Визуализация и анализ визуальных данных в аддитивной технологии производства оптико-электронных приборов

А.А. Молотков 1,2 , О.Н. Третьякова 1,2

Аннотация

Работа посвящена решению задач машинного зрения и научной визуализации в рамках промышленной реализации новых лазерных технологий, в частности технологии селективного лазерного сплавления. Продемонстрирован результат специализированной платформы машинного зрения, позволяющей упростить решение широкого спектра задач машинного зрения и научной визуализации. В представляемой работе также рассмотрен ряд частных вопросов видеофиксации процессов в изолированных средах, определения границ объектов на изображении, анализ и обработка визуальных данных, формирования и представления картины распределения тепла в трехмерном объекте, на основе данных, полученных в результате проведения численного эксперимента в соответствии с реализованной нами математической моделью исследуемого процесса. Также в статье демонстрируются результаты совмещения расчетных данных о геометрии изделия, данных, полученных при помощи анализа видеоданных от средств визуального наблюдения, с данными теплового распределения. Такой подход позволяет упростить технологам анализ процесса производства, выявление критических областей, таких как зоны перегрева и не расплавления, и подбор технологических параметров процесса селективного лазерного сплавления. Демонстрируются результаты применения созданной программной платформы в различных технологиях производства.

Ключевые слова

SLM, программная платформа, машинное зрение, оптико-электронные приборы.

Visualization and Analysis of Visual Data in Additive Manufacturing **Technology of Optoelectronic Devices**

A.A. Molotkov ^{1,2}, O.N. Tretiyakova ^{1,2}

Abstract

The work is devoted to solving the problems of machine vision and scientific visualization in the framework of the industrial implementation of new laser technologies, in particular the technology of selective laser fusion. The result of the development of a specialized machine vision platform is demonstrated, which makes it possible to simplify the solution of a wide range of machine vision and scientific visualization tasks. In the presented work, a number of particular issues of video recording of processes in isolated environments, determining the boundaries of objects in the image, analyzing and processing of visual data, forming and presenting a picture of heat distribution in a three-dimensional object, based on data obtained from the means of conducting a numerical experiment (calculation of the mathematical model of the process under study implemented by us)

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия EMAIL: karacerr@gmail.com (A.A. Молотков): tretivakova olga@mail.ru (О.Н. Третьякова)

ORCID: 0000-0002-9335-5219 (А.А. Молотков); 0000-0003-0256-4558 (О.Н. Третьякова)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

 $^{^{1}}$ ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, 125993, Россия

² ООО «Лаборатория промышленных исследований» группы компаний НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, 124498, Россия

¹ Moscow aviation Institute (national research University) MAI, Moscow, 125993, Russia

²LLC "PROMIS LAB" of the group of companies "Lasers and Equipment TM", Moscow, 124498, Russia

are also considered. The article also demonstrates the results of combining calculated data on the geometry of the product, data obtained by analyzing video data from visual observation tools, with thermal distribution data. This approach makes it easier for technologists to analyze the production process, identify critical areas, such as overheating and non-melting zones, and select the technological parameters of the selective laser melting process. The results of the application of the created platform in various production technologies are demonstrated.

Keywords

SLM, software platform, machine vision, optoelectronic devices.

1. Введение

Технология селективного лазерного сплавления (СЛС, SLM selective laser melting) является технологией послойного аддитивного производства с использованием лазера (нагревания мелкодисперсного металлического порошка лазерным излучением различных видов распределений интенсивности излучения и консолидации). Сегодня метод SLM является наиболее быстро развивающейся и широко исследуемой [1-4] технологией аддитивного производства. При промышленной реализации данной технологии мы столкнулись с проблемой визуального контроля, анализа и визуализации данных. Практика создания программного обеспечения для станков с числовым программным управлением (CNC), всё чаще требует решать задачи контроля и анализа при помощи методов машинного зрения, о чем так же говорит большое количество научных работ, посвященных как частным задачам [5-7], так и обзору применяемых методов и алгоритмов [8-10]. Причем часто это задачи, решение которых позволяет применять явные линейные алгоритмы. Примерами таких задач являются: нахождение QR-кода или штрих-кода, определение положения, количества и качества отверстий при перфорации материала, определение геометрии рабочего полотна, контроль качества шва, определение геометрии плоских изделий или изделий, изготовленных методом селективного лазерного сплавления SLM.

2. Архитектура предлагаемого программного решения

Данные задачи решаются в созданной среде с упором на доступность и простоту использования. Пользователь может собрать данные из различных источников, сформировать последовательность обработки из различных фильтров обработки изображения (рисунок 1), провести анализ при помощи заготовленных инструментов. С этой целью создана программная платформа LAMachineVision (рисунок 1).

Программная платформа использует подход визуального программирования, который хорошо зарекомендовал себя для предоставления широкому спектру пользователей возможности решения задач машинного зрения. По такому же принципу работают такие среды разработки и платформы, как LabVIEW [11] и Cognex VisionPro. LAMachineVision написана на языке С# платформы .NET Framework версии 4.7.2. Для создания основного пользовательского интерфейса используется система WPF, применяющая графическую технологию DirectX и задействующая декларативный язык XAML. Пользовательские интерфейсы применяемых инструментов (различных фильтров и обработчиков) реализованы при помощи средств WPF и Windows Forms, использующей графическую технологию GDI/GDI+. В связи с использованием языка С# основной операционной системой для платформы LAMachineVision является Windows версии 7 и выше. Основная часть платформы написана по шаблону Model-View-ViewModel (MVVM).

При помощи функции установления связи формируется связный направленный граф, по которому в последствии система будет передавать данные от источников в фильтры и далее, по указанному пользователем маршруту. Единственным условием работы данной конструкции является отсутствие циклов в графе решения.

Использование высокой степени абстракции позволяет снять широкий спектр ограничений для разработчиков, позволив реализовать свои фильтры и обработчики и просто встраивать их

в платформу при помощи АРІ, позволяя сторонним пользователям, в том числе технологам и исследователям, не обладающим навыками программирования, решать широкий спектр задач машинного зрения.

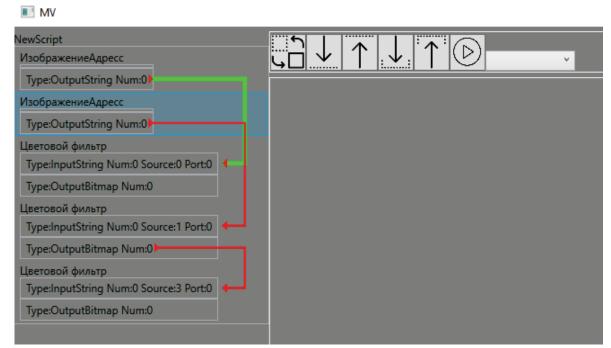


Рисунок 1 – Последовательность обработки изображений

API (Application Programming Interface) – программный интерфейс приложения, описание способов (набор классов, процедур, функций, структур или констант), которыми одна компьютерная программа может взаимодействовать с другой программой. Для того, чтобы новый фильтр мог встраиваться в дерево решения достаточно чтобы его внешняя оболочка реализовывала простой интерфейс IProcessing малым количеством поддерживаемых свойств и методов:

- string Name { get; set; }
- int Num { get; set; }
- ObservableCollection<IInputStep> InputSteps { get; set; }
- ObservableCollection<IOutputStep> OutputSteps { get; set; }
- ObservableCollection<Info> InfoInputSteps { get; set; }
- ObservableCollection<Info> InfoOutputSteps { get; set; }
- void DoProcess();
- void UpdateInfo();

Page UiPage { get; set; }

Передача информации производится при помощи «портов» ввода-вывода, так же с высокой степенью абстракции, дополнительных требований как к пользовательскому интерфейсу, так и к конкретной реализации не предъявляется. Таким образом каждый фильтр и обработчик является объектом, реализующим интерфейс IProcessing, получающий данные для своей работы из портов ввода, выполняющий какое-то действие и передающий результат своей работы дальше по графу решения через порт вывода.

Такой подход позволяет как использовать собственные реализации алгоритмов машинного зрения, так и задействовать сторонние библиотеки и фреймворки, в частности использовались решения AForge.NET и OpenCV. Для подключения различных источников данных реализовано взаимодействие с камерами машинного зрения Basler при помощи пакетов Pylon SDK, с камерами Hikvision при помощи пакетов Hikvision SDK и ір-камерами при помощи мультимедийного фреймворка DirectShow.

3. Практическое применение

Одной из реализуемых платформой возможностей является взаимодействие с различными моделями камер. В частности, опробовано использование матричных камер Basler (рисунок 2), применяемых, в основном, в автоматизации производства, мониторинге дорожного движения, ритейле, а также медицине и биологических науках.



Рисунок 2 - Матричная камера

Далее данные с камеры используются для последующего анализа или видеофиксации (рисунок 3) изучаемых процессов. Использование камер машинного зрения позволяет следить за процессами в недоступных для наблюдателя средах. В частности в технологии DMD (direct metal deposition, технология изготовления металлических деталей методом прямого нанесения металла).

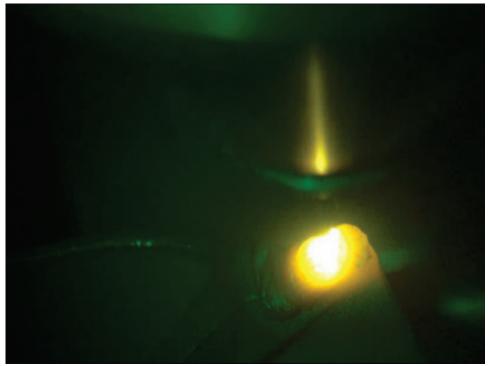


Рисунок 3 — Видеофиксация процесса DMD наплавления лопатки турбины

Одна из самых часто встречающихся задач машинного зрения - распознавание объектов. Одним из частных случаев такой задачи в промышленности является нахождение листа в рабочем поле станка. Реализован один из вариантов решения подобной задачи при помощи возможностей рассматриваемой платформы. В качестве источника данных используется матричная камера Basler. Листы могут располагаться в разных частях рабочего поля, иметь

различную форму и состоять из различных материалов, поэтому предполагается формулировать задачу как поиск абстрактных объектов на изображении. Для этого используются различные фильтры сравнения изображений. Идея подхода проста: получать изображение пустого рабочего пространства, затем получить новое изображение пространства уже с расположенным листом и выявить его расположение путем сравнения с изначальным изображением. Дополнительно продемонстрирован реализованный алгоритм исправления радиальной дисторсии, вызванной использованием широкоформатных объективов (рисунок 4).

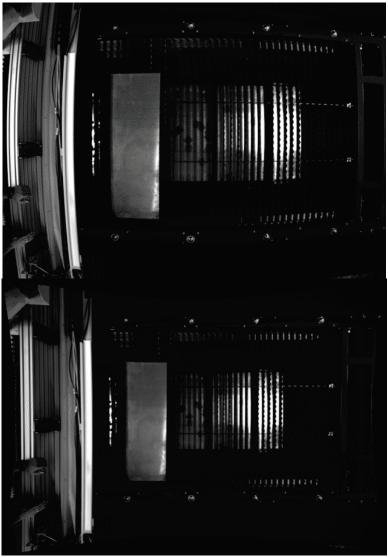


Рисунок 4 – Исправление дисторсии

Реализовано несколько вариантов фильтров, определяющих разницу между двумя изображениями, позволяющих сравнивать поле с листом и поле без листа и находить нужный объект на изображении. Для цветных изображений существует несколько подобных обработчиков, в основе которых лежат разные метрики для расчета цветового расстояния между пикселями, и несколько методов нахождения углов на изображении при помощи различных реализаций алгоритмов определения углов.

