

На правах рукописи



**Серёдкин Александр Валерьевич**

**Разработка методов реконструкции и анализа  
трёхмерной структуры движущихся объектов**

1.2.2 - Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской Академии наук (ИТ СО РАН).

Научный руководитель: **Маркович Дмитрий Маркович**  
доктор физико-математических наук,  
академик Российской академии наук,  
профессор, директор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт теплофизики им.  
С.С. Кутателадзе Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск

Официальные оппоненты: **Спектор Александр Аншелевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ведущий инженер,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования Новосибирский государственный  
технический университет

**Пестунов Игорь Алексеевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник,  
Федеральное государственное бюджетное  
научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр информационных и  
вычислительных технологий»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки «Федеральный  
исследовательский центр «Казанский научный  
центр Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2022 года в \_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном  
государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматизации и  
электрометрии СО РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика  
Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН и на сайте:  
<https://www.iae.nsk.su/ru/dissertationcouncil>.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Ильичев Л.В.

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы исследования

Трёхмерная реконструкция – это процесс восстановления трёхмерной «сцены» по нескольким двумерным изображениям. Такие задачи часто встречаются в ситуациях, когда необходимо извлечь информацию об окружающем мире, содержащуюся в изображениях. Например, при измерении расстояния до объекта, при восстановлении положения частиц в объеме (обратная задача томографии), формы поверхности, при выделении фона и т.д.

Зачастую результаты трёхмерной реконструкции представляются в виде списка точек в трёхмерном пространстве (облако точек), либо в виде карты глубины относительно одного из изображений. Обычно подобные данные являются промежуточными и требуют дальнейшей обработки. Примерами такой обработки могут служить реконструкция траектории и скорости, расчёт поля давления и температуры в жидкости или газе, анализ деформации поверхности, классификация объектов на изображении и т.д.

На сегодняшний день трёхмерная реконструкция используется повсеместно: в физике, химии, биологии, медицине, энергетике, кинематографе, археологии, авиационной и автомобильной промышленности, системах контроля на производстве, технологиях дополненной реальности, системах безопасности и видеонаблюдения. Несмотря на общую формулировку, задачи из различных областей решаются с использованием широкого класса оборудования и методов.

Для количественного анализа процессов и объектов в природных и технических системах создаются специализированные аппаратно-программные комплексы, имеющие в своей основе постоянно совершенствующиеся алгоритмы обработки первичной информации. Однако в каждом случае необходимо учитывать особенности задачи при выборе, реализации и адаптации существующих методов.

**Целью** данной работы является разработка математических алгоритмов обработки данных для создания новых оптических методов и приборов для измерения геометрических параметров и скоростей перемещения объектов,

основанных на современных достижениях в области высокопроизводительных вычислений и позволяющих существенно увеличить точность и быстродействие измерений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Разработка и программная реализация математических алгоритмов обработки данных камеры светового поля для восстановления трехмерных координат и формы наблюдаемых объектов.
2. Исследование точности метода, реализованного в виде аппаратного комплекса по измерению трехмерных полей скорости частиц-трассеров в турбулентном потоке на основе камеры светового поля.
3. Разработка и программная реализация методов распознавания образов на изображениях и отслеживания их перемещения на основе машинного обучения с целью дальнейшей сортировки роботизированным захватом.
4. Анализ точности алгоритма распознавания пригодных к переработке типов бытовой упаковки и эффективности алгоритма планировщика, реализованного в виде экспериментального образца автоматической сортировки твёрдых коммунальных отходов.
5. Разработка и программная реализация математических алгоритмов измерения формы трехмерных объектов на основе малоракурсной оптической триангуляции для набора из нескольких детекторов.
6. Анализ точности реализованного аппаратного комплекса по измерению формы трехмерных объектов на примере сопла турбореактивного двигателя.

