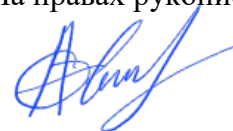


На правах рукописи



Александров Александр Александрович

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ
НА КОНВЕЙЕРНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО 3D-СКАНИРОВАНИЯ

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2026

Работа выполнена на кафедре 307 «Цифровые технологии и информационные системы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Васильев Федор Владимирович, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Голован Андрей Андреевич, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», заведующий лабораторией управления и навигации механико-математического факультета.

Фартуков Алексей Михайлович, кандидат технических наук, ООО «Исследовательский Центр Самсунг», начальник отдела интеллектуальной обработки и анализа данных.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «25» ноября 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.12 на базе Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=189249

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.327.12, к.т.н., доцент



Ф.В. Васильев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время наблюдается тенденция к повышению эффективности производства за счет его цифровизации. В производственные процессы внедряются комплексные цифровые системы, направленные на повышение качества изготавливаемой продукции, автоматизацию или оптимизацию производственных процессов. Системы автоматического контроля на различных стадиях производственного цикла являются неотъемлемой частью таких систем.

Особенно актуальной проблема внедрения систем автоматического контроля становится на авиастроительных и машиностроительных производствах, так как эти производства используют огромную номенклатуру деталей. В связи с повышением требований к качеству продукции и скорости работы машиностроительных и авиационных производств появляется потребность в идентификации типов деталей на производственной линии, в том числе на конвейере. Проблема обостряется тем, что на многих производственных участках нет возможности наносить метки на детали. При этом детали могут иметь схожую форму, но разные размеры, что обуславливает необходимость использования специализированных методик идентификации.

Автоматическая идентификация деталей на производственной линии позволит снизить количество ошибок, обусловленных влиянием человеческого фактора и сократить время производства продукции. К текущему моменту предложено большое количество методик идентификации деталей по облакам точек. Большой вклад в область научного и практического обеспечения методик идентификации деталей по облакам точек внесли советские и российские ученые: А.Л. Павлов, С.Ю. Желтов, Е.Н. Сосенушкин, Ю.Б. Блохинов и др.; а также зарубежные ученые Ю. Го (Y. Guo), Х. Чжан (H. Zhang), Р.Б. Русу (R.B. Rusu) и др.

Однако, несмотря на обилие существующих методик, из-за специфики условий эксплуатации, универсальные решения могут не обеспечивать приемлемое качество идентификации. Поэтому разработка методик идентификации для работы в конкретных условиях производственного процесса остается актуальной.

Целью диссертационной работы является улучшение характеристик информационно-измерительных систем контроля за счет повышения точности идентификации деталей по облаку точек, получаемому с помощью лазерного 3D-сканирования.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Разработать инструмент создания виртуальных облаков точек, эквивалентных полученным с помощью систем лазерного сканирования, для создания набора облаков точек тестовых деталей, который будет использоваться в процессе исследования.
2. Разработать алгоритм подготовки облаков точек, полученных с помощью системы лазерного 3D-сканирования.

3. Разработать методику идентификации деталей сложной формы по облакам точек, полученных с нескольких ракурсов.

4. Провести экспериментальное исследование для определения характеристик разработанной системы.

Объектом исследования является информационно-измерительная система (ИИС) для идентификации объекта по облаку точек, полученного с устройства лазерного 3D-сканирования.

Предметом исследования являются методики и алгоритмы идентификации объектов по облакам точек, методики и алгоритмы подготовки облаков точек.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика эмуляции системы лазерного сканирования детали, движущейся по конвейеру, позволяющая воспроизводить структуру облака точек реального сканирования, отличающаяся возможностью воспроизведения ошибок, связанных с обработкой изображений луча лазера на поверхности детали без необходимости отрисовки всей сцены сканирования.

2. Разработан новый дескриптор Laser Scanner Feature Histogram (LSFH), предназначенный для информационно-измерительной системы лазерного 3D-сканирования, отличающийся расчетом средней точки по параметрам объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда и вводом дополнительной компоненты дескриптора, основанной на геометрических параметрах детали, и позволяющий осуществлять идентификацию детали сложной формы по набору облаков точек, полученных с разных ракурсов.

3. Разработана методика формирования эталонных дескрипторов по цифровым моделям деталей для информационно-измерительных систем контроля на конвейерных линиях, основанная на построении карты дескрипторов LSFH и её последующей кластеризации, отличающаяся адаптивным выбором числа значимых дескрипторов в зависимости от геометрической сложности детали и отсутствием необходимости проведения натурного сканирования эталонных образцов.

4. Предложена методика идентификации детали в составе информационно-измерительной системы на основе голосования по нескольким дескрипторам LSFH, вычисленным для двух и более ракурсов сканирования, отличающаяся совместным использованием метрик соответствия дескриптора и габаритных параметров детали и обеспечивающая повышение точности идентификации до уровня, близкого к 0,996.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика формирования эталонных дескрипторов и методика построения дескриптора, а также содержащиеся в них математические модели образуют научные основы для разработки комплексных методик идентификации деталей по облаку точек, что способствует повышению точности идентификации.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная методика эмуляции системы лазерного сканирования позволяет получить облако точек, отличающееся от облака точек с реального устройства сканирования не более чем на 10%, что позволяет подобрать оптимальную конфигурацию параметров в алгоритмах путем тестирования на большом количестве различных деталей и различных конфигурациях систем сканирования без необходимости проведения реального сканирования.

2. Разработанный дескриптор, адаптированный под систему контроля с использованием устройств лазерного сканирования, а также методика идентификации с использованием разработанного дескриптора позволяют идентифицировать детали различного размера и сложной формы по облаку точек, с точностью 0,996 на тестовом наборе деталей с возможностью повышения точности путем увеличения ракурсов сканирования.

3. Разработанная методика формирования эталонных дескрипторов позволяет сократить число эталонных дескрипторов, используемых в процессе идентификации, что сокращает время идентификации детали.

4. Разработанное программное обеспечение для эмуляции лазерного сканирования, позволяющее получить облака точек по заданным параметрам устройства сканирования, а также программное обеспечение для идентификации детали, которое позволяет идентифицировать деталь по ее облаку точек, обеспечивают возможность внедрения разработанных методик для повышения точности идентификации.

Методы исследования. Проведенное исследование опирается на методы математического моделирования, статистические методы, методы компьютерного зрения, методы обработки изображений, методы линейной алгебры.

Положения, выносимые на защиту:

— разработанная методика эмуляции системы лазерного 3D-сканирования позволяет получать симитированные облака точек без проведения натурных измерений с ошибкой не более 10% за счет учета ширины видимого лазерного луча на поверхности детали;

— разработанный дескриптор позволяет увеличить точность идентификации деталей до 5 раз на тестовом наборе за счет учета геометрии детали при поиске средней точки, а также ввода дополнительной компоненты дескриптора, основанной на геометрических параметрах детали;

— разработанная методика формирования эталонных дескрипторов по цифровым моделям деталей позволяет сократить время идентификации более чем в 40 раз за счет нового алгоритма выбора значимых ракурсов в зависимости от сложности геометрии детали, путем представления группы похожих дескрипторов одним эталонным;

— разработанная методика идентификации детали с помощью голосования позволяет обеспечить точность идентификации 0,996 за счет использования вновь введенных дескрипторов, полученных с разных устройств сканирования, и геометрических параметров детали.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованностью используемого математического аппарата и допущений в разработанных методиках, а также экспериментальной проверкой точности идентификации разработанных методик.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в ООО «ЦПР РТСофт», а также использовалась в Московском авиационном институте при выполнении государственного задания Минобрнауки России.