Разработан и реализован алгоритм определения контуров объекта по ранее найденным углам (рисунки 5, 6). Суть алгоритма проста: на основе фильтров, о которых говорилось ранее, проводится бинаризация изображения (чаще всего на основе сравнения с фоновым изображением) и определение набора углов, берётся верхний левый не использованный угол из набора определённых. Если верхний пиксель черный, то обход осуществляется против часовой,

если белый, то обход осуществляется по часовой стрелке. Таким образом мы разделяем контуры на внешние и внутренние.

2	1	8
3	0	7
4	5	6

Рисунок 5 – Алгоритм обхода при поиске границ (внутренняя граница)

2	1	8
		7
3	0	7
4	5	6

Рисунок 6 – Алгоритм обхода при поиске границ (внешняя граница)

Обход продолжается до тех пор, пока мы не придём к началу, то есть контур замкнётся. Все встреченные по пути пиксели из списка углов составляют найденный контур (рисунок 7).

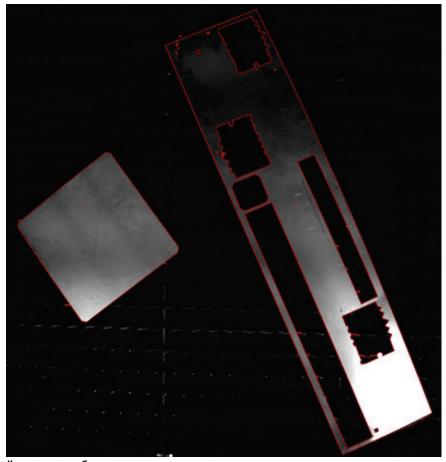


Рисунок 7 – Найденные рабочие листы

Качество полученного результата зависит от качества изображения, освещения и точности подбора параметров обработки. Тот же подход применяется для нахождения геометрии сплавляемого слоя в процессе SLM. Предварительным изображением является фото предыдущего слоя. Новым изображением является фото следующего сплавленного слоя. Схожим образом решается задача нахождения и анализа качества отверстий при перфорации.

Подобным же образом обрабатываются данные о сплавленном слое порошкового материала при изготовлении изделий методом селективного лазерного сплавления. После определения геометрии каждого слоя она сравнивается с предрасчетной и формируется так называемая «карта слоев» (рисунок 8), на которую в дальнейшем накладываются данные температурной модели.

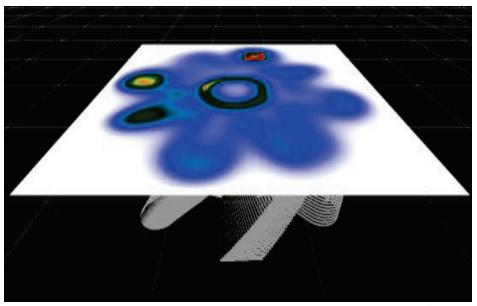


Рисунок 8 — Наложение температурных данных на карту слоев изделия (один из видов представления)

При помощи задания палитры, искомого температурного интервала и использования направляемых сечений технолог может быстро находить критические области перегрева, которые приводят к возникновению дефектов в изделии и принимать необходимые шаги по оптимизации процесса изготовления.