#### **Научная новизна:**

1. Разработаны новые способы обработки изображений с камеры светового поля, основанные на впервые предложенной реализации алгоритма перефокусировки “Total focus”, который позволяет использовать одну камеру при применении метода трёхмерной цифровой трассерной визуализации.
2. Предложен и реализован новый алгоритм планировщика для сбора объектов с конвейерной ленты, как часть автоматизированной системы сортировки

твёрдых коммунальных отходов, на основе динамического дерева поиска с отсечениями, учитывающий расположение предметов на конвейерной ленте, их стоимость и место сбора каждого предмета, хранящий лучшее найденное решение для использования в случае прерывания (Anytime algorithm).

3. Впервые предложен и реализован оптический метод динамического измерения трёхмерных координат в условиях неравномерного освещения с большей устойчивостью к вибрациям, чем ранее существующие методы на основе обработки изображений стереопар, которая была достигнута демпфированием вибраций, адаптивной подстройкой длительности выдержки в зависимости от освещения, а также выбором системы подсветки и светофильтров.
4. Предложен и реализован алгоритм выделения области выходного и критического сечений газотурбинного двигателя с соплом регулируемой площади сечения, а также вычисления их трёхмерных координат и размеров на зашумлённой трёхмерной модели, полученной методом триангуляции изображений стереопар, с использованием алгоритмов фильтрации на основе вероятностных и интегральных методов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенный метод трёхмерной цифровой трассерной визуализации на основе одной камеры светового поля позволяет производить измерения в условиях узкого оптического доступа и передвигать устройство без необходимости проведения повторной калибровки.
2. Разработанный алгоритм планировщика для сбора объектов с конвейерной ленты работает в режиме отсечения по времени (Anytime algorithm) и позволяет решать оптимизационную задачу по сбору произвольно расположенных объектов на конвейерной ленте, путём моделирования наиболее перспективных вариантов перемещения захвата, что позволяет ему работать в условиях, когда объекты имеют различное место сбора и стоимость.
3. По результатам моделирования эффективность предложенного алгоритма планировщика для сбора объектов с конвейерной ленты превышает на 11 %

эффективность алгоритма, который не производил симуляцию возможных исходов на основе информации о последующих объектах.

4. Предложенная в работе система оптической диагностики на основе обработки изображений стереопар обеспечила возможность измерений размеров выходного и критического сечений сопла газотурбинного двигателя с соплом регулируемой площади сечения во время наземных испытаний во всём диапазоне раскрытия и поворотов выходного устройства для режимов работы двигателя вплоть до максимальных.
5. Благодаря разработанному методу оптической диагностики и алгоритму фильтрации и выделения трёхмерных координат впервые удалось напрямую измерить площадь критического и выходного сечений сопла регулируемой площади сечения с относительной погрешностью менее 0,3 % и высокой воспроизводимостью результатов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на конференциях:

1. 18th international conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2016).
2. 19th international conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2018).
3. III Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых (Ялта 2018).
4. IV Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых (Ялта 2019).
5. XX Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (ИВТ СО РАН 2019).
6. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных "XXXVI Сибирский теплофизический семинар" (ИТ СО РАН 2020)

**Личный вклад.** Автор разработал и реализовал все алгоритмы, описанные в разделе «Раздел 2.1 — Получение изображений с камеры светового поля», в том числе алгоритмы калибровки камеры светового поля, алгоритмы восстановления

изображений и трехмерных координат по изображениям светового поля. Автор разработал и реализовал алгоритм работы планировщика и алгоритм обработки данных для вычисления диаметра сопла двигателя и реализовал все его этапы. Автор принимал непосредственное участие в создании и отладке системы автоматизированной сортировки твёрдых коммунальных отходов, в обучении нейронной сети для их классификации, а также в построении экспериментального образца автоматизированной системы сортировки твёрдых коммунальных отходов. Автор производил тестирование аппаратного комплекса по измерению формы трехмерных объектов на макете сопла турбореактивного двигателя и лично принимал участие в экспериментах на работающем образце газотурбинного двигателя.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, из них 8 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК, 2 патента на изобретения и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 116 страниц, включая 47 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 102 наименования.