Апробация работы. Основные научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на: 20-ой, 22-ей Международных конференциях «Авиация и космонавтика (2021, 2023; Москва, МАИ); LI, LII Международных конференциях «Гагаринские чтения» (2025, 2026; Москва, МАИ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ [1-10], в том числе 5 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК РФ [1, 2, 3, 4, 5] по специальности 2.2.11., 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [9], 1 патент на полезную модель [10].

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, четырех приложений, изложенных на 169 страницах, в том числе 142 страницах — основной части, 4 приложениях на 27 страницах. Работа содержит 52 рисунка и 19 таблиц. Список литературы содержит 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении выделена проблема и сформулирована актуальность темы диссертационной работы, рассмотрена степень разработанности темы исследования. Сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования. Показаны научная новизна и практическая значимость результатов исследования, подтверждена их достоверность, приведены положения, выносимые на защиту. Представлены сведения о внедрении, публикациях и апробации результатов работы. Описана структура и объем диссертационной работы.

Первая глава работы посвящена описанию задачи, исследованию существующих методик идентификации деталей по облакам точек и методам подготовки облаков точек для идентификации.

Задача идентификации представлена в начале главы и формулируется следующим образом. Задана база данных эталонных цифровых моделей деталей, которые необходимо идентифицировать. По конвейеру движутся детали, с этих деталей с нескольких ракурсов формируются облака точек с помощью устройств лазерного 3D-сканирования. По облаку точек, полученному с помощью устройств сканирования, необходимо определить, какая деталь движется по конвейеру.

После этого рассматриваются методики идентификации, применимые для решения поставленной задачи. Так как набор используемых методов подготовки облака зависит от используемых методик идентификации, сначала рассматриваются методики идентификации, применимые к структуре облака точек, полученного с устройства лазерного сканирования.

Рассмотрены следующие классы методов: методы с использованием машинного обучения и классические методы. Методы с использованием машинного обучения можно разделить на методы: с выделением признаков; основанные на представлении облака точек вокселями; использующие виды с нескольких ракурсов; основанные на использовании неизмененного облака точек; использующие представление облака точек в виде графов. Классические методы делятся на методы: с использованием локальных дескрипторов и с использованием глобальных дескрипторов. Схема классификации методов идентификации изображена на рисунке 1.

Анализ существующих методов показал, что методы, использующие подходы с использованием глубокого обучения, не подходят по причинам: необходимости переобучения при добавлении новых классов, отсутствия тестирования на объектах, не являющимися промышленными деталями и необходимости больших вычислительных мощностей для идентификации.

У методов с использованием локальных дескрипторов выделена особенность, не позволяющая использовать их для идентификации деталей по облаку точек, полученного с помощью лазерного сканирования. Особенность заключается в том, что из-за структуры облака точек будет происходить некорректное определение ключевых точек или некорректное построение дескрипторов. Часть поверхности детали скрыта в местах резкого изменения геометрии поверхности, а такие места являются областями, содержащими ключевые точки, в которых выполняется построение локальных дескрипторов.



Рисунок 1 — Классификация методов идентификации деталей по облаку точек

Поэтому выбран класс методов с использованием глобальных дескрипторов (весь набор видимых точек используется для построения дескриптора). Анализ показал, что среди таких дескрипторов, наилучшие результаты на реальных данных (95% точности идентификации) показал дескриптор CVFH (Clustered Viewpoint Feature Histogram), являющийся вектором размерностью 308 элементов, составленным из гистограмм распределения углов, образованных геометрическим положением точек и их нормалей к средней точке и средней нормали. Для построения дескриптора выделяется область поверхности похожей геометрии, для которой рассчитывается средняя точка и средняя нормаль, относительно которых строится дескриптор.

Однако, перед построением дескриптора необходимо выполнить подготовку облака точек — аппроксимировать нормали к поверхности детали в каждой точке облака. От точности аппроксимации нормальными и описания точками поверхности детали зависит степень соответствия дескриптора эталонному, а значит и точность идентификации.

В облаке точек присутствуют шумы и выбросы, поэтому в главе рассмотрены алгоритмы подготовки облака точек, позволяющие провести фильтрацию облака точек, с целью устранения шумов и выбросов, а также рассчитать нормали в каждой точке, что необходимо для построения дескриптора.

Рассмотрены следующие классы методов: статистические методы фильтрации облака точек, методы фильтрации облака точек на основе окрестностей точек, методы фильтрации облака точек на основе проекций, методы фильтрации облака точек на основе подходов к обработке сигналов, методы фильтрации облака точек с использованием дифференциальных уравнений с частными производными, специальные методы.

В результате анализа, в качестве метода подготовки облака точек был выбран первый этап алгоритма EAR (Edge Aware Resampling), состоящий из оператора WLOP (Weighted Locally Optimal Projection) и алгоритма фильтрации нормалей, так как выбранный этап предоставляет всю необходимую для построения дескриптора подготовку облака точек. Оператор WLOP разработан для работы с зашумленным облаком точек, и позволяет спроецировать точки внутри исходного облака таким образом, чтобы они более точно соответствовали поверхности детали. Алгоритм фильтрации нормалей основан на вычислении средней нормали в заданной окрестности точки с учетом весовых коэффициентов, зависящих от удаленности точек и взаимном расположении их нормалей в пространстве.

Во второй главе рассматривается структура и особенности облака точек детали, движущейся по конвейеру, полученного с системы лазерного сканирования (Рисунок 2), а также способы эмуляции его получения из-за необходимости использования большого количества облаков точек для разработки алгоритмов идентификации.

В начале главы описываются принципы лазерного 3D-сканирования детали, движущейся по конвейерной линии. С учетом рассмотренных принципов, а также структуры облака точек, полученного с устройства лазерного 3D-сканирования, проводится анализ существующих методик эмуляции процесса лазерного сканирования.

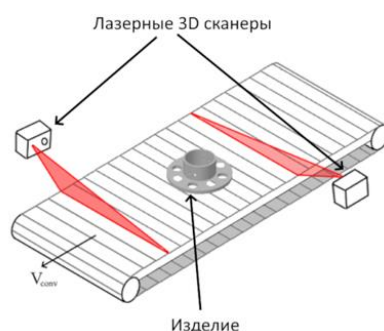


Рисунок 2 — Схема точки контроля с использованием системы лазерного сканирования

По результатам анализа из существующих методик были выбраны: методика, основанная на добавлении случайной ошибки к рассчитанным точкам положения пятна луча лазера на модели детали и методика, проводящая отрисовку всей сцены сканирования с учетом всех источников освещения, с последующим детектированием и выделением пятна луча лазера. У описанных методик выделены следующие недостатки: первая не учитывает ширину пятна луча лазера на поверхности детали, что не позволит достоверно воспроизвести структуру облака на границах детали, при использовании второй методики необходимо проводить этап выделения пятна луча на изображении при наличии других источников освещения, что является отдельным направлением исследований при разработке устройства сканирования.

Чтобы устранить выделенные недостатки, разработана методика эмуляции сканирования, основная идея которой заключается в формировании изображения с камеры устройства лазерного сканирования, содержащего только видимое пятно луча лазера на поверхности детали, с последующим выделением центра пятна лазерного луча и восстановлением положения его центров в пространстве.

