконтролирована внутренняя структура пластиковых дисков. В группу образцов входили модели с разным временем задержки на точку. В центральной части образца №1 хорошо прослеживается внутренняя структура: можно насчитать 7÷8 слоев. Придонные слои являются значительно более жесткими по сравнению с остальными слоями, что соответствует процессу изготовления образца. Обнаружены неоднородности внутренней структуры предпоследнего слоя, а также небольшие несплошности между придонными слоями, несмотря на которые, донный сигнал наблюдается во всем объеме образца. В образце №2 слоистая структура прослеживается не так четко, как в предыдущем диске.

Придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями, что соответствует процессу изготовления образца. Обнаружено несколько особенностей типа «несплошность», за которыми донный сигнал сильно ослаблен или отсутствует. В образце №3 слоистая структура прослеживается не так четко, как в образце №1. Придонный слой является чуть более жестким по сравнению с остальными слоями, что соответствует процессу изготовления образца. Особенности типа «несплошность» не обнаружено. Отсутствие донного сигнала в некоторых областях, скорее всего, связано с повышенным рассеянием ультразвука на неоднородностях последнего слоя. Образец №3, выполненный при максимальной дозе облучения (максимальная задержка на точку), имеет самую бездефектную структуру, но и подвержен максимальным деформациям из-за объемной усадки полимера. Проведенная работа показала возможность дефектоскопии пластиковых моделей, изготовленных методом лазерной стереолитографии с помощью лазерно-акустической томографии. Проведение дополнительных исследований позволит получить точные геометрические размеры и квалифицировать типы неоднородностей, что позволит выбрать оптимальные параметры технологического процесса для получения более качественных изделий.

4. Литература

- [1] C. Schmidleithner, D. Kalaskar 3D printing, Stereolithography. Ed. Cvetković D., London: IntechOpen. 2018.
- [2] С.В. Камаев, М.А. Марков, А.Н. Никитин, М.М. Новиков Лазерная стереолитография: состояние и перспективы Аддитивная технология. -2018. N4.-С. 44-48.
- [3] H. Kodama Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, The reviews of scientific instruments. -1981.-Vol.52. Iss. 11- P.1770-1773, DOI:10.1063/1.1136492.
- [4] J.W. Halloran, Ceramic Stereolithography: Additive Manufacturing for Ceramics by Photopolymerization, Annual Review of Materials Research. 2016. Vol.46.-P.19-40. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031841>
- [5] S. Waheed, J.M. Cabot, N.P. Macdonald, T. Levis, R.M. Guijt, B. Paull, Breadmore M. C. 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers, Lab on a Chip, 2016. Vol.16.-P.1993-2013. DOI: 10.1039/c6lc00284f.
- [6] P.F. Jacobs Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography, Dearborn: Society of Manufacturing Engineers. 1992.
- [7] V.V. Vnuk, E.V. Ippolitov, S.V. Kamaev, M.A. Markov, A.A. Nikulenko, M.M. Novikov, S.A. Cherebylo Study of the influence of technological features of laser stereolithography process on functional characteristics of parts Materials Physics and Mechanics 47 (2021) 293-305 http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4722021_11
- [8] E. V. Morozov, M. M. Novikov, V. M. Bouznic MRI monitoring and non-destructive quality measurement of polymeric patterns manufactured via stereolithography, Additive Manufacturing 12 (2016) 16–24 <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.015>
- [9] A. Oraevsky, A. Karabutov, Ultimate sensitivity of time-resolved optoacoustic detection, Proc. of SPIE, 3916 (2000) 228-239. <https://doi.org/10.1117/12.386326>.
- [10] A. Bychkov, V. Simonova, V. Zarubin, E. Cherepetskaya, A. Karabutov The Progress in Photoacoustic and Laser Ultrasonic Tomographic Imaging for Biomedicine and Industry: A Review, Appl. Sci. 8 (2018) 1931. <https://doi.org/10.3390/app8101931>.
- [11] A.A. Karabutov, N.B. Podymova, V.S. Letokhov, Time-resolved laser optoacoustic tomography of inhomogeneous media, Appl. Phys. B 63 (1996) 545–563. <https://doi.org/10.1007/BF01830994>.

- [12] T.D. Khokhlova, I.M. Pelivanov, A.A. Karabutov // *App. Phys. Lett.* 92 (2008) 024105.
<https://doi.org/10.1063/1.2834855>.
- [13] A.S. Bychkov, E.B. Cherepetskaya, A.A. Karabutov., V.A. Makarov Optoacoustic tomography utilizing focused transducers: The resolution study, *J. of Biomed. Opt.* 22 (2017) 076003. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.22.7.076003>.
- [14] M.W. Schellenberg, H.K. Hunt Hand-held optoacoustic imaging: A review, *Photoacoustics*, 11 (2018) 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2018.07.001>.
- [15] P. Beard Biomedical photoacoustic imaging, *Interface Focus* 1 (2011) 602–631.
<https://doi.org/10.1098/rsfs.2011.0028>.



Искусственный интеллект, КОГНИТИВНЫЕ технологии и робототехника

Artificial Intelligence, Cognitive Technologies and Robotics

GraphiCon 2021

27 – 30 сентября 2021
Нижний Новгород, Россия

Результаты Анализа Походки по Данным Акселерометра Мобильного Телефона для Интеллектуальной Системы Аутентификации Пользователя

А.В. Греченева¹, Н.В. Дорофеев¹, М.С. Горячев¹

¹ ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», ул. Горького 87, г. Владимир, 600000, Российская Федерация

Аннотация

В данной работе исследовались параметры походки человека по данным акселерометра мобильного телефона для дальнейшего развития технологии интеллектуального анализа походки в системах биометрической аутентификации. В работе рассматриваются особенности регистрации движений человека на основе различных методов, описываются проблемы при оценке параметров походки на основе акселерометрических данных мобильного телефона. В ходе исследования привлекалось 32 человека в возрасте от 15 до 67 лет мужского и женского пола, с различными физиологическими особенностями (рост, вес, осанка). Так же в экспериментальную группу были привлечены двое близнецов с одинаковыми физиологическими параметрами и человек, перенесший операцию на коленном суставе. Форма одежды была различной – от плотных прилегающих штанов до свободных брюк, а в качестве обуви использовались кроссовки, ботинки и туфли (для женского пола) на не высоком каблуке. В методику исследования были включены основные типы движений, которые совершаются в повседневной жизни человека при ходьбе. В ходе исследования анализировались информативные параметрами: среднее значение, среднеквадратическое отклонение, форма сигнала (значение коэффициента корреляции). В ходе исследования было установлено, что применение одного акселерометрического датчика мобильного телефона позволяет различать совершаемые движения человека при передвижении в различных условиях (форма одежды, тип дороги и т.п.), а так же различать людей по особенностям движений.

Ключевые слова

Интеллектуальная система, походка, носимое устройство, телефон, параметры, диагностика, аутентификация, оценка

The Results of the Analysis of Gait According to Mobile Phone Accelerometer Data for an Intelligent System of Authentication of Users

A.V. Grecheneva¹, N.V. Dorofeev², M.S. Goryachev³

¹ Vladimir State University, Orlovskaya str. 23, Murom, 602264, Russia

Abstract

In this paper, we researched parameters of a person's gait according to the accelerometer of a mobile phone for the further development of the technology of intelligent gait analysis in biometric authentication systems. The paper considers the features of registering human

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: grechenevaav@yandex.ru (A.V. Grecheneva); dorofeev@yandex.ru (N.V. Dorofeev); maximgoryachev97@yandex.ru (M.S. Goryachev)

ORCID: 0000-0002-7341-5237 (A.V. Grecheneva); 0000-0002-1636-7654 (N.V. Dorofeev); 0000-0001-7877-5672 (M.S. Goryachev)

movements based on various methods, describes the problems in assessing gait parameters based on accelerometric data of a mobile phone. The study involved 32 people aged 15 to 67 years, male and female, with different physiological characteristics (height, weight, posture). Also, two twins with the same physiological parameters and a person who underwent surgery on the knee joint were involved in the experimental group. The form of clothing was different-from tight-fitting trousers to loose trousers, and sneakers, shoes and shoes (for women) with low heels were used as shoes. The research methodology included the main types of movements that are performed in a person's daily life when walking. During the research, informative parameters were analyzed: the average value, the mean square deviation, the signal forms (the value of the correlation coefficient). In the course of the research, it was found that the use of a single accelerometric sensor of a mobile phone allows you to distinguish between the movements of a person when moving in different conditions (form of clothing, type of road, etc.), as well as to distinguish people by the features of movements.

Keywords

Intelligent system, gait, wearable device, phone, parameters, diagnostics, authentication, estimate

1. Introduction

The development of intelligent technologies, the accumulation and processing of heterogeneous data allow us to solve new classes of problems in all areas in practice. In particular, the development of new approaches of the collection and subsequent processing of biometric data contributes to the development of the functionality of intelligent systems. For example, the introduction of new intelligent tools for personalized medicine (remote diagnostics, "transparent" health monitoring, etc.), the improvement of access technology (identification and authentication, etc.) to services [1, 2, 3]. General trends in the development of technologies for collecting, processing and analyzing biometric data are aimed at compactness, invisible, scale, continuity and functioning in real time. There are many biometric parameters, as well as ways to register and process them [4, 5, 6, 7, 8]. At the moment, the most common means of registering biometric parameters are: video and photo cameras, microphones (external and personal devices) [9, 10, 11]. Sensors of wearable devices (mobile devices, smart bracelets) are used less often (on a smaller scale) to record biometric indicators: fingerprint scanner, pressure and pulse sensors, accelerometers and gyroscopes, touch screens [12]. The analyzed biometric parameters are the parameters of the face, gait, behavior, cardiovascular system, voice, and others.

The estimate of movement parameters for the authentication has been considered for more than a decade. It should be noted, that the results of the estimate of movement parameters are used not only in the field of protection against unauthorized access, but also in the field of medicine (diagnostics and rehabilitation). There are several main types of motion parameters registration: based on external sensors (video camera), based on manipulators (joysticks, trackballs, computer mouse, touch screens, etc.) and based on wearable sensors (wearable sensors and sensors of external devices). All of them have their own significant advantages and disadvantages. For example, the assessment of movements using video recording depends on the lighting and the position of the person relative to the camera, in addition, the assessment of movements requires a constant presence of the camera opposite the person, which is currently not possible to provide [13, 14]. Methods of registering movements based on manipulators provide information about movements at a local point (any part of a human limb), imply a stationary or similar place of work or clear rules for registering movements (for example, a touch screen) [15, 16, 17, 18]. Measurement of motion parameters based on wearable sensors is performed using several sensors that are placed on kinematic pairs of a person, this significantly reduces the mobility of the technology and aesthetic appearance. Because of this, sensor-based motion detection methods are usually used in specialized laboratories. The exceptions are measurement technologies made on the basis of sensors with a flexible base (including sewn into clothing), but this technology is still under development. The same exception is considered to be registration methods

based on an accelerometer or gyroscope, which are embedded in a wearable device – a smart bracelet or a mobile device. However, the software used in these devices only allows you to allocate a small number of movements (walking, running, swimming method), and the results of the work provide small quantitative indicators (number of steps, speed) and are not tied to a specific person [19, 20, 21]. Thus, the determination of informative parameters of signals of sensors of the wearable device is relevant for development of intelligent algorithms in biometric authentication system based on human movements. Data collection about the variation of values of movement parameters of different users is the primary step to developing a model of human motor behavior based on data of the accelerometer of a mobile phone.

The purpose of this work is the research of parameters of accelerometer signals of a mobile phone for the expansion of capabilities of biometric authentication through the development of technologies for intelligent analysis of gait according to mobile phone data.

2. Features of data registration and analysis

The task of estimating human gait based on the readings of one sensor is incorrect. This is due to the fact that when moving, a person uses a significant number of muscles, ligaments and joints, which leads to a multiparametric (multidimensional) model of movement [22, 23]. It is impossible to correctly evaluate all types of movement based on a single sensor, but such a feature of movements indicates a unique behavior (movement) of one sensor during the movements performed. The solution of the problem of parameter estimation is also complicated by the following aspects:

1. The location of the phone can be arbitrary.
2. In a short period of time, the mobile phone can change its location, as well as can change its orientation in space.
3. There is no rigid fixation of the phone. Even one person can wear different clothes that fit and fix the phone in different ways.
4. Different phone models have different location of the accelerometer sensor on the board.
5. The location of the accelerometer axes relative to the front surface of the mobile phone may differ for different models.
6. Various metrological characteristics of accelerometers.
7. The accelerometric sensor measures the projection of the acceleration of free fall, which is a disadvantage when registering movements in specific conditions.