## **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируются цель и задачи, решению которых посвящена работа.

**Первая глава** посвящена обзору литературы в области оптических измерительных систем и обработки изображений. Глава состоит из четырёх разделов.

**Раздел 1.1 — Метод цифровой трассерной визуализации** начинается с краткого обзора истории развития метода. В англоязычной литературе метод цифровой трассерной визуализации (ЦТВ) называется particle image velocimetry

(PIV). В разделе сформулированы современные представления о методе ЦТВ, дальнейшие перспективы развития, преимущества метода и его ограничения.

Показаны схемы экспериментальных установок по мере развития метода. В первых работах, как правило, использовалась одна камера для измерения двух компонент скорости в плоскости (2D 2C). Дальнейшее развитие метода предполагало применение двух камер, как стереопары для восстановления третьей компоненты скорости (2D 3C). В настоящее время, благодаря развитию высокопроизводительных вычислений, стало возможным использование томографических систем на базе 4 и более камер (3D 3C). В последние годы все более активно применяются измерительные системы на основе одной камеры светового поля, что существенно облегчает и упрощает эксперимент, однако такие измерения обладают большей погрешностью (неопределенностью) в определении нормальной компоненты скорости, поэтому результаты измерений можно отнести к классу (3D 2C).

**Раздел 1.2 — Алгоритмы обработки данных ЦТВ** посвящён описанию алгоритмов, используемых для обработки данных ЦТВ измерений. Алгоритмы трассировки отдельных частиц в потоке в англоязычной литературе называются Particle tracking velocimetry (PTV). Все алгоритмы PTV семейства состоят из двух этапов. На первом этапе для каждого снимка определяются координаты центров частиц в области измерения. На втором этапе найденные наборы частиц разбиваются на пары, то есть для каждой частицы с первого снимка определяется её положение на втором снимке, либо определяется, что её нет на втором снимке. Для каждой пары вычисляется вектор смещения как разность координат, который далее с учетом заданного временного промежутка между кадрами интерпретируется как скорость. Таким образом, восстанавливается мгновенное поле скоростей.

Другой подход предполагает вычисление смещений групп трассеров в элементарных измерительных объемах. Такие алгоритмы называют Particle image velocimetry (PIV). В их основе лежит предположение о том, что относительное положение трассеров меняется слабо, и группы трассеров на первом кадре можно



распознать на втором и последующих кадрах. Математически это делается вычислением корреляционной функции между изображением искомой ячейки на первом и последующих кадрах. Аргументы, при которых достигается максимум корреляционной функции, и есть смещение ячейки между кадрами.

В конце раздела описана модернизация PTV на основе алгоритма Shake-The-Vox и алгоритм обработки изображений, получаемых с камеры светового поля.

**Раздел 1.3 — Обзор систем сортировки ТКО** посвящён проблеме переработки твёрдых коммунальных отходов (ТКО). В нём перечислены наиболее распространенные методы обращения с ТКО в России. Для всех этих методов качество предварительной сортировки влияет на чистоту и эффективность переработки. Предварительная сортировка является необходимым шагом для повышения эффективности использования ТКО в качестве ресурса. В разделе проанализированы работы, в которых методы машинного обучения использовались для классификации ТКО.

Другой важной частью системы автоматической сортировки ТКО является система сбора объектов с конвейерной ленты. В научной литературе опубликовано много работ по теме планирования заданий для захвата и перемещений объектов на движущемся конвейере. Данным классом задач занимается теория массового обслуживания. В ситуации, когда скорость конвейера регулировать нежелательно или подача объектов на конвейер осуществляется неравномерно, доля захваченных объектов может быть меньше 100 %, если производительность роботизированной ячейки недостаточна для сбора всех объектов с конвейера в моменты повышенного потока. В этом случае простые алгоритмы планирования заданий типа FIFO (first in, first out), SPT (shortest processing time) и SRPT (shortest remaining processing time) будут работать неэффективно.