Для эмуляции с помощью разработанной методики используются следующие входные параметры (Рисунок 3):

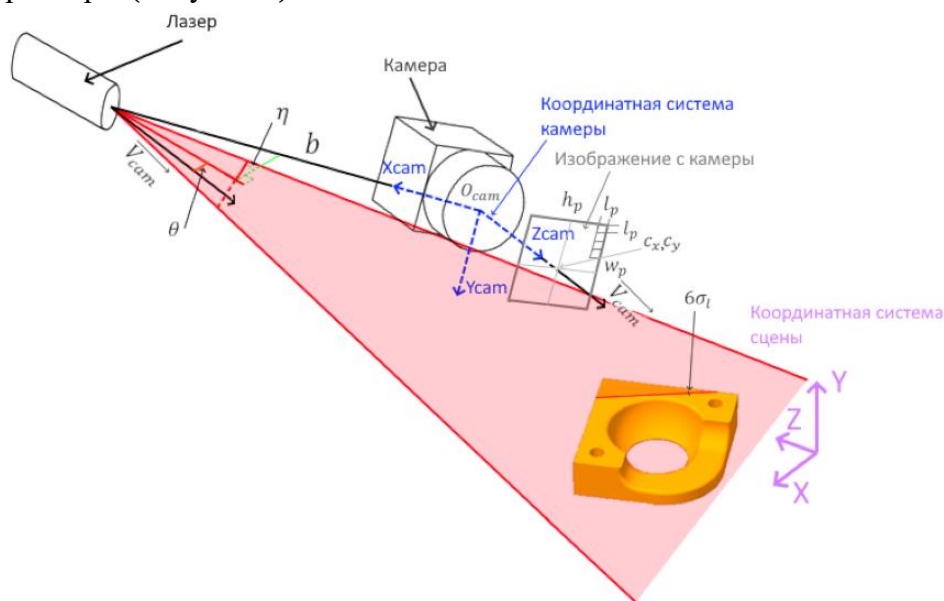


Рисунок 3 — Схема эмулируемой системы сканирования

1. *Свойства модели детали:* V — матрица координат вершин цифровой модели; P — матрица полигонов (наборов вершин) из матрицы V ; $m_d \in [0,1]$, $m_s \in [0,1]$, $\beta \in R$ — свойства материала отражать диффузную и бликовую составляющие, а также параметр блеска (модель освещения Блинна-Фонга).

2. *Свойства камеры:* $h_p \in N$, $w_p \in N$ — количество пикселей по вертикали и горизонтали; $f_r \in R$ — фокусное расстояние (мм); $l_p \in R$ — размер пикселя (мм); $O_{cam} \in R^3$ — положение камеры в координатах сцены; $\vec{V}_{cam} \in R^3$ — вектор направления оптической оси камеры в координатах сцены; $\eta_{cam} \in [0,2\pi)$ — угол поворота камеры

вокруг оптической оси; $\vartheta \in R, \delta \in R$ — коэффициент шума матрицы и чувствительности сенсора.

3. *Свойства системы камера-лазер*: $b \in R$ — расстояние между осями камеры и лазера (мм); $\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \eta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ — угол поворота плоскости камеры к оси камера-лазер и угол поворота плоскости лазера вокруг оси лазера относительно Y оси камеры; $\sigma_l \in R$ — среднеквадратическое отклонение яркостей точек луча лазера (в качестве допущения принята за константу).

4. *Параметры эмуляции*: $i_t \in N$ — количество итераций эмуляции, $\overrightarrow{V_{step}} \in R^3$ — вектор шага перемещения модели изделия между итерациями (мм).

Эмуляция проводится по следующему общему алгоритму (Рисунок 4):

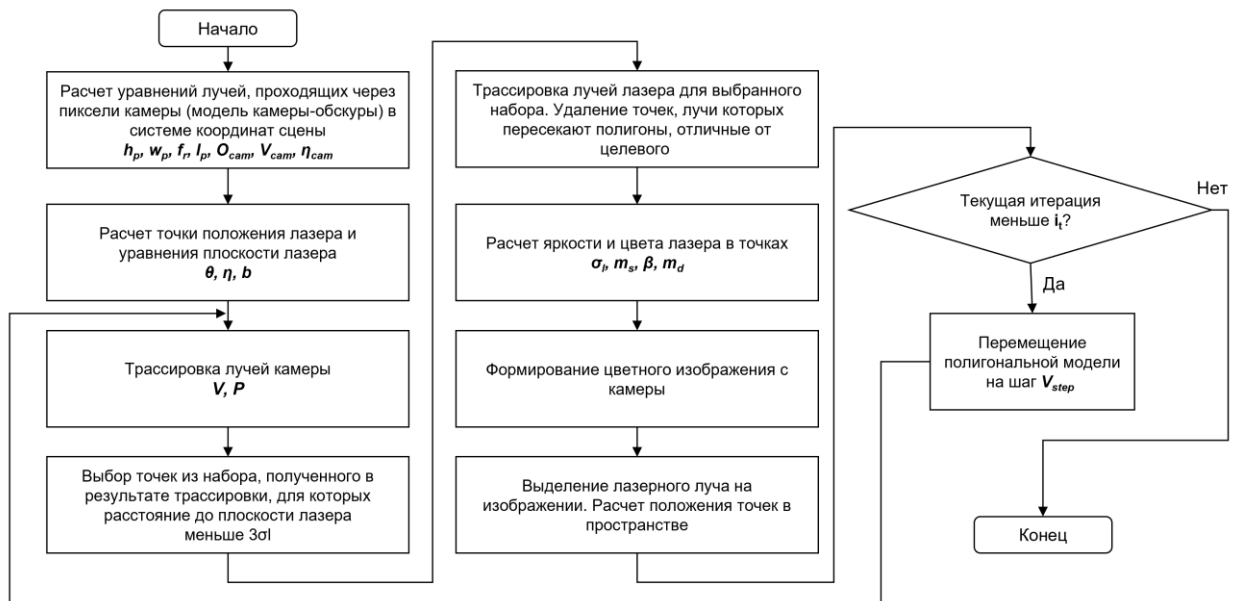


Рисунок 4 — Алгоритм эмуляции лазерного 3D-сканирования

1. Рассчитываются положения лучей, проходящих через пиксели камеры, в пространстве согласно модели камеры-обскуры.

2. Рассчитывается положение лазера на сцене и составляется уравнение плоскости лазера.

3. Производится трассировка лучей камеры, для поиска точек их пересечения с поверхностью цифровой модели детали.

4. Из полученного набора точек удаляются все точки, кроме тех, которые находятся на расстоянии не более $3\sigma_l$ от плоскости лазера.

5. Из оставшихся точек формируются лучи с точкой начала в точке положения лазера, после чего для них проводится повторная трассировка. Из набора удаляются те точки, в которые не попадают лучи, исходящие из лазера. В результате формируется набор видимых с камеры точек пятна лазерного луча на поверхности детали, причем каждая точка соответствует определенному пикселю на изображении.

6. Для каждого пикселя, содержащего видимое пятно луча лазера, по модели освещения Блинна-Фонга рассчитывается его интенсивность. Интенсивность источника

освещения рассчитывается с помощью распределения Гаусса в зависимости от удаленности от плоскости лазера.