To research 32 people involved. They are aged 15 to 67 years, male and female, with different physiological characteristics (height, weight, posture). Also, two twins (with the same physiological parameters) and a person (person have underwent surgery on the knee joint) were involved in the experimental group. The people were divided into 4 persons, so that in each group there were people with approximately the same parameters of height, weight and age.

During the research, each person performed the same moves in a different form of clothing. The form of clothing changed from tight-fitting trousers to loose trousers, and sneakers, shoes and shoes (for women) with low heels were used as shoes – this amounted to 4 different combination of clothes (6 combination for women).

In the experiments, the location of the phone was as follows: the front pocket of the pants, the back pocket of the pants, near the ear (when talking) – this amounted to 3 different positions. The movements performed were: walking, brisk walking, climbing the stairs, descending the stairs – this amounted to 4 different types of movements. Also, each experiment was carried out with a bag on his shoulder, with a bag on a preponderance, with a bag in his hand and without load – this amounted to 4 different types of load of persons. A laptop weighing was used as a load. The total weight of the bag, including the charger and computer mouse, was 3.5 kg. Thus, taking into account various conditions, person performed 192 different exercises - the main movements, that are performed in a person's daily life, were included in the research methodology. The number of repetitions of each exercise (of the same type of movements) ranged from 2000 to 3000.

The data of the accelerometer sensor of a mobile phone was analyzed, namely, the change in the acceleration of free fall (raw data) during gait. The analysis of indirect (calculated) quantities (angles, velocities, displacements, etc.) was not carried out to in order to avoid the accumulation of error

during integration and additional calculations. Since a three-axis accelerometer was used in mobile phones, data analysis was carried out for each axis (component) separately.

For each type of exercise, a template signal was selected from set of time series of this type for each person. The template signals were selected from all the signals as the signals with the least noise. All accelerometer data of each repeated exercise, template signals and their envelope form were analyzed in the time and frequency range. The following parameters were analyzed:

- Signal duration.
- Average value.
- Mean square deviation.
- Value of coefficient correlation.
- Frequency components with maximum amplitude (contribution to the total signal of more than 70%).

The research of the frequency spectrum of signals was carried out on the basis of the wavelet decomposition. The B-spline wavelet (type 'fbps 2-0,5-1' for program packet MATLAB) was chosen as the parent wavelet, which most accurately allows you to recreate signals of the accelerometer sensor of a mobile phone when gait (the average value of the correlation coefficient is 0.95, the value of the mean square deviation is 0.03).

For the correlation analysis, the all signals were normalized in time and amplitude. Time normalization was performed using the decimation procedure. This was done in order to align (bring) the durations of the signals to the time of the shortest signal (exercise).

3. Results

Distinguishing of persons causes difficulties based on the average value of signal, since the difference of average values of signals of persons does not exceed hundredths of a fraction in many cases (Figure 1). At the same time, in the pocket of clothing random movements of the phone lead to a decrease in differences (Figure 2).

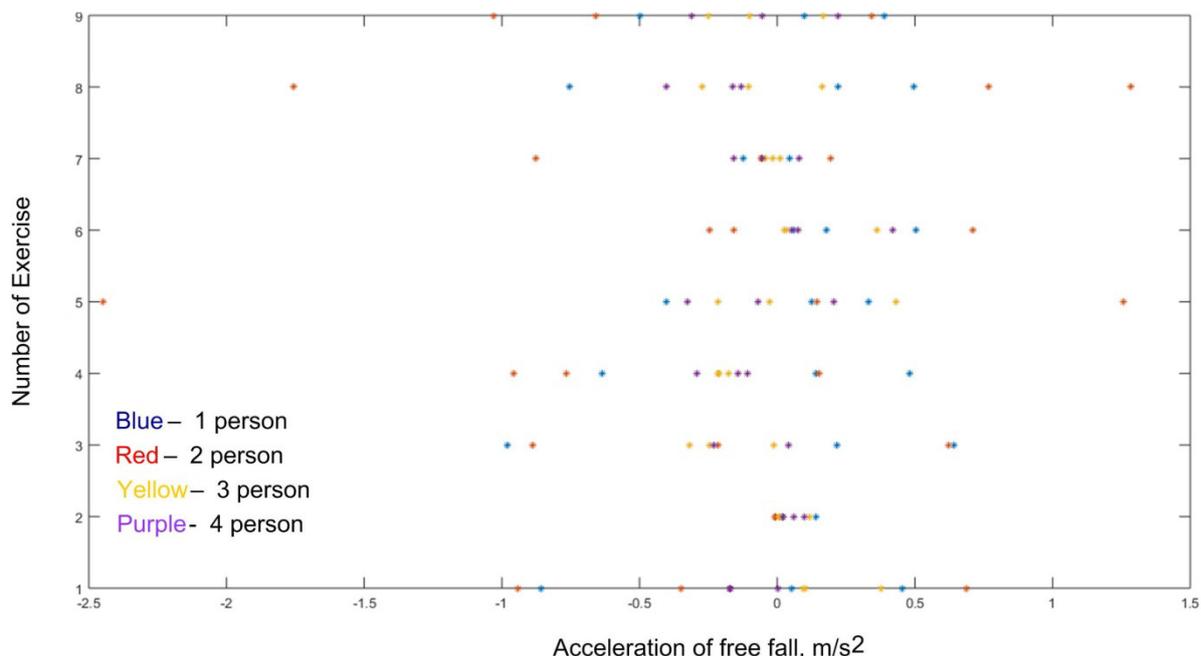


Figure 1: These are estimates of the average value of accelerometer signals for three components for one of the subgroups

The figures show the results of the following types of exercises, which were performed in loose clothes and in sneakers:

1. Walking with a phone in the front pocket.

2. Walking when talking on the phone.
3. Walking with a phone in the front pocket and a bag.
4. Climbing the stairs with a phone in the front pocket.
5. Climbing the stairs when talking on the phone.
6. Climbing the stairs with a phone in the front pocket and a bag.
7. Descending the stairs with a phone in the front pocket.
8. Descending the stairs when talking on the phone.
9. Descending the stairs with a phone in the front pocket and a bag.

In exercises with a different type of clothing, the differences are reduced by 2.6-3 times.

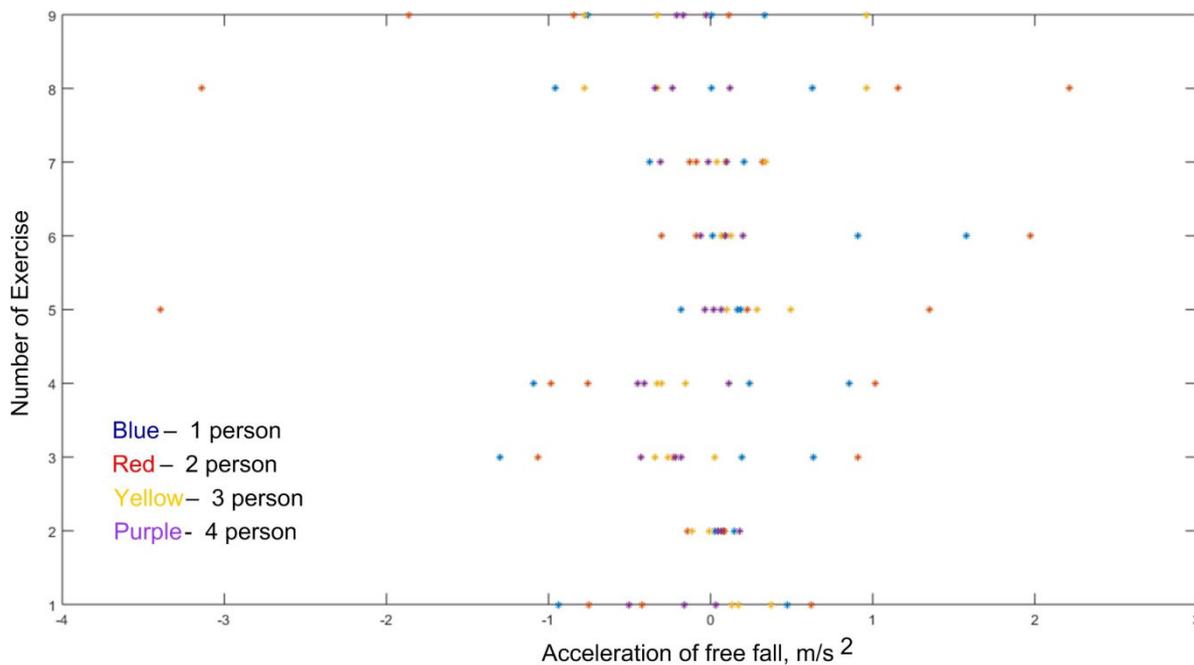


Figure 2: These are estimates of the average value of accelerometer signals for three components for one of the subgroups

The analysis of the spread of the mean square deviation shows a greater distinctness of persons (Figure 3) compared to the distinctness using the average value. The mean square deviation allowed us to see some differences even in twins under the same conditions (3 and 4 entries in Table 1). It should be noted that when talking on the phone, it is quite difficult to distinguish between the persons and their movements (it is not possible). This is due to a decrease in the number of movements of the mobile phone – it turns out that the gait features are "extinguished". However, this feature when climbing or descending the stairs on the contrary can help in distinguishing the persons (Table 2).

Table 1

The mean square deviation during normal walking in one of the subgroups

Person	Component X	Component Y	Component Z
1	3,92	3,88	6,33
2	6,50	5,33	3,53
3	2,12	4,18	2,92
4	2,23	2,02	2,64

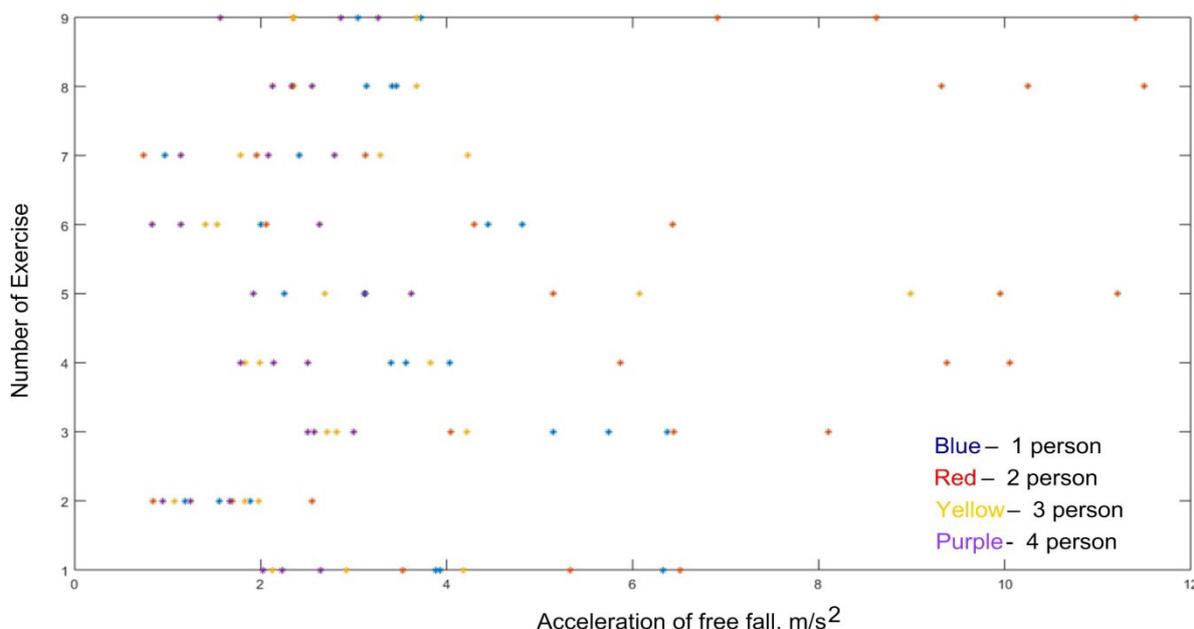


Figure 3: These are estimates of the mean square deviation of accelerometer signals for three components for one of the subgroups

Table 2

The mean square deviation when climbing the stairs with the phone near your ear

Person	Component X	Component Y	Component Z
1	2,25	3,13	3,11
2	9,94	11,21	5,14
3	2,69	8,99	6,07
4	1,92	4,62	3,11

The most informative parameter is the signal form, as well as the spectral composition (Table 3).