**Раздел 1.4 — Обзор систем для измерения геометрии сопла авиационного двигателя** посвящён необходимости измерений параметров газотурбинных двигателей (ГТД) во время наземных испытаний. К таким параметрам относятся форма выходного устройства (сопла) с переменным сечением и площадь его выходного и критического сечений. Описаны используемые приборы и причины

ошибок, которые возникают в таких условиях. Показана возможность использования оптического метода измерения для данной задачи и его преимущества.

Во **второй главе** описаны используемые методы. Для решения поставленных проблем использовались комбинации методов, часть из которых впервые предложена автором. Кроме того, описаны известные существующие методы, которые были адаптированы для конкретных задач.

**Раздел 2.1 — Получение изображений с камеры светового поля** посвящён обработке данных, получаемых с камеры светового поля. В разделе описан алгоритм калибровки, который позволяет выполнять вычисления положения микролинз относительно светочувствительной матрицы. Описан способ предварительной обработки изображения, которая позволяет уменьшить эффект виньетирования – неравномерность освещения частей микролинзы, связанную с изменением угла проецирования лучей в зависимости от удалённости от центра микролинзы. Этот подход, кроме того, частично компенсирует дефекты оптики и другие причины постоянного во времени неравномерного освещения.

Описан алгоритм перефокусировки, который позволяет получить изображение, сфокусированное на заданную глубину. Приведен алгоритм нахождения карты глубины объектов на изображении. Описан алгоритм Total Focus предназначенный для генерации изображений, на которых все объекты находятся в фокусе. Карта глубины и изображение Total Focus позволяют использовать камеру светового поля для PTV алгоритмов.

**Раздел 2.2 — Реализация системы сортировки ТКО** посвящён описанию предложенной системе сортировки ТКО. Ключевыми частями системы являются модуль классификации и система сбора.

Аппаратная часть модуля классификации состоит из камеры, которая непрерывно снимает изображения конвейерной ленты, и компьютера с системой классификации на основе нейронной сети. Классификатор получает изображения с камеры и определяет положение и тип объектов на изображениях. Для

классификации используется свёрточная нейронная сеть Faster R-CNN ResNet101, предобученная определять местоположение и класс на базе данных COCO.

Предлагаемая конструкция системы сбора основана на использовании быстрого дельта-робота в качестве устройства для перемещения объектов с конвейерной ленты в сборочные корзины. Список объектов, обнаруженный модулем классификации, и данные о них (координаты, высота, стоимость и тип), а также информация об оборудовании (скорость и границы конвейера, положение корзин для сбора), передаются управляющей системе, которая контролирует движение робота. Система управления следует алгоритму, цель которого максимизировать стоимость собранных в корзины предметов.

В работе предложен алгоритм, основанный на моделировании дерева возможных состояний системы. В процессе моделирования выбираются наиболее перспективные ветки в смысле суммарной стоимости собранных предметов. Используются правила для отсечения состояний, которые гарантированно не позволяют максимизировать стоимость собранных предметов. Алгоритм способен выдать следующее действие в любой момент времени на основании уже построенных симуляций (anytime algorithm). Это позволяет давать команды дельта-роботу по окончании выполнения прошлого действия. У предложенного алгоритма отсутствуют внешние параметры, используется только информация о возможностях системы: время, необходимое для перемещения захвата между заданными точками, скорость конвейера, информация о предметах и корзинах.

**Раздел 2.3 — Реализация системы для измерения геометрии сопла авиационного двигателя** посвящен системе машинного зрения, позволяющей восстанавливать трёхмерную модель сопла ГТД по изображениям с двух стереопар (рисунок 1).