7. Производится формирование цветного изображения с камеры лазерного сканера.

8. На сформированном изображении для каждой строки выделяются центры луча лазера, после чего с помощью модели лазерного сканера рассчитывается положение центров луча в пространстве.

9. Производится перемещение цифровой модели детали на вектор $\overrightarrow{V_{step}}$. Алгоритм повторяется заданное количество раз.

В результате работы разработанной методики эмуляции формируется набор точек поверхности детали в координатной системе сцены, воспроизводящий структуру облака точек и ошибки, вызванные определением центров лазерного луча на изображении.

В конце главы проведена экспериментальная проверка разработанной методики эмуляции. Для этого был сформирован набор тестовых деталей, имеющих сложную геометрию. Облака точек тестовых деталей были получены с разных ракурсов с помощью разработанной методики эмуляции и прототипа системы лазерного сканирования (Рисунок 5), состоящего из двух устройств лазерного сканирования и конвейера, скорость которого измерялась с помощью установленного энкодера.

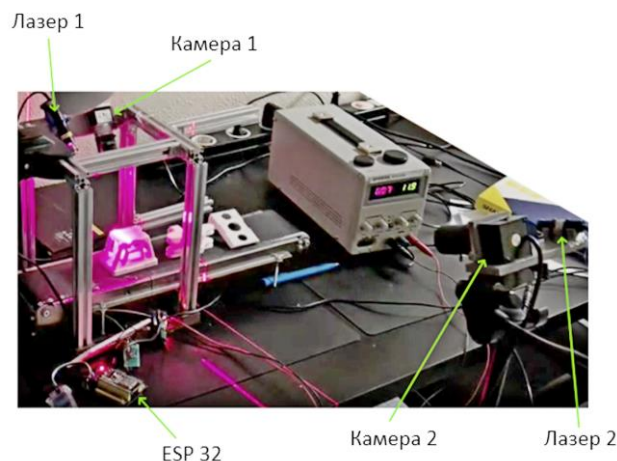


Рисунок 5 — Прототип системы лазерного сканирования

При проведении эксперимента калибровочные параметры прототипа системы лазерного сканирования использовались как входные данные для эмуляции. Отличие облаков точек, полученных с помощью описанной методики эмуляции, от реальных составило не более 10% (Рисунок 6) при использовании размера вокселя 0,7 мм, который используется при построении дескриптора.

Полученные результаты позволяют использовать методику эмуляции для формирования данных при проведении исследования алгоритмов идентификации деталей по облакам точек.

Третья глава посвящена разработке методики построения дескриптора, методики идентификации с использованием разработанного дескриптора, методики формирования эталонных дескрипторов и методики подготовки облаков точек.

В начале главы проведена экспериментальная проверка точности идентификации с помощью дескриптора CVFH на облаках точек тестовых деталей, с результатом 41% идентификации в среднем. Результаты проверки представлены в таблице 1, где $A = TP/(TP+FN)$, где TP – количество правильных идентификаций детали, FN — количество ошибочных идентификаций детали, а N — число эталонных дескрипторов для деталей.

Глубокий анализ дескриптора CVFH показал, что причинами снижения показателей точности являются проблема расчета средней точки и средней нормали при работе с деталями сложной геометрии и неоптимальная методика формирования эталонных дескрипторов.

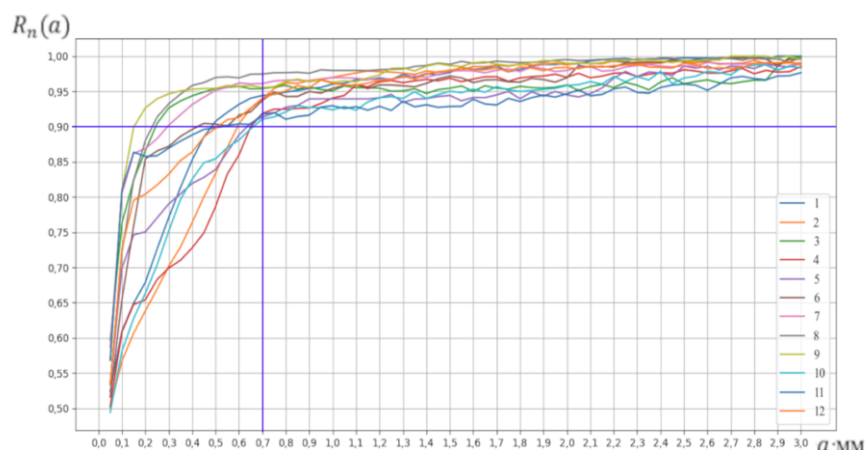


Рисунок 6 — Отличие эмуляции от реального сканирования в зависимости от размера воксельной сетки

Из-за сложной геометрии на этапе идентификации выделяется множество кластеров, с последующим расчетом большого количества дескрипторов для одного ракурса (при проведении эксперимента число дескрипторов доходило до 14). Полученные дескрипторы коррелируют с дескрипторами других деталей, при равносильности всех полученных дескрипторов, что снижает точность идентификации.

Методика формирования эталонных дескрипторов CVFH основана на получении облака точек с различных ракурсов и сопоставлении полученного облака точек с облаками точек по которым были рассчитаны эталонные дескрипторы. Описанный процесс является ресурсоемким, а также чувствительным к выбору порога схожести облаков точек. Из-за таких ограничений приходится использовать ограниченное число ракурсов, при этом размер набора эталонных дескрипторов растет непредсказуемо, из-за возможности получения нескольких дескрипторов с одного ракурса.

Далее была проведена экспериментальная проверка дескриптора VFH (Viewpoint Feature Histogram), являющегося предшественником дескриптора CVFH. Результаты проверки представлены в таблице 1. Отличие VFH от CVFH состоит в том, что средняя точка и нормаль рассчитываются для всего облака точек. Для некоторых деталей дескриптор VFH обеспечивал более высокую точность идентификации, чем дескриптор CVFH, однако идентификация с помощью VFH показала также неудовлетворительные

результаты (37% идентификации в среднем). Анализ показал, что причиной является также расчет средних точек и нормали.

Таблица 1 — Оценка точности идентификации на тестовых деталях

Деталь №	VFH 1226		CVFH 1226		VFH 7082		CVFH 7082	
	A	N	A	N	A	N	A	N
1	0,39	1226	0,3	9416	0,39	7082	0,54	53342
2	0,15	1226	0,1	5551	0,19	7082	0,15	31876
3	0,17	1226	0,34	14014	0,17	7082	0,49	81128
4	0,27	1226	0,514	9275	0,42	7082	0,58	54190
5	0,19	1226	0,15	7059	0,17	7082	0,19	41259
6	0,56	1226	0,39	3991	0,67	7082	0,41	23104
7	0,31	1226	0,2	2227	0,31	7082	0,24	12961
8	0,17	1226	0,3	5847	0,25	7082	0,34	33490
9	0,24	1226	0,2	4150	0,2	7082	0,36	24010
10	0,89	1226	0,68	3777	0,87	7082	0,79	21907
11	0,26	1226	0,4	6092	0,3	7082	0,42	35198
12	0,38	1226	0,42	8201	0,5	7082	0,48	48001
среднее	0,33	1226	0,33	6694	0,37	7082	0,41	38722

По результатам анализа получено, что необходимо разработать собственный дескриптор, на базе дескриптора CVFH, адаптированный для работы с облаком точек деталей со сложной геометрией, и разработать методику формирования эталонных дескрипторов, позволяющую адаптивно выбирать их в зависимости от сложности геометрии детали. При этом необходимо разработать методику подготовки облака точек, которая позволит строить разработанный дескриптор так, чтобы он более точно описывал деталь.