Table 3

The main frequency in the spectrum when walking with a bag and a phone in the front pocket

Person	Component X	Component Y	Component Z
1	4,18	4,18	10,27
2	6,23	5,13	3,95
3	3,45	2,69	6,11
4	2,83	9,14	2,95

Although the durations of signals and patterns differ in different experiments for different subjects, bringing them in the same dimension with subsequent estimation of the correlation coefficient value gives a good result. In the worst case option (in loose clothing and sneakers), at least 90% of movements can be distinguished at a threshold value of the correlation coefficient of more than 0.8 (Table 4), in good conditions (tight clothing, shoes), this percentage is achieved at a threshold of 0.7. A correlation receiver was used as a signal detector. The most similar movements are performed during ascents and descents of the stairs. It should be noted that such a comparison is performed with the same duration of the exercise performed, which was not recorded during the research. This means that the probability of recognizing movements and subjects by individual movement patterns increases significantly.

Table 4

An example of the correlation of normalized signal patterns in one of the subgroup when climbing stairs with a phone in the front pocket

Person	1	2	3	4
1	1	0,54	0,38	0,42
2	0,54	1	0,6	0,47
3	0,38	0,6	1	0,68
4	0,42	0,47	0,68	1

4. Conclusion

In the course of the research, it was found that the use of a single accelerometric sensor of a mobile phone allows you to distinguish between the movements of a person when moving in different conditions (form of clothing, type of road, etc.), as well as to distinguish people by the features of movements. The material collected as a result of the research will allow us to apply neural network technologies to improve the quality of distinguishing movements and people, and implement these developments both in individual devices (in the form of software) and in information systems of medical, law enforcement and banking profile. It should also be noted that in order to improve the quality of analysis of biometric data of a person's gait according to the data of a wearable device, it is necessary to conduct an analysis with other factors not considered, as well as to attract a larger number of subjects with various physiological features and deviations in the functioning of the musculoskeletal system to form a database.

5. Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation No. MK-1558.2021.1.6.

6. References

- [1] C. Lei, Y. Chuang, Privacy protection for telecare medicine information systems with multiple servers using a biometric-based authenticated key agreement scheme, *IEEE Access* 7 (2019) 186480-186490. doi:10.1109/ACCESS.2019.2958830.
- [2] Z. Mehmood, A. Ghani, G. Chen, A. S. Alghamdi, Authentication and secure key management in E-health services: a robust and efficient protocol using biometrics, *IEEE Access* 7 (2019) 113385-113397. doi:10.1109/ACCESS.2019.2935313.
- [3] N. V. Dorofeev, A. V. Grecheneva, V. S. Buzhinsky, Assessment of human gait parameters base on accelerometer data, *Biomedical Engineering* 55 (2021) 92-96. doi:10.1007/s.10527-021-10078-y.
- [4] G. L. Marcialis, P. Mastinu, F. Roli, Serial fusion of multi-modal biometric systems, *IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications*, 2010, pp. 1-7. doi:10.1109/BIOMS.2010.5610438.
- [5] A. E. Sulavko, D. A. Volkov, S. S. Zhumazhanova, R. V. Borisov, Subjects Authentication Based on Secret Biometric Patterns Using Wavelet Analysis and Flexible Neural Networks, *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, IEEE, Novosibirsk Russia, 2018, pp. 218-227. doi:10.1109/APEIE.2018.8545676.
- [6] Vandana, N. Kaur, A Study of Biometric Identification and Verification System, *International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, IEEE, New Deli India, 2021, pp. 60-64.

- [7] S. Raju, V. Udayashankara, Biometric person authentication: A review, International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), IEEE, Mosore India, 2014, pp. 575-580. doi:10.1109/IC3I.2014.7019771
- [8] S. K. Singla, M. Singh, N. Kanwal, Biometric System - Challenges and Future Trends, 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development, INDIACom, New Delhi India, 2021, pp. 647-651.
- [9] D. S. Krutokhvostov, V. E. Khitsenko, Password and continuous authentication by keyboard handwriting by means of mathematical statistics, Cybersecurity 24 (2017) 91-99. doi:10.21681/2311-3456-2017-5-91-99.
- [10] A. E. Sulavko, E. V. Shalina, Biometric authentication of users of information systems by keyboard handwriting based on immune network algorithms, Applied Informatics 14 (2019) 39-45.
- [11] M. Faundez-Zanuy, J. Fierrez, M. A. Ferrer, M. Diaz, R. Tolosana, R. Plamondon, Handwriting Biometrics: Applications and Future Trends in e-Security and e-Health, Cognitive Computation 12, 1 September (2020) 940-953. doi: 10.1007/s12559-020-09755-z.
- [12] N. V. Dorofeev, A. V. Grecheneva, The assessment of gait features according to the data of a portable acceleration sensor in an intelligent monitoring system, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 873 (2020) 1-7. doi:10.1088/1757-899X/873/1/012017.
- [13] O. C. Reyes, R. Vera-Rodriguez, P. J. Scully, K. B. Ozanyan, Analysis of Spatio-Temporal Representations for Robust Footstep Recognition with Deep Residual Neural Networks. pp. 1-15 doi:10.1109/TPAMI.2018.2799847.
- [14] A. I. Sokolov, A. S. Konushin, Methods of human identification by gait in video, Proceedings of ISP RAS, 1 (2019) 69-82. doi:https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-5.
- [15] A. L. Yerokhin, S. N. Lednev, Methods of gesture recognition based on the data of three-axial accelerometers Android devices, Bulletin of NTU KHPI 21 (2017) 1-4.
- [16] A. V. Khelvas, N. G. Belyakina, A. A. Gilya-Zetinov, D. D. Chernikova, V. M. Shabunin, E. O. Yaprntsev, Gesture recognition using a neural network and the application of this approach to create a new generation of gaming gadgets, Proceedings of MIPT 34 (2017) 1-12.
- [17] P. S. Teh, N. Zhang, S.-Y. Tan, Q. Shi, W. H. Khoh, R. Nawaz, Strengthen user authentication on mobile devices by using user's touch dynamics pattern, J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing 11-10 (2020) 4019-4039. doi: 10.1007/s12652-019-01654-y.
- [18] X. Zhang, L. Yao, C. Huang, T. Gu, Z. Yang, Y. Liu, DeepKey: A Multimodal Biometric Authentication System via Deep Decoding Gaits and Brainwaves, ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology 11-4 (2020) 1-24. doi:10.1145/3393619.
- [19] A. G. Kazantseva, D. N. Lavrov, Personality recognition by gait based on wavelet parameterization of accelerometer readings, Mathematical Structures and Modeling 23 (2011) 31-37.
- [20] Y. Chen [et al.] LSTM Networks for Mobile Human Activity Recognition, Atlantis Press, Bangkok Thailand, 2016, pp. 50-53. doi:10.2991/icaaita-16.2016.13.
- [21] D. Anguita, A. Ghio, L. Oneto, X. Parra, J. L. Reyes-Ortiz, Human Activity Recognition on Smartphones using a Multiclass Hardware-Friendly Support Vector Machine, International Workshop on Ambient Assisted Living IWAAL 2012: Ambient Assisted Living and Home Care, Springer, Victoria-Gasteiz, Spain, 2012, pp 216-223. URL: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/101769/IWAAL2012.pdf>.
- [22] D. V. Skvortsov, Clinical analysis of movements, Gait analysis: Publishing house of SPC - Stimulus, Ivanovo, Standartinform, Moscow, 1996, pp. 344.
- [23] I. A. Sutchonkov, Informativeness of biomechanical parameters in pathological walking before and after the course of electrostimulation of muscles during walking, Russian Journal of Biomechanics 2 (1999) 1-5.

Применение метода детектирования границ к задаче распознавания обстановки

А.А.Карандеев^{1,2}, В.П.Осипов¹, В.И.Балута^{1,2}

¹ ИИМ им. М.В.Келдыша РАН, Миусская пл, д.4, Москва, 125047, Россия

² РЭУ им. Г.В. Плеханова, Стремянный пер., 36, Москва, 117997, Россия

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты одного из вариантов решения проблемы повышения скорости принятия решений интеллектуальным агентом при моделировании поведения сложных систем на виртуальном электронном полигоне. Такой полигон в настоящее время рассматривается в качестве инструментальной площадки для отработки технологий обучения интеллектуальных агентов в условиях обстановки различной сложности с целью последующего переноса отработанных методов на реальные объекты для решения практических задач. В качестве примера рассмотрено управление робототехническим средством, функционирующим в закрытом помещении. В статье изложена технология снижения объема и размерности обрабатываемых данных с целью повышения оперативности реагирования на изменение обстановки и выработку решений на перемещение робототехнического устройства. В основе технологии лежит предобработка видеоизображений для формирования обучающей выборки, а также процедура и результаты глубокого обучения сверточной нейросети. В работе использована библиотека алгоритмов компьютерного зрения OpenCV с открытым исходным кодом, реализованная на C/C++. Показано, что акцентирование внимания на выделении границ объектов позволяет существенно снизить объем данных для анализа ситуации и повысить скорость принятия решений роботом на перемещение.

Ключевые слова

Интеллектуальные агенты, повышение оперативности выработки решений, сверточная нейронная сеть, обработка видеоизображений

Application of the boundary detection method to the problem of recognizing the situation

A.A.Karandeev^{1,2}, V.P.Osipov¹, V.I.Baluta^{1,2}

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics, Miuskaya sq., 4, Moscow, 125047, Russia

² Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanyi per., 36, Moscow, 117997, Russia

Abstract

This paper presents the results of one of the solutions to the problem of increasing the speed of decision-making by an intelligent agent when modeling the behavior of complex systems on a virtual electronic polygon. Such a training ground is currently considered as an instrumental platform for testing technologies for training intelligent agents in conditions of varying complexity in order to subsequently transfer the developed methods to real objects for solving practical problems. As an example, the control of a robotic device operating in an enclosed space is considered. The article describes the technology of reducing the volume and dimension of the processed data in order to increase the responsiveness to changes in the situation and the development of solutions for moving a robotic device. The technology is based on the preprocessing of video images for the formation of a training sample, as well as the procedure

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: karalex755@gmail.com (А.А.Карандеев); osipov@keldysh.ru (В.П.Осипов); vbaluta@keldysh.ru (В.И.Балута)

ORCID: 0000-0001-8555-996X (А.А.Карандеев); 0000-0002-8237-1053 (В.П.Осипов); 0000-0002-4399-0943 (В.И.Балута)

and results of deep learning of a convolutional neural network. The paper uses an open source library of OpenCV computer vision algorithms implemented in C / C++. It is shown that focusing on the selection of object boundaries can significantly reduce the amount of data for analyzing the situation and increase the speed of decision-making by the robot to move.

Keywords

Intelligent agents, improving the efficiency of decision-making, convolutional neural network, video image processing

1. Введение

Робототехника – прикладная наука, занимающаяся разработкой автоматизированных технических систем, является одним из передовых и наиболее стремительно развивающихся направлений прикладной математики и искусственного интеллекта. Перед ней стоит много задач, многие из которых еще только предстоит решить в дальнейшем, однако уже сейчас использование робототехники и роботов, в частности, дает свои положительные плоды.

Прикладная робототехника находит свое применение и в различных сферах научной деятельности, в частности, при решении задач компьютерного и математического моделирования различных процессов. В решении подобного рода задач робототехнические средства обычно выступают в роли агентов, а взаимодействуя вместе с другими роботами в рамках одного полигона образуют мультиагентные системы.

Предварительное описание подходов к построению электронного полигона в агентном представлении было сделано нами ранее в работах [1, 2] применительно к задаче конфликтного взаимодействия двух противодействующих сторон. Технологии агентного представления взаимодействующих элементов сложных систем в последние годы получили интенсивное развитие прежде всего благодаря возможности независимого описания сложного поведения каждого такого элемента, что, с одной стороны, существенно упрощает модельную постановку имеющихся задач при одновременном сохранении вариативности сложного поведения состоящей из таких элементов системы, с другой стороны, позволяет исследовать сложное поведение больших систем, которое невозможно реализовать другими методами.

При агентном представлении сложных систем одной из ключевых задач моделирования является задача математического представления интеллектуальных агентов [3-5].

Алгоритм поведения интеллектуального агента в процессе взаимодействия с окружающей средой можно представить в виде циклической последовательности шагов, представленных на рисунке 1. В соответствии с имеющейся у него картиной мира и целевой установкой агент оценивает обстановку, прогнозирует ее развитие, выбирает из возможных вариантов действий наиболее рациональное в плане приближения к цели и осуществляет его, после чего собирает информацию об изменении ситуации, проверяет эффективность совершенного действия, при необходимости корректирует свою модель представлений об окружающем мире и с учетом этого вновь оценивает изменившуюся обстановку.