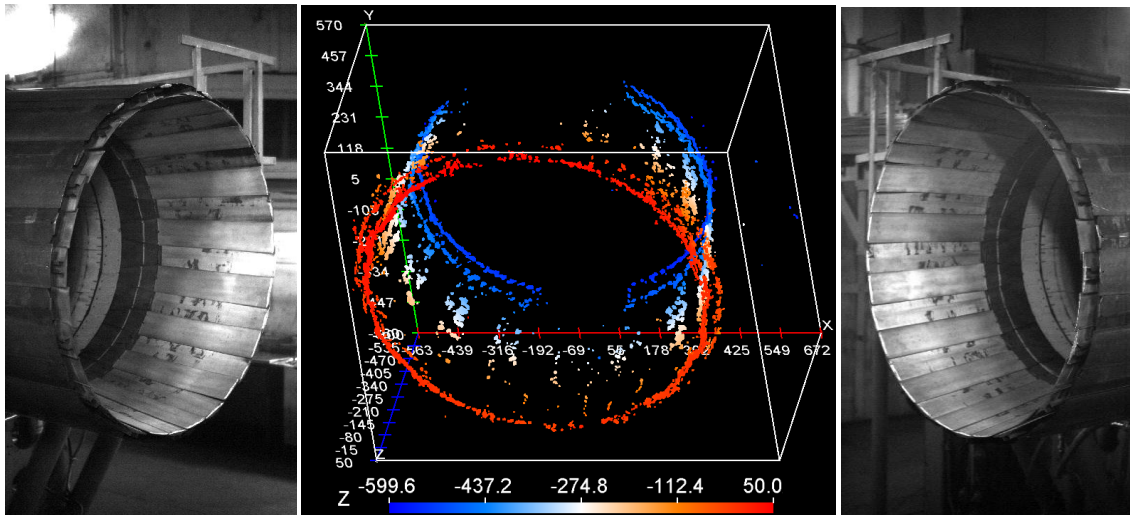


Рисунок 1 — Примеры исходных изображений выходного устройства с одной из камер левой и правой стереопары (левая и правая фотографии, соответственно).

Реконструированная 3D модель видимой части выходного устройства, работающего в режиме малого газа (центр).

В работе использовался способ реконструкции 3D модели объекта по стереопаре — это нахождение и сопоставление одних и тех же элементов объекта на изображениях стереопары для вычисления их диспаратности (сдвигового несоответствия). По диспаратности и калибровке вычисляется трёхмерная модель объекта, производится фильтрация шумов и выделение сечений.

В **третьей главе** описаны экспериментальные установки и результаты, полученные с использованием описанных методов.

**Раздел 3.1 — Измерение поля скоростей методом PIV** посвящён проведению PIV-измерений на основе камеры светового поля. Объектом исследования являлось поле скорости в жидкости при распространении струи и в следе за цилиндром в щелевом канале. В разделе описано используемое оборудование и приведены параметры экспериментов. Для обработки изображений использовались алгоритмы, предложенные в разделе 2.1.

Результаты измерений согласуются с другими методами, пример показан на рисунке 2. Измерена абсолютная погрешность определения положения частицы. Погрешность в плоскости камеры составила 0,01 мм (около 1 пикселя), а погрешность в определении глубины составила 0,1 мм (примерно 10 пикселей), что согласуется с теоретической оценкой.

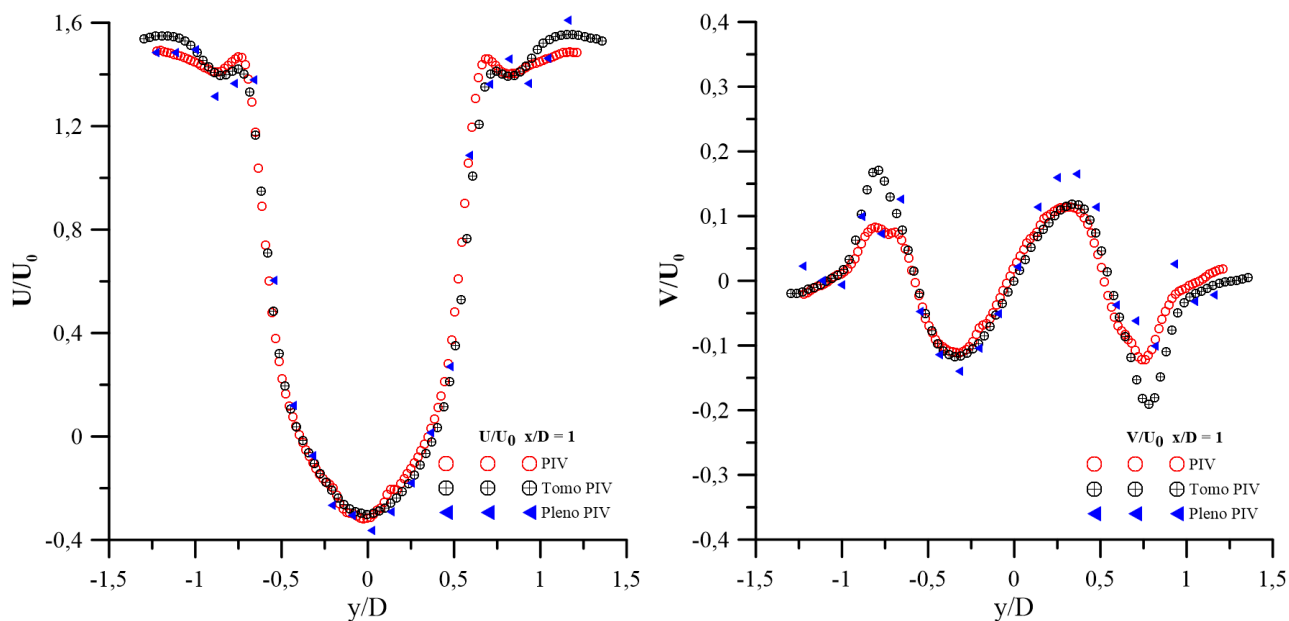


Рисунок 2 — Нормированная продольная (слева) и поперечная (справа) компоненты скорости на расстоянии  $x/D = 1$  от центра цилиндра в центральном сечении ( $z/D = 0$ ), измеренная PIV, Tomo PIV и Pleno PIV методами.

**Раздел 3.2 — Тестирование и применение системы сортировки ТКО** описывает состав базы данных ТКО для обучения нейронной сети, качество классификации нейронной сети и эффективность алгоритма сбора предметов. Для обучения нейронной сети была составлена база данных из 14 535 фотографий отдельных объектов. Из них генерировались синтетические изображения групп объектов, которые использовались для обучения сети. Тестирование сети проходило на размеченных вручную реальных фотографиях групп объектов. Качество обучения по метрике mean Average Precision составило 55 %.

Предложенный в работе алгоритм сбора предметов сравнивался с «Базовым» алгоритмом в рамках симуляции. Все параметры симуляции были идентичными: положение, стоимость, тип предметов, размеры и скорость конвейера, положение корзин для сбора. Симуляция длилась более 5 дней, каждый алгоритм собрал более 300 000 предметов. «Базовый» алгоритм принимал решения лишь с учётом ближайших предметов, основываясь на стоимости и расстоянии до них, но без учёта более удаленных предметов. При этом использовалось несколько параметров, которые подбирались вручную для достижения наилучшего результата в рамках данной симуляции. Оба алгоритма были разработаны с целью

максимизировать суммарную стоимость собранных предметов. По результатам симуляции, предложенный алгоритм собрал предметов на 11,5 % больше по суммарной стоимости и на 9,5 % больше предметов количественно.

**Раздел 3.3 — Диагностика 3D геометрии сопла авиационного двигателя** посвящён описанию используемого оборудования, процессу калибровки системы и проведению эксперимента по измерению формы выходного и критического сечений ГТД переменного сечения. Схема проведения измерений показана на рисунке 3.