В работе выдвинута гипотеза, что при наличии нескольких устройств сканирования, расположенных под тупым углом друг другу (как в рассматриваемой системе контроля), параметры объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда (minimal oriented bounding box или MOBB) достаточно точно рассчитываются для использования его в процессе идентификации и построения дескриптора после применения методики подготовки. Предложенная гипотеза подтверждена в работе экспериментально, поэтому параметры MOBB использовались для расчёта средних точек и нормалей при построении дескриптора.

На основе глубокого анализа дескрипторов CVFH, VFH, был разработан дескриптор, названный Laser Scanner Feature Histogram (LSFH) — вектор, состоящий из 180 элементов составленный из четырех гистограмм, содержащих 45 элементов в каждой, количественного распределения значений θ_k , α_k , ϕ_k с шагом $\frac{2\pi}{45}$ (использованы из дескриптора CVFH) и значений $LSSDC_k$ с шагом $\frac{1}{45}$. Отличия разработанного дескриптора состоят в алгоритме расчета средней точки и средней нормали, а также во введенной компоненте пространственного распределения точек LSSDC. Структура дескриптора LSFH представлена в таблице 2. Графическое представление дескриптора изображено на рисунке 7.

Дескриптор LSFH строится по следующему алгоритму:

1. Производится преобразование облака точек в воксельную сетку с размером вокселя равным 3 расстояниям между соседними плоскостями срезов лазера (0,7 мм).

2. Расчет объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда (minimal oriented bounding box или MOBB) для общего облака точек.

Таблица 2 — Структура дескриптора LSFH

45 ячеек с шагом $\frac{2\pi}{45}$	45 ячеек с шагом $\frac{2\pi}{45}$	45 ячеек с шагом $\frac{2\pi}{45}$	45 ячеек с шагом $\frac{1}{45}$
Гистограмма распределения значений θ_k	Гистограмма распределения значений α_k	Гистограмма распределения значений ϕ_k	Гистограмма распределения значений $LSSDC_k$

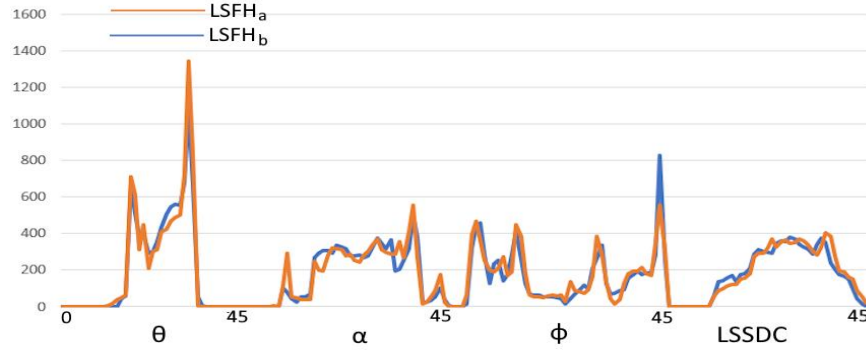


Рисунок 7 — Графическое представление дескрипторов LSFH

3. Расчет средней точки (1) и средней нормали (2). Для облака точек $S_k = \{p_{k_i} n_{k_i}\}_{i=1}^{a_k}$, полученного с k -го устройства сканирования, где $p_{k_i} \in R^3$ координаты i -й точки, а $n_{k_i} \in R^3$ — аппроксимированная нормаль поверхности в заданной точке $\|n_{k_i}\| = 1$:

$$p_{c_k} = C_k, \quad (1)$$

где C_k — центры MOBB в координатной системе k -го устройства сканирования. Из облака точек S_k удаляются точки со значением кривизны поверхности в данной точке больше порогового значения ρ , в результате чего формируется облако точек $\bar{S}_k = \{\bar{p}_{k_i}, \bar{n}_{k_i}\}_{i=1}^{I_k}$, где I_k — число точек в k -м облаке, оставшихся после удаления точек со значением кривизны больше порогового. Для полученного облака точек рассчитывается средняя нормаль (2):

$$n_{c_k} = \frac{\sum_{i=1}^{I_k} \bar{n}_{k_i}}{I_k}. \quad (2)$$

4. Для каждой i -й точки облака относительно полученных на предыдущих этапах средней точки и нормали рассчитываются угловые распределения α_{k_i} (3), ϕ_{k_i} (4), θ_{k_i} (5), и компонента распределения точек LSSDC (6), являющаяся адаптированной компонентой SDC дескриптора CVFH (Рисунок 8).

$$\alpha_{k_i} = \arccos(v_{k_i} \cdot n_{k_i}), \quad (3)$$

$$\phi_{k_i} = \arccos\left(u_{k_i} \cdot \frac{p_{k_i} - p_{c_k}}{\|p_{k_i} - p_{c_k}\|}\right), \quad (4)$$

$$\theta_{k_i} = \arctg(w_{k_i} \cdot n_{k_i}, u_{k_i} \cdot n_{k_i}), \quad (5)$$

где $u_{k_i} = n_{c_k}, v_{k_i} = \frac{p_{k_i} - p_{c_k}}{\|p_{k_i} - p_{c_k}\|} \times u_{k_i}, w_{k_i} = u_{k_i} \times v_{k_i}$.

$$LSSDC_{k_i} = \frac{2\|p_{k_i} - p_{c_k}\|}{\sqrt{(d_1^2 + d_2^2 + d_3^2)}}, \quad (6)$$

где d_1, d_2, d_3 — длины сторон МОБВ. По полученным распределениям строится дескриптор LSFH.

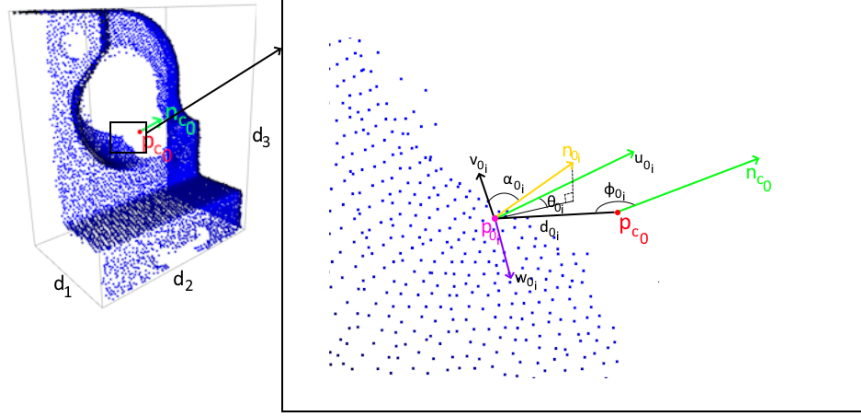


Рисунок 8 — Расчёт параметров дескриптора LSFH для i -й точки

В работе в качестве метрики соответствия дескрипторов используется евклидово расстояние между ними (7).

$$d(LSFH_a, LSFH_b) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{180} (LSFH_a(i) - LSFH_b(i))^2}}{180}. \quad (7)$$

Для улучшения точности соответствия дескриптора эталонному в главе предложена методика подготовки облака точек, представленная следующими шагами:

1. Получение исходного облака точек (присутствуют шумы и выбросы).
2. Статистическая фильтрация (удаление точек в окрестности которых число соседей меньше порогового) и геометрическая фильтрация (удаление точек за пределами рабочей области).