Рисунок 1: Циклический алгоритм поведения интеллектуального агента

Логика поведения агента подобна логике поведения человека, но задается с помощью функции агента, которая отображает любую конкретную последовательность актов восприятия на некоторое действие среды [6].

Важнейшей особенностью интеллектуального агента является способность функционировать в условиях неточной, нечеткой и даже противоречивой информации, поскольку в силу ограниченных возможностей рецепторов и эффекторов агента он не может ни определять исчерпывающим образом параметры среды, ни точно предсказывать результаты намеченного действия, особенно в динамично изменяющейся обстановке.

Несмотря на схожесть логики принятия решений интеллектуальным агентом с человеческой, существует ряд принципиальных отличий между восприятиями обстановки человеком и компьютерными системами. Известно, что человек мыслит образами, сопоставляя то, что он видит и ощущает, с уже имеющимся у него опытом. Что, в свою очередь, при наличии даже неполной информации, позволяет достраивать цельную картину мира на основе прошлого опыта, выделять в этой картине существенные для выработки решения аспекты, принимать решение практически мгновенно [7]. В то время как компьютерные системы мыслят «конкретными данными». Это обстоятельство порождает определенное противоречие. С одной стороны, для повышения качества выработки рациональных решений необходимо максимально расширять объем имеющейся информации. С другой стороны, как попытки увеличить этот объем путем сбора дополнительной информации, так и обработка расширенного объема данных существенно замедляют процессы получения тех самых решений. Что может приводить к потере актуальности выработанного решения в связи с изменением обстановки [8, 9]. Выигрыш в качестве решений приводит к проигрышу по времени их получения. В условиях электронного полигона, где происходит многократное (сотни тысяч и более) моделирование взаимодействия множества агентов, такое положение неприемлемо. В связи с чем возникает проблема совершенствования алгоритмов формирования интеллектуальным агентом его картины мира с возможностью выделения только существенных деталей с последующей оценкой обстановки на основе такой неполной информации без потери адекватности.

2. Описание технологии

Задача оценки обстановки в значительной мере аналогична задаче распознавания образов [10-12]. Опираясь на эту аналогию, обработка основных подходов к решению сформулированной проблемы была проведена на примере робототехнических средств с использованием реальных данных, полученных путем видео и фотосъемки роботизированной платформой «PATROLBOT», базовая версия которой представлена на рисунке 2. Данная платформа является мобильной, оснащена рядом сенсорных устройств, может работать автономно в течение длительного периода, решая задачи патрулирования и доставки грузов, причем у оператора есть возможность просматривать в реальном времени получаемые с сенсоров данные, включая видеопотоки.

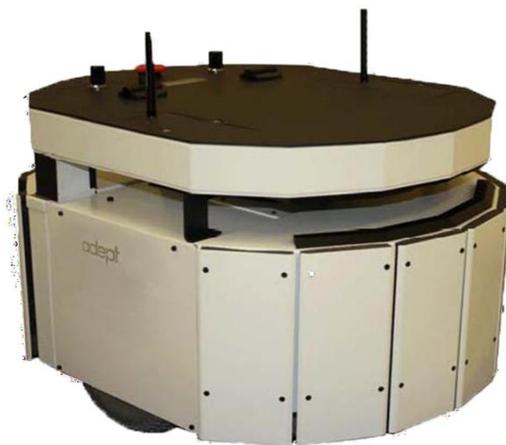


Рисунок 2: Платформа робота-помощника «PATROLBOT»

Хотя для ориентации и позиционирования в пространстве платформой применяется ряд сонаров, лазерных дальномеров и позиционных датчиков, в рамках решаемой в настоящей работе задачи для классификации объектов и окружающей обстановки использовались только видеоизображения, получаемые стереопарой.

Основная задача заключалась в разработке программного комплекса для формирования датасета и последующего обучения нейронной сети совместно с методами ускоренной оценки обстановки с целью оперативного реагирования на различного рода изменения при перемещении роботизированной платформы. Для чего робот-помощник должен был научиться принимать решения только по части имеющейся у него информации о габаритах предметов, игнорируя незначительные детали обстановки. Именно поэтому достаточно большой объем работы пришелся на формирование датасета для обучения нейросети.

Первый шаг включал автоматическое извлечение из непрерывной видеосъемки набора кадров для обучающей выборки с соблюдением ряда требований к их содержанию и качеству. Для решения этой задачи требовалось выполнить нарезку кадров из видеопотока, провести их селекцию и обработку, включая удаление статичных кадров съемки с одинаковым сюжетом, устранение вибрационных и краевых искажений, коррекцию перспективы и т.п. [13].

Выполнение этой работы было осуществлено с помощью библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV с открытым исходным кодом, реализованной на C/C++ [14].

Как правило, из-за особенностей объектива, а также угла съемки часть изображения по краям кадра имеет деформации, в силу чего дальнейшее использование этой части кадра нецелесообразно. Для коррекции перспективы в OpenCV применяется функция `warpPerspective`, в которую в качестве входных параметров передается исходное изображение, а также координаты прямоугольника, относительно которого необходимо выполнить трансформацию изображения с целью устранения упомянутых искажений.

Выделение интересующей нас содержательной области с отсечением лишней информации является базовым при подготовке любой обучающей выборки и положительно сказывается на финальном результате [15]. В OpenCV оно проводится с помощью функции `cvSetImageROI`, позволяющей выделить прямоугольную область, изображение в пределах которой сохраняется в базе и используется для дальнейшей работы.

Для повышения общего качества выборки проводилась её предварительная обработка с целью устранения близких по содержанию кадров. Выявление степени близости осуществлялось путем попиксельного вычитания предварительно переведенных в градацию серого изображений одного (текущего) кадра из другого (предыдущего). Соответствующая процедура в OpenCV осуществляется с использованием функции `cvtColor`. Сформированный после взаимного вычитания результирующий кадр служит основой для расчета степени соответствия изображений друг другу. Опытным путем были установлены значения критерия, при которых различия в кадре можно считать удовлетворительными.

Пример сравниваемых изображений и полученный результирующий кадр с разницей соответствия между двумя кадрами представлен на рисунках 3 и 4.



Рисунок 3: Два кадра, между которыми проводится сравнение



Рисунок 4: Результат сравнения двух кадров, где интенсивность белого тона пропорциональна степени различий

Как уже отмечалось выше, основной целью работы была разработка технологии ускоренного распознавания образов, для чего необходимо научить агента выделять существенные аспекты обстановки и игнорировать большое число незначимых деталей.

Одним из способов сжатия информационного поля с последующим выделением наиболее существенных акцентов является применение сверточных нейронных сетей [16]. Для формирования архитектуры конкретной сети в настоящей работе были использованы библиотеки с открытым исходным кодом Segnet и Tensorflow.

Для улучшения результатов обучения, заключающегося в корректном распознавании динамических объектов, их классификации и обозначении габаритов, проводится дополнительная обработка отобранных изображений различными фильтрами и применением детектора границ Санну. Все вместе это позволяет последовательно провести отсеивание шума и устранение лишних деталей из изображения, рассчитать градиенты, выделить краевые эффекты и перевести их в тонкие линии, связать полученные края в контуры. Пример дополнительной обработки отобранных кадров для формирования вспомогательного изображения представлен на рисунке 5.

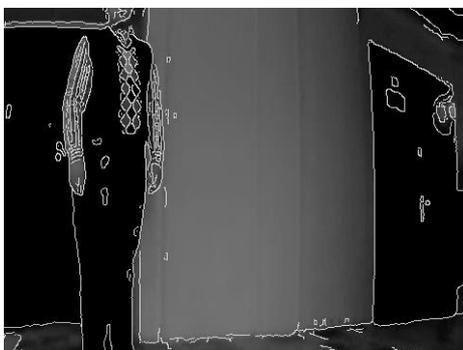


Рисунок 5: Пример дополнительной обработки отобранных кадров

В итоге после первичной обработки извлеченных из видеопотока изображений полученные данные передаются в сверточную нейронную сеть для её глубокого обучения. При этом вспомогательное изображение представляет собой выделенные на кадрах типовые объекты, заполненные одним цветом (тоном).

В текущем примере для робототехнической установки, функционирующей в пределах помещений, существенными аспектами, которые необходимо различать, являются границы попадающих в поле зрения робота объектов, и их идентификация для понимания их значимости при анализе обстановки, поскольку такие объекты, как пол, стена, проход, мобильный (человек) или стационарный (препятствие) объект играют разную роль при планировании перемещений робота.

После предварительной обработки изображения с помощью детектора границ в ход вступают алгоритмы автоматической раскраски типовых зон (пол, потолок), написанных на C++ с

помощью библиотеки OpenCV. А затем, с помощью визуального анализа идет окончательная валидация размеченных зон, границ и выделение не типовых объектов, таких как люди, дверные проемы и т.д.

Таким образом, обучающая выборка для сверточной нейронной сети представляла из себя два типа изображения. Первое – исходное, и второе – сопутствующее ему сегментированное изображение, на котором объекты и границы объектов представляются однотонно в различных цветах (или в тонах в градации серого).

Пример исходного и вспомогательного изображения представлен на рисунке 6.



Рисунок 6: Исходное и вспомогательное изображения для обучения сети

Обычно сверточные нейронные сети строятся с целью детектирования тех или иных объектов. Ключевой особенностью предлагаемого метода было решение одновременно учить нейросеть распознавать не только объекты, но и границы этих самых объектов.

Исходя из свойств архитектуры и принципов обучения, работа сверточной нейронной сети обычно сводится к переходу от конкретных особенностей изображения к более абстрактным деталям. Выражаясь более простым языком, нейронная сеть упрощает те или иные объекты и элементы изображения до простых составляющих – линий, точек и т.д. Таким образом, детектирование границ является задачей, на которой подобного рода нейронные сети показывают достаточно хороший результат. При этом подобное нововведение положительно сказывается на других слоях нейронной сети, которые нацелены на распознавание объектов в кадре.

Для того, чтобы убедиться в положительном эффекте данного нововведения, были обучены две разные нейронные сети с одинаковыми параметрами. Одна была обучена распознавать различные объекты на изображении, в другую же подавался слегка измененный датасет, в котором дополнительно помимо самих объектов также были выделены границы объектов. Результат обработки изображения нейронной сетью со встроенным детектированием границ и без него представлен на рисунке 7, слева и справа соответственно.



Рисунок 7: Результат обработки изображения нейронной сетью со встроенным детектированием границ и без него.

После чего полученные кадры сравнивались друг с другом на предмет различий. Получаемое в ходе взаимного вычитания кадров изображение характеризует различия нейронных сетей в восприятии объектов и окружения.

Результат сравнения работы двух нейронных сетей представлен на рисунке 8.

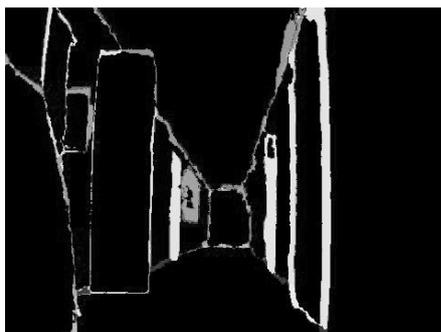


Рисунок 8: Результат сравнения работы двух нейронных сетей

Для того, чтобы вычислить насколько нейронная сеть, умеющая распознавать границы, корректно отображает действительность, полученное изображение соотносится с реальной картинкой и сопутствующим ей сегментированным изображением. В ходе чего происходит попиксельное сравнение полученного кадра и сегментированного изображения с целью выявления некорректного распознавания объектов и их границ. Таким образом, мы получаем процент соответствия полученного нейронной сетью изображения действительности.

Стоит понимать, что в связи с тем, что эксперимент проводится с нейронными сетями, преимущества и недостатки от внедрения того или иного подхода и метода можно списать на качество обучения, а также то обстоятельство, что при работе с нейронными сетями мы, по сути, имеем дело с моделью "черного ящика". Именно поэтому есть вероятность того, что на других датасетах может быть получен другой результат.

Тем не менее, на полученных в ходе решения поставленной задачи данных корректность распознавания объектов и их границ нейронной сетью в зависимости от исследуемых кадров удалось повысить в среднем на 15-20 процентов, причем в отдельных случаях увеличение точности доходило и до 30 процентов.