По результатам ста одиночных измерений (сто кадров с каждой камеры) диаметр выходного сечения составил 1030,5 мм, а диаметр критического составил 874,5 мм. Среднеквадратичное отклонение составляло 2,8 мм для выходного и 1,5 мм для критического сечений, что не превышало 0,3 %. При этом погрешность метода определения геометрических характеристик сопла, определенная по статической калибровке в неработающем состоянии, не превышала 0,5 %.

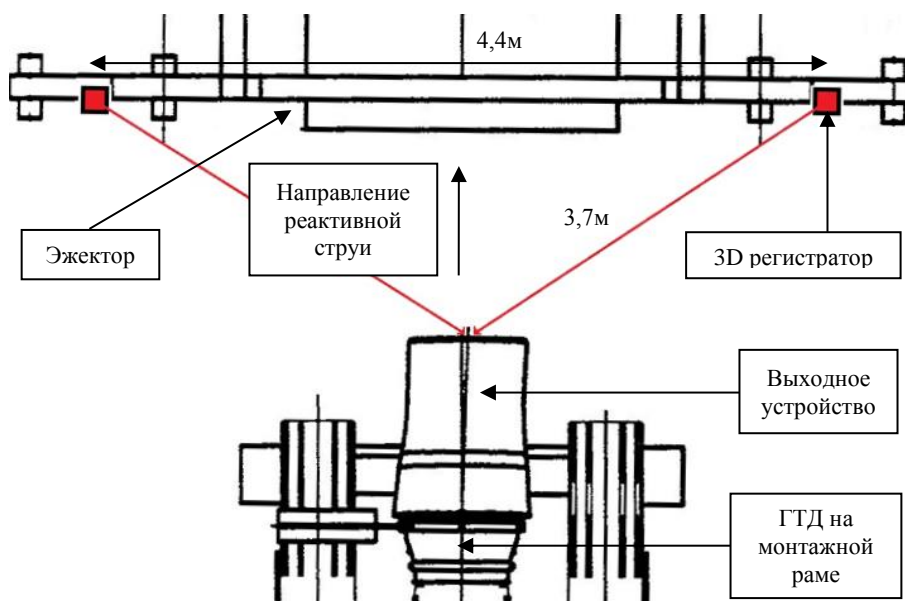


Рисунок 3 — Схематическое расположение 3D регистраторов относительно выходного устройства ГТД (вид сверху).

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Предложены и реализованы алгоритмические подходы для анализа изображений и получения качественной и количественной информации о процессах и объектах для различных приложений: определения скоростных полей в аэрогидродинамике, распознавания образов с элементами машинного обучения, измерения геометрических параметров объектов в усложненных условиях.

Реализована модификация PIV-комплекса для определения трехмерного поля скоростей в гидроаэродинамических потоках с применением камеры светового поля. Для приложений с 3D измерениями показана возможность существенного упрощения конструкции измерительной системы при переходе от нескольких регистрирующих камер к одной пленоптической камере при сохранении ошибки эксперимента на приемлемом уровне. Разработанные методы позволяют использовать современные камеры светового поля для диагностики потоков с ограниченным оптическим доступом, а также упростить процесс калибровки по сравнению с многокамерными системами.

Предложена общая структура роботизированной сортировочной установки твёрдых коммунальных отходов с классификатором объектов на основе нейронной сети Faster R-CNN ResNet101. Разработан алгоритм управления системой сбора для максимизации стоимости собранных предметов. Показано, что алгоритм, учитывающий информацию об общем массиве предметов, повышает эффективность системы сбора на 11 %.

Разработана, реализована, протестирована и апробирована система бесконтактной оптической диагностики геометрии сопла переменного сечения газотурбинного двигателя. С использованием этой системы измерена площадь критического и выходного сечений во время наземных испытаний двигателя в условиях высоких температур, вибраций и ограниченного оптического доступа. Разброс значений, оцененных по каждому набору кадров, не превышал 0,3 %, что позволяет использовать метод для анализа динамического изменения геометрических характеристик сопла с приемлемой точностью.

### **Список публикаций автора по теме диссертации:**

1. Mel'Nik A.V., Seredkin A.V., Tokarev M.P., Gobyzov O.A. Laser line scanning of a shape of moving objects with various degree of transparency // Journal of Physics: Conference Series – 2020 - 1677(1) - 012187 (из перечня ВАК).
2. Seredkin A.V., Bobrov M.S., Tokarev M.P., Gobyzov O.A. Development of the algorithm for the optimization of objects pick up sequence on a conveyor belt // Journal of Physics: Conference Series – 2020 - 1677(1) - 012195 (из перечня ВАК).
3. Seredkin A., Plokhikh I., Mullyadzhanov R., Malakhov I., Serdyukov V., Surtaev A., Chinak A., Lobanov P., Tokarev M. Pattern recognition for bubbly flows with vapor or gas-liquid interfaces using U-Net architecture // Proceedings – 2020 Science and Artificial Intelligence Conference, S.A.I.ence – 2020 - P. 5-8 - 9303175 (из перечня ВАК).
4. Seredkin A.V., Tokarev M.P., Plokih I.A., Gobyzov O.A., Markovich D.M. Development of a method of detection and classification of waste objects on a conveyor for a robotic sorting system // Journal of Physics: Conference Series – 2019 - 1359(1) - 012127 (из перечня ВАК).
5. Chertovskikh P.A., Seredkin A.V., Gobyzov O.A., Styuf A.S., Pashkevich M.G., Tokarev M.P. An adaptive PID controller with an online auto-tuning by a pretrained neural network // Journal of Physics: Conference Series – 2019 - 1359(1) - 012090 (из перечня ВАК).
6. Токарев М.П., Серёдкин А.В., Хребтов М.Ю., Петкогло Н.П., Вовк М.Ю., Чикишев Л.М., Дулин В.М., Маркович Д.М., Марчуков Е.Ю. Оптическая диагностика геометрии осесимметричного регулируемого сопла газотурбинного двигателя // Автометрия – 2019 - Т. 55. № 6 - С. 94-101 (из перечня ВАК).
7. Tokarev M.P., Abdurakipov S.S., Gobyzov O.A., Seredkin A.V., Dulin V.M. Monitoring of combustion regimes based on the visualization of the flame and machine learning // Journal of Physics: Conference Series – 2018 - 1128(1) – 012138 (из перечня ВАК).



8. Seredkin A.V., Shestakov M.V., Tokarev M.P. An industrial light-field camera applied for 3D velocity measurements in a slot jet // AIP Conference Proceedings – 2016 – 1770 - 030025 (из перечня ВАК).
9. Бобров М.С., Токарев М.П., Плохих И.А., Серёдкин А.В. "Программное обеспечение для детектирования объектов твёрдых коммунальных отходов на ленте конвейера на основе нейронной сети" // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020662465.
10. Абдуракипов С.С., Токарев М.П., Плохих И.А., Гобызов О.А., Серёдкин А.В. Программа мониторинга режимов горения на основе методов машинного обучения (flamesense) // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018666880, 21.12.2018. Заявка № 2018664174 от 10.12.2018.
11. Серёдкин А.В., Токарев М.П., Бобров М.С., Гобызов О.А. Способ оптимизации роботизированной сортировки ТКО путём динамического планирования перемещений робота-сортировщика // Заявка на патент № 2020132021.
12. Гобызов О.А., Абдуракипов С.С., Токарев М.П., Серёдкин А.В., Дулин В.М., Бильский А.В. Система мониторинга режимов горения топлива путем анализа изображений факела при помощи классификатора на основе свёрточной нейронной сети // Патент на изобретение RU 2713850 С1, 07.02.2020. Заявка № 2018143528 от 10.12.2018.