3. Первоначальная аппроксимация нормалей к поверхности методом анализа главных компонент (РСА). После аппроксимации данным методом нормаль может быть направлена как от поверхности, так и в обратном направлении.

4. Восстановление направления нормалей с использованием информации об оптической оси камеры (угол между нормалью и оптической осью должен быть тупым). Этот этап является оптимизированной версией алгоритма восстановления направлений в EAR, применимый к облаку точек, полученного с помощью описанного устройства лазерного сканирования.

5. Итеративная фильтрация нормалей (8) методом минимизации функции расхождения нормалей между всеми точками в окрестности O_{p_i} радиуса σ_p для каждой точки p_i облака точек $S = \{p_i, n_i\}_{i=1}^k$, полученного на предыдущем этапе, где $p_i \in R^3$ — координаты точки, $n_i \in R^3$ — вектор нормали к поверхности, аппроксимированный в точке p_i :

$$n_i^{k+1} \leftarrow \frac{\sum_{s_j \in O_{p_i}} n_j \theta(\|p_i - p_j\|) \psi(n_i^k, n_j)}{\sum_{s_j \in O_{p_i}} \theta(\|p_i - p_j\|) \psi(n_i^k, n_j)}, \quad (8)$$

где $\theta(r) = e^{-\frac{r^2}{\sigma p^2}}$, $\psi(n_i, n_j) = e^{-\left(\frac{1-n_i^T n_j}{1-\cos(\sigma n)}\right)^2}$.

6. Реорганизация облака, адаптированным под лазерное сканирование, методом WLOP. Адаптация заключается в ограничении перемещения точек плоскостью лазера для каждого из «срезов» детали, полученного в процессе лазерного сканирования. При такой адаптации положение точки итеративно пересчитывается по формуле (9):

$$p_i^{k+1} = e t_i * \overrightarrow{e_{las}} + u t_i * \overrightarrow{u_{las}} + l_{id}, \quad (9)$$

где $\overrightarrow{n_{laser}}$ – единичный вектор нормали плоскости лазера, $\overrightarrow{e_{las}}$ – единичный вектор, сонаправленный оси лазера, $\overrightarrow{u_{las}}$ – единичный вектор образованный векторным произведением векторов $\overrightarrow{n_{laser}}$ и $\overrightarrow{e_{las}}$, l_{id} – точка начала лазерного луча в координатной системе устройства сканирования на срезе с индексом id . Адаптированные коэффициенты

метода WLOP: $eavg_i = \sum_{j \in J} \overrightarrow{e_{las}} \cdot (q_j - l_{id}) \frac{\alpha_{ij}^k}{\sum_{j \in J} \alpha_{ij}^k}$, $ereps_i = \sum_{j \in J} \overrightarrow{e_{las}} \cdot (p_i^k - p_{i'}^k) \frac{\beta_{ii'}^k}{\sum_{i' \in I \setminus \{i\}} \beta_{ii'}^k}$, $uavg_i = \sum_{j \in J} \overrightarrow{u_{las}} \cdot (q_j - l_{id}) \frac{\alpha_{ij}^k}{\sum_{j \in J} \alpha_{ij}^k}$, $ureps_i = \sum_{j \in J} \overrightarrow{u_{las}} \cdot (p_i^k - p_{i'}^k) \frac{\beta_{ii'}^k}{\sum_{i' \in I \setminus \{i\}} \beta_{ii'}^k}$, $e t_i = eavg_i + \mu * ereps_i$, $u t_i = uavg_i + \mu * ureps_i$, коэффициенты без

изменений: $\alpha_{ij}^k = \frac{\psi(n_i, p_i^k - q_j)}{\|p_i^k - q_j\|}$, $\beta_{ii'}^k = \frac{\theta(\|p_i^k - p_{i'}^k\|)}{\|p_i^k - p_{i'}^k\|}$, $\theta(r) = e^{-\frac{r^2}{\sigma p^2}}$, $\psi(n_i, p_i^k - q_j) = e^{-\frac{(n_i^T (p_i^k - q_j))^2}{\sigma p^2}}$.

Результатом подготовки облака точек по предложенной методике является отфильтрованное и сглаженное облако точек с аппроксимированной нормалью к поверхности детали в каждой точке данного облака с сохранением первоначальной структуры, которое можно использовать для построения разработанного дескриптора LSFH.

В работе проведена проверка разработанной методики подготовки, в ходе которой получено, что среднее значение расстояния до ближайшего дескриптора и средняя ошибка определения параметров МОВВ меньше у дескриптора, построенного с использованием методик фильтрации, в среднем на 22% и на 43% соответственно. Результаты представлены в таблице 3, где среднее расстояние до ближайшего эталонного дескриптора $L_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{LSFH_i}$, а среднее расстояние длин ребер до эталонного для каждой детали $D_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\overline{D}_i - \overline{D}\|$.

Чтобы провести идентификацию для каждой детали необходимо составить набор эталонных дескрипторов, при этом от выбора данного набора будет зависеть точность и скорость идентификации. Предложенная методика выбора эталонных дескрипторов основана на представлении групп похожих дескрипторов одним центральным дескриптором, где выбор порога схожести зависит от геометрии и размеров детали.

Таблица 3 — Анализ результатов работы методики подготовки облака точек

Деталь №	Стандартная методика подготовки		Методика подготовки	
	L_{avg}	D_{avg} мм	L_{avg}	D_{avg} мм
1	1181,01	2,53	987,74	1,34
2	1469,41	2,31	1338,34	0,99
3	2510,88	2,89	2134,49	1,39
4	2282,14	3,1	1690,29	1,16
5	2106,67	2,64	1710,6	1,32
6	792,26	2,37	615,67	1,74
7	1591,33	1,98	1254,05	1,24
8	1417,67	2,83	973,88	1,49
9	1016,85	2,94	766,6	1,92
10	733,06	2,13	555,35	1,29
11	2489,85	2,5	1852,74	1,63
12	2899,99	2,88	2104,87	1,96
среднее	1707,59	2,59	1332,05	1,45

Методика формирования эталонных дескрипторов использует подходы из обработки изображений и представлена следующими шагами:

1. Для цифровой модели детали строится карта базовых дескрипторов M с 65160 ракурсов (образуется поворотом на 1° вокруг оси Z на угол $\theta \in [-90^\circ; 90^\circ]$, и оси X на угол $\varphi \in [0, 359]$). Вращение вокруг оси Y не производится, так как при построении базового дескриптора ось Y является оптической осью камеры устройства сканирования, а дескриптор является инвариантным к повороту вокруг оптической оси.