Получаемые по итогам обучения сети результаты работы программного комплекса представлены на рисунке 9, где по горизонтали последовательно приведены исходное изображение, вспомогательное изображение с распознанными объектами и результирующее изображение, полученное на основе выделения границ объектов обучаемым программным комплексом.

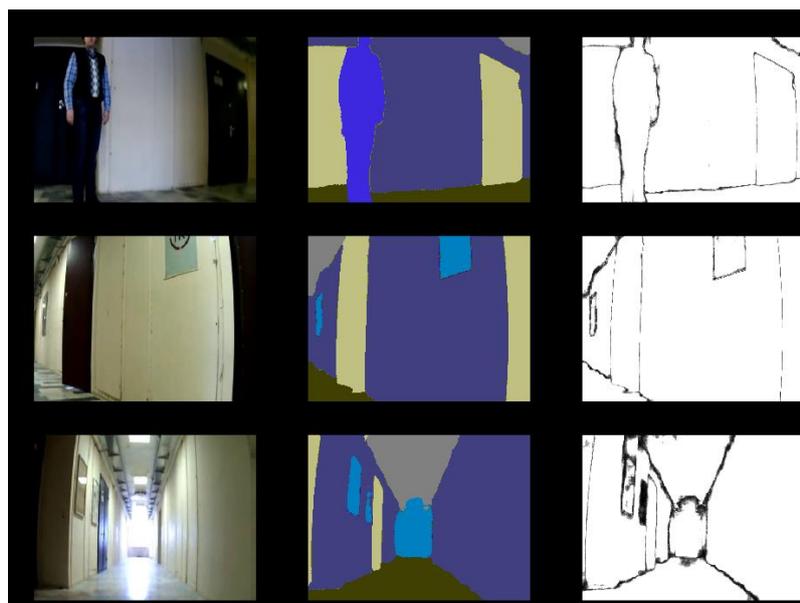


Рисунок 9: Примеры результирующих изображений с классификацией объектов и выделением их границ.

Объем данных, описывающих результирующее изображение, на несколько порядков меньше объема данных исходного, тем не менее этих данных достаточно для оперативной оценки обстановки и управления перемещением робота.

Таким образом, уменьшение объема обрабатываемой информации, позволяющее существенно ускорить процессы оценки обстановки и выработки решений на совершение рациональных действий интеллектуальным агентом в текущей ситуации, может быть достигнуто за счет выделения однородных в разрезе каких-то характеристик областей и оперирования ими как цельным объектом только на основании выявленных границ, что, по сути, эквивалентно снижению размерности обрабатываемых массивов данных.

3. Заключение

В ходе проведенного исследования была разработана методика и алгоритмы для создания обучающей выборки с последующим ее применением в рамках программного комплекса по ускоренной классификации объектов на изображениях, получаемых путем видеосъемки.

Модифицированная технология классификации и анализа обстановки с помощью сверточных нейронных сетей, описанная в настоящей работе, может быть полезна и применима не только во многих направлениях робототехники и обработки изображений, но и в ряде других задач, где важна не столько точность, сколько скорость отклика для принятия своевременных решений.

Стоит заметить, что практическое применение описанного здесь подхода связано с определенными сложностями. Так, относительно качественное выделение границ на объектах изображения на данный момент возможно лишь для ближней зоны и при достаточно высоком качестве изображения. Да и формирование такого рода обучающей выборки является весьма трудоемким и сложным процессом, нуждающимся в оптимизации.

Тем не менее, можно надеяться, что дальнейшее развитие предложенного метода позволит добиться увеличения точности обработки изображений для нахождения объектов с помощью нейронной сети, обеспечивая сохранение точности распознавания на приемлемом уровне, что весьма важно во многих ситуациях, требующих ускоренного реагирования на изменение обстановки.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-31-90031.

5. Литература

- [1] В.И. Балута, А.А. Карандеев, В.П. Осипов, Функционал электронного полигона неоконфликтологии, Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), Алушта, 2020, с. 674. URL:http://www.npnj.ru/files/npnj2020_web.pdf.
- [2] A.A. Karandeev, V.I. Baluta, V.P. Osipov, Electronic Training Polygon for Artificial Intelligence Systems, Proceedings of the 8th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020), Nizhny Novgorod, Russia, 2020, pp. 188-192. doi:https://doi.org/10.30987/conferencearticle_5fce2771df93d0.19570965.
- [3] Д.А. Новиков. Теория управления организационными системами. 2-е изд. 2007, с. 584.
- [4] А.А. Воронин, М.В. Губко, С.П. Мишин, Д.А. Новиков. Математические модели организаций. 2008.
- [5] P. Lindes, Intelligence and Agency, Journal of Artificial General Intelligence, 11(2020). doi:[10.2478/jagi-2020-0003](https://doi.org/10.2478/jagi-2020-0003).
- [6] С. Рассел, П. Норвиг, Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. пер. с англ., 2006.

- [7] A. Stocco, C. Sibert, Z. Steine-Hanson, N. Koh, J.E. Laird, C.J. Lebiere, P. Rosenbloom, Analysis of the human connectome data supports the notion of a "Common Model of Cognition" for human and human-like intelligence across domains. *NeuroImage* 235(118035), 2021, pp. 1-15.
- [8] R. Rosenbloom, A Cognitive Odyssey: From the Power Law of Practice to a General Learning Mechanism and Beyond. In *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 2006, pp. 6-14.
- [9] Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев, Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности, 1997, с. 112.
- [10] D. Zhdanov, I. Potemin, A. Zhdanov, V. Galaktionov, Methods for the synthesis of realistic images formed by optical devices containing hologram optical elements, *Proceedings of the 8th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020)*, volume 2763 of Conference Notes, Nizhny Novgorod, Russia, 2020, pp. 30-35, ISBN 978-5-6042891-4-3. URL:http://ceur-ws.org/Vol-2763/CPT2020_paper_p-4.pdf, doi:https://doi.org/10.30987/conferencearticle_5fce2770b308b1.97036102.
- [11] B. Barladian, N. Deryabin, A. Voloboy, V. Galaktionov, L. Shapiro, High Speed Visualization in the JetOS Aviation Operating System Using Hardware Acceleration, *Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Vision*, volume 2744 of Conference Notes, Saint Petersburg, Russia, 2020, ISSN 1613-0073, URL:<http://ceur-ws.org/Vol-2744/short3.pdf>.
- [12] P. Ramaraj, J.E. Laird. Establishing Common Ground for Learning Robots. *RSS 2018: Workshop on Models and Representations for Natural Human-Robot Communication*, Pittsburgh, PA, 2018.
- [13] D.A. Forsyth, J.Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson Education. 2012.
- [14] A. Kaehler, G. Bradski, *Learning OpenCV: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*, 2015, pp. 575.
- [15] Nielsen, A. Michael, *Neural Networks and Deep Learning*. Determination Press, 2015.
- [16] Y. Seldin, S. Starik, M. Werman, Unsupervised Clustering of Images using their Joint Segmentation, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision (SCTV)*. URL:http://www.cs.huji.ac.il/%7Ewerman/Papers/SSW_SCTV03.pdf.



Графические технологии
информационной поддержки жизненного
цикла продукта

Graphic technologies
for product lifecycle information support

GraphiCon 2021

27 – 30 сентября 2021
Нижний Новгород, Россия

Метрики качества генеративных моделей

К.И. Абросимов¹, Т.В. Львutiна¹, А.С. Суркова¹

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 24, ул.Минина, Нижний Новгород, 603095, Россия

Аннотация

В рамках данной статьи рассматриваются современные метрики оценивания генеративных моделей. Особое внимание уделяется метрикам, которые применяются в области обработки естественного языка – BLUE (оценивает качество на основе сравнения полученного результата моделью и человека), NIST (основана на метрике BLUE), METEOR (основана на гармоническом среднем униграмм точности и полноты), ROUGE (. В статье представлена новая метрика, которая основана на субъективных оценках. Используемые в рассмотренной метрике субъективные оценки собираются с помощью попарного сравнения в виде шкал оценивания. Также в рамках статьи предложен алгоритм генерации музыки, построенный на основе автоматных моделей работы с ABC-нотацией, моделей дистрибутивной семантики и генеративных моделей глубоких нейронных сетей – Трансформеров. Новая метрика качества (SS-метрика), представленная в статье, применяется для оценки качества предложенного алгоритма генерации музыки в сравнении с решениями, которые предлагает человек и baseline-модели. Генерация музыки на основе baseline-модели строит продолжение музыкального фрагмента путем случайного выбора тактов из первой половины музыкального фрагмента. В ходе экспериментов удалось выяснить, что SS-метрика позволяет формализовать и обобщить субъективные оценки, это может быть использовано при оценке качества различных объектов.

Ключевые слова

Метрика, генеративные модели, анализ объектов сложной структуры, SS-метрика, генерация музыки, машинное обучение

Quality metrics of generative models

K.I. Abrosimov¹, T.V. Lvutina¹, A.S. Surkova¹

¹ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), 24, Minin Street, Nizhny Novgorod, 603095, Russia

Abstract

Within the framework of this article, modern metrics for evaluating generative models are considered. Particular attention is paid to metrics that are used in the field of natural language processing - BLUE (evaluates quality based on a comparison of the result obtained by a model and a person), NIST (based on the BLUE metric), METEOR (based on the harmonic mean of unigrams of accuracy and completeness), ROUGE (. The article presents a new metric, which is based on subjective assessments. The subjective estimates used in the considered metric are collected using pairwise comparison in the form of evaluation scales. The article also proposes an algorithm for generating music based on automatic models of working with ABC notation, models of distributive semantics and generative models of deep neural networks - Transformers. The new quality metric (SS-metric) presented in the article is used to assess the quality of the proposed algorithm for generating music in comparison with the solutions offered

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: abrosimov.kirill.1999@mail.ru (К.И. Абросимов); tat.lvutina@mail.ru (Т.В. Львutiна); ansurkova@yandex.ru (А.С. Суркова)
ORCID: 0000-0001-9262-0474 (К.И. Абросимов); 0000-0002-2061-8858 (Т.В. Львutiна); 0000-0003-0018-9053 (А.С. Суркова)

by humans and baseline models. Music generation based on the baseline model builds a continuation of a musical fragment by randomly selecting bars from the first half of the musical fragment. During the experiments, it was found out that the SS-metric allows you to formalize and generalize subjective assessments, this can be used to assess the quality of various objects.

Keywords

Metrics, generative models, analysis of objects of complex structure, SS-metric, music generation, machine learning

1. Введение

Задача оценивания картин, музыкальных произведений и текстов достаточно давно является предметом обсуждения научного сообщества. Первоначально подобными проблемами занимались специалисты соответствующих областях: искусствоведы, литературные и музыкальные критики и т.п. Однако с распространением компьютеров задачами получения численной оценки, отражающей объективные параметры объекта, стали заниматься математики-аналитики.

В последнее время широкое распространение получили такие генеративные модели, как генеративные состязательные сети (GAN), глубокие нейронные сети Трансформеры и другие техники, которые могут быть использованы для создания новых объектов, таких как изображения, текст или музыкальные произведения. В связи с этим одной из важных задач стала задача оценки качества генеративных моделей и в целом задача формализации и объективизации оценки генерируемых объектов.

2. Метрики качества генеративных моделей

Как уже было сказано, остро встает вопрос оценки качества генеративных моделей. Для классических задач существует исчерпывающее количество метрик, например: правильность, точность, полнота, и т. д., но вот с генеративными моделями все достаточно тяжело, ведь мы не просто хотим свериться с правильным ответом, но и понять, а не смогла ли она даже в чем-то превзойти человека.

Метрики можно классифицировать на две категории – субъективные метрики и объективные метрики. Субъективные метрики основаны на оценке восприятия человеком-наблюдателем, тогда как объективные метрики основаны на вычислительных моделях, которые пытаются сопоставить результат с некоторым эталоном. Субъективные метрики часто являются более «точными для восприятия», однако большая часть этих метрик неудобна, трудоемка или дорога для вычисления. Другая проблема заключается в том, что эти две категории метрик могут не соответствовать друг другу. Следовательно, исследователи часто анализируют результаты, используя метрики из обеих категорий.

2.1. Метрики качества NLP

В рамках задачи оценки музыкальных фрагментов, в том числе сгенерированных на основе ABC-нотации, можно пользоваться объективными метриками, которые используются в области обработки естественного языка (Natural Language Processing, NLP).