4. Заключение

В результате проведенной работы удалось решить ряд задач машинного зрения и научной визуализации в рамках промышленной реализации новых лазерных технологий, в частности технологии селективного лазерного сплавления. Создать специализированную платформу машинного зрения, позволяющую упростить решение широкого спектра задач машинного зрения и научной визуализации. Обеспечить возможность видеофиксации процессов в изолированных средах, определения границ объектов на изображении, анализа и обработки визуальных данных, формирования и представления картины распределения тепла в трехмерном объекте, на основе данных, полученных в результате проведения численного эксперимента в соответствии с реализованной нами математической моделью исследуемого процесса [12-14]. Также удалось реализовать совмещение расчетных данных о геометрии изделия, данных, полученных при помощи анализа видеоданных от средств визуального наблюдения, с данными теплового распределения. Данный подход позволяет упростить технологам анализ процесса производства, выявление критических областей, таких как зоны перегрева и не расплавления, и подбор технологических параметров процесса селективного

лазерного сплавления. Созданная платформа опробована и внедрена в программные решения, используемые в ряде отечественных высокотехнологичных производств.

5. Благодарности

Авторы выражают благодарность руководству группы компаний «Лазеры и Аппаратура ТМ» за помощь в материально-техническом обеспечении проведения экспериментальных исследований и моделирования рассматриваемого SLM процесса.

6. Список источников

- [1] Оптико-электронный комплекс для исследования процессов тепло- и массообмена лазерным бесконтактным методом / А.В. Ведяшкина [и др.] // Научная визуализация. 2019 № 11.3. С. 43-53.
- [2] Aluminum alloys for selective laser melting towards improved performance / P. Rometsch, Q. Jia, K. Yang, X. Wu // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, pp. 301-325.
- [3] Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM) / M. Mazur [et al.] // Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications. 2016. pp. 119-161.
- [4] Heat Source Modeling in Selective Laser Melting / E. Mirkoohi, D. Seivers, H. Garmestani, S. Liang // Materials. 2019, № 12, 2052.
- [5] Система технического зрения для информационного обеспечения автоматической посадки и движения по ВПП летательных аппаратов/ С.М. Соколов, А.А. Богуславский, Н.Г. Фёдоров, П.В. Виноградов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1. С. 96-109.
- [6] Machine vision based automated inspection approach for clutch friction disc (CFD) / S. Kaushik, A. Jain, T. Chaudhary, N.R. Chaudhan // Materials Today: Proceedings. 2022. № 62.1. pp. 151-157.
- [7] Степанов Д.Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. 2014. № 1. С. 150-157.
- [8] Краснобаев А. А. Обзор алгоритмов детектирования простых элементов изображения и анализ возможности их аппаратной реализации [Электронный ресурс] // Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук. 2005. URL: http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep114/prep2005_114.html (дата обращения 17.08.2022).
- [9] Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, О. Е Балашов, А. И. Степашкин // М.: Радиотехника, 2008. С. 176.
- [10] Рахматулин И. Нейросети, глубокое обучение, машинное зрение в сельском хозяйстве. Краткий обзор для 2021 года. [Электронный ресурс] // Препринт. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/350280155_Nejroseti_glubokoe_obucenie_masinnoe_z renie_v_selskom_hozajstve_Kratkij_obzor_dla_2021_goda (дата обращения 17.08.2022).
- [11] Иванов П.В., Бойков А.В. Преимущества применения программного комплекса LabView для создания систем машинного зрения // Записки Горного института. 2011. № 192. С. 216-218.
- [12] Молотков А.А., Третьякова О.Н. О возможных подходах к визуализации процесса селективного лазерного сплавления // Научная визуализация. 2019. № 11.4. С. 1-12.
- [13] Математическое моделирование сложного теплообмена при разработке лазерных SLM технологий [Электронный ресурс] / И. Ф. Лебёдкин, А. А. Молотков, О. Н. Третьякова // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/118/Lebyedkin_Molotkov_Tretyakova_rus.pdf?lang=ru&issue =101 (дата обращения 17.08.2022).
- [14] Молотков А.А., Третьякова О.Н. Визуализация результатов моделирования процесса селективного лазерного сплавления // GraphiCon 2019 (Брянск, 23–26 сент. 2019 г.): сб. трудов междунар. конференции / Брянский государственный технический университет. Брянск. 2019. С. 78-81.