2. Рассчитывается карта изменения дескрипторов G между соседними ячейками (10). После чего нормализуется к максимальному значению (11):

$$\bar{G}(i, j) = \sqrt{\left(\begin{aligned} &\|M(i+1, j+1) - M(i-1, j-1)\| \\ &+ 2\|M(i+1, j) + M(i-1, j)\| + \\ &\|M(i+1, j-1) - M(i-1, j+1)\| \end{aligned} \right)^2 + \left(\begin{aligned} &\|M(i+1, j+1) - M(i-1, j-1)\| + \\ &2\|M(i, j+1) - M(i, j-1)\| + \\ &\|M(i+1, j-1) - M(i-1, j+1)\| \end{aligned} \right)^2}, \quad (10)$$

$$G(i, j) = 255 \frac{\bar{G}(i, j)}{\max(\bar{G}(i, j))}. \quad (11)$$

3. С помощью доработанного алгоритма водораздела на нормализованной карте дескрипторов выделяются области. Дескрипторы в одной области объединяются в набор. В результате получено m наборов дескрипторов $D = \{\{d_{ki}\}_{i=1}^{n_k}\}_{k=1}^m$, где m — число наборов, n_k — число дескрипторов в m -ом наборе.

4. Производится выбор критерия схожести групп. Для каждого из наборов дескрипторов $D = \{\{d_{ki}\}_{i=1}^{n_k}\}_{k=1}^m$ рассчитывается центральный дескриптор (12):

$$D_{c_k} = d_{ke}, \quad (12)$$

где $e = \operatorname{argmin}_i (\|d_{ki} - \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} d_{ki}\|)$. Для каждой из групп рассчитывается средний разброс от центрального дескриптора (13), после чего на основании этого рассчитывается коэффициент схожести групп (14, 15):

$$dst_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} \|D_{c_k} - d_{ki}\|}{n_k - 1}, \quad (13)$$

$$c_{dst} = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} dst_k, \quad (14)$$

$$S_{thd} = c_{dst} + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_k} (c_{dst} - dst_k)^2}{n_k - 1}}. \quad (15)$$

5. Группы со значением $dst_k > S_{thd}$ разбиваются на подгруппы с помощью иерархической кластеризации. Для новых групп рассчитываются центральные дескрипторы.

6. С помощью иерархической кластеризации центральные дескрипторы объединяются в группы, таким образом чтобы максимальное расстояние d между ними было меньше S_{thd} . Для полученных групп вычисляются центральные дескрипторы. Вычисленные центральные дескрипторы принимаются за эталонные.

Описанная методика была использована при формировании эталонных дескрипторов для 12 тестовых цифровых моделей деталей. В результате для каждой из них сформировано в среднем 447 эталонных дескрипторов.

Для облаков точек, полученных с помощью системы сканирования, будет рассчитано несколько дескрипторов LSFH (по одному на каждое устройство сканирования в составе системы сканирования), а также параметры МОБВ. Так как некоторые детали невозможно идентифицировать с определенных ракурсов, необходимо использовать всю доступную информацию во время идентификации. Для этого в работе предложена методика расчета метрики соответствия с помощью голосования. Она позволяет учесть все полученные дескрипторы, а также параметры МОБВ для идентификации.

Возможность использования дескрипторов с разных ракурсов позволяет увеличить процент идентификации, путем увеличения числа ракурсов сканирования. В описанной методике сначала рассчитываются метрики соответствия каждого i -го дескриптора каждой детали для идентификации (16) (для каждой детали задан набор эталонных дескрипторов) и метрики соответствия параметров МОБВ каждой детали (17). На основании полученных метрик рассчитывается общая метрика соответствия (18), на основании которой деталь с наибольшей метрикой принимается за результат идентификации (19). Метрика соответствия i -го дескриптора для j -й детали:

$$p_{Li}(j) = 1 - \frac{d_i(j)}{\sum_{j'=1}^k d_i(j')}, \quad (16)$$

где k — число деталей для идентификации, $d_i(j) = \min(\|LSFH_i - LSFH_{j_e}\|)$, $e = 1..m(j)$, где $m(j)$ — число эталонных дескрипторов для j -ой детали. Метрика соответствия МОБВ облака точек для j -й детали:

$$p_M(j) = 1 - \frac{l(j)}{\sum_{j'=1}^k l(j')}, \quad (17)$$

где k — число деталей для идентификации, $l(j) = \|D - D(j)\|$, где $D(j)$ — длины ребер МОБВ j -го изделия, D параметры МОБВ, полученные во время построения дескриптора. Общая метрика соответствия:

$$p(j) = \frac{p_M(j) + \sum_{i=1}^n p_{Li}(j)}{n+1}. \quad (18)$$

Выбор детали:

$$j_{res} = \operatorname{argmax}(p(j)). \quad (19)$$

Методика расчета метрики соответствия с помощью голосования позволяет определить деталь по нескольким дескрипторам и параметрам МОВВ облака точек, полученного с устройства сканирования.

Эталонные дескрипторы использовались для проверки описанных методик на 2448 облаках точек, полученных с помощью разработанной методики эмуляции. Для идентификации по одному ракурсу достигнута точность идентификации 89%, а при идентификации с помощью методики голосования 99,8%. На деталях, не входящих в тестовый набор, достигнута точность идентификации 78,6% и 99,6% для идентификации по дескриптору с одного ракурса и с помощью методики голосования соответственно. При этом время необходимое на идентификацию уменьшилось в 42 раза по сравнению с идентификацией с помощью дескриптора VFH и в более чем 600 раз по сравнению с идентификацией с помощью CVFH.

После чего разработанные методики были экспериментально проверены на реальных данных, полученных с помощью прототипа системы лазерного сканирования, рассмотренного в первой главе. В качестве сканируемых объектов использовались заготовки, выполненные по цифровым моделям тестовых деталей. Точность идентификации с помощью методики голосования составила 99%. Результаты эксперимента представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Результаты экспериментальной проверки разработанных методик

Тип данных	Число типов деталей	Число облаков точек	Количество ракурсов	Метод	Точность, %
Тестовые детали, эмуляция	12	2448	1	LSFH	89,0
Тестовые детали, эмуляция	12	2448	2	LSFH + голосование	99,8
Детали вне тестового набора, эмуляция	5	1020	1	LSFH	78,6
Детали вне тестового набора, эмуляция	5	1020	2	LSFH + голосование	99,6
Тестовые детали, реальное сканирование	12	240	2	LSFH + голосование	99

В четвертой главе описано разработанное ПО, реализующее предложенные в работе методики, а также способы их применения. После этого описана ИИС идентификации деталей по облаку точек. Схема описанной ИИС изображена на рисунке 9.

Информационно-измерительная система идентификации детали на конвейере по облаку точек, полученного с помощью устройств лазерного сканирования, представлена следующими модулями:

1. Модуль сканирования детали, предназначенный для проведения сканирования с целью получения облака точек детали.
2. Модуль идентификации детали, предназначенный для осуществления идентификации детали по ее облаку точек.