1. Метрика BLUE - оценивает качество на основе сравнения полученного результата моделью и человека, изначально применялась именно в оценке качества машинного перевода, центральной идеей метрики являлась: «Чем ближе машинный перевод к профессиональному человеческому переводу, тем он лучше». Во-первых, вычисляется среднее геометрическое модифицированных n -граммовых точностей p_n , используя n -граммы до длины N и положительно-определенные веса, сумма которых равняется единице. Во-вторых, вычисляется штраф за краткость BP , на основе длины результата модели s и эффективной длиной, на основе

корпуса r . В результате произведения штрафа за краткость и экспоненты сум, получаем значение метрики [1], вычисляемой по формулам

$$p_n = \frac{\sum_{c \in \{Candidates\}} \sum_{n_gram \in c} Count_{clip}(n_gram)}{\sum_{c \in \{Candidates\}} \sum_{n_gram \in c} Count_{clip}(n_gram)} \quad (1)$$

$$BP = \begin{cases} 1, & \text{if } c > r \\ e^{(1-\frac{r}{c})}, & \text{if } c \leq r \end{cases} \quad (2)$$

$$BLUE = BP * \exp\left(\sum_{i=1}^n w_n \log p_n\right) \quad (3)$$

2. Метрика NIST - основанная на метрике BLUE, с разницей лишь в том, где BLUE при вычислении точности n -грамм использует не одинаковый вес w_n , а вычисляет его, насколько информативный конкретный n -грамм. Например, если биграмма «но и» найдена, то она получит меньший вес, чем биграмма «вычислительная лингвистика», так как у первой биграммы больше априорная вероятность.

3. Метрика METEOR - основанная на гармоническом среднем униграмм точности и полноты. Она также имеет несколько особенностей, которые не встречаются в других метриках, таких как совпадение стемминга и синонимии, а также стандартное точное совпадение слов. Появился новый штраф: более длинные n -граммовые совпадения используются для вычисления штрафа r за выравнивание. Чем больше сопоставлений, которые не являются смежными в ссылке и предложении-кандидате, тем выше будет штраф, что позволяет учитывать конгруэнтность не только по отношению к отдельным словам, но и по отношению к более крупным сегментам [2]. Метрика METEOR вычисляется по формулам

$$P = \frac{\text{количество } n - \text{грамм в сгенерированном объекте, которые также были найдены в эталонном объекте}}{\text{количество } n - \text{грамм в сгенерированном объекте}} \quad (4)$$

$$R = \frac{\text{количество } n - \text{грамм в сгенерированном объекте, которые также были найдены в эталонном объекте}}{\text{количество } n - \text{грамм в эталонном объекте}} \quad (5)$$

$$F = \frac{10PR}{R + 9P} \quad (6)$$

$$p = \left(\frac{\text{число групп } n - \text{грамм}}{\text{количество } n - \text{грамм, которые объединили в группы(словосочетания)}} \right)^3 \quad (7)$$

$$METEOR = F(1 - p) \quad (8)$$

4. Семейство метрик ROUGE. Рассмотрим две основные метрики из данного семейства: ROUGE-N и ROUGE-SKIP2. Формально, ROUGE-N-это n -граммовая полнота между кандидатом и реальным продолжением, которая вычисляется как отношение полученных n -грамм кандидата к максимальному количеству n -граммов, которые есть и у кандидата, и у эталона. ROUGE-SKIP2. Скип – биграмма - это любая пара слов в их порядке предложения, допускающая произвольные пробелы. Статистика совпадений скип-биграмм измеряет перекрытие скип-биграмм между кандидатом и эталоном [3].

2.2. Метрики качества музыкальных произведений

Однако, все эти метрики имеют главный минус – все они сравниваются с некоторым эталоном, а в музыке достаточно тяжело найти такой «эталон», ведь даже тому, что написал

человек нельзя поставить такую метку, так как завтра найдется другой человек, который, возможно, сделает лучше. Поэтому необходимо определить иную метрику.

Одной из первых работ по формализации оценок качества музыкальных произведений стала статья «Оценка сложности песен» [4], в которой рассмотрена эволюция популярных песен с точки зрения теории вычислительной сложности.

2.3. Scale Score метрика (SS-метрика)

Однако, все эти метрики имеют главный минус – все они сравниваются с некоторым эталоном, а в музыке достаточно тяжело найти такой «эталон», ведь даже тому, что написал человек нельзя поставить такую метку, так как завтра найдется другой человек, который, возможно, сделает лучше. Поэтому необходимо определить иную метрику.

Одной из первых работ по формализации оценок качества музыкальных произведений стала статья «Оценка сложности песен» [4], в которой рассмотрена эволюция популярных песен с точки зрения теории вычислительной сложности.

У каждого человека есть свой собственный музыкальный вкус, который зависит от огромного количества факторов, но особенно от характера человека [5,6,7]. Поэтому давать оценку конкретному произведению разным людям нецелесообразно, однако давать на оценку пару произведений, покажет, что именно больше нравится человеку в сравнении.

Поэтому была предложена метрика попарной оценки объектов, названная Scale Score метрика (SS-метрика). SS-метрика рассчитывается по формуле

$$SS_{ke}^{scale} = \frac{\sum_{i=1}^n score_{ke_i}}{n * (\min(scale) + \frac{\max(scale) - \min(scale)}{2})} \quad (9)$$

где n - количество оценок, k - предлагаемое решение, относительно решения e; scale - выбранная шкала с неотрицательными оценками.

Данная метрика возвращает значение от 0 до 2.

0 – решение k абсолютно хуже решения e.

1 – решение k сопоставим решению e.

2 – решение k абсолютно лучше решения e.

3. Расчеты Scale Score метрики при оценивании музыкальных фрагментов

Были проведены эксперименты для оценки качества музыкальных фрагментов. Генерировались фрагменты алгоритмом на основе ABC-нотации и дистрибутивной семантики [8]. Алгоритм состоит из нескольких моделей:

1. С помощью автоматной модели происходит разделение ABC-нотации на мелодические и ритмические конструкции.
2. В мелодических конструкциях, с помощью поиска коллокаций, находятся часто встречаемые аккорды, которые объединяются в пару.
3. С помощью моделей дистрибутивной семантики (Word2Vec (CBOW) и FastText) производится векторизация мелодических и ритмических конструкций.
4. Полученные сжатые векторные представления подаются генеративным моделям - Трансформерам.
5. Полученные продолжения с помощью еще одной автоматной модели сцепляются в ABC-нотацию, в результате получаем продолжение музыкального фрагмента.

Датасет представлен компанией YandexCloud, в котором представлены 182 000 музыкальных произведений различных жанров, тональностей, длительностей в формате ABC-нотаций [9]. Для

тестирования и оценки модели были выбраны 100 ABC-нотации из указанного датасета. На Рисунке 1, представлены круговые диаграммы тестовой репрезентативной выборки.



Рисунок 1: Характеристики тестовой выборки

Для оценки качества полученного алгоритма использовалась предложенная SS-метрика: людям предлагали попарно сравнить три фрагмента, у которых первая половина была одинаковой. Вторая половина отличалась: первый фрагмент - это продолжение, которое придумал человек, второй фрагмент - это то, что сгенерировал предложенный алгоритм, описанный выше, третий фрагмент - это продолжение, сгенерированное baseline-моделью, которая в случайном порядке с повторениями выбирала такты из первой половины произведения.

Для удобства сбора субъективных оценок был разработан web-сервис, который автоматизирует и упрощает пользователю взаимодействовать с музыкальными фрагментами, а также равномерно распределять их между самими пользователями.

Была выбрана шкала от 0 до 4, то есть SS-метрика для сравнения объектов будет рассчитывается по формуле

$$SS_{model-human}^{[0..4]} = \frac{\sum_{i=1}^n score_{model-human_i}}{n * 2} \quad (10)$$

Интересное свойство данной метрики: сумма SS-метрика для решения А, относительно решения Б и SS-метрика для решения Б, относительно решения А равна 2, или $SS_{model-human}^{[0..4]} = 2 - SS_{human-model}^{[0..4]}$.

Для каждого значения шкалы предусмотрен следующий смысл:

- **score = 0** - предлагаемое решение к явно хуже решения е;
- **score = 1** - предлагаемое решение к скорее хуже решения е;
- **score = 2** - предлагаемое решение к также хорошо/плохо как решение е;
- **score = 3** - предлагаемое решение к скорее лучше решения е;
- **score = 4** - предлагаемое решение к явно лучше решения е.

На Рисунках 2–4 представлены посчитанные SS-метрики для каждого музыкального фрагмента, на которых считались результирующие метрики, которые рассмотрены выше.

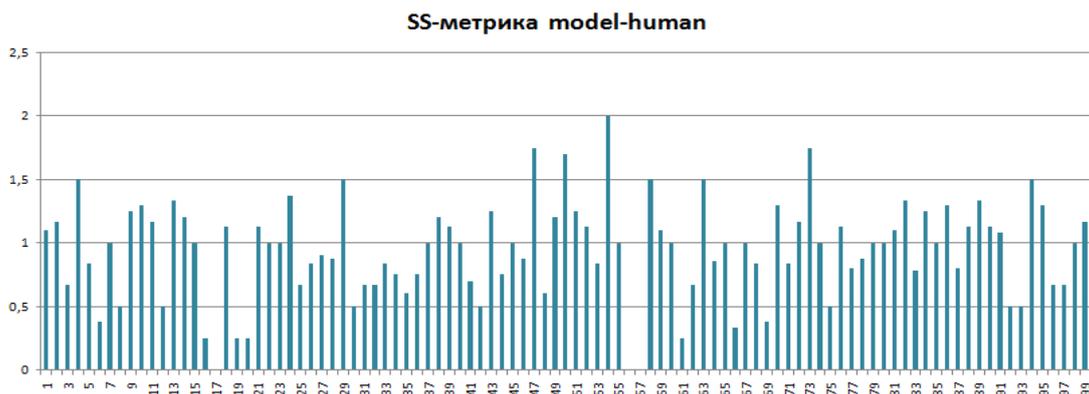


Рисунок 2: SS-метрика model-human по каждому фрагменту

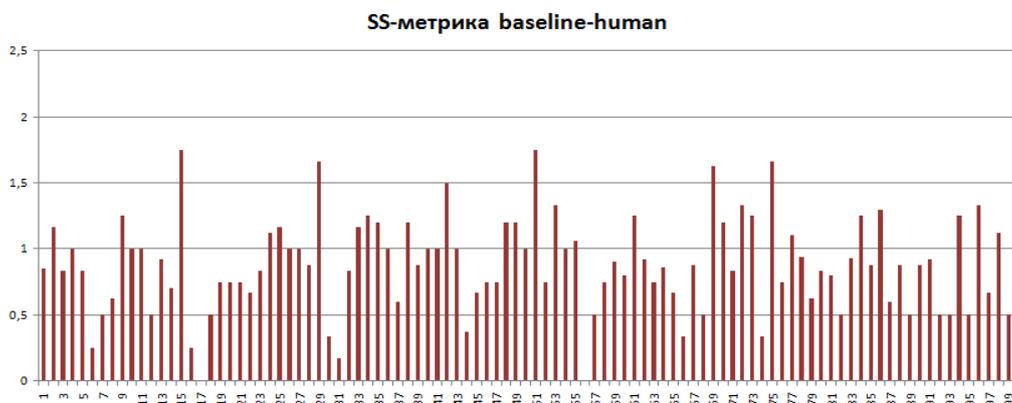


Рисунок 3: SS-метрика baseline-human по каждому фрагменту

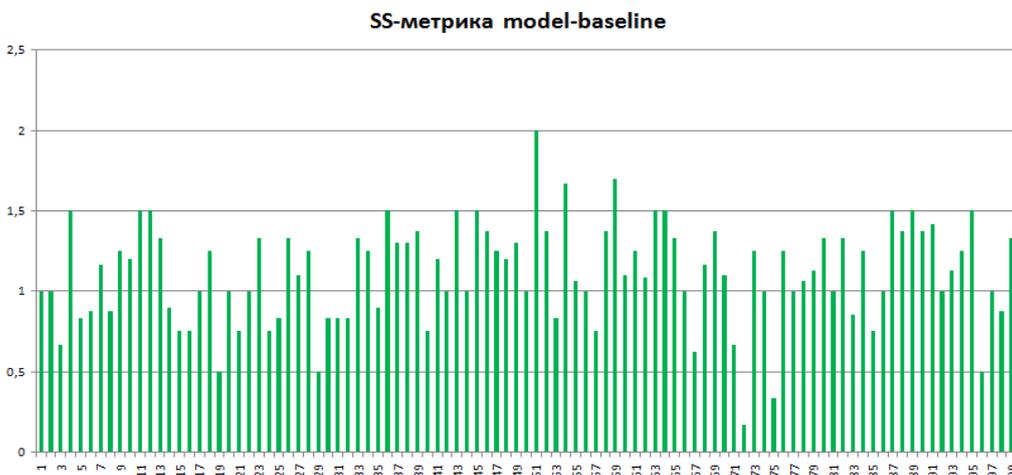


Рисунок 4: SS-метрика model-baseline по каждому фрагменту

Предложенный алгоритм показал себя хорошо, что видно по Рисунку 5, результирующая метрика показала, что предложенный алгоритм сгенерировал лучше музыкальные фрагменты, чем baseline-модель, основанная на случайном выборе тактов из подаваемого начала. Однако, алгоритм все-таки хуже предлагал продолжения, чем написанные фрагменты человеком, но тем не менее метрика очень близка к 1, это означает, что модель генерирует чуть хуже продолжения, чем человек, но все равно довольно достойно.



Рисунок 5: Значение SS-метрики для разных алгоритмов

4. Заключение

В настоящее время все быстрее развиваются технологии генерации контента, которые крайне тяжело оценить. В рамках этой статьи были рассмотрены основные метрики оценок моделей NLP, описана предложенная SS-метрика, а также применена для оценивания предложенного алгоритма генерации музыки.

Предложенная метрика позволяет формализовать и обобщить субъективные оценки, что может быть использовано при оценивании качества различных объектов, таких как музыкальных произведений, изображений, текстов, в том числе полученных генеративными методами.

5. References

- [1] K. Papineni, S. Roukos, T. Ward, W. J. Zhu, BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation. ACL-2002: 40th Annual meeting of the Association for Computational Linguistics, 2002, p. 311–318.
- [2] S. Banerjee, A. Lavie, «METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation with Improved Correlation with Human Judgments» in Proceedings of Workshop on Intrinsic and Extrinsic Evaluation Measures for MT and/or Summarization at the 43rd Annual Meeting of the Association of Computational Linguistics (ACL-2005), 2005.
- [3] Lin, Chin-Yew. ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries. In Proceedings of the Workshop on Text Summarization Branches Out (WAS 2004), Barcelona, Spain, 2004.
- [4] D. Knuth, The Complexity of Songs, SIGACT News, 1977, p.17–24.
- [5] R.A. Brown, Music preferences and personality among Japanese university students // International Journal of Psychology: journal, volume 47, 2012, p. 259–268.
- [6] Langmeyer, Alexandra; Guglhör-Rudan, Angelika & Tarnai, Christian. What do music preferences reveal about personality: a cross-cultural replication using self-ratings and ratings of music samples // Journal of Individual Differences: journal, volume 33, 2012, p. 119–130.
- [7] Chamorro-Premuzic, Tomas; Gomà-i-Freixanet, Montserrat, Furnham, Adrian & Muro, Anna. Personality, self-estimated intelligence, and uses of music: A Spanish replication and extension using structural equation modeling // Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts: journal, volume 3, 2009, p. 149–155.
- [8] К. И. Абросимов, А.С. Суркова, Алгоритм генерации музыки на основе ABC-нотации и дистрибутивной семантики // Информационные системы и технологии ИСТ-2021. Сборник материалов XXVII Международной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева. 2021. С. 906–912.
- [9] Хакатон-соревнование от Yandex.Cloud. URL: <https://ds2020.ai-community.com/>.

Иерархия концепций и моделей создания и поддержки программного обеспечения в течение жизненного цикла

В.П. Хранилов¹, П.В. Мисевич¹, Е.Н. Панкратова¹, А.Э. Ермилов¹

¹ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина д.24, Нижний Новгород, 603000, Россия

Аннотация

Статья посвящена позиционированию современных подходов, концепций и моделей к комплексу вопросов разработки автоматизированных систем и их поддержки в течение всего жизненного цикла. Тема актуальна для создателей современных программно-аппаратных комплексов компьютерной графики и программно-аппаратных комплексов на этапах их проектирования и поддержки. В работе предложены системы классификации концепций и информационных моделей. В статье описана иерархия универсальных концепций построения программного и аппаратного обеспечения. Первый уровень состоит из концепции интеллектуализации системы, концепции глобализации программного и аппаратного обеспечения, концепции систем, концепции поддержки систем в течение жизненного цикла, концепции открытых систем, объектно-ориентированного подхода и других. Второй уровень состоит из концепции ситуационного подхода, сценарного подхода, сценарно-ситуационного подхода, логистического подхода, мультиагентного подхода и прочих. Третий уровень иерархии состоит из концепции иерархий абстракции, концепции агрегаций, концепции обобщений (БД), концепции нормализаций, концепции семантических сетей, концепции фреймовых сетей, концепции мультимедийных фреймовых сетей (систем дистанционного управления и мониторинга), концепции сетей фреймов с нечеткой логикой и других. Статья опирается на работы в области системного анализа, САУ, САПР и систем представления знаний и искусственного интеллекта.

Ключевые слова

Автоматизированные системы, концептуальные иерархии, информационные модели, концепция систем, сети фреймов с нечеткой логикой, мультимедийные фреймовые сети, логистический подход, сценарно-ситуационный подход

Hierarchy of concepts and models for creating and maintaining software throughout the life cycle

V.P. Khranilov¹, P.V. Misevich¹, E.N. Pankratova¹, A.E. Ermilov¹

¹ NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Minina 24 str., N. Novgorod 603000, Russia

Abstract

The article is devoted to the positioning of modern approaches, concepts and models to the complex issues of the development of automated systems and their support throughout the life cycle. The topic is relevant for the creators of modern computer graphics software and hardware complexes and software-hardware complexes at the stages of their design and support. A hierarchy of universal concepts for building software and hardware is described in the paper. The first level consists of the concept of system intellectualization, the concept of software and hardware globalization, the systems concept, the concept of the support for systems during the life cycle, the concept of open systems, the object-oriented approach, and

ГрафиКон 2021: 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 27-30 сентября 2021 г., Нижний Новгород, Россия

EMAIL: hkanilov@nntu.ru (В.П.Хранилов); p_misevich@mail.ru (П.В.Мисевич); inyaz@nntu.ru (Е.Н.Панкратова); aermilov09@mail.ru (А.Э.Ермилов)

ORCID:

others and etcetera. The second level consists of the concept of the situation approach, the scenario approach, the scenario-situational approach, the logistics approach, the multi-agent approach, and etcetera. The third level of the hierarchy consists of the concept of abstraction hierarchies, the concept of aggregations, the concept of generalizations (DB), the concept of normalizations, the concept of semantic networks, the concept of frame networks, the concept of multimedia frame networks (remote control and monitoring systems), the concept of networks of frames with fuzzy logic and etcetera. The article is based on works in the field of system analysis, ACS, CAD and knowledge representation systems and artificial intelligence.

Keywords

Automated systems, concept hierarchies, information models, systems concept, networks of frames with fuzzy logic, multimedia frame networks, logistics approach, scenario-situational approach

1. Введение

Активное развитие автоматизированных систем, захват ими всех сфер жизни человеческого инициирует развитие теоретических основ их создания и поддержки в течение всего жизненного цикла. Отметим, что, как правило, исследователи через свой практический опыт разработки и поддержки программно-аппаратных комплексов формулирует концепции и модели, которые в совокупности образуют теоретические основы построения и поддержки информационных систем и систем компьютерной графики.

Наличие множества концепций и моделей актуализирует их анализ с целью формализации факторов успеха в комплексе вопросов их применения. Одним их способов исследования предметных областей с высоким уровнем абстракций является классификация. Результатом, как правило, является иерархическая система, которая описывает систему объектов в исследуемой предметной области.

Отметим, что любая классификация концепций и моделей несет некоторый оттенок субъективизма. Однако, создание классификационных систем является научным методом исследования, который прямо или опосредованно приводит к часто весьма интересным результатам. В данной работе авторами предлагается классификационная система, которая охватывает концепции и модели построения автоматизированных систем.

2. Иерархии концепций

В данной работе предлагается условно разделить множество концепций на три уровня. К первому уровню (рис.1) отнесем концепции, которые выступают в качестве общих устойчивых трендов развития ИТ мира. К ним отнесем:

- интеллектуализацию автоматизированных систем;
- глобализацию;
- использование системного подхода [1];
- поддержку системы в течение всего жизненного цикла [2];
- открытые системы [3];
- объектно-ориентированный подход [4];
- и другие.

Очевидно, что каждая концепция имеет многогранную интерпретацию практиками. Например, концепция интеллектуализации автоматизированных систем может интерпретироваться практиками как:

- использование экспертных систем для решения задач;
- применение нейронных сетей в компьютерной графике;
- использование производственных систем для управления процессом обработки информации;

- применение семантических сетей для построения интероперабельных информационных систем;
- использование гибридных форм представления знаний, например, сетей фреймов с мультимедийными образами для создания информационного обеспечения и др.



Рисунок 1: Иерархия концепций: первый уровень

Научно-практические вопросы интеллектуализации имеют различную интерпретацию на каждом этапе проектирования, внедрения и поддержки автоматизированных систем и средств компьютерной графики. Например, опыт применения экспертных систем позитивен и для поддержки принятия решений при проектировании и для поддержки уже функционирующих программно-аппаратных комплексов.

Аналогично, применение аппарата нечеткой логики эффективно при выборе ресурсов при проектировании программно-аппаратных комплексов и при поддержке работы групп сопровождения программного продукта на этапах внедрения и эксплуатации программного обеспечения.

Однако, общее направление интеллектуализации ИТ мира, как концепция, располагается в нашей классификационной системе на высшем уровне иерархии.

Ко второму уровню (рис.2) отнесем концепции, которые поддерживают сам процесс проектирования. Это концепции:

- ситуационного подхода [5];
- сценарного подхода [5];
- сценарно-ситуационного подхода [5];
- логистический подход (каждый факт, каждое данное в нужном формате в нужном месте и в нужный момент времени) [6];
- агентного подхода [7];
- и другие.

Отметим нечеткие классификационные границы описанных выше подходов. Например, ситуационный подход, который основан на гипотезе повторяемости ситуаций применим и к сценариям функционирования автоматизированных систем. Таким образом, принцип повторяемости – это общая составляющая и сценарного и ситуационного подхода.

Классический аппарат описания ситуаций (фреймы) использовался М.Минским для описания сценариев. Взаимопроникновение подходов отмечается и с классификационными концепциями более высокого уровня. Например, ситуационный подход, который использует аппарат фреймов, является частным случаем концепции интеллектуализации ИТ мира. Однако, идеи ситуационного подхода позволяют строить информационные системы и без применения аппарата искусственного интеллекта. Практики понимают взаимозависимость идей логистического и агентного подхода. Создание и использование приведенной выше

классификации позволило авторам сформулировать сценарно-ситуационный подход, который использовался при построении систем информационной логистики и ослаблял недостатки сценарного и ситуационного подходов как концепций построения программно-аппаратных комплексов.

Условно к третьему уровню (рис.2) иерархии отнесем концепции, которые выступают в роли руководства к практическим действиям. Это в первую очередь концепции построения программного и информационного обеспечения информационных систем.

При построении информационного обеспечения используются концепции:

- иерархии абстракций (БД) [8, 9];
- агрегации (БД) [8, 9];
- обобщения (БД) [8, 9];
- нормализации [8, 9];
- семантические сети (ИИ, открытые системы и др.) [10];
- сети фреймов (САПР, САД, СППР и другие) [11, 12];
- сети мультимедийных фреймов (системы дистанционного управления и мониторинга) [13];
- сети фреймов с нечеткой логикой (системы мониторинга и др.) [14].

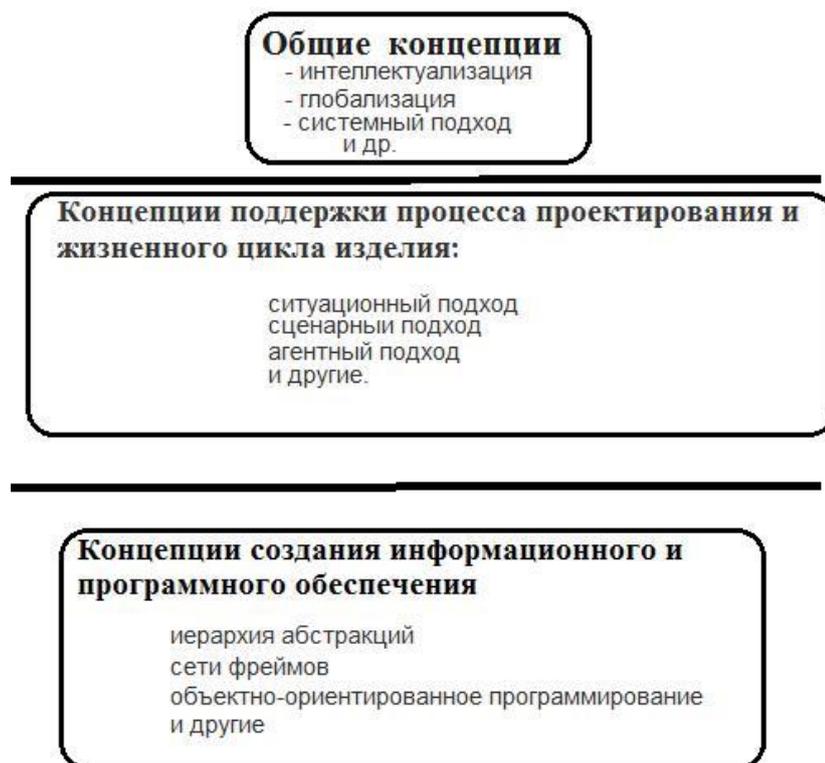


Рисунок 2: Иерархия концепций для проектирования и поддержки автоматизированных систем

В качестве примера применения данной классификации приведем формализацию гибридной формы баз знаний, которая основана на сочетании фреймового подхода с нечеткой логикой [14]. Эта форма представления знаний в различных предметных областях апробировалась и хорошо себя зарекомендовала при построении систем мониторинга в нескольких тестовых областях.

Целесообразность создания такой формы описания предметных областей стала следствием анализа классов, описанных выше и спецификой предметной области мониторинга:

необходимостью подстраивания сценариев работы систем под динамику изменения реальных ситуаций [14].

Применим полученные результаты к предметной области мониторинга распределенной системы компьютерной графики. Проведем декомпозицию предметной области мониторинга на множество взаимосвязанных типовых задач. Каждой типовой задаче сопоставляется один из «кирпичиков» фреймов-классов с единым интерфейсом, декларирующим их использование. Каждый фрейм-класс состоит из типовых сценариев, описанных в интерфейсе, и типовых вспомогательных сценариев, не описанных в интерфейсе, относящихся к тому или иному типу фрейма-класса (например: «мониторинг рабочей станции», «мониторинг используемого ПО»). Уровень событий и уровень причинно-следственных связей определяется логикой выполнения типовых сценариев и их параметров (id станции и т.п.), а также логикой правил обработки слотов фрейма (в т.ч. нечёткой логикой) и поступающей на вход оперативной информацией.

Отметим, что использование фреймовой модели позволяет совместить концептуальную модель информационного обеспечения с описанием предметной области построения системы мониторинга распределенной системы компьютерной графики.

При построении программного обеспечения применяют:

- объектно-ориентированное программирование [4];
- процедурное программирование [15];
- структурное программирование [16];
- модульное программирование [17];
- и другие.

Описанная выше иерархия весьма условна. Например, ситуационный подход можно отнести к самому верхнему уровню иерархии т.к. он является одним из основных подходов построения ИТ систем (первые центры ситуационного управления появились в 70-х годах прошлого столетия и сегмент рынка данного класса систем сегодня активно расширяется). Однако, ситуационный подход можно отнести и к более низким уровням иерархии т.к. он активно применяется при построении автоматизированных систем (САПР, САД, систем дистанционного управления и мониторинга, систем мониторинга ситуационного типа).

С практической точки зрения для предложенной системы работает правило: чем выше уровень концепции, тем большие предметные области автоматизации он охватывает. Кроме этого проектировщик, создатель систем имеет большую свободу действий, т.к. концепции более высокого уровня не предлагают конкретных стратегий создания систем.

Например, очевидная концепция – тренд интеллектуализации автоматизированных систем и всего ИТ мира не дает технологии решения конкретной задачи. Проектировщик при создании конкретной системы в рамках концепции интеллектуализации столкнется с проблемой выбора:

- использовать интеллектуальный анализ данных;
- создавать систему интеллектуальной поддержки пользователя;
- использовать модели данных искусственного интеллекта для построения информационного обеспечения;
- применение различных механизмов логического вывода;
- использование гибридных знаний для решения задач;
- и другие.

3. Иерархия моделей

Анализ моделей поддержки процесса проектирования автоматизированных систем и их поддержки в течение всего ЖЦ так же позволяет их ранжировать.

На самом верхнем уровне расположим модели:

- описания процессов проектирования и поддержки систем в течение жизненного цикла (каскадная, спиралевидная и др. модели) [18];
- динамическая модель поддержки выбора ресурсов для синтеза проектируемой системы [19];

- динамическая модель описания процесса реализации сценариев функционирования автоматизированных систем [20].

К моделям более низкого уровня, которые имеют ярко выраженную инженерную ориентацию отнесем:

- фреймовая модель описания процесса проектирования изделий [12];
- модель с мультимедийными фреймами [13];
- фреймовая модель с процедурами нечеткой логики [14];
- фреймово-продукционная модель представления процессов проектирования [21];
- ситуационные модели смешанного типа [22];
- и другие.

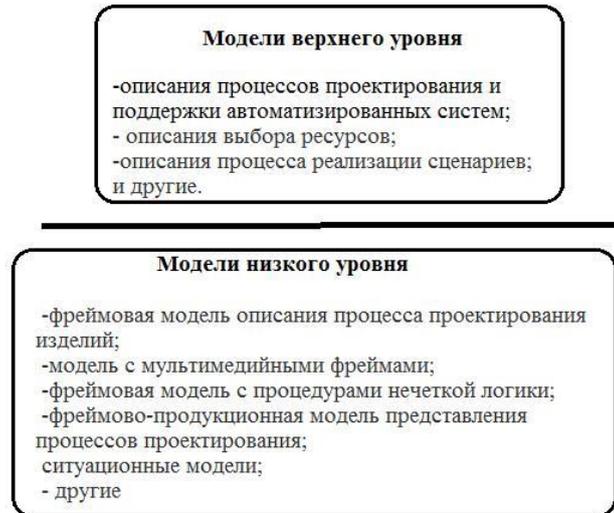


Рисунок 3: Иерархия моделей описания процессов проектирования и поддержки автоматизированных систем в течение всего жизненного цикла

Таким образом, совокупность моделей поддержки процесса проектирования и жизненного цикла изделия на уровне концепции образует два уровня иерархии (рис.3).

Отметим, что предложенная классификация концепций имеет три уровня, а классификация моделей состоит из двух уровней иерархии. Это во многом определяется традицией: при проектировании выделяют три уровня абстракций. На верхнем уровне стоят кибернетические концепции, которые описывают процесс в предметной области. Более низким уровнем являются машинно-независимые концепции и концептуальные модели, которые позволяют реализовать проект с использованием нескольких альтернативных платформ (или инструментальных комплексов, например, СУБД). И, наконец, на самом низком уровне располагаются машинно-ориентированные концепции и модели, которые поддерживают реализацию проекта в жестких рамках конкретных инструментариев.

4. Литература

- [1] Игорь Клименко: Теория систем и системный анализ. Учебное пособие. Кнорус, 2021. 264 с.
- [2] Юрчик, Голубкова: Применение CALS технологий на предприятии. Учебное пособие/ Лань, 2020 г. – 92 С.
- [3] Ю.В. Гуляев, Е.Е. Журавлев, А.Я. Олейников. Методология стандартизации для обеспечения интероперабельности информационных систем широкого класса. Радиоэлектроника, N3, 2012, С 1-12.
- [4] Grady Booch, Robert A. Maksimchuk, Michael W. Engle, Jim Conallen, Kelli A. Houston, Bobbi J. Young Ph.D Object-Oriented Analysis and Design with Applications, Third Edition. Released April 2007 Publisher(s): Addison-Wesley Professional ISBN: 9780201895513

- Д.А. Поспелов. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. — 288 стр.
- [5] П.В. Мисевич. Логистический подход к вопросам проектирования систем объектов и формирования сценариев работы программного обеспечения// Системы управления и информационные технологии. 2007. №4.1(30). - С. 169-174.
- [6] Stuart Russell and Peter Norvig Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th US ed.
- [7] Т. Тиори. Проектирование структур баз данных. В 2 кн./ Т. Тиори, Д. Фрай - М.: Мир, 1985. Кн. 1. - 287 с. Кн. 2. - 320 с.
- [8] Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — СПб.: Питер, 2013. — 704 с.
- [9] Г. С. Осипов. Методы искусственного интеллекта. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 296 с.
- [10] Marvin Minsky. A Framework for representation knowledge. Massachusetts institute of technology. June 1974
- [11] В.В. Семёнов. Принципы формирования и фрагменты базы знаний теории управления, в сборнике "Общее математическое обеспечение систем автоматизированного проектирования", Москва, МАИ, 1981.
- [12] Д.А. Белов. Проблемно-ориентированная автоматизированная система мониторинга движения железнодорожного состава / Д.А. Белов, П.В. Мисевич, В.П. Хранилов // Автоматизация в промышленности. 2009. №2. С.49-51.
- [13] V.P. Khranilov; P.V. Misevich; E.N. Pankratova. The Use of Hybrid Knowledge Bases in Designing Engineering Systems Published in: 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)
- [14] Борис Олейников. Программирование. процедурное программирование. Издательство: Сибирский федеральный университет 2016 92 с.
- [15] Татьяна Павловская, Юрий Щупак. С/С++. Структурное и объектно-ориентированное программирование: Практикум СПб.: Питер, 2011. — 352 с.
- [16] Н.В. Титовская., С.Н. Титовский. Модульное программирование: учеб. пособие / Н.В.Титовская; С.Н.Титовский, Краснояр. гос. аграр. ун-т. -Красноярск
- [17] Р.И. Сольнищев. Автоматизация проектирования систем автоматического управления / Р.И. Сольнищев - М., Высшая школа, 1991. - 335с.
- [18] В.П. Хранилов. Нечеткая динамическая модель интерактивного распределения вычислительных ресурсов / В.П. Хранилов, Д.В. Прохоров // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 4.1(26). С. 189-12020
- [19] V.P. Khranilov, V.V. Andreev, P.V. Misevich, E.N. Pankratova. MODELS IN A STATE SPACE FOR ENGINEERING APPLICATIONS 788-792. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)
- [20] П.Д. Басалин. Построение САПР на базе фреймво - производственной модели/ П.Д. Басалин, П.В. Мисевич // Системы обработки информации и управления: межвуз. сб. научн. тр./ Н. Новгород: изд - во НГТУ, 1995.- С. 106 - 112.
- [21] О.М. Полевая. Математическое обеспечение синтеза формулировок стратегических целей и задач в информационной системе поддержки процессов стратегического управления // Информационные системы и технологии, №3, 2016, с.81-91.

Авторский указатель

А

Абросимов К.И. 124
Александрова С.С. 47
Антонов В.С. 10
Ахметшин Р.И. 75

Б

Балута В.И. 114
Бойков А.А. 38
Борисов В.Е. 23

В

Власенко А.В. 47
Воронин П.А. 47

Г

Гордеев Д.С. 54
Горячев М.С. 106
Греченева А.В. 106

Д

Давыдов А.А. 23
Дорофеев Н.В. 106

Е

Ермилов А.Э. 131

Ж

Жарина Е.С. 32

Жданов Д.Д. 10

З

Зелев А.П. 75
Зиатдинов Р.А. 75
Зиганшина Ф.Т. 75

К

Карабчевский В.В. 63
Карандеев А.А. 114
Константиновская Т.В. 23

Л

Луцкий А.Е. 23
Львутина Т.В. 124

М

Мазуров А.С. 63
Максименко А. 75
Мисевич П.В. 131
Муфтеев В.Г. 75

Н

Набиев Р.И. 75
Новиков М.М. 94
Новикова Л.В. 94

О

Осинов В.П. 114

П

Панкратова Е.Н. 131

Р

Ризен Ю.С. 32

С

Саватеева Е.В. 94
Садреев Ф.Г. 47
Симонова В.А. 94
Сорокин М.И. 10
Суркова А.С. 124

Т

Томчинская Т.Н. 88

Ф

Фархутдинов И.М. 75
Фаттахов М.М. 75

Х

Хранилов В.П. 131

Ш

Шагалова А.А. 88

Научное издание

GraphiCon 2021

31-я Международная конференция
по компьютерной графике
и машинному зрению

Труды конференции

Издается в авторской редакции
Компьютерная вёрстка: *Е.С. Глумова, У.И. Халеева*

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24