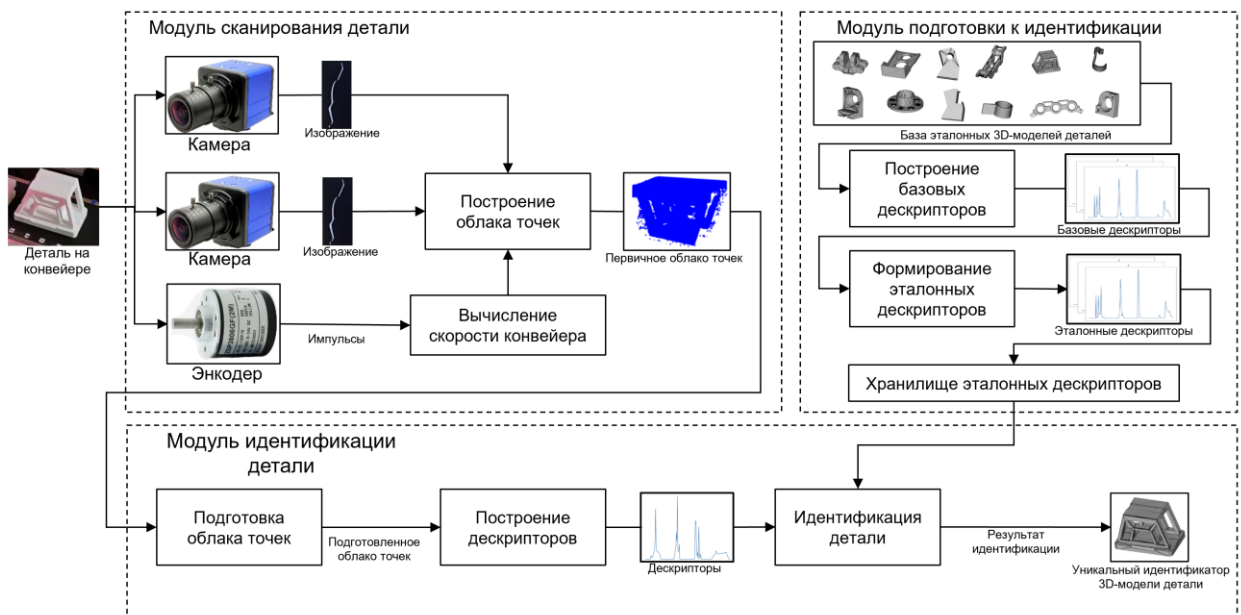


Рисунок 9 — Схема информационно-измерительной системы идентификации детали

3. Модуль подготовки к идентификации необходимый для формирования набора эталонных дескрипторов 3D-моделей деталей, с помощью которых будет осуществляться идентификация.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе проведена разработка информационно-измерительной системы идентификации детали на конвейере по облаку точек, полученному с помощью устройства лазерного 3D-сканирования. В ходе которой получены следующие результаты:

1. Проведено исследование существующих методов идентификации деталей по облаку точек, позволившее выделить методы, использующие глобальные дескрипторы, как подходящие для решения задачи идентификации детали по облаку точек, полученному при движении детали по конвейеру. Проведено исследование методик подготовки облаков точек к построению глобального дескриптора, в результате которого выделены методики, применимые для решаемой задачи.

2. Разработана методика эмуляции лазерного 3D-сканирования, отличающаяся от известных способом построения облака точек, а именно формированием изображения с камеры устройства лазерного сканирования, содержащего только видимое пятно лазера на поверхности детали, с последующим выделением центра лазерного луча и восстановлением положения его центров в пространстве. В ходе исследования соответствия облака точек, полученного с помощью разработанной методики эмуляции, облаку точек, полученному при реальном сканировании, отличие облаков составило не более 10% и 6% в среднем при использовании вокселя 0,7 мм.

3. Разработана методика построения глобального дескриптора, названного Laser Scanner Feature Histogram, на базе дескрипторов CVFH, VFH, предназначенная для описания деталей сложной геометрии, отличающаяся методом определения средней точки

по параметрам MOBB и адаптированной компоненте LSSDC, позволившая повысить точность идентификации до 5 раз по сравнению с дескриптором CVFH на тестовых деталях.

4. Разработана методика подготовки облака точек, включающая в себя этапы статистической фильтрации, фильтрации нормалей и реорганизации облака точек для лучшего соответствия поверхности, позволившая уменьшить расстояние до ближайшего эталонного дескриптора на 22% и повысить точность расчета параметров MOBB на 43% в среднем.

5. Разработана методика формирования эталонных дескрипторов с учетом свойств дескриптора LSFH и подходов к обработке изображений, которая позволяет динамически выбирать значимые дескрипторы на основе сложности геометрии детали, что позволило уменьшить число дескрипторов с 65160 до 447 в среднем на деталь, за счет чего более чем в 40 раз уменьшилось время на идентификацию детали по сравнению с идентификацией с помощью дескриптора VFH и в более чем 600 раз по сравнению с идентификацией с помощью дескриптора CVFH.

6. Разработана методика идентификации деталей с помощью голосования, позволяющая повысить точность идентификации до 0,99 на реальных данных путем одновременного использования дескрипторов, полученных с разных ракурсов, и информации о геометрических параметрах детали.

7. Разработано программное обеспечение для эмуляции лазерного сканирования и для идентификации деталей по облаку точек, реализующее разработанные методики.

8. Разработана информационно-измерительная система идентификации деталей на конвейерной линии по облаку точек, полученному с помощью лазерного сканирования.

Таким образом цель работы — повышение точности и сокращение времени идентификации деталей в составе ИИС — достигнута.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, включенных в Перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. Александров А.А. Идентификация деталей по облакам точек, полученных с системы лазерного сканирования, с помощью глобального дескриптора LSFH // Мягкие измерения и вычисления. – 2026. № 4. Т.101. С. 7-16.

2. Александров А.А., Максимов А.Н. Система лазерного 3D сканирования изделий, движущихся по ленточному конвейеру // Мягкие измерения и вычисления. – 2025. № 3. Т. 88. С. 5–14.

3. Александров А.А., Максимов А.Н. Метод эмуляции получения облака точек объекта по его полигональной модели с учетом параметров сканирующего устройства // Мягкие измерения и вычисления. – 2024. – Т. 82, № 9. – С. 39-50.

4. Александров А.А., Максимов А.Н. Метод сегментации объектов с использованием принципов лазерного 3D сканирования // Мягкие измерения и вычисления. – 2024. – Т. 85, № 12. – С. 59-71.

5. Александров А.А., Максимов А.Н. Метод измерения диаметра изделий с помощью стереозрения при их изготовлении на токарном станке // Мягкие измерения и вычисления. – 2024. – Т. 78, № 5. – С. 5-14.

В других изданиях:

6. Александров А.А., Павлов О.В. Оценка параметров трехмерного объекта по облаку точек в программах на языках IEC 61499 // Гагаринские чтения - 2025: Сборник тезисов докладов международной молодежной научной конференции, Москва, 15–18 апреля 2025 года.

7. Максимов А.Н., Александров А.А., Лавриненко С.А. Метод построения киберимунной архитектуры на языках IEC 61499 // Авиация и космонавтика: Тезисы 22-ой Международной конференции, Москва, 20–24 ноября 2023 года.

8. Максимов А.Н., Александров А.А., Романов В.Д. Метод интеграции алгоритмов обработки изображения в программы на языках IEC 61499 // Авиация и космонавтика: Тезисы 20-ой Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021 года.

Публикации объектов интеллектуальной собственности:

9. Александров А.А. Программное обеспечение для эмулирования процесса лазерного 3D сканирования на ленточном конвейере. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026661733, дата регистрации 22.04.2026 г.

10. Патент на полезную модель № 230531 U1 Российская Федерация, МПК G01B 11/08, G01B 11/10, G01B 11/22. Автоматизированное устройство технического контроля геометрических параметров тел вращения : № 2024104364 : заявл. 19.02.2024 : опубл. 09.12.2024 / Ф.В. Васильев, М.А. Коробков, О.И. Овсянников, А.А. Александров; заявитель АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "СЕРОВСКИЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД".