

Восточно-Казахстанский технический
университет им. Д.Серикбаева

УДК 681.51; 62-94; 004.896

На правах рукописи

КАДЫРОЛДИНА АЛЬБИНА ТАЛАПЖАНОВНА

**Интеллектуальная роботизированная система для плазменной
обработки изделий сложной формы**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Отечественный научный
консультант:
Алонцева Дарья Львовна
к.ф.-м.н. (д.ф.-м.н. РФ),
профессор

Зарубежный научный
консультант:
Гьеорг Гьеорог
Ph.D., профессор

Республика Казахстан
Усть-Каменогорск, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО 3D СКАНИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ	8
1.1 Анализ существующих систем и методов роботизированного 3D сканирования и воссоздания 3D модели поверхности объекта.....	9
1.2 Технологические процессы термического плазменного напыления покрытий и плазменной резки, основные контролируемые параметры при управлении данными процессами.....	18
2 ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА	25
2.1 Оборудование эксперимента.....	25
2.2 Методы анализа сканированных изображений: выделение лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования.....	31
3 СХЕМА СИСТЕМЫ 3D-СКАНИРОВАНИЯ И АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ С ПОСТРОЕНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ	40
4 ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА И ГЕНЕРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДВИЖЕНИЯ РОБОТ-МАНИПУЛЯТОРА ПО СФОРМИРОВАННОЙ ТРАЕКТОРИИ, ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	81
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	88
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Копия акта производственных испытаний	89

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы: диссертационная работа посвящена автоматизации системы управления промышленным роботом-манипулятором с закрепленным на его руке инструментом, выполняющим последовательно операции 3D-сканирования и плазменной резки или обработки поверхности (напыление покрытий), при этом планирование траектории и генерация программы движения руки робота-манипулятора выполняется на основе данных сканирования. Таким образом, реализуется интеллектуальное управление движением рабочего инструмента робота-манипулятора при выполнении операций плазменной резки и напыления, так как программная траектория движения манипулятора не задается заранее, а формируется системой управления роботом на основе информации о текущем состоянии внешней среды, то есть по воспроизведенной роботом 3D-модели обрабатываемой поверхности.

Актуальность. Современный робот – манипулятор может перемещать рабочий инструмент с контролируемыми кинематическими параметрами по заданной траектории. В настоящее время область применения промышленных роботов - манипуляторов неуклонно расширяется, в том числе манипуляторы применяются в автоматических линиях упаковки, системах сборки, для автоматизированных процессов покраски, для автоматизации процессов плазменной резки или плазменного напыления покрытий. В связи с этим задачи, которые связаны с управлением роботами-манипуляторами в целом и с планированием их траектории в частности, весьма актуальны и находятся в центре внимания ученых, как представителей академической среды, так и исследовательских подразделений компаний, специализирующихся на производстве средств автоматизации. Таким образом, теоретические и практические способы решения этих задач интересны и важны с точки зрения науки и производства. В настоящее время применение роботов-манипуляторов в автомобиле- и машиностроении ограничивается крупносерийным производством, потому что каждый переход на новый вид изделий требует проведения сложных калибровочных процедур, чтобы достичь соответствия с заложенной в робота при изготовлении моделью. Поэтому задача автоматической генерации кода программы робота-манипулятора по заданной средствами САПР (системы автоматического проектирования) модели изделия находится в центре внимания ученых и разработчиков роботизированных систем. Практическая реализация такой задачи могла бы позволить экономически эффективно производить или обрабатывать мелкосерийные и штучные изделия с использованием робота-манипулятора.

Основная идея данного исследования заключается в создании такой системы, позволяющей реализовать движение руки робота по заданной 3D-траектории - модели изделия, которое робот будет вырезать или обрабатывать плазмой. Отличительной чертой предлагаемой системы является проведение предварительного 3D-сканирования поверхности заготовки или обрабатываемого изделия с последующей автоматической генерацией кода

программы робота-манипулятора, учитывающей данные 3D-сканирования объекта обработки, предварительно проведенного посредством датчиков расстояния, монтируемых на манипуляторе робота, что позволит использовать заготовки с варьирующимся в широком диапазоне геометрическими параметрами и обрабатывать крупногабаритные изделия, геометрические параметры которых определены с малой точностью или изделия с отклонениями от заданной формы.

Исследование выполнено в рамках проекта № AP05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы» с грантовым финансированием Комитета науки МОиН РК на 2018-2029 годы, по приоритету «Информационные, телекоммуникационные и космические технологии, научные исследования в области естественных наук».

Цель исследования: разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления промышленным роботом-манипулятором, позволяющей производить плазменную резку деталей сложной формы и/или обработку их поверхности плазмой по заданной 3D-модели изделия, при этом предварительное 3D-сканирование обрабатываемой поверхности и генерация программы движения по 3D-модели изделия осуществляется тем же роботом-манипулятором.

Задачи исследования:

Разработать схему системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе и алгоритм процедуры сегментации поверхности с построением аналитической модели поверхности;

Разработать алгоритм формирования траектории рабочего инструмента робота-манипулятора и программное обеспечение, предназначенное для интерактивного взаимодействия с оператором робота;

Реализовать генерацию программы робота-манипулятора для его движения по сформированной траектории;

Провести производственное испытание обработанного с использованием разработанной интеллектуальной системы промышленного изделия.

Объектом исследования диссертационной работы является интеллектуальная система управления промышленным роботом-манипулятором.

Предметом исследования является автоматизация системы управления промышленным роботом-манипулятором путем разработки схемы роботизированной системы 3D-сканирования с последующим планированием траектории и генерацией программы движения руки робота-манипулятора на основе данных сканирования.

Основные методы исследования: методы теории автоматического управления, математическое компьютерное моделирование, натурный эксперимент: тестирование методики сканирования на модельных объектах и реализация роботизированной плазменной обработки поверхности с

перемещением руки робота-манипулятора по сгенерированной траектории с последующим производственным испытанием промышленного изделия.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) схема системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе и алгоритм сегментации с построением аналитической модели поверхности;

2) формирование траектории рабочего инструмента и генерация программы движения робота-манипулятора по сформированной траектории.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- разработана схема 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе;

- разработан оригинальный алгоритм процедуры сегментации поверхности с построением аналитической модели поверхности;

- разработан алгоритм управления роботом-манипулятором, при котором планирование траектории и автоматическая генерация программы робота – манипулятора производится по данным 3D-сканирования поверхности обрабатываемого роботом изделия.

Научная и практическая значимость работы. Совокупность полученных в работе теоретических и экспериментальных результатов позволила создать научные основы роботизированной технологии плазменной резки и обработки крупногабаритных изделий сложной формы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы получены в ходе выполнения исследований по проекту с грантовым финансированием на 2018-2020 годы Комитета науки МОиН РК № AP05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы». Зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая реализовать интерактивное взаимодействие с человеком - оператором робота во время выполнения процесса 3D-сканирования, а также распознавать и анализировать изображения, полученные в результате сканирования. (Свидетельство о государственной регистрации на объект авторского права (программа для ЭВМ) под названием «Программа выделения лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования» № 5870 от 17 октября 2019). Получен акт производственных испытаний обработанного по новой технологии промышленного изделия, где подтверждено увеличение срока службы плиты щековой дробилки с плазменным покрытием изношенной поверхности. (Акт производственных испытаний «ИП Абакумов С.А.», № 1 от 01.10.2020). Разработанные в диссертации новые алгоритмы управления, сегментации и схема роботизированного сканирования и представляют интерес для широкого круга исследователей в области автоматизации и управления, в частности, в области интеллектуального управления роботами-манипуляторами. Результаты диссертации перспективны для создания наукоемкого производства, внедрение в производство интеллектуальной роботизированной системы позволит оптимизировать технологию плазменной резки и обработки изделий, улучшить эксплуатационные характеристики обрабатываемых изделий, экономически

эффективно производить роботизированное плазменное напыление покрытий на детали или изделия сложной формы, а также плазменную резку крупногабаритных мелкосерийных и штучных изделий.

Апробация работы. Основные результаты исследования прошли апробацию на пяти международных конференциях в Венгрии, и в Казахстане, а именно: 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (Венгрия, 2017); 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (Венгрия, 2019); Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана» (Усть-Каменогорск, 2018); Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education (Усть-Каменогорск, 2018); III Международной научно-практической конференции «Global Science And Innovations 2018: Central Asia» (Астана, 2018).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 работ, из них: 11 статей опубликованы в рецензируемых научных журналах, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ККСОН и 7 статей в журналах, индексируемых Scopus, в том числе 2 статьи в периодических выпусках журналов, индексируемых в базах Web of Science и Scopus с квартилями Q2 и Q1 по Web of Science и с процентилями по CiteScore в базе Scopus 75 % и 80% соответственно, а также 1 статья в журнале, индексируемом в Scopus с процентилем по CiteScore 26%.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 99 наименований, работа изложена на 89 страницах компьютерного текста, включает 39 рисунков, 3 таблицы и 2 приложения.

В первом разделе диссертации рассмотрены современные методы и оборудование 3D-сканирования и проанализированы с точки зрения автоматизации основные технологические процессы плазменного напыления и резки. Обоснована актуальность разработки интеллектуальной роботизированной системы для плазменной резки и обработки поверхностей с применением предварительного сканирования обрабатываемой поверхности, для сканирования выбран тип бесконтактного датчика расстояния, а именно - бинокулярный триангуляционный лазерный датчик и отмечено, что необходима разработка процедура сегментации для восстановления 3D модели поверхности при сканировании изделий сложной формы (с гранями, сочленениями и т.п.). На основе проделанного анализа технологических процессов плазменного напыления и резки, с учетом актуальности применения промышленного робота для автоматизации технологических процессов плазменной обработки и резки, поставлена цель и указаны задачи диссертационного исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Во втором разделе диссертации обоснован выбор и описано основное оборудование и методы исследования. Кратко описаны разработанные и апробированные алгоритмы управления роботом - манипулятором для

перемещения инструмента (плазменного источника) по заранее заданным сложным траекториям в плоскости и для реализации 3D сканирования объектов. Описан разработанный для данного исследования метод (алгоритм) распознавания сканированных изображений и реализующая его компьютерная программа для интерактивного взаимодействия с оператором робота, которая позволяет оператору во время процесса 3D сканирования задавать, тестировать и сохранять параметры процесса распознавания для дальнейшего использования в процессе автоматической обработки данных 3D сканирования.

В третьем разделе диссертации представлена схема системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе, описан алгоритм сегментации с построением аналитической модели поверхности и приведены результаты апробации разработанной схемы и алгоритма (данные тестирования для восстановления формы поверхности), которые подтверждают первое положение, выносимое на защиту.

В четвертом разделе диссертации описаны результаты исследований по формированию траектории рабочего инструмента и генерации программы движения робота-манипулятора по сформированной траектории, которые подтверждают второе положение, выносимое на защиту. Представлено теоретическое обоснование, описаны алгоритмы управления и результаты практического применения разработанных алгоритмов управления при отработке технологических решений на опытном производственном роботизированном участке, приведены результаты производственных испытаний обработанных по новой технологии изделий.

В заключительном разделе диссертации приводится перечень основных результатов и выводов диссертационного исследования, исходя из которых положения, выносимые на защиту, были подтверждены, дается оценка научной новизны и практической значимости исследования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и копия акта производственных испытаний приводятся в приложениях.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО 3D СКАНИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Промышленный робот-манипулятор относится к классу робототехнических устройств, способных самостоятельно и с высокой точностью выполнять в их рабочем пространстве широкий спектр технологических операций [1, 2]. Производители роботов-манипуляторов стремятся обеспечить их универсальность, отсюда вытекает проблема управления роботом при выполнении специфических технологических операций, а именно: приходится выбирать ориентацию рабочего инструмента, планировать траекторию, а затем обеспечивать управление с учетом изменяющихся скоростей и ускорений при прохождении выбранной траектории. Эти задачи управления роботом достаточно сложны, даже если вид выполняемой операции или траектория заранее известны, если же их приходится решать в изменяющихся или в неизвестных заранее условиях, то решения требуются весьма нетривиальные. Таким образом, несмотря на то, что роботы собственно и задумывались, чтобы самостоятельно функционировать именно в таких неопределенных условиях, задачи управления роботами до сих пор активно исследуются и решаются.

Исследования в области интеллектуального управления, а также изучение разработок по методам синтеза и анализа, средств автоматизации и систем управления дают возможность создания нового поколения техники. Создание интеллектуальных систем способствует открытию широких перспектив построения, в нашем случае, современных робототехнических систем [3]. В современных литературных источниках, таких как [4,5,6], отмечается, что интеллектуальные системы и технологии являются основой интеллектуального управления. Сама же интеллектуальная система (ИС) представляет собой техническую или программно-техническую систему. Интеллектуальная система (ИС) управления – это автоматизированная система, включающая комплекс программных и логико-математических средств, позволяющих реализовать управление на основе информации о текущем состоянии внешней среды [7]. Как было упомянуто выше, создание ИС дает возможность построить робототехническую систему, способную самостоятельно выполнять технологические операции, в частности, технологические операции по плазменной обработке и/или плазменной резке крупногабаритных изделий сложной формы и операции 3D сканирования объектов.

Мотивацией к разработке интеллектуальной роботизированной системы плазменной обработки и резки изделий, выполняющей последовательно операции 3D сканирования обрабатываемого объекта, восстановления формы поверхности объекта по облаку точек, а затем генерирующей движение робота-манипулятора вдоль воссозданной траектории для реализации операций плазменной резки либо плазменной обработки поверхности, послужили, во-первых, анализ научной проблемы использования роботов-манипуляторов в

качестве основного компонента системы сканирования и желание предложить новое решение; во-вторых, анализ проблем, которые были выявлены нами при работе с промышленным роботом-манипулятором Kawasaki (конкретно при напылении покрытий микроплазмотроном на поверхности изделий сложной формы или при упрочняющей плазменной обработке таких поверхностей, как описано в работах [8-11]); в-третьих, желание расширить круг задач и технологических операций, выполняемых с применением роботов-манипуляторов.

В данной главе последовательно будут рассмотрены вопросы применения роботов-манипуляторов в системах 3D- сканирования и для реализации плазменного напыления покрытий и плазменной резки, будут описаны технологические процессы термического плазменного напыления покрытий и плазменной резки с обоснованием основных контролируемых параметров при управлении данными процессами. В конце главы будет сделана постановка цели и задач исследования, с обоснованием выбора основных методов исследования и основного экспериментального оборудования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

1.1 Анализ существующих систем и методов роботизированного 3D сканирования и воссоздания 3D модели поверхности объекта

Среди подзадач, на которые разбивается задача создания роботизированной системы 3D сканирования технически наиболее сложной является проблема синхронизации измерений и перемещений робота-манипулятора. Как мы указали в нашей статье [12], задачу управления движением роботизированной системы можно разбить на две основные части: планирование движения и его исполнение во времени, при этом первую задачу выполняет компьютер, к которому поступают указания от человека-оператора, а вторую задачу решает контроллер движения, который рассчитывает и выдает сигнал на исполнительные приводы.

Ряд недавних научных публикаций [13–16] посвящен решению проблемы управления движением манипулятора с использованием встроенного датчика силы / крутящего момента (гибкого контроллера) [13, р.44], с использованием кинематического управления со встроенным ПИ-регулятором [14, р.429], с исследованием электромеханической и электрической постоянной времени двигателей скорости вращения промышленного робота для планирования траектории [15, р.560] и с использованием адаптивного контроллера слежения [16, р.4]. Каждый из перечисленных методов обладает своими достоинствами, однако, проблема управления и планирования траектории робота-манипулятора требует дополнительного изучения, так как при использовании каждого из предложенных методов остаются нерешенными проблемы согласованной работы всех систем позиционирования робота.

Следующей подзадачей создания роботизированной системы 3D сканирования является сканирование поверхности, предшествующее технологическим операциям плазменной резки или плазменного напыления.

Сканирование реализуется путем последовательного просмотра исследуемой поверхности и анализа результатов этого просмотра. Если на основании анализа результатов сканирования выполняется трехмерная реконструкция поверхности и (или) измерение формы объекта, или других его визуальных свойств, то такое сканирование называется 3D-сканированием [17-21]. Трехмерное (3D) воссоздание формы объекта является очень важной темой, включенной во многие области науки и промышленности, в том числе в создание и контроль продукции, 3D моделирование для стереофильмов, наблюдение за безопасностью, медицинскую визуализацию, взаимодействие человека с компьютером и пр. Для этого широкого спектра применений были разработаны многочисленные методы воссоздания трехмерной формы объекта, которые были обобщены в работах Curless и Seitz [22], разработавших таксономию по методам получения трехмерной формы объекта.

Методы 3D сканирования классифицируются как контактные и бесконтактные. Второй метод можно, в свою очередь, классифицировать как активный метод и пассивный. По систематизации Curless и Seitz [22, p.11] первый метод имеет преимущества при непосредственном сканировании и воссоздании формы жестких объектов, однако приводят к искажению формы мягких объектов, таких, например, как человеческий палец, и являются инвазивными. Для реализации большинства бесконтактных методов требуется применение специального и дорогостоящего оборудования. Эти методы подходят для дистанционного измерения крупномасштабных сцен. В основном для бесконтактных оптических методов используются алгоритмы восстановления формы поверхности по данным только одного источника информации (за исключением стерео-зрения), что математически создает проблему неоднозначности воспроизведения 3-D картины, поэтому в настоящее время такие методы находятся только на стадии исследования. Стереозрение решает теоретическую проблему отсутствия достаточного количества видов, чтобы воссоздать 3-D картину без неоднозначности, но неопределенности все еще возникают в зависимости от сцены. Из бесконтактных оптических активных методов методы, основанные на триангуляции, являются наиболее практически легко реализуемой технологией.

Контактный метод заключается в использовании так называемого сенсора, предназначенного для обводки объекта. Такое механическое устройство именуют щупом. Он делает замер точек в месте пересечения сетки, нанесенной изначально на объект, и результат выводит на ЭВМ. Далее, основываясь на этих точках, получают трёхмерную модель объекта [23]. Имеются такие минусы, как не распознаваемость текстур, к тому же обработка большого предмета становится трудоемкой.

Использование устройств контактного метода позволяет получить облако точек с помощью сканирования поверхности. Технология эта далека от идеала и имеет следующие недостатки: невысокую скорость сканирования и невозможность (чаще всего) сканирования малых отверстий. Преимуществами таких систем являются – высокая степень контроля самого процесса оцифровки оператором и низкая стоимость измерительного оборудования.

Под бесконтактным методом предполагают применение стереобинокулярных систем и технологии структурированного света, а также лазерное и рентгеновское сканирование [23, с. 19]. Наиболее точным методом сканирования при пассивном сборе трехмерных данных является Stereo Vision (стереозрение). В технике стереозрения оптическая триангуляция устанавливается между целевым объектом и массивом камер. В методах стереозрения трехмерная реконструкция целевого объекта достигается путем нахождения соответствия между изображениями, просматриваемыми с двух или более точек зрения. Однако главная проблема, связанная со стереозрением, связана с соответствием признаков. Эта проблема соответствия в технике стереозрения решается с помощью активных методов воссоздания изображения [24], но очень сильно зависит от объекта и его отличительных признаков.

В работе Kazuyuki Miyazawa и Takafumi Aoki [25] описывается 3D система сканирования, которая использует метод стереозрения на базе роботоманипулятора, применимый для сканирования тела человека. Данная 3D система сканирования применяет активные 3D методы измерения. К таковым методам отнесли систему структурированного света или так называемое, лазерное сканирование, которое, отметим, нежелательно в системах, применяемых для сканирования человека. Главной проблемой использования данного стереозрения для 3D измерения является его низкая точность. Основываясь на этом, авторы [25, р. 306] создали систему «eye-in-hand» на основе стереозрения, где использовалась техника согласования изображений на основе фазы.

Сtereo бинокулярный метод сканирования представлен в работе [26], где описывается робототехническая система с возможностями 3D-Vision (зрения). Данный метод вычисляет координаты способом, подобным способу, используемому человеческим мозгом. Трехмерная бинокулярная система стереозрения использует две камеры, которые снимают изображения одной сцены из разных положений, а затем вычисляют 3D-координаты для каждого пикселя, сравнивая смещение между двумя изображениями. Основная идея такой системы заключается в поиске соответствия между двумя изображениями, которое используют для оценки различий (различия в локациях изображения объекта, записанного двумя камерами). Используя методы геометрии и алгебры, точки, которые появились в 2D-стерео изображениях, могут быть отображены как координаты в 3D-пространстве.

В работе [27] рассматриваются различные стратегии бесконтактного трехмерного измерения и представлена модель для воссоздания формы деталей сложной геометрии, которыми манипулируют с помощью руки робота, используя новую систему машинного зрения, состоящую из лазерного триангуляционного датчика и моторизованной линейной ступени. В статье [27, с. 94] описана геометрическая модель, включающая простой модуль для повышения долгосрочной стабильности измерений. Новый метод, используемый в автоматическом модуле, позволяет настроить датчик, включая линейную механизированную ступень, для сканирования без использования внешних измерительных устройств. В данной модели робот представляет собой

просто устройство для позиционирования деталей с высокой повторяемостью. Его данные о положении и ориентации не используются для измерения, и поэтому он не является активным компонентом в модели. Функция робота состоит в том, чтобы представить различные поверхности заготовки в диапазоне измерений системы обзора, которая отвечает за воссоздание формы объекта. Таким образом, на всю систему не влияют собственные ошибки робота в выборе и прохождении траектории, за исключением тех, которые связаны с отсутствием статической повторяемости. Для косвенной связи между системой обзора и роботом, разработанной исходной модели требуется только одна первая деталь, измеряемая как «ноль» или мастер-деталь, известная точным измерением, например, с помощью координатно-измерительной машины.

В 2008 году в статье Borangiu T., Dumitrache A. [26, p. 506] был описан эксперимент (см. рисунок 1.1) по интеграции бинокулярной системы стереозрения с промышленным роботом, где 3D-реконструкция выполняется по следующей цепочке: сканирование с помощью сканера – получение облака точек – карта глубины, полученная из облака точек – полная 3D-модель.

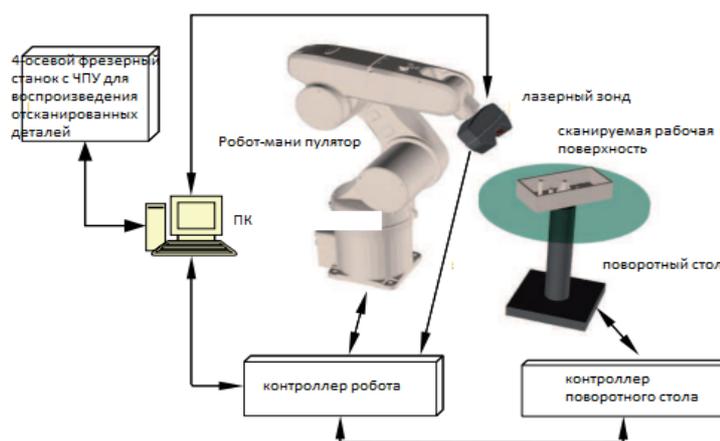


Рисунок 1.1 – Бинокулярная система стереозрения с роботом-манипулятором

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [26, p. 506]

В статье Bellandi P. и др. [28] описывается система Roboscan, aRobotcell, которая объединяет 2D и 3D зрение в одном простом устройстве, чтобы помочь роботу-манипулятору в операциях захвата и размещения детали. Оптическая головка Roboscan объединяет две системы зрения: камера используется «автономно» в 2D-системе и объединяется с лазерным щелевым проектором в 3D-системе, которая работает в режиме триангуляции. 2D-система с использованием подходящих библиотек предоставляет предварительную 2D-информацию в 3D-систему для быстрого, гибкого и надежного выполнения сегментации и подгонки облака точек. Roboscan устанавливается на антропоморфный робот-манипулятор Mover6 6DOF (6 degree of freedom) Robot Arm (RobotShop, US). Наиболее инновационная часть системы представлена

использованием надежного двумерного геометрического сопоставления с шаблоном в качестве средства классификации трехмерных объектов. Таким образом, авторы избегали трудоемкой сегментации трехмерного облака точек и классификации трехмерных объектов, используя только трехмерные данные для оценки положения и ориентации захвата робота.

В статье Canduo, Sh. и др. [29] представлена роботизированная система (см. рисунок 1.2) для измерения поверхности, которая была разработана по принципу «Сканер+Робот+Заготовка». Суть данной системы заключается в выполнении трех подсистем: подсистемы 3D-лазерного сканирования, подсистемы обработки данных и подсистемы реконструкции. Сама процедура измерения поверхности начинается с захвата роботом 3D-лазерного сканера, а заготовка закрепляется на регуляторе положения. В соответствии с типом заготовки, центральный компьютер отправляет команду контроллеру робота для выполнения специальной программы сканирования, которая состоит из преобразованных кодов из серии линий, выполняемых 3D-лазерным сканером во время сканирования поверхности заготовки, и, следовательно, она активирует робот-манипулятор вместе со сканером, перемещающимся, чтобы получить все точки сканирования. Результаты измерений постепенно передаются в центральную память компьютера и визуализируются на мониторе как трехмерное изображение сканируемой поверхности. В результате реализации данной технологии были получены трехмерные координаты поверхности заготовки, отработаны данные «облака точек», включая расположение линий сканирования, фильтр точек шума, уменьшение данных, и получена модель с помощью прямой триангуляции и соединения («сшивания») изогнутой поверхности. Это основная рабочая теория системы восстановления (моделирования) поверхности, основанной на работе.

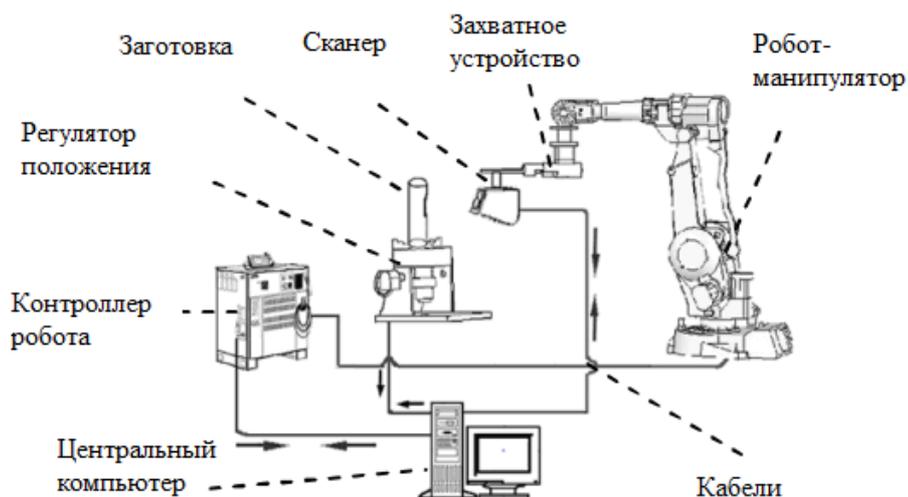


Рисунок 1.2 – Роботизированная система сканирования и восстановления (моделирования) поверхности

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [30]

В 2011 году в статье Rossi S. и др. [31] была предложена роботизированная система с возможностями системы машинного зрения: система машинного зрения представляет собой лазерный сканер, состоящий из камеры и линейного лазерного проектора (рисунок 1.3), робот имеет 3 оси сканирования. Свет излучается лазерным модулем на фиксированной длине волны, равной 635 нм, а также используется оптический полосовой фильтр, центрированный на длине волны лазера. Соответственно, система может лучше наблюдать лазерный луч и сделать операцию обнаружения края более простой и надежной. Сканер сканирует 3D – поверхность, данные конвертируются в облако точек в рабочем пространстве робота. По данным облака точек вычисляются конечные эффекторные траектории, используемые для репликации сканированной поверхности. Был разработан и успешно протестирован алгоритм интерполяции траекторий и планирования траекторий [31, p.5]. Поскольку лазерный сканер связан с роботом, можно использовать координаты суставов робота, для того, чтобы определить положение и ориентацию окна сканирования в системе отсчета робота, и, таким образом, в рабочем пространстве. С помощью матрицы Денавита-Хартенберга можно определить в базовом фрейме робота координаты точек, полученных путем триангуляции между камерой и лазерным модулем. Лазерный сканер захватывает контуры поверхности объекта. Во время процедуры сканирования лазерный сканер перемещается роботом для захвата изображений профиля объекта из разных положений и ориентаций в зависимости от формы объекта. Авторами [31, p.6] было разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом, которое позволяет пользователю легко использовать систему.

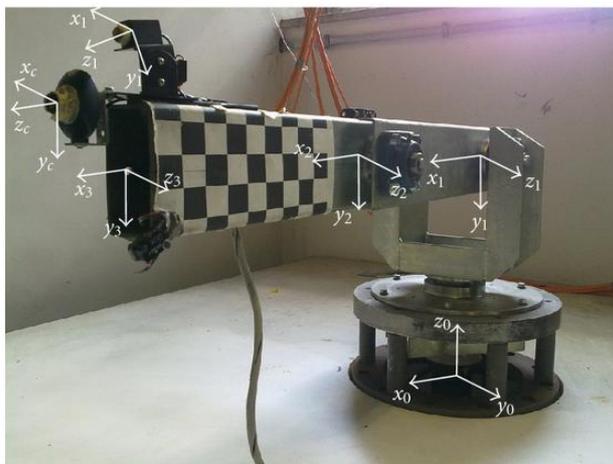


Рисунок 1.3 - Рука робота и система координат

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [31, p.2]

В статье Mikołajczyk T. [32] описывается робот, оснащенный инструментом для обработки поверхности. Система 3D-сканирования была разработана на основе синтеза координат поверхности и связана с

видеооптическим сканером. Был использован красный лазер (длина волны 660 нм) с плоской системой потока, который генерирует профиль поверхности. Результаты работы показали возможность оснащения робота собственным устройством сканирования поверхности с использованием недорогой USB-камеры. Первоначально была проверена точность системы считывания координат поверхности. При сканировании получают так называемое «облако точек», которое должно быть отправлено в САПР.

Чтобы 3D-сканировать и распознать поверхность неизвестного объекта, в работе Не F.V. и др. [33] предложен двухэтапный метод сканирования поверхности, включающий в себя грубое сканирование и специальное сканирование. Идея заключается в получении общей трехмерной информации о поверхности, что значительно бы сократило бы время сканирования. Эта идея также используется в исследовании Астапенко, Кошекова и др. [34], где предлагается методика организации автоматического бесконтактного получения трёхмерных координат точек поверхности. Затем производится анализ и определение недостающих областей [33, р.34]. Если все-таки обнаруживаются недостающие области, то проводят подробное специальное сканирование. Система сканирования показана на рисунке 1.4, отмечается, что в первом грубом сканировании общий контур поверхности был получен как данные облака точек, а недостающие области определены с использованием метода длины хорды.

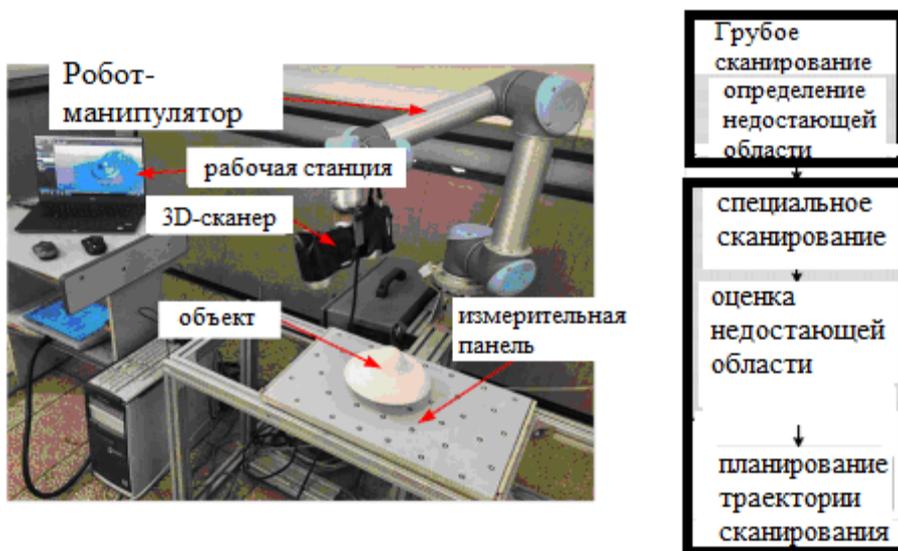


Рисунок 1.4 – Система сканирования на базе робота-манипулятора

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [33, р. 36]

По первичным результатам сканирования, а именно по форме их представления, методы сканирования принято делить на точечные методы сканирования (первичные данные в виде «облака точек») и профильные (первичные данные в виде профилей сканируемой поверхности).

Изучение публикаций [18, p.26; 19, p.13; 20, p. 802; 21, p.60; 26, p.507; 35-40], посвященных разработкам роботизированных систем 3D-сканирования, позволяет прийти к заключению, что методы второй группы применяются чаще. Необходимо отметить, что подход, примененный в работе [26, p.505], представляет собой исключение из отмеченной тенденции.

Лазерное сканирование имеет определенные преимущества по сравнению с другими методами сканирования, потому что, во-первых, позволяет избежать механического контакта со сканируемым объектом; во-вторых, позволяет сканировать мелкие рельефы за счет весьма малого размера измеряющей лазерной точки. Сканирование можно выполнять с таким шагом, который мы задаем в зависимости от необходимой степени проработки рельефа поверхности. Следовательно, использование лазера позволяет выполнить сканирование таких объектов, которые невозможно отсканировать никакими другими методами, а само лазерное сканирование - это мощный вспомогательный инструмент для решения задач 3D-моделирования. В процессе лазерного 3D-сканирования реализуется систематическое определение координат точек поверхностей физических объектов (в том числе деталей сложной формы или так называемых «сложнопрофильных объектов»). Это делается для создания и модификации средствами САПР их математических моделей, при этом сначала поверхность объекта отображается в виде «облака точек», которое затем как бы «накрывается» воспроизводящей сканируемую поверхность с определенной точностью аппроксимирующей поверхностью [41].

Условно бесконтактные сканеры делят на лазерные и оптические. Лазерный сканер представляет собой бесконтактную измерительную систему, которая использует контролируемое управление лазерным лучом с последующим измерением расстояния, чтобы построить профиль сцены в поле зрения устройства [42, 43]. Одним из основных недостатков конструкции лазерного сканера является система механического позиционирования, из-за которой процесс сканирования занимает много времени [44]. Выходные данные лазерного сканера представляют собой набор расстояний между сканером и ближайшим объектом под соответствующим углом обзора. Основной лазерный сканер включает лазерный дальномер. Его лазерный луч отражается (с измерением расстояния вращения) от вращающегося зеркала с заданными интервалами угла.

Существует много типов лазерных сканеров, имеющих существенные различия между собой. Известно, что принцип измерения существенно влияет на конечные параметры лазерного сканера, но наиболее важными параметрами, которые следует учитывать при выборе наилучшего подходящего продукта, являются:

- диапазон измерения - минимальное и максимальное расстояние от сканера до объекта, который можно измерить;
- поле зрения - угловая ширина обзора. Вместе с диапазоном измерения определяет рабочую зону;

- угловое разрешение - наименьшая угловая разница между двумя измеренными точками. Определяет плотность полученных точек и, следовательно, влияет на минимальное расстояние между двумя измеренными точками;

- частота сканирования - частота обновления значения точки. Определяет, сколько измерений расстояния до одной точки выполняется каждую секунду. Обычно зависит от поля зрения и углового разрешения;

- разрешение и точность - разрешение определяют минимальную разницу между двумя расстояниями, которые заметны сканером и точность, определяются как площадь вокруг измеренной величины, в которой производитель заявляет, что истинное значение находится точно;

- интерфейс данных - важный параметр, который определяет, как данные могут передаваться от измерительного устройства к обрабатывающему устройству. Влияет на возможные приложения сканера;

- вес - важно в случаях, когда сканеры размещаются в некоторых местах, где максимальная нагрузка ограничена; в нашем случае на руку робота-манипулятора.

Выводы по подразделу 1.1

Суммируя, можно сказать, что для создания системы сканирования в большинстве рассмотренных разработок используются робот-манипулятор и сканер. Эти два оборудования образуют целую систему 3D-сканирования. 3D-сканером является устройство, которое «оценивает» объект или среду реального мира для сбора информации по определенным критериям, а затем на основе полученной информации создает цифровую трехмерную модель объекта. Если информация о цвете собирается в каждой точке, то также могут быть определены цвета на поверхности объекта. Созданная 3D-сканером, «картинка» несет информацию о расстоянии до поверхности для каждой точки трехмерного объекта сканирования. Следует отметить высокую стоимость рассмотренных систем сканирования. Другим недостатком является сложность обработки полученных от этих систем данных и приведения информации к требуемому виду.

Цель 3D-сканирования - это, как правило, создание 3D-модели. Эта трехмерная модель состоит из облака точек - координат поверхности объекта. Эти точки затем могут быть использованы для экстраполяции формы объекта (процесс называется реконструкцией). Реконструкция поверхности, как правило, включает процесс сегментации. Сегментация - это разбиение сложной поверхности на геометрически однородные области с простым аналитическим описанием. Для успешного использования облака точек при создании 3D-модели, сначала должна быть выполнена сегментация. Сегментация необходима для определения геометрически однородных участков поверхности и опорных точек в пределах области, в которой будет выполняться точечное сканирование. Наибольшую трудность при построении адекватной аналитической 3D-модели представляет поверхность с резкими перегибами. Это связано с тем, что методики сегментации хорошо разработаны в основном для аппроксимации гладкой поверхности. Таким образом, решение задачи

сегментации поверхности является актуальным для 3D- сканирования, чтобы можно было сканировать и анализировать все типы поверхностей.

На основании вышеописанного литературного обзора по современным методам 3D-сканирования и из практических соображений, для реализации диссертационного исследования был выбран бинокулярный триангуляционный лазерный датчик. Он относительно дешевый, при этом обеспечивает высокую точность измерения расстояния до контролируемого объекта без механического контакта с ним. Триангуляционные датчики расстояния незаменимы в задачах, требующих высокоточного измерения расстояния до объекта, как в статике, так и в динамике. Однако, лазерные триангуляционные датчики расстояния, в целом, как класс приборов, при достаточно высокой точности измерений отличаются высокой степенью зашумленности показаний. Этот факт, необходимо учитывать как при проектировании системы сбора данных, так и при разработке верхнего уровня программного обеспечения.

Анализ работ в области обработки данных лазерного сканирования [27, p.96; 28, p. 1875; 30, p.237; 31, p.2; 37, p.664; 38, p.1237; 39, p.157; 40, p.571; 42, p.3; 43, p.303; 44, p.91] позволяет однозначно утверждать, что, во-первых, статистическая обработка и (или) фильтрация данных должна закладываться еще на уровне проектирования алгоритмов обработки данных сканирования. Во-вторых, что особенности геометрического строения деталей подвергаемых сканированию (наличие острых гранений и сочленений) делают практически необходимым проведение процедуры сегментации в ходе процесса восстановления поверхности.

1.2 Технологические процессы термического плазменного напыления покрытий и плазменной резки, основные контролируемые параметры при управлении данными процессами

В настоящее время методы плазменной резки и способы газотермического напыления покрытий, такие как плазменное напыление, напыление пламенем горения, пламенно-дуговое напыление, высокоскоростное газопламенное напыление в кислородной струе и др. активно развиваются во всем мире [45, 46]. Как отмечается в работе [46, p.80], правильно нанесенные газотермические покрытия имеют множество применений и ряд преимуществ перед покрытиями, полученными конкурирующими методами, а именно, позволяют наносить в виде покрытий широкий диапазон материалов, в том числе металлы, сплавы, керамику, пластмассы и композитные структуры, состоящие из металлов, керамики и пластмасс, а также обеспечивают широкий диапазон толщин покрытий: от десятков микрон, до нескольких миллиметров. Газотермические покрытия эффективно повышают износостойкость и коррозионную стойкость поверхности, а также ее устойчивость к окислению и коррозии при высоких температурах. В то же время оборудование для плазменной резки и термического напыления относительно дешево по сравнению с конкурирующими процессами резки и напыления покрытий и в ряде случаев может быть сделано в мобильном варианте. Процесс обработки поверхности

удешевляется за счет высоких скоростей осаждения материала покрытия на подложку (нормальная практика - от 2 до 7 кг/ч). Весьма существенно, что термическое напыление является относительно «холодным» процессом, и подложки обычно не нагреваются выше 65°C, что обеспечивает их минимальную термическую деградацию [46, р.76].

На рисунке 1.5 показана схематически картина формирования газотермического покрытия из расплавляемых в пламени источника (горелки либо плазмотрона) частиц, отрываемых от прутка (проволоки) или засыпаемых в это пламя частиц порошка по данным работы [46, р.78]. В продуваемой струе инертного газа, например, аргона, который служит и защитным и плазмообразующим газом, отдельные частицы движутся с ускорением по направлению к подложке, достигая ее в частично или полностью расплавленном состоянии (зависит от условий напыления), ударяются об нее, деформируются и формируют послойно покрытие.



Рисунок 1.5 - Схема формирования газотермического покрытия

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [46, р.78]

Как отмечается рядом исследователей [45, p.203; 46, p.80; 47-49], основными недостатками покрытий, полученных газотермическими методами, является их повышенная пористость и не всегда хорошая адгезия с подложкой. Пористость иногда может быть полезной, как в случаях с удержанием масла на поверхностях подшипников, для химически активных структур, таких как батареи, для обеспечения надежной фиксации ортопедических имплантатов в кости за счет прорастания в поры костной ткани и т. д, однако в этом случае она должна быть контролируемой.

Покрытия, получаемые путем термического напыления, как правило, содержат много дефектов. Основное влияние на количество и распределение дефектов оказывает дистанция напыления. Важно, как сильно нагрета частица, с какой скоростью она движется и какое расстояние проходит от источника до удара о подложку. Разбрызгивание расплавленных частиц во время сплющивания при ударе может существенно повлиять на свойства покрытия [50]. Геометрия подложки может влиять на поток ударяющихся и разбрызгиваемых частиц [51]. Поры, часто называемые шаровидными, образуются при формировании покрытия из-за теневого эффекта, они формируются в не полностью заполненных узких отверстиях в промежутках между нерасплавленными или частично расплавленными частицами. Эти шаровидные поры распределяются более или менее равномерно по всему покрытию и их потенциал к изменению свойств покрытия пропорционален их размеру [52]. Следовательно, для уменьшения пористости покрытия, следует избегать включения в покрытие больших нерасплавленных частиц, которые достаточно разогреты, чтобы пристать к подложке, или частично расплавленных частиц. Это можно сделать, тщательно выбрав гранулометрический состав частиц и оптимизируя их впрыск.

Тем не менее, иногда приходится находить компромисс между тем, чтобы получить большее количество полностью расплавленных частиц, но с довольно высоким содержанием оксида, или больше нерасплавленных частиц с более низким содержанием оксида. Покрытия также содержат трещины, образовавшиеся во время уменьшения остаточного напряжения и которые часто способствуют открытой пористости покрытий. Микро-трещины появляются в результате резкого снижения напряжения и наблюдаются у керамических материалов. Макро-трещины часто являются следствием релаксации нагрузки рассогласования расширения; они имеют тенденцию вызывать взаимосвязанную пористость. Могут произойти снижения других напряжений, но их можно избежать путем оптимизации условий нанесения покрытия.

Наконец, еще одним источником дефектов является угол напыления, если покрытие напыляется под некоторым углом, не строго перпендикулярно обрабатываемой поверхности, то это снижает нормальную скорость удара частицы, приводя к получению вытянутых сплатов (единичных деформированных при ударе частиц покрытия). Распыление с углом выше определенного значения, в зависимости от материалов частицы и подложки, будет способствовать разбрызгиванию даже на подложках, предварительно

нагретых выше так называемой «температуры перехода». Рисунок 1.6 схематично иллюстрирует структуру термически напыленного покрытия.

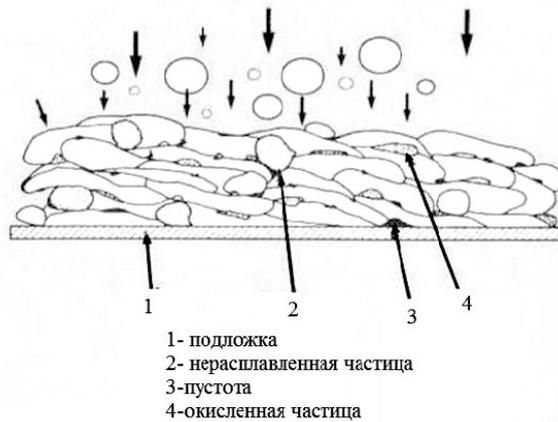


Рисунок 1.6 - Схема поперечного сечения термически нанесенного покрытия

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [50, р. 178]

Если угол падения плазменной струи отклоняется от нормали к поверхности, то качество покрытия может ухудшиться [45, р. 204; 46, р. 80], что демонстрирует рисунок 1.7.

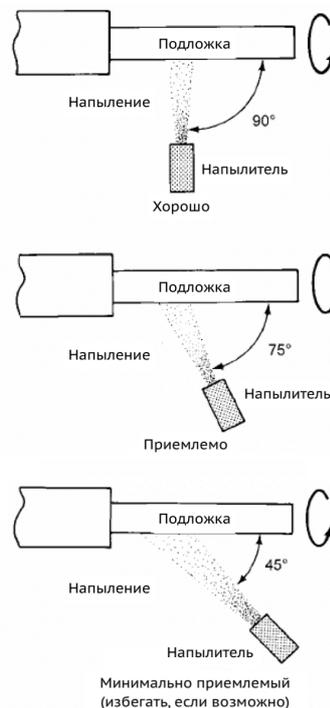


Рисунок 1.7 - Схема, демонстрирующая приемлемый угол напыления покрытия на цилиндрическую подложку, вращаемую электродвигателем вокруг оси симметрии цилиндра

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [45, р. 204]

Проведение нескольких последовательных технологических процессов необходимо для получения оптимальных покрытий методами термического напыления [46, p. 81; 47, p.502; 48, p.5; 49, p.1]. Ряд покрытий требуют дополнительной термообработки или их уплотнения после нанесения.

Таким образом, обобщая результаты, представленные в работах [45, p. 205; 46, p. 82; 47, p.504; 48, p.2; 49, p.2], можно сказать, что технологии газотермического напыления включают подбор и использование оборудования (плазмотроны, источники питания, манипуляторы и т. д.), материалов (порошки, проволока или прутки), а также техническое и технологическое ноу-хау (опыт). Только тогда, когда все эти ключевые компоненты технологии используются правильно, можно получить хорошее покрытие с контролируемой структурой и хорошей адгезией.

Следует отметить, что микроструктурная однородность, воспроизводимость процесса и точные допуски на размеры – это неотъемлемые требования в производстве покрытий. Нанесение покрытий четкой формы и высокой точности размеров важно для экономической эффективности, особенно в случае твердых покрытий, требующих механической обработки и отделки. Движение (траектория) и скорость плазменного источника, управляемого роботом, играют важную роль, особенно для покрытий на изделиях со сложной 3D геометрией. Эти параметры влияют на конечные характеристики покрытия: толщину, шероховатость, адгезию, пористость, распределение температурных напряжений и др. Таким образом, обязательно разрабатывать инструментальные средства программного обеспечения для генерации, моделирования и осуществления движения (положение и ориентация) плазменного источника [53].

Одним из основных методов газотермического нанесения покрытий является плазменное напыление. Наиболее часто для этой цели используются плазмотроны, генерирующие турбулентную плазменную струю с электрической мощностью до 200 кВт и диаметром пятна напыляемого материала 15...30 мм. Применение таких плазмотронов для напыления деталей малых размеров или тонкостенных деталей может привести к их перегреву и короблению в виду высокой тепловой мощности плазменной струи. Кроме того, в случае напыления малоразмерных деталей или локальных участков поверхности (5...10 мм и менее) возникают большие потери напыляемого материала и требуются дополнительные операции по маскированию участков, не подлежащих напылению. Эти обстоятельства привели к разработке ИЭС им. Е.О. Патона нового способа газотермического нанесения покрытий – микроплазменного напыления (МПН) [54, 55]. МПН, в частности, характеризуется малым диаметром пятна напыления (1 ... 8 мм) и малой (до 2 кВт) мощностью плазмы, что обеспечивает низкую скорость поступления тепла в обрабатываемое плазмой изделие [54, p.336; 55, p.54; 56, 57]. Таким образом, МПН может применяться для прецизионного нанесения покрытий на мелкие детали. Особенностью процесса микроплазменного напыления является также возможность нанесения покрытий при ламинарном режиме истечения струи с использованием в качестве плазмообразующего газа чистого аргона. В качестве

исходных материалов для напыления могут использоваться как порошки, так и проволоки.

При осуществлении процессов воздушно-плазменной резки используются плазморезы, в которых при подаче электрического питания возбуждается так называемая «дежурная» электрическая дуга. При подаче сжатого воздуха из компрессора и подключения кабеля массы с положительным зарядом к изделию, дуга замыкается на материале изделия и становится так называемой «режущей» дугой. Таким образом, при использовании плазмореза образуется плазма температурой около 20 000 °С, которой осуществляется резка. Эта плазма обладает не только высокой температурой, но и повышенной скоростью истечения (около 1500 м/с), что обеспечивает чистый рез с узкой кромкой и минимальным шлаком на обратной стороне изделия, которое режут. Очевидно, по самому физическому принципу действия плазменной резки, что параметры реза (отреза) будут зависеть от материала разрезаемого изделия и от расстояния от сопла плазмореза до поверхности изделия, от угла падения плазмы на поверхность изделия и от скорости перемещения плазмореза вдоль поверхности изделия. Таким образом, контролируемыми параметрами при роботизированной плазменной резке выступают расстояние от поверхности (т.е. высота на которой плазмотрон находится по отношению к изделию), скорость перемещения вдоль поверхности изделия и угол падения плазмы (рекомендуется строго вертикальное падение).

Выводы по подразделу 1.2 Анализ технологических процессов роботизированного плазменного напыления и резки покрытий, показал, что основными управляемыми с помощью робота-манипулятора параметрами являются: расстояние от плазменного источника до обрабатываемой поверхности и скорость движения плазменного источника и угол, под которым плазменная струя попадает на поверхность (оптимальным является перпендикулярное положение подложки к потоку плазмы). От выбора и контроля данных параметров зависит качество плазменной резки: глубина, ширина разреза, степень оплавления краев и качество напыления: равномерность напыления, толщина покрытия, пористость покрытия, адгезия покрытия к подложке, температура нагрева покрытия и подложки.

Выводы по разделу 1

На основании проведенного в подразделе 1.1 анализа систем и методов трехмерного сканирования, был обоснован выбор типа бесконтактного датчика расстояния для проведения экспериментального исследования, а именно - бинокулярный триангуляционный лазерный датчик и отмечено, что необходима разработка процедура сегментации для восстановления 3D модели поверхности при сканировании изделий сложной формы (с гранями, сочленениями и т.п.).

На основе проделанного анализа технологических процессов роботизированного плазменного напыления и резки, с учетом актуальности применения промышленного робота для автоматизации технологических

процессов плазменной обработки и резки, была поставлена цель диссертационного исследования.

Целью работы является разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления промышленным роботом-манипулятором, позволяющей производить плазменную резку деталей сложной формы и/или обработку их поверхности плазмой по заданной 3D-модели изделия. Предварительное 3D-сканирование обрабатываемой поверхности и генерация программы движения по 3D-модели изделия осуществляется тем же роботом-манипулятором.

Для того чтобы достигнуть поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать схему системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботоманипуляторе и алгоритм процедуры сегментации поверхности с построением аналитической модели поверхности;
- разработать алгоритм формирования траектории рабочего инструмента робота-манипулятора и программное обеспечение, предназначенное для интерактивного взаимодействия с оператором робота;
- реализовать генерацию программы робота-манипулятора для его движения по сформированной траектории;
- провести производственное испытание обработанного с использованием разработанной интеллектуальной системы промышленного изделия.

Основными методами исследования выбраны: методы теории автоматического управления, математическое компьютерное моделирование, натурный эксперимент: тестирование методики сканирования на модельных объектах и реализация роботизированной плазменной обработки поверхности с перемещением руки робота-манипулятора по сгенерированной траектории с последующим исследованием структуры и свойств обработанных образцов и производственным испытанием промышленного изделия.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- 1) схема системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботоманипуляторе и алгоритм сегментации с построением аналитической модели поверхности;
- 2) автоматическое планирование траектории и генерация программы движения робота – манипулятора по спланированной траектории.

2 ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Оборудование эксперимента

Роботизированное плазменное напыление и резка проводилось в секторе высокоскоростной воздушно-плазменной резки и напыления <https://www.ektu.kz/divisions/veritas/rocptm/shsapcs.aspx>, оснащенном промышленным роботом-манипулятором Kawasaki (RS010L, Kawasaki Heavy Industries, Япония). Описание оборудования данного сектора приводится в нашей статье [58, с.9], где указывается, что на руку робота устанавливается либо плазморез из комплекта устройства для воздушно-плазменной резки «УВПр- 120», производства ООО «НПП Технотрон» (Россия) для работ по плазменной резке, как показано на рисунке 2.1а, либо микроплазматрон МПН-004, разработанный институтом электросварки им. Е.О. Патона (Киев, Украина) [59], для микроплазменного напыления (МПН) порошковых (см. рисунок 2.1б) или проволочных покрытий (см. рисунок 2.1 в). Массы крепящихся на руку робота устройств составляют, соответственно: 1,2 кг – масса микроплазматрона для МПН и 8,0 кг - масса плазмореза (плазмотрона) для плазменной резки.

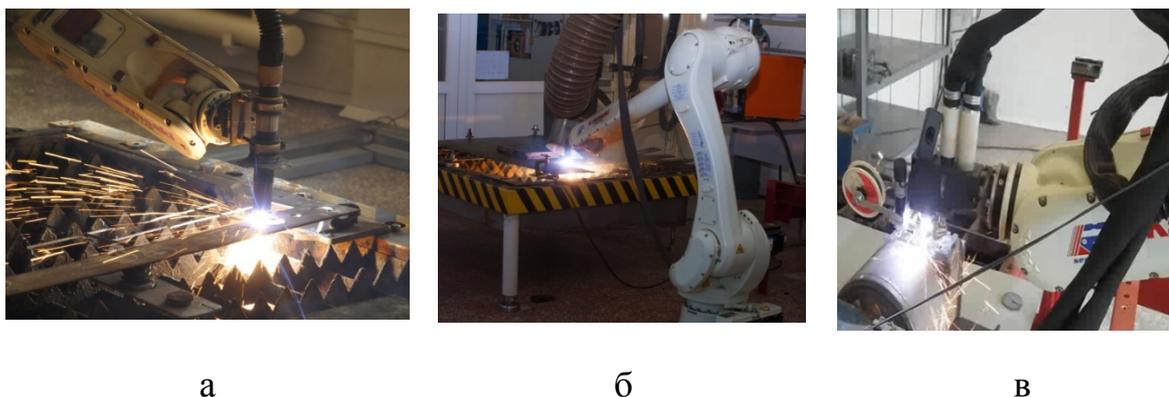


Рисунок 2.1– Оборудование сектора высокоскоростной воздушно-плазменной резки (а) и микроплазменного напыления порошков (б) и проволоч (в)

Скорость линейного перемещения плазмотрона по подложке была выбрана равной 50 мм/с. Выбор скорости плазмотрона основывался на предварительных оценках температуры подложки при воздействии плазменной струи, писанных в работах [60, 61]. Это было сделано для того, чтобы температура оставалась значительно ниже температуры плавления подложки. Аргон (Ar) использовался как плазмообразующий и транспортирующий газ в процессе МПН покрытий и для формирования плазменной дуги на плазмотроне при плазменной резке.

Использование робота-манипулятора позволяет точно напылять покрытия за счет равномерного перемещения плазмотрона с соблюдением заданного расстояния до поверхности (дистанции напыления), при движении манипулятора по заданной (сгенерированной) траектории.

Характеристики робота-манипулятора Kawasaki RS-010LA, как указано в нашей работе [62, с.83], следующие: точность позиционирования - 0,06 мм; максимальная линейная скорость - 13100 мм/с; рабочая зона- 1925 мм; рабочая грузоподъемность - 10 кг. Таким образом, позволительно устанавливать на руку робота-манипулятора как плазморез, так и микроплазматрон, использованные в данном исследовании.

Роботы Kawasaki управляются программным обеспечением AS (Advanced Superior) [63]. В системе AS язык AS используется для связи с роботом или для программирования, язык AS - это язык управления, разработанный специально для контроллеров роботов Kawasaki, управляемых программируемым контроллером E40F-A001. Использовали также оригинальное ПО [64], разработанное для робота KawasakiRS-010LA, позволяющее реализовать его движение с требуемой заданной скоростью по заданной траектории в плоскости. В частности, с использованием ПО [64] и разработанных нами алгоритмов управления промышленным роботом- манипулятором Kawasaki, описанных в статье [65], выполнялась плазменная резка прутков (разрезание) и листов проката титанового сплава (вырезание в плоскости) с использованием устройства воздушно-плазменной резки «УВПП- 120», с источником питания инверторным ДС 120П.33 производства ООО «НПП «Технотрон» (Россия).

В процессе роботизированных процессов плазменной резки при реализации управления движением робота по заданным сложным траекториям в плоскости, мы столкнулись с проблемами управления роботом-манипулятором, требующими решения на самых первых этапах разработки более сложной системы движения по заданным 3D- траекториям. Для решения этой задачи были разработаны соответствующие алгоритмы управления роботом - манипулятором, описанные в статье Шадрин Г.К. [66] и в нашей статье [65, р.197]. Был разработан комбинированный (с компенсацией возмущений) метод управления многоканальными линейными объектами общего вида в виде соответствующих алгоритмов для генерации элементов управления манипуляторами. Исходные уравнения объектов при применении этого метода выводятся в векторно-матричной форме. Уравнения алгоритма решаются путем алгебраических преобразований матриц математической модели объекта и систем отсчета. Общий метод синтеза алгоритма управления демонстрируется на примере объекта управления, соответствующим образом описывающего динамику (скорость) звена манипулятора уравнением первого порядка. Выполняется синтез алгоритма управления движением для однозвенного манипулятора с приводом, описываемым уравнением второго порядка. Управление движением двухзвенного манипулятора рассматривается с учетом динамики привода и показывается параметрическая устойчивость и соответствие поведения системы ее собственным эталонным фильтрам, как описано в нашей работе [65, р.198]. Структурная схема соответствующей системы управления представлена на рисунке 2.2, где ТОУ – технологический объект управления, $x_0 \in R^n$ – вектор переменных состояния; $y_0 \in R^m$ – вектор выходных переменных; $u \in R^m$ – вектор управляющих воздействий; $f_y \in R^m$ –

векторное возмущающее воздействие на выходные переменные; $f_x \in R^n$ – векторное возмущающее воздействие на переменные состояния.

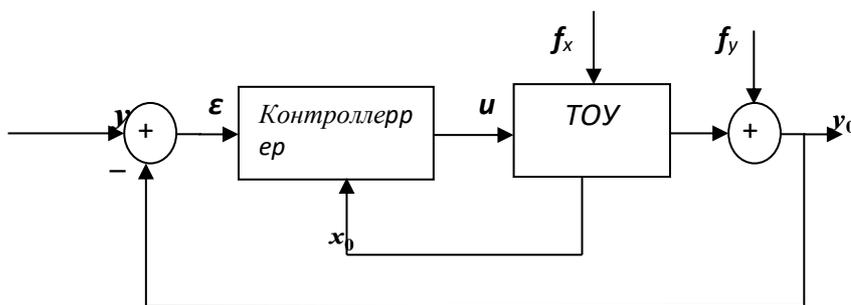


Рисунок 2.2 - Структурная схема системы управления роботом-манипулятором

Кратко описанный здесь и подробно описанный в нашей статье [65, р. 191] алгоритм управления и оригинальное ПО [64] были применены для реализации процессов микроплазменного напыления порошковых и плазменных покрытий на плоские образцы из титанового сплава и на эндопротезы тазобедренных и локтевых суставов, а также для плазменной резки с перемещением инструмента (плазмореза) в плоскости: разрезались прутки титанового сплава и вырезались из листа титанового сплава заготовки компонентов «ножки» эндопротеза тазобедренного сустава (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - Заготовка ножки эндопротеза тазобедренного сустава, вырезанная роботизированной плазменной резкой из листа титанового сплава

Разработанный и описанный выше и в нашей статье [65, р.193] алгоритм управления применялся также для реализации роботизированных процессов 3D сканирования. Для экспериментов по роботизированному сканированию поверхности использовалось оборудование, включающее 3 различных датчика расстояния и 1 видеокамеру, 2 типа преобразователей сигналов, техническая спецификация оборудования приводится в таблице 2.1.

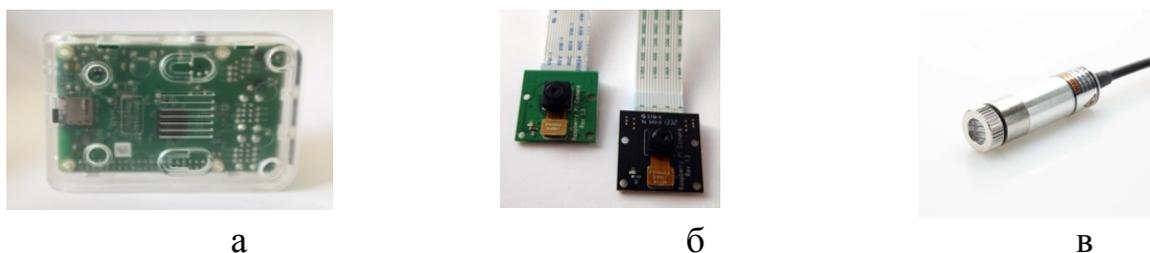
Таблица 2.1 - Техническая спецификация оборудования для сканирования

№	Наименование оборудования	Техническая характеристика
1	2	3
1	<p>Лазерный триангуляционный датчик расстояния ODSL 8/D4-400-S12 (Leuze electronic)</p> 	<p>Диапазон измерений 20 – 400 мм Разрешение не хуже 0.1 мм Длина волны источника излучения в диапазоне 560-580 нм (видимый красный свет) Размеры светового пятна не более 1×6 мм на расстоянии 400 мм Абсолютная погрешность измерений не хуже 1% на расстояниях до 200мм, не хуже 2% на расстояниях до 400мм Повторяемость (в процентах от измеряемой величины) не хуже 0.25% на расстояниях до 200мм, не хуже 1% на расстояниях до 400 мм Нелинейность не более 0.5 % Максимальная частота измерений не менее 200 Гц при этом время измерения не больше 5 мс Время отклика не более 20 мс Тип интерфейса цифровой RS485 Напряжение питания в диапазоне 18-30 В Максимальный потребляемый ток не более 100 мА</p>
2	<p>Лазерный триангуляционный датчик расстояния CD22-100-485M122 (Optex FA)</p> 	<p>Диапазон измерений 60-180 мм (120 +-60 мм) Разрешение не хуже 45 нм Длина волны источника излучения в диапазоне 560-580 нм (видимый красный свет) Размеры светового пятна не более 1.0×1.5 мм на расстоянии 180 мм Абсолютная погрешность измерений не хуже 1% на расстояниях до 200мм, не хуже 2% на расстояниях до 400мм Температурный дрейф (в процентах от полной шкалы на градус кельвина) не больше 0.1 %/К Нелинейность не более 0.3 % от полной шкалы Максимальная частота измерений не более 1 КГц (максимальная частота – измерений без осреднения) Время отклика (стандартное) не более 8.5 мс Тип интерфейса цифровой RS485/RS420 Напряжение питания в диапазоне 12 – 24 В Максимальный потребляемый ток не более 100 мА</p>
3	<p>Лазерный триангуляционный датчик расстояния CD33-120CN-422 (OptexFA)</p> 	<p>Диапазон измерений 50-150 мм (100 +-50 мм) Разрешение не хуже 0.1 мм Длина волны источника излучения в диапазоне 560-580 нм (видимый красный свет) Размеры светового пятна не более 600×700 мкм Погрешность измерений: повторяемость не хуже 20 мкм, Нелинейность (в процентах от полной шкалы измерений) не более 0.1 % Температурный дрейф (в процентах от полной шкалы на градус кельвина) не более 0.5 %/К Временные характеристики:</p>

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
		максимальная частота измерений не более 1 КГц, время оклика не более 4 мс. Тип интерфейса цифровой RS485. Напряжение питания в диапазоне 12 – 24 В +-10% Максимальный потребляемый ток не более 70 мА
4	Цифровая видеокамера машинного зрения с USB – интерфейсом Мако-U029В (Allied Vision)	Разрешение не хуже 640 X480 пикселей. Размер пикселя не более 3,0 x 3,0 мкм. Динамический диапазон не хуже 8 бит Частота кадров не менее 30 кадров/с Электрический интерфейс: Интерфейс: USB 3.0 Напряжение: USB в диапазоне 4.5-5.5 В. Ток не более 250 мА при 5В
5	Гальваноизолированный преобразователь сигналов RS-232 в сигналы RS-422/485 ADAM4520 (Advantech)	Интерфейсы RS232 - RS422/RS485 Разъемы DB9 – со стороны RS232. Клеммная колодка со стороны RS422/RS485 Автоматический контроль направления передачи данных - присутствует. Напряжение пробоя изоляции не менее 1000 В Допустимая скорость передачи данных не менее 38.4 кБод Напряжение питания в диапазоне 10 – 30 В. Потребляемая мощность не более 1 Вт при напряжении питания 24В. Монтаж - DIN – линейка
6	Гальваноизолированный преобразователь сигналов интерфейсов USB в RS485 /RS232EL204-1	Интерфейсы USB - RS232/RS485 Автоматическое определение направления передачи данных по RS485 –присутствует. Гальваническая изоляция интерфейса RS485 не менее 1000 В Питание в диапазоне 5В от порта USB

Часть экспериментального исследования по сканированию и распознаванию изображений проводилась в 2019 году в лаборатории Университета Обуда, Секешфехервар (Венгрия) с использованием одноплатного миниатюрного компьютера Raspberry Pi3 (см. рисунок 2.4). RaspberryPi использует мощный BCM2837, который предлагает 1,2 ГГц четырехъядерный процессор ARM Cortex-A53, 1 ГБ оперативной памяти. встроенный Wi-Fi 802.11n и Bluetooth 4.1. Данный процессор имеет архитектуру ARMv53, позволяющую использование различных операционных систем, как Fedora Remix, Ubuntu Mate, Debian Wheezy, а также MS Windows 10 IoT. Использовался компактный модуль с инфракрасной камерой для Raspberry Pi. Вторая версия модуля оснащена 8-ми мегапиксельным сенсором Sony IMX219 Exmor. Он позволяет захватывать, записывать и транслировать видео в форматах 1080p, 720p и VGA. Максимальное разрешение для фотографий достигает 3280 × 2464 пикселей. Разъем питания и кабель Ethernet использовались для связи между RPi3 и ПК. Все алгоритмы, разработанные в Matlab, были развернуты в процессоре ARM на RPi3 через кабель Ethernet.

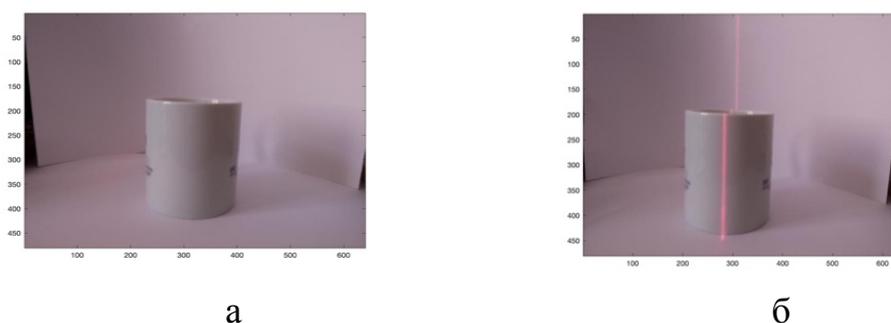


(а) плата RaspberryPi 3; (б) встроенная инфракрасная камера для RaspberryPi; (с) диод LineLASER

Рисунок 2.4 –Дополнительное оборудование для сканирования и распознавания изображений

Для реализации эксперимента объединили Matlab с Raspberry Pi, как описывается в нашей работе [67]. Для этого была выбрана установка поддержки Matlab для пакетов поддержки оборудования Raspberry Pi Home-Add-Ons-Get в списке Raspberry Pi, и был установлен компонент Matlab.

Процесс начинается после загрузки и присвоения имени для RaspberryPi: $MyPi = raspi$. Получаем характеристики Raspberry Pi: $mysat = cameraboard(myPi, 'Resolution', '1280x720')$. Вызывается команда для создания платы подключения камеры. Выбираются режимы съемки: яркость, освещенность и размер. Делаются два снимка - один снимок с диодом Line LASER, который также подключен и контролируется Raspberry Pi, и один снимок без лазера (см. рисунок 2.5), полученные изображения сохраняются вручную для будущего использования. Поскольку все остальное в поле зрения камеры остается неизменным, разница между этими двумя изображениями дает все точки, которые лежат на Line LASER, проецируемые на объект.



(а) без использования диода Line LASER; (б) с использованием диода Line LASER

Рисунок 2.5 – Примеры изображений, полученные с помощью RaspberryPi

Частично описание данного метода получения, сохранения и анализа изображений приводится в нашей работе [67, р. 39], далее мы разработали алгоритм распознавания изображения, применяемый для интерактивного

взаимодействия с оператором робота при сканировании, описанный в следующем разделе данной главы.

Так как основной целью разработки интеллектуальной роботизированной системы плазменной резки и обработки поверхности было повышение качества этих процессов, чтобы получить плазменный разрез нужной конфигурации или покрытие с требуемой структурой и свойствами, то исследование было по существу мультидисциплинарным. Чтобы убедиться, что система работает с обеспечением требуемого качества процесса, что применение разработанных алгоритмов автоматизации процессов сканирования и управления роботом-манипулятором приводит к улучшению характеристик обрабатываемых плазмой изделий, проводились исследования структуры и свойств экспериментальных образцов методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, профилометрии, испытаний на прочность покрытий к отрыву, на коррозионную стойкость и на стойкость к износу. Подробное описание использованного для этих целей экспериментального оборудования и методов физического эксперимента, а также полученных результатов, можно найти в нашей статье [68]. В данном разделе диссертации основное внимание уделено непосредственно роботу-манипулятору и оборудованию для сканирования, а также разработанному нами методу распознавания сканированных изображений.

2.2 Методы анализа сканированных изображений: выделение лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования

В данном разделе описывается оригинальный, разработанный нами алгоритм распознавания изображения, применяемый для интерактивного взаимодействия с оператором робота при 3D сканировании объектов, подсвеченных лазером. Настоящий алгоритм, описываемый ниже, был реализован в виде компьютерной программы. Нами была зарегистрирована в государственном реестре Республики Казахстан программа для ЭВМ под названием «Программа выделения лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования» [69].

Программа предназначена для распознавания полосы от лазера на сканируемом объекте и представления вытянутой области полосы в виде ломаной линии без самопересечений. Программа дает возможность оператору задавать, тестировать и сохранять параметры процесса распознавания для дальнейшего использования в процессе автоматической обработки данных 3D сканирования.

Программа позволяет загружать, визуализировать и выделять регионы растровых цифровых изображений (цифровых фотографий) в форматах jpeg, bmp, png. Предполагается, что обрабатываемая фотография содержит изображение объекта 3D сканирования, подсвеченного узкой полосой лазера. Соответствующие фотографии прилагаются в папке «Фотографии». В исполняемый файл программы включены два файла цифровых изображений объектов сканирования с лазерной полосой, один из которых отображается в главном окне программы сразу после запуска, как показано на рисунке 2.6

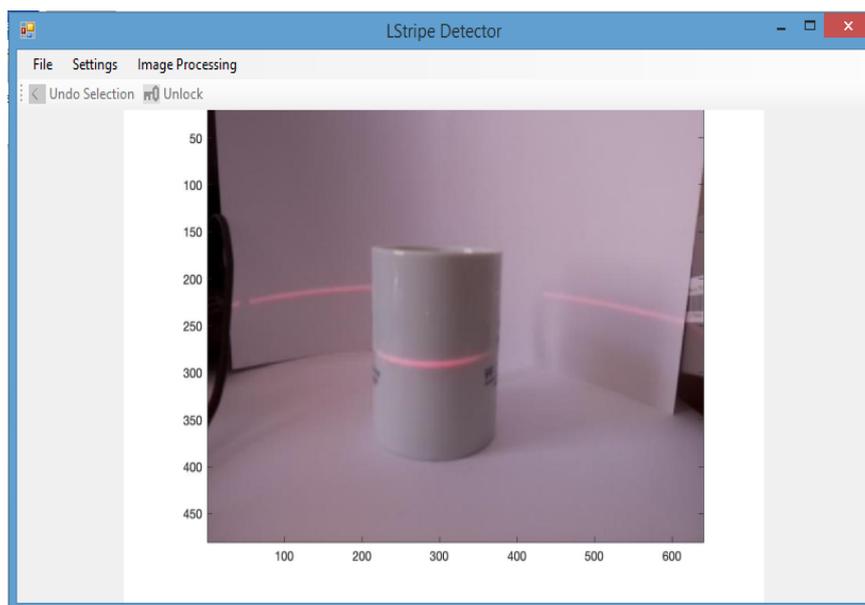


Рисунок 2.6 - Вид главного окна программы детектирования лазерных линий после открытия программы

Для загрузки и отображения цифрового изображения необходимо выбрать пункт “File” в строке меню главного окна программы, и в выпадающем меню выбрать пункт “Open Image File”.

Затем, в открывшемся диалоговом окне выбора файла следует выбрать файл растрового изображения или задать путь к нему, как показано на рисунке 2.7. Следует выбрать один из файлов из папки «Фотографии», прилагаемой к программе.

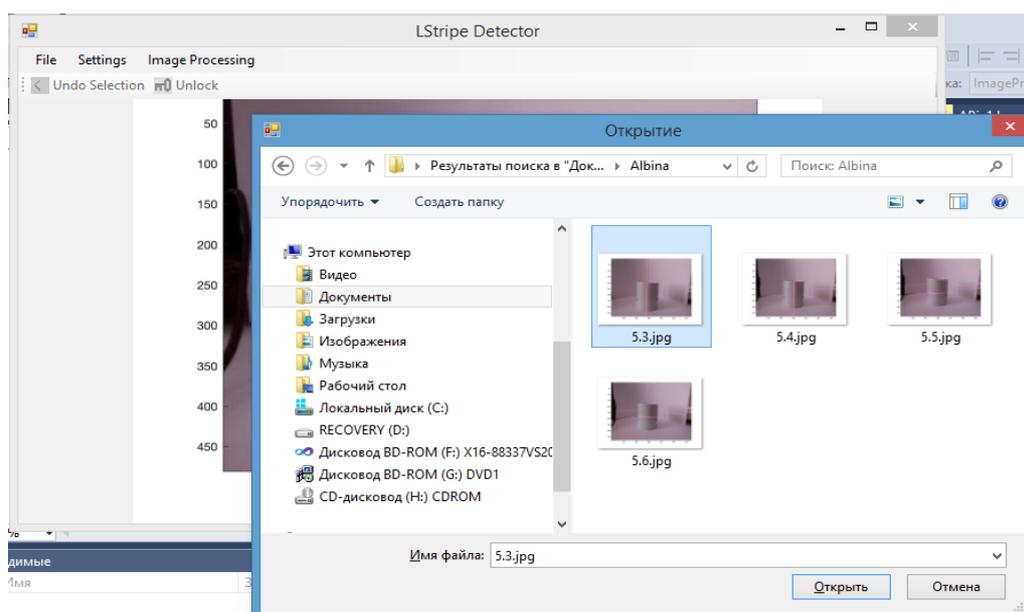


Рисунок 2.7 - Вид диалогового окна выбора файла цифрового изображения

Для загрузки одного из прикрепленных к программе файлов примеров, необходимо кликнуть левой кнопкой мыши по пункту “Open Example” выпадающего подменю пункта “File”. После этого в отобразившемся подменю надо выбрать один из двух подпунктов: “Example1” или “Example2”.

Первый файл примера “Example1” содержит изображение объекта сканирования (фарфоровой чашки) с горизонтально расположенной полосой лазера (рисунок 2.8 а).

Второй файл примера “Example2” содержит изображение того же объекта сканирования (фарфоровой чашки) с вертикально расположенной полосой лазера (рисунок 2.8 б).

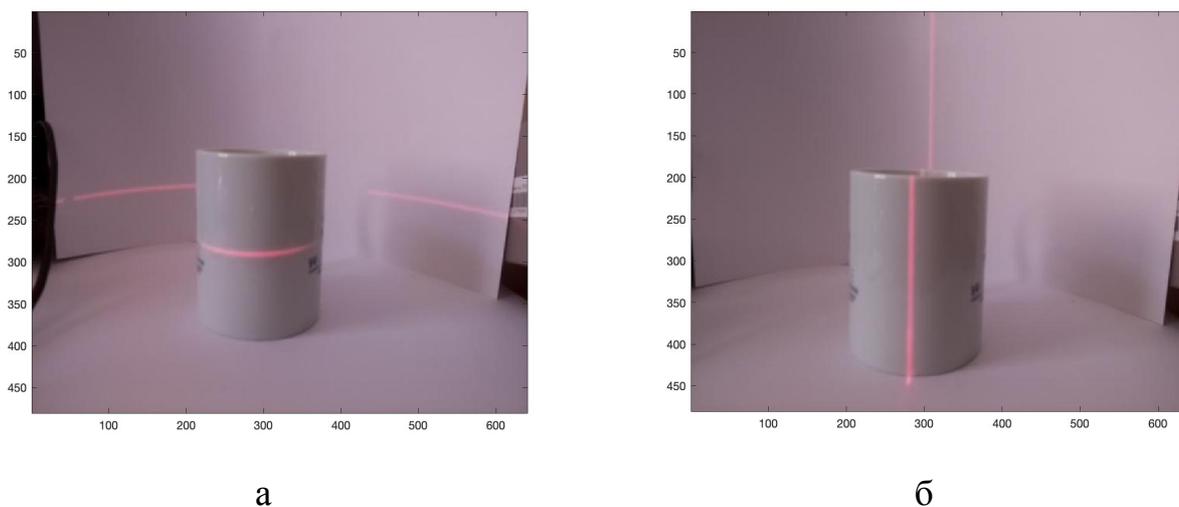


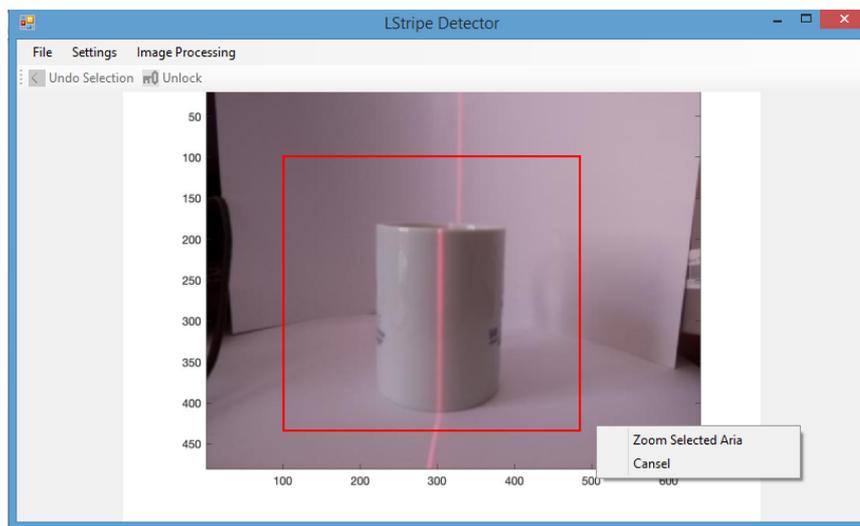
Рисунок 2.8 - Вид диалогового окна выбора файла цифрового изображения

Для выделения рабочей области необходимо мышью выделить прямоугольник области. Для этого нужно, подведя курсор к месту расположения угла выделяемой области, нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, выделить область.

После освобождения левой кнопки мыши, по щелчку по правой кнопке мыши появится всплывающее меню с двумя пунктами: “Zoom Selected Area” и “Cancel” (рисунок 2.9).

После выбора опции “Zoom Selected Area” выбранная рабочая область будет отображена в главном окне интерфейса программы, как показано на рисунке 2.10.

Для выполнения обратного действия (возвращения к исходному изображению или к ранее выбранной области изображения) необходимо обработать кнопку “Undo Selection”, расположенную на меню инструментов главного окна программы.



Рабочая область выделена прямоугольной рамкой красного цвета. Справа внизу отображено всплывающее меню

Рисунок 2.9 - Выбор рабочей области

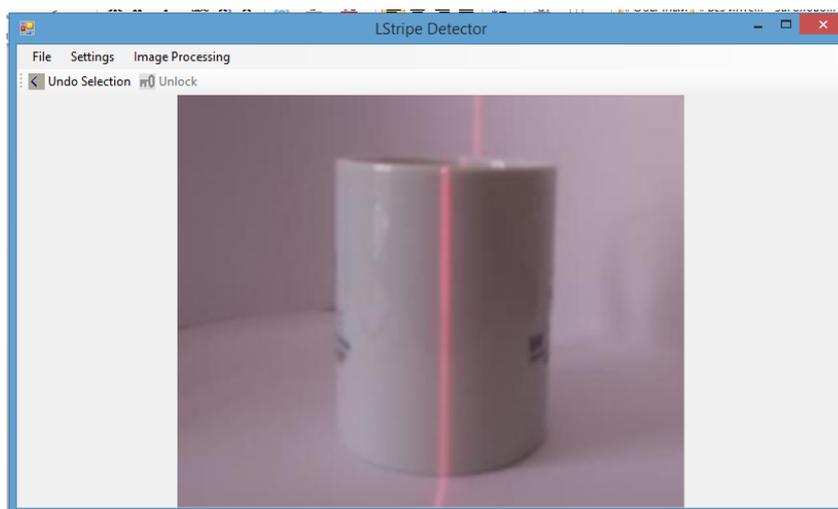


Рисунок 2.10 - Вид главного окна программы с выбранной рабочей областью после зуммирования (выбора пункта “Zoom Selected Area”)

Для детектирования полосы лазера на изображении необходимо выбрать подпункт меню “Find Laser Stripes” пункта “Image Processing” главного меню программы, как показано на рисунке 2.11.

Во время выполнения расчетов на экране отображается всплывающее окно с надписью “Please Wait”. В процессе детектирования, области изображения, соответствующие полосам засветки лазерным лучом, преобразуются в ломаные линии.

По окончании расчетов изображение построенных ломаных линий (выполненное красным цветом) накладывается на исходное изображение и отображается в главном окне программы, как показано на рисунке 2.12.

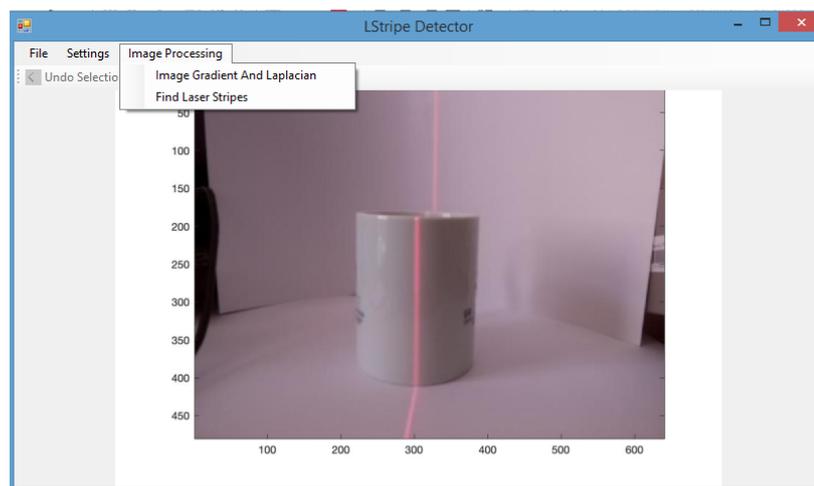
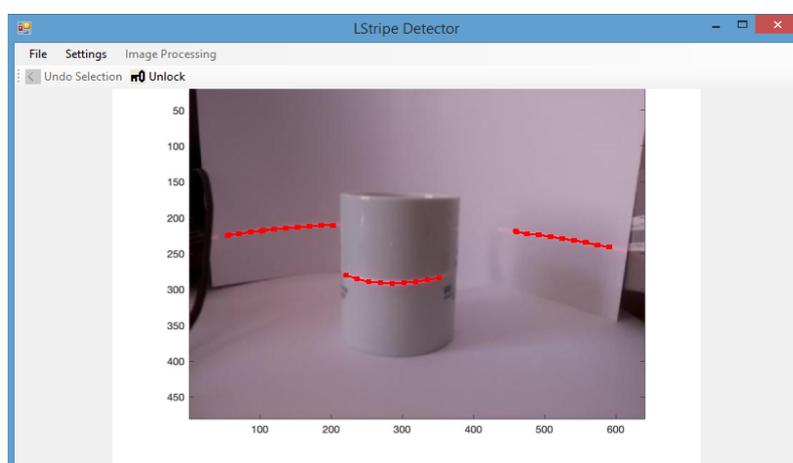


Рисунок 2.11 - Вид окна программы с открытым пунктом меню “Image Processing”



Построенные ломаные линии выделены на изображении красным цветом

Рисунок 2.12 - Вид главного окна программы после выполнения процедуры детектирования лазерной полосы

После выполнения процедуры детектирования становятся доступными пункты меню “Save Results To File” и кнопка “Unlock” на панели инструментов главного окна программы. Выделение области изображения становится недоступным. Недоступным также становится пункт меню “Image Processing”. Выход из режима блокировки осуществляется либо после сохранения результатов детектирования в файле, либо после нажатия на кнопку “Unlock”, расположенную на панели инструментов главного окна. При нажатии на кнопку “Unlock” данные о результатах сканирования утрачиваются, поэтому пользователю рекомендуется после проведения процедуры детектирования сохранить результаты процедуры в файле. Для этого следует выбрать подпункт “Save Results To File” пункта меню “File”. В появившемся диалоговом окне (рисунок 2.13) следует выбрать расположение на диске сохраняемого файла и задать его имя. При этом автоматически будет сгенерирован файл с

расширением “.txt” (при задании имени файла нет необходимости указывать его тип).

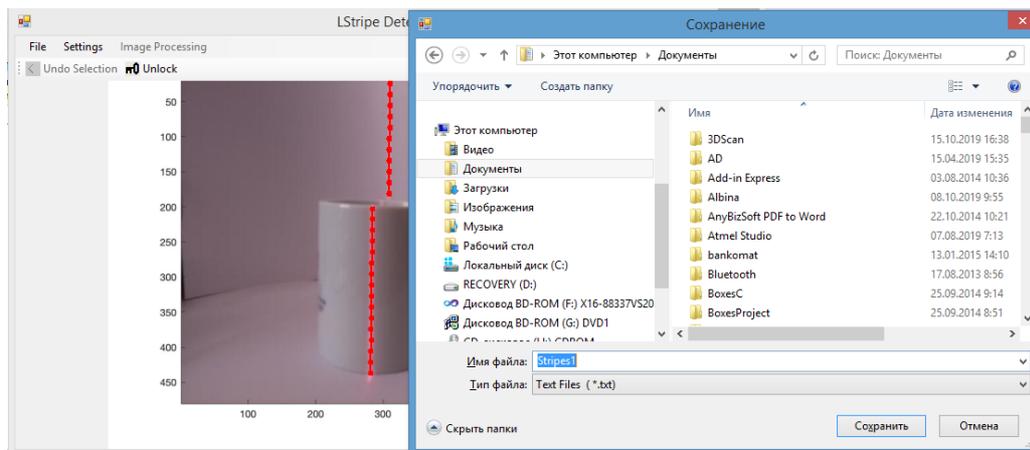


Рисунок 2.13 - Вид диалогового окна выбора файла для сохранения результатов детектирования

При выборе в окне сохранения файла уже существующего файла, он будет перезаписан. После записи результатов процедуры детектирования в файл, на экране появляется всплывающее окно с надписью “Results Successfully Saved”. Данные сохраняются в текстовом файле, имеющем следующий формат:

```
<Число ломаных> PolyLines  
Broken Line <Номер ломаной>  
<Число вершин> vertexes  
<координата x> <координата y> // координаты первой вершины  
<координата x> <координата y> // координаты второй вершины  
<координата x> <координата y> // координаты последней вершины  
Broken Line 2
```

Целочисленные координаты вершин ломаных линий задаются в декартовой системе координат изображения, при этом верхний левый угол изображения имеет координаты (0,0), а правый нижний (Width,Height), где Width – ширина изображения в пикселях, а Height – высота изображения в пикселях. Для просмотра текстовых файлов рекомендовано использовать программы “NotePad” и “WordPad”.

Программа позволяет пользователю задавать два параметра детектора лазерных полос: значение пороговой величины Лапласиана изображения (“Laplacian Threshold Value”) и значение пороговой величины модуля градиента изображения (“Minimal Gradient Magnitude”). Для задания параметров необходимо выбрать подпункт “Image Processor Settings” пункта “Settings” главного меню программы. После выбора подпункта “Image Processor Settings” визуализируется диалоговое окно “Settings” с двумя полями ввода “Minimal Gradient Magnitude” и “Laplacian Threshold Value”, как показано на рисунке 2.14.

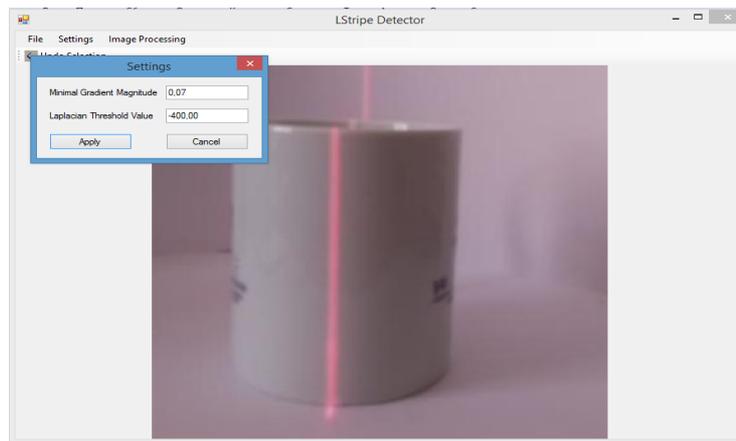


Рисунок 2.14 - Вид диалогового окна параметров детектирования “Settings”, в полях ввода отображены дефолтные значения параметров обработки

В том случае, если после редактирования данных в полях ввода пользователь нажмет кнопку “Apply” (рисунок 2.14), то в дальнейшем во время обработки изображения будут применены введенные значения параметров, отображаемые в полях ввода. Если после редактирования данных в полях ввода пользователь нажмет кнопку “Cancel” (рисунок 2.14), то в дальнейшем во время обработки изображения будут применены либо дефолтные (по умолчанию) значения параметров, либо значения, введенные при последнем изменении параметров. Для оценки воздействия параметров процедуры детектирования на ее качество, графический интерфейс программы позволяет визуализировать карту распределения величин Лапласиана изображения и модуля градиента изображения. Для просмотра карты необходимо выбрать подпункт “Image Gradient And Laplacian” пункта “Image Processing” главного меню программы (рисунок 2.11). При этом во всплывающем окне будет визуализирована карта величин Лапласиана цифрового изображения и модуля градиента изображения, как показано на рисунке 2.15.

Синим цветом на рисунке 2.15 выделены области изображения, величина Лапласиана изображения в которых меньше заданной пользователем. Красным цветом выделены области, в которых модуль градиента изображения превышает заданную величину отсечки.

Детектируются области в промежутке цвета «красный-синий-красный», уменьшение значений «отсечки» модуля градиента приводит к расширению области высокого уровня градиента, что увеличивает надежность детектирования полос лазера, но также увеличивает вероятность регистрации артефактов изображения (бликов, ярких цветовых полос на поверхности и т.п.).

Аналогично, уменьшение значений «отсечки» Лапласиана изображения приводит к повышению надежности детектирования при одновременном увеличении вероятности появления артефактов детектирования. Одним из назначений программы является предоставление оператору возможности выбрать опытным путем оптимальные для заданных условий сканирования параметры процедуры детектирования.

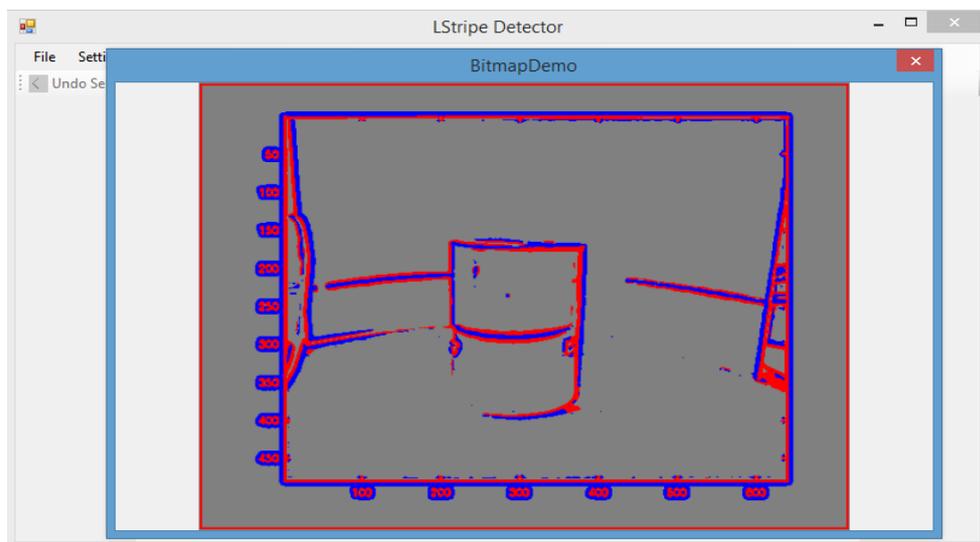


Рисунок 2.15 - Всплывающее окно с картой распределения величин Лапласиана изображения и модуля градиента изображения

Основные технические характеристики, требуемые для реализации разработанной компьютерной программы приводятся в таблице 2.1

Таблица 2.1 - Основные технические характеристики компьютерной программы выделения лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования

Минимальные	
Операционная система (ОС)	(ОС)Windows 8 с установленной платформой .NET v4.03
Архитектура ОС	x86
Растровые цифровые изображения (цифровые фотографии) объектов 3D сканирования, подсвеченных узкой полосой лазера	Файлы в форматах jpeg или bmp или png с изображениями объектов 3D сканирования с лазерной полосой
Рекомендованные:	
Операционная система (ОС)	(ОС)Windows 8 (или старших версий) с установленной платформой .NET v4.03
Архитектура ОС	x86
Растровые цифровые изображения (цифровые фотографии) объектов 3D сканирования, подсвеченных узкой полосой лазера	Файлы в форматах jpeg или bmp или png с изображениями объектов 3D сканирования с лазерной полосой

Язык программирования: C#. Программа разработана с применением свободно распространяемой IDE Microsoft Visual Studio Express 2017.

Тип реализующей ЭВМ: IBM PC совместимая, объем оперативной памяти (RAM) не менее 4ГБ; объем дискового пространства: 40 ГБ; объем видеопамати не менее 128 МБ.

Выводы по разделу 2

Выбрано и описано основное оборудование для проведения роботизированной плазменной резки и обработки поверхности микроплазменным напылением (МПН). Разработаны и апробированы алгоритмы управления роботом - манипулятором для перемещения инструмента (плазменного источника) по заранее заданным сложным траекториям в плоскости и для реализации 3D сканирования объектов.

Подготовлено техническое описание и выбраны три типа лазерных триангуляционных датчиков расстояния, два вида преобразователя сигналов и цифровая камера машинного зрения с необходимыми характеристиками, нужными для проведения натурального эксперимента по роботизированному 3D сканированию с использованием различных вариантов построения системы сканирования.

Разработан алгоритм распознавания сканированных изображений и разработана компьютерная программа для интерактивного взаимодействия с оператором робота (с человеком, выполняющим процесс) при сканировании. Программа дает возможность оператору во время процесса 3D сканирования задавать, тестировать и сохранять параметры процесса распознавания для дальнейшего использования в процессе автоматической обработки данных 3D сканирования.

Таким образом, основные методы исследования в данной работе – это методы теории автоматического управления, математическое компьютерное моделирование, натуральный эксперимент: тестирование методики сканирования на модельных объектах и реализация роботизированной плазменной обработки поверхности с перемещением руки робота-манипулятора по сгенерированной траектории с последующим исследованием структуры и свойств обработанных образцов и производственным испытанием промышленного изделия.

Результаты исследования, описанные в данном разделе, были представлены в виде устного доклада и обсуждены на 14-й Международной конференции по прикладной информатике и соответствующим областям AIS 2019, а также было получено свидетельство ИС РК на компьютерную программу (Приложение А) и опубликованы работы [65, p. 191; 67, p.39; 68, p.180]

3 СХЕМА СИСТЕМЫ 3D-СКАНИРОВАНИЯ И АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ С ПОСТРОЕНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ

3D-сканирование, то есть пространственное измерение и моделирование формы и других визуальных свойств сканируемого объекта, является одной из наиболее актуальных форм поверхностной реконструкции, для реализации которой в настоящее время во всем мире все шире применяют роботизированные системы [70-78]. Разработанная нами и описанная в нашей статье [58, с. 7] система роботизированного сканирования объекта с использованием датчиков расстояния основана на измерении расстояния до поверхности объекта в дискретном множестве точек, образующих сеть с заданными геометрическими параметрами, налагаемую на поверхность исследуемого объекта. 3D модель сканируемого объекта строится посредством процедур интерполяции по узлам этой сетки.

На этапе 3D сканирования программное обеспечение системы производит сегментацию поверхности объекта и строит приблизительную трехмерную модель объекта. Согласно результатам сегментации, набор опорных точек выбирается на поверхности с известными пространственными координатами. Это позволяет точно построить трехмерную модель объекта. После выбора контрольных точек программа генерирует программу манипулятора. Программа определяет, как манипулятор последовательно проходит контрольные точки, выполняя сканирование поверхности в каждой из точек.

В нашей статье [62, с. 81] мы пояснили теоретические основы трехмерного сканирования роботом-манипулятором с закрепленным на нем датчиком расстояния. Приводим описание процедуры сканирования относительно координат робота, как оно давалось в нашей работе [62, с. 82]. При выполнении сканирования данные собираются в двух системах координат робота (см. рисунок 3.1).

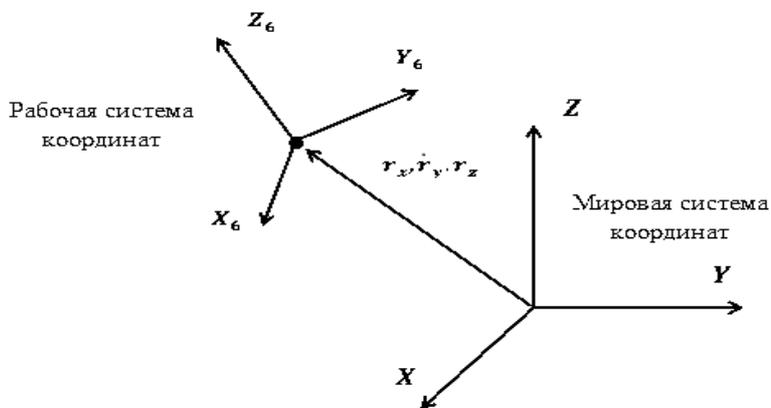


Рисунок 3.1 – Система координат робота-манипулятора

Одна система - это декартовы координаты конечного эффектора, а вторая - углы Эйлера, например, углы поворота вокруг осей X, Y, Z, которые относятся к ориентации инструмента. Рабочий вектор рабочей системы координат однородной системы $(X_0, Y_0, Z_0, 1)$ определяет однородный вектор мировой системы координат $(X, Y, Z, 1)$ посредством преобразования (3.1)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = [A] \times \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Согласно рисунку 3.1, матрица однородного преобразования может быть описана формулой (3.2)

$$A = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & r_x \\ l_y & m_y & n_y & r_y \\ l_z & m_z & n_z & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

где $l_x = \cos(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_3)$

$$l_y = \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_3)$$

$$l_z = \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_3) - \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \cos(\alpha_3)$$

r_x, r_y, r_z - оригинальные координаты рабочей системы координат, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - углы вращения вокруг осей X, Y, Z соответственно

Начало сканирования сопровождается измерением расстояния вдоль оси z посредством лазерного датчика расстояния. Для реконструкции трехмерного изображения сканируемого объекта требуется последний столбец из матрицы результатов (3.1). Рука робота-манипулятора с лазерным датчиком расстояния перемещается по заданной в плоскости траектории во время 3D-сканирования, как правило, эта траектория представляет собой П-образную кривую. Для синхронизации данных нужно использовать дополнительное ПО, чтобы управлять процессом измерения через пользовательский интерфейс ПК.

Для реализации роботизированного сканирования с использованием видеокамеры необходимо, по сути, разработать систему машинного зрения. В настоящее время наиболее распространенными являются системы машинного зрения, в которых используются стандартные камеры и компьютеры [42, р.3; 79]. Мы рассмотрели для реализации выбранных методов сканирования и, соответственно, разработки программного обеспечения, те методы получения и обработки изображений, а также алгоритмы преобразования и распознавания объектов, которые наиболее часто используются в теории компьютерного зрения для робототехники [42, р.4; 79, р.435; 80-85], а именно: обнаружение края оператором Собеля, обнаружение углов оператором Харриса, определение линии оператором Хафа. Мы предложили принципиальную схему реализации 3D-сканирования на основе бесконтактных датчиков расстояния, установленных на промышленном роботе-манипуляторе Kawasaki RS10L (см.

рисунок 3.2). Данная схема также допускает использование закрепленной на манипуляторе лазерной подсветки, с фиксацией изображения неподвижно закрепленной видеокамерой. На рисунке 3.2 четко прослеживается взаимосвязь компонентов системы: робота-манипулятора с установленным на нем бесконтактным датчиком расстояния либо лазерной подсветкой, контроллера E40 и ПК, подключенного к контроллеру робота с помощью последовательного интерфейса RS232.

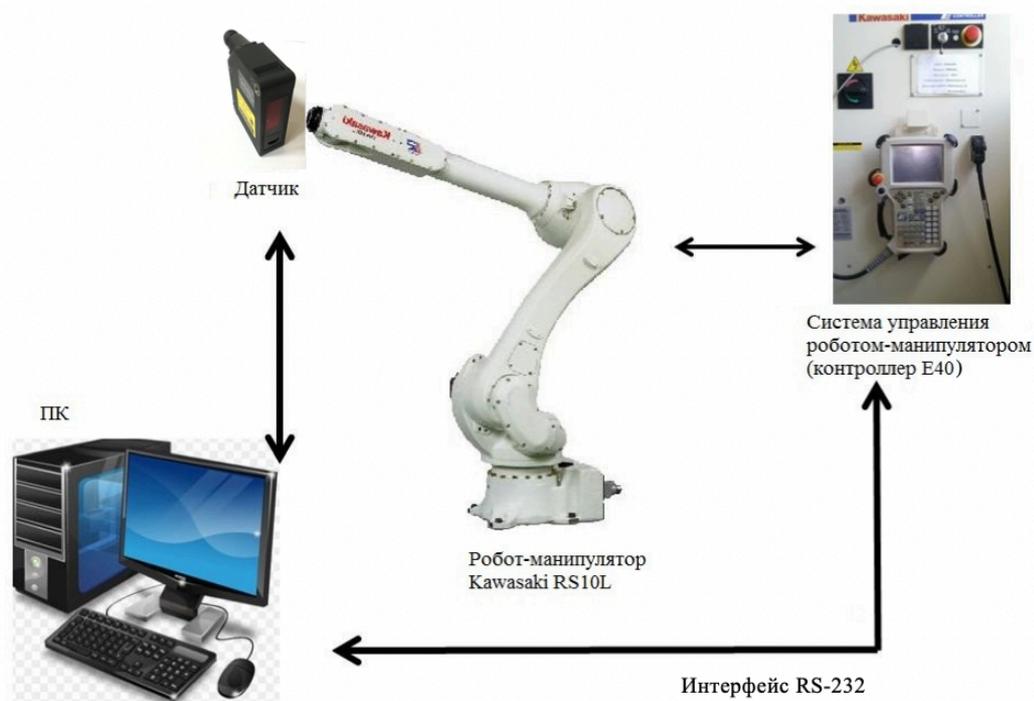


Рисунок 3.2 - Универсальная схема системы 3D-сканирования на основе бесконтактных датчиков расстояния, установленных на манипуляторе промышленного робота Kawasaki RS10L

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [58, с.16]

Таким образом, разрабатываемая нами роботизированная система 3D сканирования измеряет расстояния до поверхности объекта в дискретном множестве точек, образующих сеть с заданными геометрическими параметрами. Эта сеть «накладывается» на поверхность исследуемого объекта и посредством процедур интерполяции по узлам этой сетки строится 3D - модель сканируемого объекта. Соответственно, для создания интеллектуальной роботизированной системы реализуется этап 3D – сканирования с построением системы сбора данных, которая формирует задачу для робота манипулятора. Задача состоит в последовательном перемещении робота-манипулятора с закрепленным на ней датчиком расстояния по точкам сканирования, с выполнением в каждой точке необходимых для сканирования действий, с накоплением в памяти результатов измерений расстояния в точках.

Были апробированы конструкционные и алгоритмические решения для системы 3D-сканирования с применением разработанной системы сбора данных. При использовании данной схемы сканирования траектория датчика представляет собой ломаную линию, лежащую в горизонтальной плоскости.

Согласно описанной в нашей работе [58, с.16] и показанной на рисунке 3.2, схеме системы роботизированного 3D сканирования, процесс (алгоритм) сбора данных (создания «облака точек») технически осуществляется следующими операциями, также описанными в нашей работе [58, с.16]:

- задается траектория сканирования с указанием точек опроса датчика, эта траектория состоит из П-образных сегментов, покрывающих область сканирования;

- датчик двигается по заданной траектории в плоскости и в указанных точках проводится его опрос, то есть измерение расстояния до поверхности сканируемого объекта;

- данные сканирования отправляются на ПК. Протокол передачи данных (логика передачи данных) обеспечивает передачу текущих координат сканирующего датчика вместе с данными сканирования (расстояние до поверхности);

- полученные данные позволяют построить облако точек и вычислить 3D-координаты набора точек на поверхности, то есть формируется облако точек, состоящее из множества троек декартовых координат точек (X_k, Y_m, Z_{km}) на сканируемой поверхности.

По данным сканирования строится параметризованная аналитическая 3D модель поверхности.

Ключевой идеей разработанной нами методики построения аналитической модели поверхности, является разбиение поверхности на геометрически гомогенные регионы, в пределах которых возможна достаточно точная аппроксимация фрагмента поверхности простой аналитической моделью поверхности второго порядка. Применяя терминологию, принятую в технике обработки изображений [28, р.1874], мы будем называть процедуру разбиения поверхности на геометрически однородные регионы процедурой сегментации поверхности. Подчеркнем, что если поверхности сложной формы невозможно аппроксимировать поверхностью второго порядка с приемлемой точностью при попытках аппроксимации поверхности «в целом», то при корректной сегментации поверхности можно добиться весьма высокой точности приближения.

Процесс построения аналитической модели поверхности разделяется на три этапа. Первым этапом построения аналитической модели поверхности является разбиение плоскости сканирования на множество окружностей одного радиуса, образующих покрытие области сканирования. Для каждой окружности строится локальная аппроксимация поверхностью второго порядка. На втором этапе осуществляется сегментация поверхности. При этом малые области (окружности), в которых уже проведена локальная аппроксимация объединяются в геометрически однородные макрорегионы. Второй этап построения аналитической модели поверхности – это сегментация, которая

реализуется на основании информации, полученной в результате проведения процедуры локальной аппроксимации во всех микрорегионах. Для сегментации поверхности, на основе описываемого в работах [11, p.148; 62, с.81; 86] алгоритма растущих регионов (region growing algorithm), мы разработали оригинальную процедуру, подробно описанную ниже. На третьем этапе для каждого региона рассчитываются оптимальные параметры модели – поверхности второго порядка.

Перед тем, как перейти к описанию разработанных нами процедур локальной аппроксимации и сегментации поверхности, приведем несколько соображений, которые необходимо учитывать при проектировании этих процедур. Данные триангуляционных лазерных датчиков расстояния отличаются высокой степенью зашумленности, поэтому процедура локальной аппроксимации должна представлять собой вариацию метода наименьших квадратов. Отсюда также следует, что сетка сканирования должна выбираться таким способом, чтобы в область локальной аппроксимации гарантировано попадало достаточное число точек (превышающее число точек, достаточное для построения поверхности второго порядка методом интерполяции Лагранжа). Если выбор радиуса окружности, задающий размер области локальной аппроксимации задается исходя из соображений точности локальной аппроксимации поверхности, то выбор шага сетки сканирования представляет собой компромисс между стремлением увеличить число точек сканирования в области аппроксимации, и соображениями производительности процесса сканирования. Во вторых, для применения алгоритма роста регионов, необходимо иметь численный критерий схождения двух локальных областей. В качестве таких численных критериев мы используем такие параметры, как Гауссова и средняя кривизна поверхности. Ниже мы приводим описание процедуры локальной аппроксимации поверхности. Как отмечалось выше, процедура автоматической сегментации поверхности в целом, основывается на локальном анализе Гауссовой и средней кривизны поверхности, полученной при построении непараметрической аналитической модели.

Разработанная нами процедура автоматической сегментации поверхности основывается на локальном анализе Гауссовой и средней кривизны поверхности, полученной при построении непараметрической аналитической модели. В предлагаемой методике облако точек интерпретируется как карта высот, т.е. предполагается, что задана дискретная функция двух переменных $Z(X, Y)$ на некоторой сетке в плоскости XY . В каждой точке поверхность моделируется полиномом второго порядка по локальным координатам. Расчет коэффициентов аппроксимирующего полинома проводится путем рассмотрения выбранного количества соседних точек лежащих в пределах круга заданного радиуса, для применения метода наименьших квадратов. Основное преимущество непараметрического подхода состоит в его общности: при таком подходе не вводятся априорные предположения о локальной геометрии поверхности и, тем более, не предлагается аналитическая модель поверхности. Рассмотрим аппроксимацию поверхности в локальной окрестности произвольной точки P с координатами (X_k, Y_m, Z_{km}) вида (3.3)

$$z_{ij} = c_0 + c_1 \cdot u + c_2 \cdot v + \frac{1}{2} \cdot c_3 \cdot u^2 + c_4 \cdot u \cdot v + \frac{1}{2} c_5 \cdot v^2 + \varepsilon_{ij} \quad (3.3)$$

Такую аппроксимацию можно рассматривать как отрезок разложение в ряд Тейлора функции $Z(u, v)$ в окрестности точки (X_k, Y_m) . При этом справедливы равенства (3.4 – 3.11)

$$c_0 = z_{km} \quad (3.4)$$

$$c_1 = \left(\frac{\partial Z}{\partial u} \right)_P \quad (3.5)$$

$$c_2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial v} \right)_P \quad (3.6)$$

$$c_3 = \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial v^2} \right)_P \quad (3.7)$$

$$c_4 = \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial u \partial v} \right)_P \quad (3.8)$$

$$c_5 = \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial v^2} \right)_P \quad (3.9)$$

$$u = x_i - x_k \quad (3.10)$$

$$v = x_j - y_m \quad (3.11)$$

Расчет коэффициентов c_0, c_1, \dots, c_5 локальной аппроксимации вида (2.3) производится методами регрессионного анализа по значениям координат соседних с P точек. Точнее говоря, мы задаемся некоторым значением радиуса r (подбираемого эмпирически) и рассматриваем множество точек, для которых выполняется неравенство (3.12)

$$d_{ij} \leq r \quad (3.12)$$

где d_{ij} расстояние между точкой с координатами (x_i, y_j) и точкой P , определяемое согласно (3.13)

$$d_{ij} = \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_m - y_j)^2} \quad (3.13)$$

Для вычисления средней и Гауссовой кривизны поверхности рассмотрим поверхность заданную уравнением (3.14)

$$\vec{r} = \vec{r}(x_1, x_2) \quad (3.14)$$

Полный дифференциал $d\vec{r}$ радиус-вектора \vec{r} точки поверхности представляется в виде линейной дифференциальной формы (3.15)

$$d\vec{r} = \vec{r}_1 \cdot dx_1 + \vec{r}_2 \cdot dx_2 \quad (3.15)$$

Скалярный квадрат этой формы представляет собой скалярную квадратичную дифференциальную форму (3.16), обладающую свойством инвариантности.

$$d\vec{r}^2 = \vec{r}_x^2 \cdot dx_1^2 + 2 \cdot (\vec{r}_x, \vec{r}_y) \cdot dx_1 \cdot dx_2 + \vec{r}_y^2 \cdot dx_2^2 \quad (3.16)$$

Эту квадратичную форму называют первой квадратичной формой поверхности. В развернутом виде первую квадратичную форму принято записывать в виде (3.17)

$$E \cdot dx^2 + 2 \cdot F \cdot dx \cdot dy + G \cdot dy^2 \quad (3.17)$$

Коэффициенты E, F, G первой квадратичной формы определяются уравнением (3.3). В дальнейшем мы будем использовать представление первой квадратичной формы в стандартном виде

$$I(u, v) = (u^1, u^2) \cdot \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v^1 \\ v^2 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Заметим, что матрица первой квадратичной формы в регулярных точках поверхности положительно определена. Коэффициенты первой квадратичной формы вычисляются по коэффициентам c_1, c_2, \dots, c_5 аппроксимирующего полином (3.3) по формулам (3.19)-(3.20).

$$\begin{aligned} E &= c_3 / \sqrt{1 + c_1^2 + c_2^2} \\ F &= c_4 / \sqrt{1 + c_1^2 + c_2^2} \\ G &= c_5 / \sqrt{1 + c_1^2 + c_2^2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Обозначим через $\vec{m}(x, y)$ такую нормаль к регулярной поверхности в точке $\vec{r}(x, y)$, что $(\vec{m}, \vec{r}_x, \vec{r}_y)$ положительно ориентированный репер в пространстве R^3 . Вектор \vec{m} находится явно по формуле (3.20)

$$\vec{m} = \frac{[\vec{r}_x, \vec{r}_y]}{|[\vec{r}_x, \vec{r}_y]|} \quad (3.20)$$

Пусть \vec{r}_{jk} определяется формулой (3.21)

$$\vec{r}_{jk} = \frac{d^2 \vec{r}}{dx_j dx_k} \quad (3.21)$$

Второй квадратичной формой называется симметричная билинейная форма $\Pi(u, v)$ определенная уравнениями (3.22)-(3.25).

$$\Pi(u, v) = (u^1, u^2) \cdot \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v^1 \\ v^2 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$L = (\vec{r}_{11}, \vec{m}) \quad (3.23)$$

$$M = (\vec{r}_{12}, \vec{m}) \quad (3.24)$$

$$N = (\vec{r}_{22}, \vec{m}) \quad (3.25)$$

Коэффициенты второй квадратичной формы связаны с коэффициентами аппроксимирующего полинома формулами (2.26)-(2.28)

$$L = 1 + c_1^2 \quad (3.26)$$

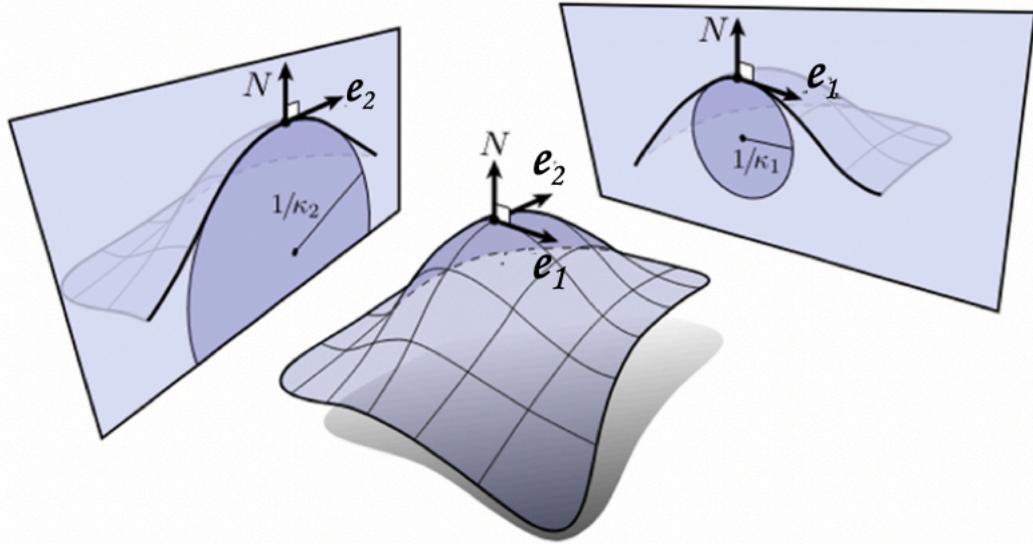
$$M = c_1 \cdot c_2 \quad (3.27)$$

$$N = 1 + c_2^2 \quad (3.28)$$

Фундаментальная роль второй квадратичной формы в определении локальной геометрии поверхности заключается в том, что она позволяет определить кривизну заданной кривой принадлежащей поверхности. Пусть \vec{v} - касательный вектор к поверхности в точке $\vec{r}(u^1, u^2)$ и \vec{m} - вектор нормали в этой же точке. Проведем через точку $\vec{r}(u^1, u^2)$ двумерную плоскость, натянутую на векторы \vec{m} и \vec{v} . Пересечение этой плоскости и поверхности — кривая γ называется нормальным сечением, отвечающим точке и $\vec{r}(u^1, u^2)$ касательному вектору \vec{v} . Тогда кривизна нормального сечения γ определяется формулой (3.29)

$$k = \frac{\Pi(u, v)}{I(u, v)} \quad (3.29)$$

В касательной плоскости выбирается базис \vec{e}_1, \vec{e}_2 в котором формы $I(u, v)$ и $\Pi(u, v)$ одновременно диагонализуются. Направления векторов \vec{e}_1 и \vec{e}_2 называются главными направлениями и они определены однозначно, если $k_1 \neq k_2$. Значения k_1 и k_2 нормальных кривизны вдоль главных направлений называются главными кривизнами (рисунок 3.3).



e_1 и e_2 - единичные векторы, N - вектор нормали, k_1 и k_2 - нормальные кривизны

Рисунок 3.3 – Главные направления к поверхности

То, что главные кривизны k_1 и k_2 - это экстремальные значения для нормальных кривизн в точке, следует из формулы Эйлера (3.30), где φ - угол между векторами \vec{e}_1 и \vec{v} .

$$\frac{\Pi(u, v)}{I(u, v)} = k_1 \cdot \cos^2 \varphi + k_2 \cdot \sin^2 \varphi \quad (3.30)$$

Произведение главных кривизн в точке называется гауссовой кривизной поверхности в этой точке:

$$K = k_1 \cdot k_2 = \frac{(L \cdot N - M^2)}{(1 + E^2 + G^2)^2} \quad (3.31)$$

Полусумма главных кривизн в точке называется средней кривизной поверхности в этой точке:

$$H = \frac{1}{2} (k_1 + k_2) \quad (3.32)$$

В зависимости от средней и от гауссовской кривизны и их сочетания, определяется тип аппроксимируемой поверхности, как показано на рисунке 3.4. Таким образом, для каждой точки четыре значения локальной кривизны K, H , значения k_1 и k_2 могут быть автоматически получены как функции коэффициентов аппроксимирующего многочлена. Кроме того, такие кривизны являются инвариантными к принятой системе отсчета, что представляет собой очень важное свойство при анализе формы поверхности.

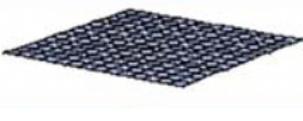
	$K < 0$: гиперболический тип поверхности	$K = 0$: параболический или плоский тип поверхности	$K > 0$: эллиптический тип поверхности
$H < 0$			
$H = 0$			невозможно
$H > 0$			

Рисунок 3.4 – Вид поверхности в зависимости от значений ее Гауссовской кривизны K и средней кривизны H

После проведения процедуры локальной аппроксимации во всех микрорегионах, на основе полученных данных осуществляется второй этап построения аналитической модели поверхности – сегментация. Как отмечалось выше, для выделения геометрически однородных областей отсканированной поверхности мы применяли один из вариантов так-называемого алгоритма роста регионов (region growing algorithm). Алгоритмы этого семейства широко применяются в технике обработки изображений для выделения на цифровых изображениях областей, удовлетворяющих некоторому заданному критерию (например, для выделения на цветных изображениях областей одного цвета). Как будет показано ниже, алгоритм роста регионов очень похож на известный в информатике волновой алгоритм (известный также как *алгоритм Ли* [87]) поиска кратчайшего пути между вершинами графа. На вход алгоритма подается граф. Вершинами графа являются центры окружностей (областей, в которых производится локальная аппроксимация поверхности полиномами второго порядка), образующие прямоугольную сетку. Шаг сетки выбирается таким образом, чтобы окружности образовывали покрытие плоскости. Вершины графа k и t считаются смежными в том случае, если для расстояния d_{kt} между вершинами выполняется неравенство $d_{kt} < 2 \cdot r$, где r – радиус окружности аппроксимации. Иначе говоря, две вершины смежны, если окружности радиуса r с центрами в этих вершинах перекрываются. Предполагается, что каждой вершине с номером k соответствует предикат – булевская функция δ_k . Предикат служит для тестирования точек на «схожесть» или «однородность». Например, при обработке черно-белого изображения критерием «однородности» двух пикселей изображения часто служит близость значений функции интенсивности изображения в двух точках. В этом случае, для пикселя с номером k предикат δ_k будет определяться выражением (3.33):

$$\delta_k(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } |I(n) - I(k)| < \varepsilon \\ 0, & \text{если } |I(n) - I(k)| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (3.33)$$

где I – функция интенсивности изображения, а $\varepsilon > 0$ задаваемое пороговое значение разности интенсивностей. При этом, если для двух вершин k и j выполняется условие $\delta_k(j) = 1$, то это факт можно интерпретировать выражением «интенсивность изображения в пикселях k и j примерно одинакова».

Идея алгоритма состоит в том, что некоторая выбранная вершина v_k рассматривается как зародыш региона однородности, включающего эту точку. Регионом однородности при этом называется максимальный связный подграф, задаваемый множеством вершин $R = \{v_{r1}, v_{r2}, \dots, v_{rn}\}, v_k \in R$, такой, что $\forall v \in R \delta_{v_k}(v) = 1$. Таким образом, регион однородности – это связное подмножество узлов сетки, состоящее из всех узлов «похожих» (то есть точно определяемых заданием предиката δ) на выбранный узел v_k .

Сущность алгоритма состоит в том, что стартовая точка рассматривается как источник колебаний (волн), которые расходятся от нее во все стороны, огибая препятствия. Также можно использовать наглядное представление о том, что в стартовой точке находится источник жидкости, растекающейся по трубам, проходящим через ребра.

Алгоритм оперирует с двумя множествами вершин (узлов сетки) – границей, которую можно рассматривать как фронт распространяющейся волны, и множеством помеченных узлов, в который входят внутренние точки области, ограниченной полигоном границы (условно говоря, это точки, по которым уже «прошла волна»).

На этапе инициализации множество точек границы состоит из одного элемента – стартовой точки, а множество помеченных точек пусто. Распространение волны симулируется процедурой, строящей новый фронт по текущему положению фронта. При этом для каждой точки, входящей в множество границы (фронта) просматриваются все смежные с ней точки. Если какая-то из смежных точек не входит ни в множество граничных, ни в множество помеченных точек, не принадлежит строящейся новой границе и удовлетворяет критерию схожести, то ее включают в новую границу. Фактически, на этапе распространения волны происходит симуляция построения волнового фронта с помощью принципа Гюйгенса, т.е. каждая точка фронта волны рассматривается как точечный источник сферических волн. Итерации построения нового фронта (множества точек границы), возобновляются до тех пор, пока не окажется, что процедура построения нового фронта возвращает пустое множество (дальнейшее наращивание региона невозможно). На рисунке 3.5 приведена блок-схема разработанной нами процедуры построения региона по стартовой точке.

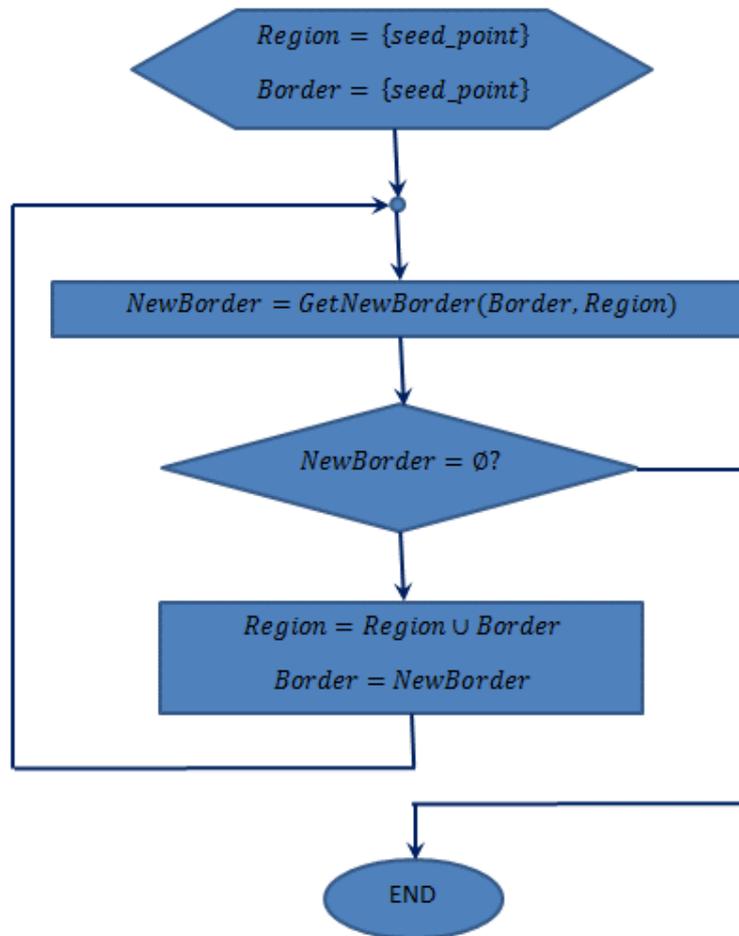


Рисунок 3.5 - Блок –схема процедуры построения региона однородности по стартовой точке – «зародышу» региона (seed point)

Процедура построения новой границы региона (процедура *GetNewBorder*), состоит, как было упомянуто выше, в тестировании всех смежных точек для каждой точки старой границы фронта, из которых выбираются точки, принадлежащие новой границе. Для тестирования на принадлежность к региону однородности, процедура использует предикат δ_h , определенный выражением (3.34)

$$\delta_h(v) = \begin{cases} 1, & \text{если } |K(v) - K_0| < \varepsilon_K \text{ и } |H(v) - H_0| < \varepsilon_H \\ 0, & \text{если } |K(v) - K_0| \geq \varepsilon_K \text{ и } |H(v) - H_0| \geq \varepsilon_H \end{cases} \quad (3.34)$$

В этом выражении $K(v)$ – значение гауссовой кривизны в области локальной аппроксимации с индексом v , $H(v)$ – значение средней кривизны в соответствующей области, K_0 и H_0 значения гауссовой и средней кривизны соответственно в области – зародыше региона (стартовой точке), а ε_K и ε_H , задаваемые предельно допустимые (в пределах региона) отклонения соответствующих величин K и H от их значения в стартовой точке.

Алгоритм сегментации поверхности строится на базе описанной выше процедуры построения региона однородности по избранной стартовой точке,

как последовательность итераций, схематически изображенная блок-схемой, приведенной на рисунке 3.6:

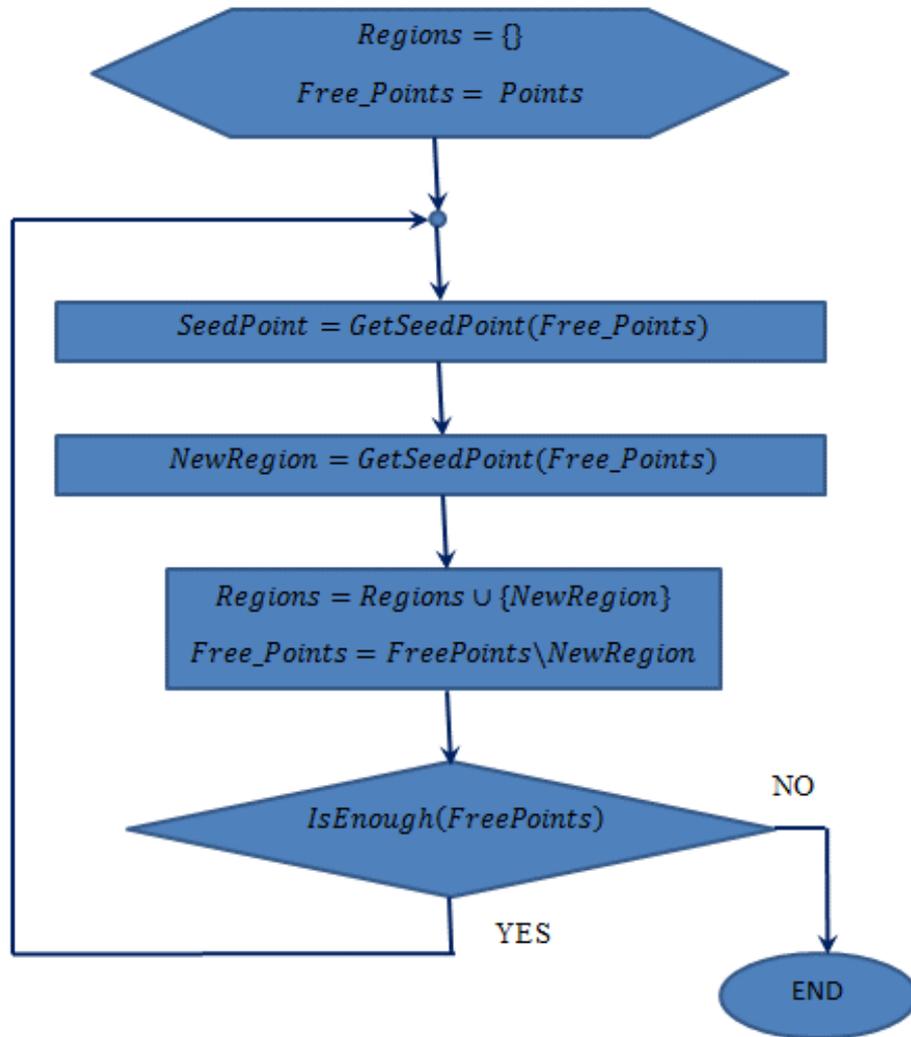
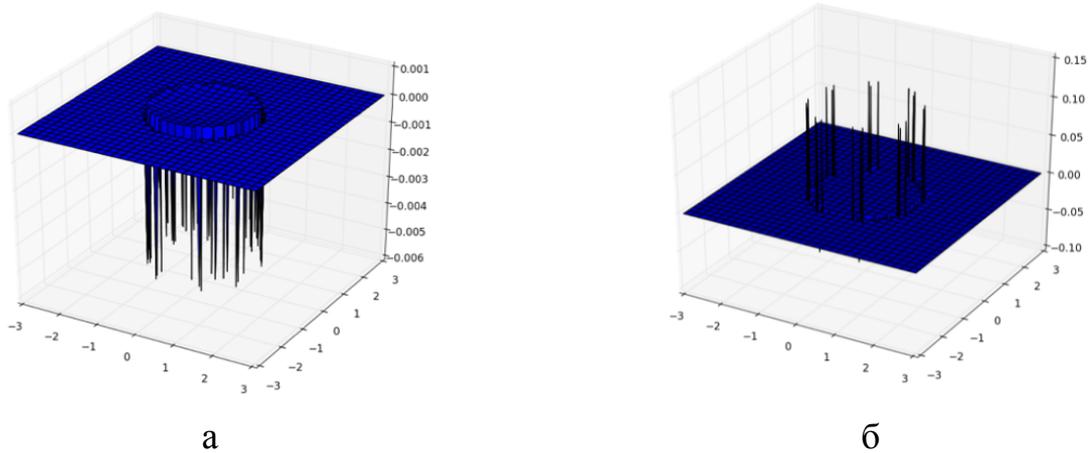


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритма сегментации поверхности

Алгоритм представляет собой разновидность метода исчерпания. Множество точек, не принадлежащих ни одному из построенных регионов однородности (обозначенное на блок-схеме как множество *FreePoints*) в начале инициализируется всем множеством вершин (центров окружностей, задающих области локальной аппроксимации). С помощью процедуры *GetSeedPoint* из текущего множества свободных точек (точек, не принадлежащих ни одному из уже построенных регионов) выбирается стартовая точка для построения нового региона. Построенный по выбранной стартовой точке регион однородности добавляется в множество регионов однородности *NewRegions*, а точки входящие в этот регион, удаляются из множества *FreePoints*. Процедура повторяется до тех пор, пока количество точек, не принадлежащих регионам однородности, не станет меньше заданного числа (строго говоря, процедура *IsEnough* не просто проверяет число

свободных точек, но находит области связности во множестве оставшихся «свободных» точек и оценивает размеры областей связности). В ходе экспериментов нами было опробовано несколько различных алгоритмов выбора стартовой точки. По нашим наблюдениям, предпочтителен алгоритм выбора, основанный на анализе распределения параметра K , при котором в качестве стартовой выбирается точка, значение в которой параметра K наиболее близко к найденному по распределению «наиболее вероятному значению». Последний этап алгоритма построения аналитической модели поверхности – построение аппроксимации в регионах однородности вполне стандартен и не нуждается в описании.

На рисунке 3.7 и рисунке 3.8 представлены данные тестирования программного обеспечения (ПО) алгоритма сегментации, созданного по разработанному нами алгоритму. Карта высоты поверхности, представляет собой сегмент шара радиуса $R = 2$, центр которого расположен в точке $(0,0,-1.5)$, вырезанный плоскостью $z = 0$. Карта задана на прямоугольной сетке с шагом $\Delta x = 0,02$, $\Delta y = 0,02$. Ниже приводятся необходимые пояснения по разработке данного ПО.



(а) поверхность функции средней кривизны поверхности, рассчитанная в локальных окнах радиуса $r = 0,75$; (б) поверхность функции Гауссовой кривизны поверхности, рассчитанная в локальных окнах радиуса $r = 0,75$

Рисунок 3.7 - Данные тестирования ПО алгоритма сегментации: карта высоты поверхности, представляющей собой сегмент шара с заданным радиусом и центром

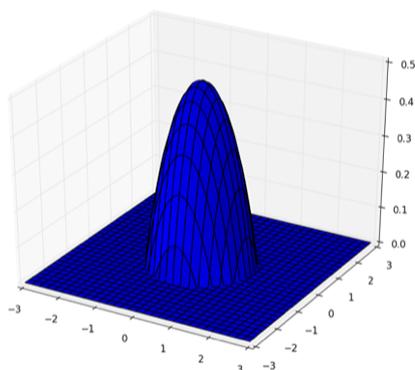


Рисунок 3.8 - Данные тестирования ПО для восстановления формы поверхности

Описанная в данном разделе и частично в нашей статье [58, с.17] роботизированная система 3D сканирования является малочувствительной к ориентации датчиков относительно поверхности и позволяет применять датчики положения с широким диапазоном измеряемых расстояний. За счет высокого быстродействия триангуляционных датчиков, сканирование поверхности с получением облака точек проводится без остановок в узлах сетки сканирования, таким образом, эффективность сканирования повышается. В процессе обработки данных облака точек проводится процедура сегментации поверхности, необходимая для определения геометрически гомогенных регионов сканируемой поверхности и ее аппроксимации известными типами поверхностей. Разработанный нами алгоритм сегментации позволяет аппроксимировать не только гладкие, но и поверхности с резкими перегибами и изломами. Таким образом, алгоритм сегментации поверхности играет важную роль в разрабатываемой технологии обработки поверхности и позволяет получить адекватную аналитическую 3D модель поверхности.

Программное обеспечение интеллектуальной роботизированной системы на этапе 3D сканирования поверхности с использованием лазерных датчиков расстояния разделяется на несколько логических уровней (слоев), причем отдельные уровни могут быть представлены как отдельными приложениями, так и программными модулями одного приложения.

Нижний уровень ПО представляет собой систему сбора данных, позволяющую считывать и сохранять результаты измерений расстояния между датчиком, зафиксированным на руке робота-манипулятора и поверхностью сканируемого объекта. При этом система сбора данных должна иметь доступ к информации о пространственном положении и ориентации рабочего инструмента манипулятора в момент проведения каждого измерения. Конечным результатом проведения фазы сканирования является облако точек, т.е. неструктурированное множество координатных троек (x, y, z) описывающих положение точек на поверхности. Необходимо отметить, что для осуществления своей основной функции – построения облака точек, проектируемая система сбора данных должна предоставлять необходимый функционал для проведения процедуры калибровки лазерного датчика

расстояния, используемого в системе как первичный источник информации, и включать в себя подсистему планирования измерений, позволяющую пользователю задавать размеры поля измерений, геометрические параметры сетки, в узлах которой проводятся измерения, а также ряд других параметров, специфичных для систем сканирования на базе робота-манипулятора.

Верхний уровень ПО производит восстановление поверхности по облаку точек в виде аналитической модели поверхности. Для сохранения результатов нами был разработан текстовый формат представления аналитической модели. ПО также предоставляет пользователю возможность сохранять результат в одном из распространенных форматов описания 3D деталей. Следует отметить, что специфичной для данного исследования является идея использования данных 3D сканирования для формирования траектории движения робота-манипулятора, обрабатывающего поверхность, что делает разумным выделение третьего уровня, а именно ПО – уровня, на котором по данным сканирования генерируется программа робота – манипулятора.

Мы учитывали при разработке ПО, что лазерные триангуляционные датчики расстояния, в целом, как класс приборов, при достаточно высокой точности измерений отличаются высокой степенью зашумленности показаний. Этот факт необходимо учитывать как при проектировании системы сбора данных, так и при разработке верхнего уровня программного обеспечения. Накопленный опыт обработки данных лазерного сканирования позволяет однозначно утверждать, что статистическая обработка и (или) фильтрация данных должна закладываться еще на уровне проектирования алгоритмов обработки данных сканирования. Во-вторых, особенности геометрического строения деталей подвергаемых сканированию (наличие острых гранений и сочленений) делает практически необходимой проведение процедуры сегментации в ходе процесса восстановления поверхности.

Приводим краткое описание результатов работ по разработке ПО верхнего и нижнего уровня для выполнения задач 3D сканирования и реконструкции поверхности с использованием разработанного нами алгоритма сегментации. Отметим, что среди подзадач, на которые разбивается задача создания интеллектуальной роботизированной системы, технически наиболее сложной является проблема синхронизации измерений и перемещений робота-манипулятора.

Триангуляционные лазерные датчики расстояния, выбранные для применения в системе, оснащены последовательными интерфейсами физического уровня RS-485. Протоколы связи с датчиками предусматривают возможность их конфигурирования, причем параметры настройки позволяют выбирать режим передачи данных, а для некоторых видов датчиков выбирать один из стандартных протоколов логического уровня (Modbus-RTU, Can), используемых в промышленных сетях. Контроллер промышленного робота Kawasaki связывается с управляющим компьютером интерфейсом физического уровня RS-232. Для организации сети, состоящей из датчика расстояния, контроллера робота-манипулятора и персонального компьютера рассматриваются два варианта построения физического уровня построения: в

первом варианте ведущее устройство (ПК) использует для связи с двумя ведомыми устройствами один COM – порт (физический уровень интерфейса RS-232). В дальнейшем для преобразования уровней планируется применять конвертор интерфейсов ADAM 4245. Во втором варианте для коммуникаций со стороны компьютера используется порт USB, а для согласования с ведомыми устройствами соответствующие конвертеры интерфейсов.

На первом этапе разработки ПО нижнего уровня были разработаны и протестированы библиотеки, выполняющие низкоуровневые операции с COM – портом, такие как настройка параметров порта (скорости передачи, наличие/отсутствие контроля четности и т.п.), организация приема потока данных с использованием буферизации и т.п. Для разработки прототипа модуля восстановления поверхности был использован язык программирования Python с применением свободно распространяемых библиотек численных методов NumPy и SciPy. Для тестирования мы располагали натурными данными, полученными с использованием оптического 3D сканера. Таким образом, работы по созданию ПО верхнего уровня были проведены параллельно с разработкой низкоуровневого ПО.

Выводы по разделу 3

Результаты исследования, представленные в данном разделе, обладают научной новизной и практической значимостью, впервые:

- разработана схема 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе. Схема включает промышленный робот-манипулятор Kawasaki с установленным на нем датчиком расстояния, контроллер робота-манипулятора, персональный компьютер, связанный с контроллером робота-манипулятора и датчиком расстояния через последовательный интерфейс RS232. Робот-манипулятор Kawasaki позволяет осуществлять высокоточное позирование рабочего инструмента, за счет чего данная схема позволяет реализовать относительно недорогую для достигнутых характеристик систему 3D-сканирования, обладающую высоким разрешением и точностью;

- разработан оригинальный алгоритм процедуры сегментации поверхности с построением аналитической модели поверхности. Алгоритм основан на применении локальной параметрической модели и последующего объединения локальных участков поверхности, обладающих однородной геометрической структурой, что позволяет без априорных предположений о геометрическом строении поверхности строить аналитическую 3D модель поверхности со сложным строением.

Разработанная схема системы 3D сканирования позволяет применять датчики положения с широким диапазоном измеряемых расстояний с произвольной ориентацией датчиков относительно сканирования поверхности. За счет высокого быстродействия триангуляционных датчиков, сканирование поверхности с получением облака точек проводится без остановок в узлах сетки сканирования, что позволяет повысить эффективность сканирования.

Таким образом, подтверждено первое положение, выносимое на защиту, разработаны и апробированы схема системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботоманипуляторе и алгоритм сегментации с построением аналитической модели поверхности.

Частично исследование, представленное в данной главе, также было представлено в наших публикациях [11, р. 146; 62, р. 81; 67, р.39; 86, р.1; 88-90].

В целом в процессе выполнения исследования по проекту с грантовым финансированием № АР 05130525 была разработана и апробирована не только данная схема системы 3D сканирования, но и двухстадийная система 3D сканирования, а также синтез алгоритма управления роботом-манипулятором для 3 D сканирования, однако эта часть исследования по проекту представляла собой отдельную научную задачу, не являющуюся предметом рассмотрения данной диссертации.

4 ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА И ГЕНЕРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ПО СФОРМИРОВАННОЙ ТРАЕКТОРИИ, ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В данном разделе диссертации последовательно описывается работа интеллектуальной системы роботизированной плазменной резки и обработки поверхности, с упором на формирование траектории рабочего инструмента и генерацию программы робота, приводятся примеры практической реализации технологии.

Как описывалось в предыдущем разделе 3, нами была разработана схема роботизированного 3D – сканирования, в которой замеры в узлах сетки сканирования производятся единожды. Мы применили на практике эту систему, и приводим тут обоснование, почему единичные измерения в узлах выбранной сетки сканирования предпочтительны.

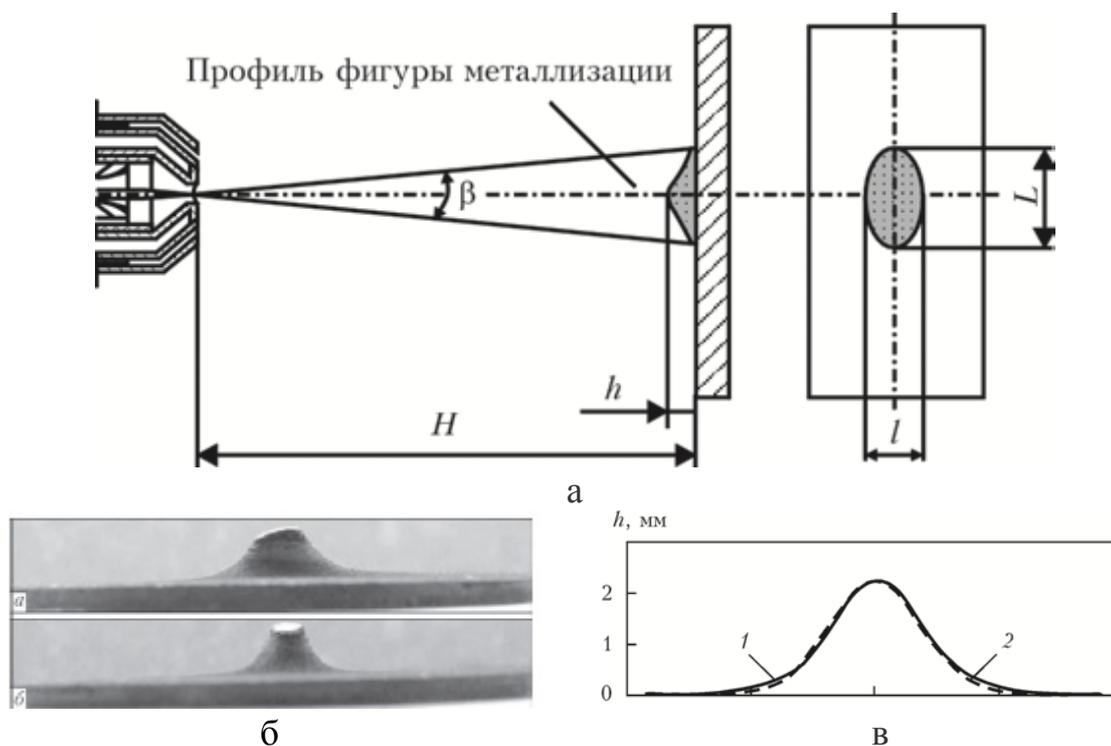
Во-первых, быстродействие триангуляционных датчиков расстояния настолько велико, что допускает проведение сканирования с движущегося датчика, без остановок в узлах сетки сканирования. Контроллер робота-манипулятора позволяет по запросу считывать текущее пространственное положение рабочего инструмента, а применяемые триангуляционные датчики расстояния снабжены сетевым интерфейсом, позволяющим производить измерение по запросу. В процессе сканирования, с управляющего компьютера последовательно выполняется пара запросов – запрос на проведение измерений к датчику расстояния и запрос на передачу координат рабочего инструмента к контроллеру робота-манипулятора. Интервал времени между этими двумя запросами настолько мал, что при разумном выборе скорости перемещения датчика, расстоянием пройденным датчиком за этот интервал времени можно пренебречь. Такая схема сканирования позволяет значительно повысить производительность сканирования (в сравнении со схемой, в которой манипулятор осуществляет остановки в узлах сетки сканирования) и к тому же, провести большое число измерений, необходимое для точного восстановления поверхности по зашумленным данным триангуляционного датчика расстояния.

Во-вторых, при равном общем числе измерений, схема с однократными измерениями во множестве точек, распределенных по сканируемой поверхности, имеет преимущество в точности восстановления поверхности, над схемой с многократными измерениями в более разреженных точках сканирования. При использовании данной схемы сканирования траектория датчика представляет собой ломаную линию, лежащую в горизонтальной плоскости. Траектория состоит из П-образных сегментов, покрывающих область сканирования. При этом рабочие участки траектории (сегменты ломаной линии, при движении по которым осуществляется опрос датчика расстояния) представляют собой отрезки параллельных прямых, расположенных на равных расстояниях друг от друга. Данные сканирования представляют собой облако точек. Строго говоря, это облако точек представляет собой неупорядоченное множество троек декартовых координат

точек на сканируемой поверхности. При избранной схеме сканирования, первая пара координат (положение датчика на плоскости траектории датчика) измеряется с высокой степенью точности, в то время как третья координата (расстояние от плоскости траектории датчика до точки сканируемой поверхности) может рассматриваться как случайная величина, математическое ожидание которой соответствует действительному значению этой координаты. Таким образом, попытка восстановления поверхности прямыми методами 2D-интерполяции по данным сканирования приведет к недопустимо большим ошибкам.

С целью преодоления этих трудностей, мы разработали алгоритм обработки данных, использующий регрессионные методы анализа для построения локальной параметризуемой модели поверхности. Разработанный нами алгоритм включает в себя процедуру сегментации поверхности, в ходе которой локальные модели перекрывающихся сегментов поверхности объединяются в области, имеющие однородную геометрическую структуру (описываемую общей аналитической параметризуемой моделью). Такая процедура сегментации необходима для дальнейшего формирования траектории манипулятора по двум причинам: во-первых, применяемые нами методы формирования траектории манипулятора используют в качестве входных данных аналитическую модель поверхности. Во-вторых, использование методов сегментации позволяет частично решить проблемы, возникающие при восстановлении поверхностей, форма которых не может быть описана гладкой функцией двух переменных (поверхности с «изломами»).

При проектировании системы автоматической генерации программы промышленного робота-манипулятора для нанесения микроплазменных покрытий на поверхность произвольной формы мы принимали ряд допущений и ограничений, касающихся как модели процесса нанесения покрытия, так и технологических параметров процесса. Так как рабочий инструмент манипулятора представляет собой перемещаемый плазменный источник, формирующий плазменную струю с потоком частиц покрытия или плазменную струю из ионизированных частиц для плазменной резки, то предполагалось, что в любом случае плазменная струя может моделироваться потоком частиц, имеющим форму конуса. Предполагалось также, что распределение потока частиц через плоскость, перпендикулярную оси конуса напыления, радиально симметрично. Эти предположения обсуждались с разработчиками установки микроплазменного напыления, старшими научными сотрудниками Института электросварки им. Е.О. Патона С. Войнарович и О.Кислиця, которые любезно предоставили нам экспериментальные данные о распределении частиц при микроплазменном напылении - данные о пятне металлизации (стационарный случай) и о форме формирующегося покрытия. Приводим данные из их работы [91] (рисунок 4.1), подтверждающие выбор модели с радиально-симметричным относительно оси конуса распределением частиц.



(а) - схема исследования формирования пятна напыления при МПН; (б) - вид стационарно напыленного участка покрытия; (в) - график распределения материала в данном эксперименте, где 1 — график распределения Гаусса (расчетный); 2 — фактический профиль фигуры металлизации

Рисунок 4.1 - Распределение материала при МПН

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [91, с. 20]

К траектории движения рабочего инструмента манипулятора предъявлялись два обязательных требования.

Первое - в любой момент времени ось конуса напыления должна быть перпендикулярна обрабатываемой поверхности. При выполнении этого требования траектории рабочего инструмента в пространстве будет соответствовать кривая на обрабатываемой поверхности, являющаяся геометрическим местом точек пересечения оси конуса напыления с поверхностью. В дальнейшем мы будем называть эту кривую следом траектории рабочего инструмента манипулятора.

Вторым требованием к траектории рабочего инструмента манипулятора было постоянство расстояния от рабочего инструмента до поверхности на всем протяжении траектории.

Мы полагаем также, что обрабатываемая поверхность допускает описание в виде кусочно-гладкой функции, причем в областях, геометрические размеры которых имеют порядок геометрических размеров пятна напыления, поверхность допускает аппроксимацию плоскостью с достаточной степенью точности.

Генерируемая траектория рабочего инструмента манипулятора имеет U – образную форму, при этом след траектории на поверхности состоит из рабочих сегментов, представляющих собой эквидистанциальные кривые на поверхности, и сегментов, при прохождении которых не осуществляется напыление, но осуществляется маневр манипулятора, имеющий целью выход на смежный рабочий сегмент траектории. При этом предполагается, что зона нанесения покрытия ограничена замкнутой кривой на поверхности. Схематически U – образная траектория рабочего инструмента манипулятора изображена на рисунке 4.2.

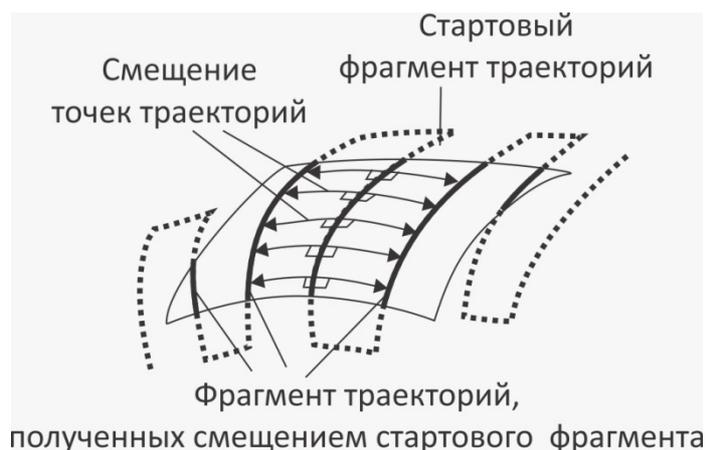


Рисунок 4.2 - U – образная траектория рабочего инструмента манипулятора, генерируемая стартовым сегментом.

Мы применяем схему генерации траектории, при которой рабочие сегменты траектории строятся как эквидистанционные копии одного выделенного рабочего фрагмента траектории.

Обобщая опыт практического применения методов формирования траектории рабочего инструмента этого класса, описанный в работах [92, 93], можно утверждать, что выбор стартовой траектории оказывает сильнейшее влияние, как на качество покрытия, так и на производительность процесса обработки.

Говоря о влиянии выбора стартовой траектории, мы имеем ввиду, в первую очередь, однородность толщины наносимого покрытия (смысл этого утверждения будет раскрыт в дальнейшем при обосновании используемого нами метода формирования стартовой траектории).

Большинство существующих алгоритмов формирования траектории [13, р. 42; 14, р. 420; 15, р. 565; 16, р.3; 92, р.2; 93, р.884] применяют для формирования стартового фрагмента траектории метод секущей плоскости, при котором линия пересечения поверхности с некоторой плоскостью принимается в качестве стартового фрагмента траектории. Для формирования стартового фрагмента траектории мы применяем специальным образом выбранную геодезическую линию на поверхности. Приведем необходимые определения и обоснования выбора стартового сегмента такого вида.

Для кривых на поверхностях разделяют понятия нормальной и геодезической кривизны. Ниже мы приведем определения понятий нормальной и геодезической кривизны кривой на поверхности, основывающиеся на понятии вектора кривизны кривой. Пусть $\vec{\tau}(s)$ функция, описывающая зависимость касательного к некоторой гладкой кривой вектора единичной длины от натурального параметра s . Тогда вектор кривизны кривой, \vec{k} , определяется формулой (4.1):

$$\vec{k}(s_0) = \left(\frac{d\vec{\tau}}{ds} \right) \Big|_{s=s_0} \quad (4.1)$$

Теперь рассмотрим на поверхности S гладкую кривую γ , проходящую через точку $X = X(u, v)$, лежащую на S . Пусть $\vec{r} = \vec{r}(s) = \vec{r}(u(s), v(s))$ - некоторая натуральная параметризация кривой γ . В точке X найдем единичный вектор $\vec{\tau}$, касательный к γ . Аналитическое выражение для $\vec{\tau}$ дается уравнением (4.2).

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{r}}{ds} \quad (4.2)$$

Обозначим нормаль к поверхности S в точке X как \vec{n} , и определим вектор $\vec{b} = \vec{n} \times \vec{\tau}$. Нетрудно показать, что тройка векторов $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$ линейно независима, что позволяет представить вектор кривизны поверхности \vec{k} в виде разложения по векторам базиса $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$ (4.3):

$$\vec{k} = \alpha \cdot \vec{\tau} + \beta \cdot \vec{n} + \delta \cdot \vec{b} \quad (4.3)$$

Доказано (см. например [94]), что $\alpha = (\vec{k}, \vec{\tau}) = 0$, а коэффициенты β и δ определяются уравнениями (4.4) и (4.5) и носят специальные названия.

$$\beta = k_n = (\vec{k}, \vec{n}) \quad (4.4)$$

где k_n называют нормальной кривизной поверхности.

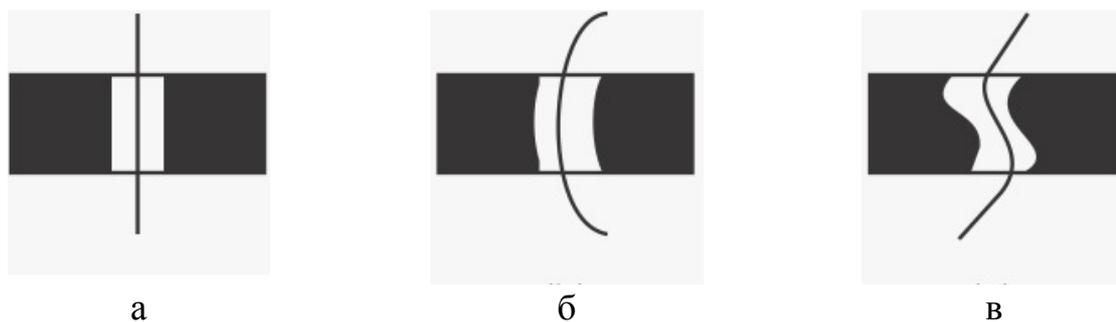
$$\delta = k_g = (\vec{k}, \vec{b}) \quad (4.5)$$

где k_g называют геодезической кривизной поверхности.

Очевидно, что нормальная кривизна любой кривой на плоскости равна нулю в любой точке кривой. Термин «геодезическая линия на поверхности» используется для обозначения кривой на поверхности, геодезическая кривизна

которой в любой точке равна нулю. Таким образом, геодезическими линиями на плоскости будут прямые линии. Кроме того, в общем случае, геодезическая линия, соединяющая две точки на поверхности, представляет собой кривую наименьшей длины, из всех кривых на поверхности, проходящих через эти две заданные точки. Таким образом, геодезическая кривизна представляет собой меру искривления во внутренней геометрии поверхности, и геодезические линии играют во внутренней геометрии поверхности ту же роль, что и прямые в геометрии на плоскости.

Пусть кривая на поверхности представляет собой след сопла напылителя. На рисунке 4.3 представлены три возможных случая влияния геодезической кривизны следа (ГКС) траектории, на однородность наносимого покрытия.



(а) ГКС = 0, равномерное распределение покрытия по обе стороны траектории; (б) ГКС = const, толщина покрытия увеличена по направлению изгиба кривой; (в) ГКС переменная, неравномерное распределение покрытия по обе стороны траектории

Рисунок 4.3 - Влияние геодезической кривизны следа (ГКС) траектории, на однородность наносимого покрытия

Из рисунка 4.3 следует, что в случае (а), когда геодезическая кривизна следа (ГКС) равна нулю, напыляемый материал будет распределяться равномерно по обе стороны траектории следа. Случай (б) соответствует постоянной геодезической кривизне траектории. Очевидно, что большая часть напыляемого материала будет при этом скапливаться в направлении изгиба кривой. Также ясно, что в случае переменной геодезической кривизны траектории, случай (в), толщина покрытия будет распределяться неравномерно по обе стороны траектории. Это наглядное рассмотрение заставляет предположить, что оптимальным выбором стартового сегмента траектории будет одна из геодезических линий на поверхности. Кроме того, это рассмотрение показывает, что желательно выбирать стартовый сегмент таким образом, чтобы сегменты траектории, полученные смещением стартового сегмента, обладали возможно меньшей геодезической кривизной.

В ходе разработки автоматической системы планирования траектории и генерации программы движения робота-манипулятора по сформированной трехмерной модели изделия нами были опробованы три способа генерации стартового фрагмента. Эти три способа генерации стартового фрагмента включали два автоматических и один полуавтоматический. Первый

автоматический способ основывался на критерии минимальной высоты, предложенном в работе [92, p.3], второй, оригинальный способ основывался на переборе направлений стартового сегмента и оценке качества сгенерированных траекторий по интегральному критерию, третий способ был полуавтоматическим, при котором оператор задает точку и направление в ней стартовой геодезической кривой.

Поясним задачу автоматической генерации программы робота-манипулятора по заданной траектории движения рабочего инструмента. Дадим математическую формулировку проблемы, как задачи оптимальной аппроксимации пространственной кривой последовательностью геометрических примитивов с замечаниями о программной реализации алгоритмов автоматической генерации программы робота-манипулятора.

Результатом процедуры генерации траектории рабочего инструмента робота – манипулятора является последовательность точек в трехмерном пространстве, причем мы можем полагать, что эти точки лежат на кусочно-гладкой пространственной кривой. Мы будем рассматривать эту последовательность точек как последовательность вершин ломаной линии в пространстве, аппроксимирующей «идеальную» траекторию рабочего инструмента. Перед тем, как сформулировать постановку задачи, сразу отметим несколько важных обстоятельств: Во-первых, система команд контроллера промышленного робота Kawasaki включает команду MOVE, формат которой приводится как (4.6):

$$\text{Move } (<x1,y1>) (<x2,y2>) <velocity> \quad (4.6)$$

Таким образом, практически возможна процедура генерации программы робота-манипулятора, состоящая в трансляции описания ломанной в последовательность команд MOVE, при выполнении которой каждому сегменту ломанной ставится в соответствие одна команда MOVE.

Однако такой метод генерации программы робота-манипулятора обладает существенными недостатками принципиального характера. Например, корректно определенная программа робота-манипулятора может соответствовать физически неосуществимому процессу движения. В качестве примера рассмотрим программу, состоящую из двух команд MOVE, задающих траекторию движения манипулятора в виде ломаной ABC, состоящей из двух перпендикулярных друг другу отрезков AB и BC. Мы будем считать, что модуль скорости движения рабочего инструмента манипулятора v по обоим сегментам ломаной одинаков (изменяться в ходе движения будет направление вектора \vec{v} , но не модуль вектора $v = |\vec{v}|$). Такая программа будет формально корректной и будет принята на исполнение контроллером робота манипулятора. Однако очевидно, что прохождение такой траектории с постоянной по модулю скоростью физически невозможно, так как в точке B ускорение рабочего инструмента должно быть бесконечным (вектор скорости не может изменяться скачком). Практически, при исполнении такой программы, рабочий инструмент манипулятора будет останавливаться в точке

B и, соответственно, отрезки AB и BC не будут проходиться с постоянной скоростью v , заданной программой манипулятора и в целом, движение по сегментам AB и BC не будет равномерным. Очевидно, что проблемы такого рода будут возникать при прохождении любой траектории в форме ломаной линии, каковы бы ни были углы между смежными сегментами ломаной.

Можно выделить два фактора, влияющих на качество исполнения программы, синтезированной рассматриваемым способом:

- 1) максимальная величина угла между сегментами ломаной линии траектории;
- 2) величина модуля скорости движения рабочего инструмента манипулятора.

Движение по одной и той же траектории в виде ломаной линии будет тем сильнее отличаться от равномерного, чем больше задаваемая командами MOVE скорость движения рабочего инструмента. Таким образом, рассматриваемый «прямой» метод генерации программы робота-манипулятора плохо подходит для задач, в которых требуется точное соблюдение задаваемых временных параметров прохождения траектории.

Альтернатива методу генерации программы манипулятора, в котором сгенерированная программа состоит из последовательности команд MOVE, состоит в использовании команды CIRCLE языка AS, наряду с командами MOVE. Траекторией движения манипулятора в таком случае будет кривая, представляющая собой последовательность геометрических примитивов – отрезков прямых и дуг окружностей. В общепринятой математической терминологии такую кривую можно описать следующим образом: Параметризованная натуральным параметром кривая задается зависимостью радиус-вектора \vec{r} , соответствующего точке кривой, от натурального параметра s – длины дуги кривой. Отрезок $[0, L]$, где L – длина кривой, разбит $n - 1$ точками s_1, s_2, \dots, s_{n-1} на n отрезков $[0, s_1), (s_1, s_2], \dots, (s_{n-1}, L]$. Последовательность точек s_1, s_2, \dots, s_{n-1} полагается возрастающей. Функция $\vec{r}(s)$ задается соотношениями (4.7).

$$\vec{r}(s) = \begin{cases} \vec{r}_1(s), & \text{если } s \in [0, s_1) \\ \vec{r}_2(s - s_1), & \text{если } s \in (s_1, s_2] \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \vec{r}_n(s - s_{n-1}), & \text{если } s \in (s_{n-1}, L] \end{cases} \quad (4.7)$$

При этом каждая из функций $\vec{r}_1(s), \vec{r}_2(s), \dots, \vec{r}_n(s)$ описывает один из двух типов графических примитивов – отрезок прямой (описывается функциями вида $\vec{r}(s) = \vec{r}_0 + s \cdot \vec{e}$, где \vec{e} направляющий вектор единичной длины) или дугой окружности (описывается). Сформулируем требования к аппроксимирующей кривой:

- 1) непрерывность. Как будет показано далее, это требование в предлагаемых нами методах выполняется автоматически;

2) гладкость. Гарантируется гладкость первого порядка, т.е. непрерывность функции $\vec{r}'(s) = \frac{d}{ds}r(s)$. Геометрически вектор $\vec{r}'(s)$ - это касательный к кривой вектор единичной длины. Если траектория рабочего инструмента манипулятора не будет гладкой кривой, то такую траекторию физически невозможно пройти с постоянной по модулю скоростью, то есть рабочий инструмент будет останавливаться перед точками изломов, а затем разгоняться после прохождения точки излома. Требование гладкости траектории для случая, когда траектория представляет собой последовательность геометрических примитивов, допускает наглядную геометрическую интерпретацию. Смежные дуги окружностей и отрезки прямых должны быть сопряжены друг с другом. Процедура сопряжения отрезков дугой окружности используется в предлагаемом нами методе генерации программы манипулятора.

3) соблюдение задаваемой точности аппроксимации. Точность аппроксимации задается численным критерием. Процедура аппроксимации строится таким образом, чтобы расстояние от любой точки кривой траектории до ближайшей точки аппроксимирующей кривой не превышало этой пороговой величины (критерия точности аппроксимации).

Таким образом, техническую задачу автоматической генерации программы движения робота – манипулятора по заданной траектории можно разделить на две фазы: Построение аппроксимации траектории кривой, представляющей собой последовательность геометрических примитивов, и трансляции результата первой фазы в последовательность команд MOVE и CIRCLE языка AS. Эту фазу, результатом выполнения которой является текстовый файл, содержащий программу манипулятора, мы назвали фазой трансляции описания последовательности геометрических примитивов в программу робота-манипулятора.

При разработке программного обеспечения, реализующего алгоритмы автоматической генерации программы робота-манипулятора по заданной траектории, программы генерации разбиении на два программных модуля. Выходным результатом работы первого модуля является текстовый файл, содержащий текстовое описание последовательности геометрических примитивов в виде s – выражения. Этот текстовый файл служит источником входных данных для модуля трансляции описания последовательности геометрических примитивов в программу робота-манипулятора. Сам модуль трансляции состоит из парсера s – выражений, предназначенного для считывания входного файла, и собственно блока трансляции. Программная реализация парсера и блока трансляции является стандартной задачей, рассмотрим подробнее задачу оптимальной аппроксимации пространственной кривой последовательностью геометрических примитивов и методы аппроксимации кривой кусочно-линейной функцией и их применение к решению поставленной задачи аппроксимации.

Мы разработали оригинальный метод аппроксимации плоских кривых, последовательностью геометрических примитивов, основанный на применении

функции угловой характеристики кривой. В этом методе также используется кусочно-линейная аппроксимация, а именно метод «длин хорд и дуг» или CAL (Chord and Arc Length)- алгоритм. Сущность CAL алгоритма состоит в выборе несколько особых точек на кривой (доминирующих точек) так, чтобы соблюдался критерий точности аппроксимации, сходимость которого строго доказана [95]. Алгоритм можно представить нижеприведенной последовательностью шагов:

1) Начиная с любой точки замкнутой кривой (в первой точки на открытой кривой), вычислить длину хорды C и длину дуги кривой S , для каждой последующей точки, и когда величина критерия $\frac{1}{2} \cdot \sqrt{S^2 - C^2}$ больше порога отклонения помечаем предыдущую точку как доминирующую

2) Объединить доминирующие точки, протестировав каждую найденную доминирующую точку - может ли она быть устранена без превышения порога на отклонение.

3) Вычислить (параметризованную) прямую линию наименьших квадратов для множества точек на кривой, заключенных между двумя последними доминирующими точками

4) Найти на построенной прямой точку, ближайшую к последней доминирующей точке.

5) Выбрать середину отрезка прямой, соединяющей найденную на предыдущем шаге точку с последней доминирующей точкой как последнюю точку приближения.

При разумном выборе величины порога отклонения алгоритм позволяет приближать кривые сложной формы ломанными с малым числом звеньев (рисунок 4.4)

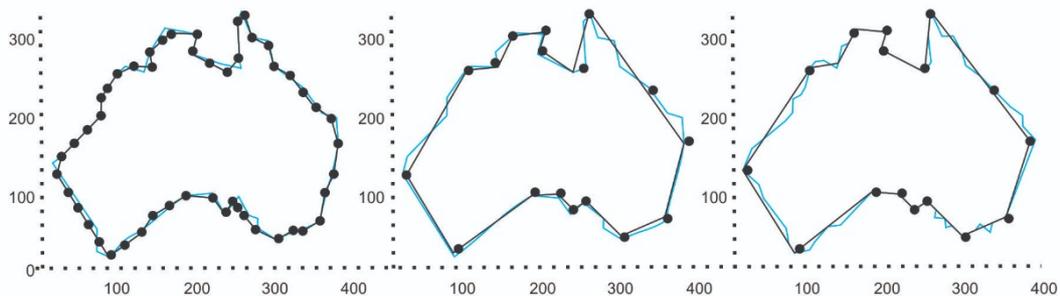


Рисунок 4.4 - Результат применения различных модификаций алгоритма CAL к плоской кривой сложной формы, задаваемой большим количеством точек (1708 точек)

Примечание - Рисунок составлен на основе источника [95, p. 10]

Несмотря на то, что алгоритм CAL изначально разрабатывался для плоских кривых [95, p.8], впоследствии он стал применяться и для задач аппроксимации кривых в трехмерном пространстве, так как и сам алгоритм, и доказательство его сходимости не претерпевают никаких изменений при

переходе к случаю аппроксимации пространственной кривой. Мы адаптировали САЛ –алгоритм для решения нашей основной задачи – аппроксимации траектории гладкой кривой, представляющей собой последовательность отрезков и дуг окружности. Для этого достаточно выполнить сопряжение смежных сегментов ломаной линии дугами окружностей. Как видно из рисунка 4.5, радиус сопрягающей окружности ограничен сверху величиной R_{max} , определяемой формулой (4.8)

$$R_{max} = \min\{l_1, l_2\} \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (4.8)$$

где l_1, l_2 – длины смежных сегментов ломаной, а φ угол между смежными сегментами. Таким образом, для каждой вершины ломаной радиус сопрягающей окружности можно выбирать из интервала $[0, R_{max}]$.

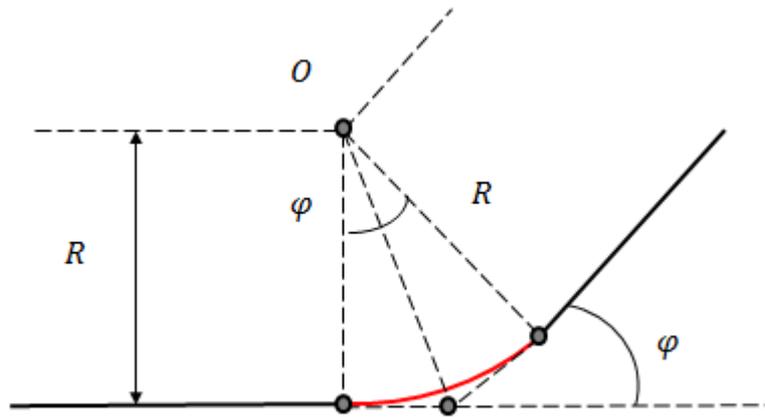


Рисунок 4.5. Сопряжение отрезков дугой окружности.

При построении алгоритма выбора радиуса сопряжения мы исходили из тех соображений, что выбор радиуса представляет собой компромисс между двумя крайностями. С одной стороны, выбор максимально возможного значения R_{max} может привести к недопустимо большой погрешности аппроксимации, с другой стороны, выбор чрезмерно малого радиуса сопряжения может привести к неприемлемым ограничениям на скорость движения рабочего инструмента. Поясним последнее утверждение: при движении по дуге окружности радиуса R с постоянной по модулю скоростью v , величина центростремительного ускорения $\frac{v^2}{R}$ обратно пропорциональна радиусу и пропорциональна квадрату скорости. Понятно, что при фиксированной величине скорости движения существует нижний предельно допустимый порог радиуса, при котором привод манипулятора сможет обеспечивать такое прохождение траектории. Кроме того, при движении с постоянной скоростью по прямой линии ускорение рабочего инструмента равно нулю, и изменение величины ускорения скачком физически невозможно – при прохождении сочленения, так или иначе нарушается равномерность движения. Таким образом, в целях соблюдения временных параметров

прохождения траектории желательнее увеличивать радиус сопрягающей окружности. В качестве компромиссного решения мы используем алгоритм выбора радиуса сопрягающей окружности, основанный на вычислении оценки ошибки аппроксимации δ по формуле (4.9)

$$\delta(R) = \frac{\left(1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)}{\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \cdot R \quad (4.9)$$

В каждой точке сочленения вычисляется величина R_{max} по формуле (4.8), затем вычисляется соответствующая погрешность $\delta_{Rmax} = \delta(R_{max})$. Затем δ_{Rmax} сравнивается с заданной пороговой величиной погрешности δ_{max} . В случае $\delta_{Rmax} \leq \delta_{max}$ величина R_{max} выбирается в качестве радиуса сопрягающей окружности. В противном случае, радиус сопрягающей окружности рассчитывается по формуле (4.10)

$$R = \frac{\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{\left(1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)} \cdot \delta_{max} \quad (4.10)$$

Описанный алгоритм, несмотря на ряд привлекательных качеств: малую вычислительную емкость, гарантированное соблюдение точности аппроксимации и легкость программной реализации, обладает существенным недостатком, проявляющимся в ошибке аппроксимации. Если подать на вход алгоритма кривую, представляющую собой дугу окружности, то на выходе мы получим последовательность сопряженных дугами окружности отрезков, а не желательный результат, то есть последовательность из одного элемента – дуги окружности, совпадающей с входной дугой.

Мы разработали алгоритм оптимальной аппроксимации плоской кривой последовательностью геометрических примитивов: отрезков прямых и дуг окружностей. Алгоритм основывается на использовании введенной нами в рассмотрение специальной математической конструкции – функции угловой характеристики кривой.

Дадим геометрическое определение функции угловой характеристики кривой. Будем определять положение точки M на кривой длиной дуги кривой AM .

Обозначим $\vec{e}(s)$ касательный вектор, являющийся направляющим вектором прямой, касающейся γ в точке $M(s)$. Тогда мы можем определить функцию $\alpha(s)$, считая, что для заданной длины дуги s , $\alpha(s)$ – угол между векторами $\vec{e}(s)$ и \vec{v}_0 (см. рисунок 4.6).

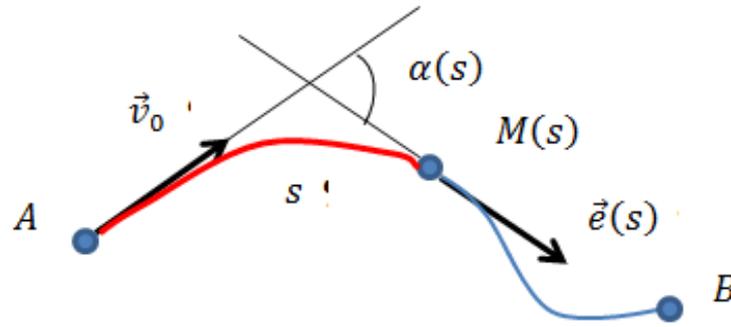


Рисунок 4.6 - Геометрическое определение функции $\alpha(s)$

Определим аналитически функцию $Ang(\vec{e}_1, \vec{e}_2)$ определенную на множестве упорядоченных пар векторов единичной длины $E \times E$, где мы обозначили множество двумерных векторов единичной длины $E = \{\vec{e} \in \mathbb{R}^2 \mid |\vec{e}| = 1\}$. Областью значений функции Ang будет отрезок действительной прямой $D = [-\pi, \pi]$. Для точного определения введем в рассмотрение функцию $S: \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, определенную выражением (4.11):

$$S(\vec{a}, \vec{b}) = a_x \cdot b_y - a_y \cdot b_x \quad (4.11)$$

Геометрически, функция $S(\vec{a}, \vec{b})$ представляет собой ориентированную площадь параллелограмма, натянутого на векторы $\vec{a} = (a_x, a_y)$ и $\vec{b} = (b_x, b_y)$. Пусть $\vec{e}_1, \vec{e}_2 \in E$ и $\vec{e}_1 = (\cos(\alpha), \sin(\alpha))$, $\vec{e}_2 = (\cos(\beta), \sin(\beta))$. Тогда, очевидно, справедливо равенство (4.12):

$$S(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = \sin(\beta - \alpha) \quad (4.12)$$

Теперь мы можем определить функцию Ang равенством (4.13):

$$Ang(\vec{e}_1, \vec{e}_2) = \arcsin(S(\vec{e}_1, \vec{e}_2)) \quad (4.13)$$

В дальнейшем, говоря об угле α между двумя ненулевыми векторами \vec{a} и \vec{b} , мы будем подразумевать значение (4.14)

$$\alpha = Ang\left(\frac{\vec{a}}{|\vec{a}|}, \frac{\vec{b}}{|\vec{b}|}\right) \quad (4.14)$$

Если длина всей кривой γ равна L (т.е. $s(B) = L$, то функция $\alpha(s)$ определена на интервале $s \in [0, L]$. Определим выражением (4.15) на интервале $[0, 1]$ функцию $\theta(x)$:

$$\theta(x) = \alpha(x \cdot L) \quad (4.15)$$

Мы будем называть $\theta(x)$ функцией угловой характеристики кривой γ (или просто угловой характеристикой γ).

Свойства функции угловой характеристики:

1) Если кривая γ представляет собой отрезок прямой, то ее функция угловой характеристики $\theta(x)$ определяется формулой (4.16)

$$\forall x \in [0,1] \theta(x) = 0 \quad (4.16)$$

2) Если кривая γ является дугой окружности радиуса R , которую отсекает угол φ , то вне зависимости от величины R , ее функция угловой характеристики будет линейной функцией вида (4.17)

$$\theta(x) = \varphi \cdot x \quad (4.17)$$

Именно эти свойства позволяют эффективно применять функцию угловой характеристики кривой к задаче аппроксимации кривой последовательностью геометрических примитивов. А именно, если выполнить кусочно-линейную аппроксимацию функции угловой характеристики, то сегментам ломаной будут соответствовать дуги окружностей и отрезки, причем смежные дуги окружностей и отрезки окажутся сопряженными. Таким образом, кусочно-линейной аппроксимации функции угловой характеристики кривой однозначно соответствует гладкая кривая, представляющая собой последовательность дуг окружности и отрезков.

Таким образом, разработанный и апробированный в данном исследовании процесс построения траектории рабочего инструмента робота-манипулятора состоит из двух стадий: на первом этапе строится след траектории, как список координат точек, лежащих на соответствующей пространственной кривой. Затем строится собственно траектория рабочего инструмента, также в виде списка координат точек. При этом по каждой точке следа траектории, генерируется точка траектории манипулятора путем сдвига в направлении вектора нормали к поверхности на величину, определяющую расстояние от поверхности до вершины конуса напыления. Нерабочим сегментам (сегментам маневрирования) ставится в соответствие стандартный паттерн последовательности координат точек.

Входными данными для программного модуля, генерирующего последовательность команд контроллера робота манипулятора, является список координат последовательно проходимых точек траектории. Поскольку траектория движения рабочего инструмента манипулятора программно определяется последовательностью стандартных паттернов движения двух видов – движением по отрезку прямой (соответствующему группе команд MOVE языка AS) и движением по сегменту окружности (соответствующему группе команд CIRCLE языка AS), основной функцией модуля генерации программы манипулятора является оптимальная трансляция последовательности точек траектории манипулятора в текстовый файл, содержащий последовательность команд контроллера манипулятора. Отметим,

что наиболее простой в реализации метод прямой трансляции, при котором траектория рабочего инструмента представляет собой ломаную линию с заданными вершинами, не всегда дает удовлетворительные результаты. Поэтому для трансляции применяется процедура сплайн-интерполяции по входной последовательности точек с последующей процедурой сегментации полученной гладкой кривой для аппроксимации ее последовательностью геометрических примитивов.

Мы адаптировали CAL –алгоритм для решения задачи аппроксимации траектории гладкой кривой последовательностью отрезков и дуг окружности, и разработали алгоритм оптимальной аппроксимации плоской кривой последовательностью данных геометрических примитивов, введя специальную функцию угловой характеристики кривой. Таким образом, применяемый в данной работе для планирования траектории и генерации программы робота-манипулятора алгоритм аппроксимации по-прежнему обладает малой вычислительной емкостью, гарантированным соблюдением точности аппроксимации, легкостью программной реализации, но ошибки аппроксимации были существенно уменьшены, что было очень важно для практического применения разработанных алгоритмов управления. Практически важно то, что разработанные нами алгоритмы автоматического планирования траектории и генерации программы робота обеспечивают плавное перемещение рабочего инструмента робота-манипулятора с постоянной по модулю скоростью вдоль гладкой кривой - 3D модели изделия, без риска возникновения и нежелательных больших значений центростремительного ускорения при маневрах манипулятора. Алгоритмы являются новыми, и в литературе нет описаний применения алгоритмов планирования траектории и генерации программы к архитектуре языка AS, которым управляется робот-манипулятор Kawasaki. Разработанные нами алгоритмы автоматического планирования траектории и генерации программы робота-манипулятора Kawasaki являются новыми и впервые применены для управления роботом-манипулятором при выполнении технологических операций плазменной резки и микроплазменного напыления покрытий.

Для отработки технологических решений на опытном производственном участке применяли разработанную нами схему 3D сканирования и алгоритмы сегментации, планирования траектории и генерации программы робота, то есть реализовали на практике работу интеллектуальной системы роботизированной плазменной резки и обработки поверхности. В процессе работы системы, робот-манипулятор последовательно выполняет сканирование поверхности закрепленным датчиком расстояния, воссоздание 3D-модели поверхности и осуществляет либо плазменную резку (закрепленным плазморезом), либо плазменное напыление покрытия (закрепленным микроплазмотроном), двигаясь по воссозданной 3D- траектории, при этом генерацию программы движения выполняет сам робот-манипулятор (интеллектуальное управление).

Были апробированы разработанные алгоритмы управления и отработаны технологические решения для плазменной резки крупногабаритных изделий и для напыления защитных покрытий с целью восстановления изношенных

крупногабаритных деталей, а также для МПН покрытий из биосовместимых материалов. Приведем примеры практической реализации разработанной технологии для обработки крупногабаритных изделий.

Пример 1. Роботизированная плазменная резка и микроплазменное напыление (МПН) защитных покрытий для восстановления изношенной дробящей плиты щековой дробилки.

Восстановление дробящей плиты произведено по технологии роботизированного микроплазменного напыления износостойкого хромового покрытия на изношенные части дробящей плиты с использованием интеллектуальной системы роботизированной плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий.

Подвижная плита щековой дробилки представляет собой крупногабаритную деталь размерами: 900x820x100 мм³, с ребристой поверхностью (рисунок 4.7 а) из прочного материала. Мы восстанавливали поверхность дробящей (подвижной) плиты типа СМД-108А, весом 295 кг из стали 110Г13Л с расстоянием 100 мм между центрами ребристых выступов высотой 30 мм. Поверхность дробящей плиты была предварительно подвергнута роботизированному сканированию, затем по сгенерированной программе осуществлялось роботизированное микроплазменное напыление защитного покрытия на изношенные участки плиты путем перемещения руки робота-манипулятора с закрепленным на ней микроплазмотроном в соответствии с полученной 3D-моделью изделия (рисунок 4.8 б).

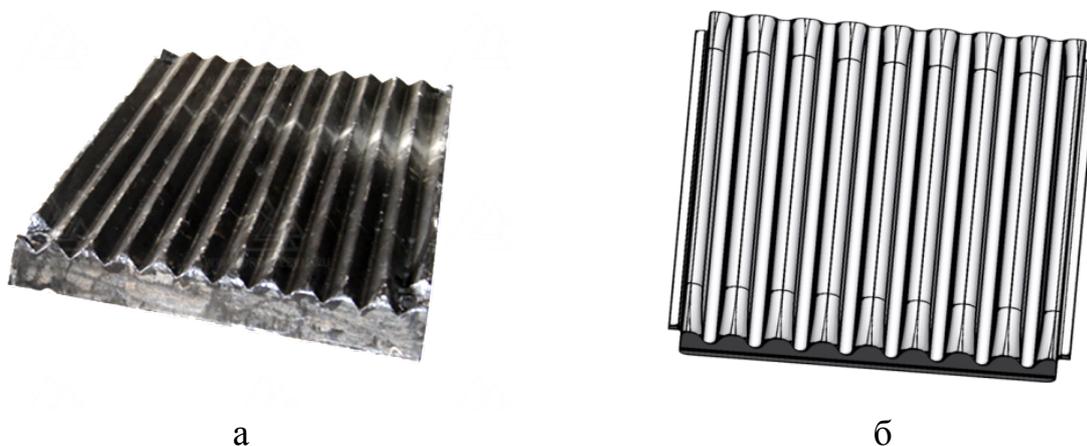


Рисунок 4.8 – Изображение дробящей плиты щековой дробилки (а) и ее 3D-модель (б), полученная в результате роботизированного 3D -сканирования

Поверхность дробящей плиты была восстановлена и упрочнена путем роботизированного микроплазменного нанесения покрытия из порошка композиционного сплава АН-35 (ГОСТ 21448-75), применяемого для упрочнения и ремонта трущихся деталей. Нанесение покрытий проводилось по рекомендованному в результате численного эксперимента режиму, указанному в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Режимы микроплазменного напыления износостойкого покрытия

Материал покрытия (порошок композиционного сплава)	Мощность, Р [Вт]	Дистанция напыления [мм]	Сила тока, I [А]	Расход плазмобразующего газа (Ar) [л/час]	Расход защитного газа (Ar) [л/час]	Скорость перемещения источника [м/с]	Расход порошка [кг/ч]	Коэффициент использования порошка
АН-35	2	100	40	70	360	0.008	2	0.7

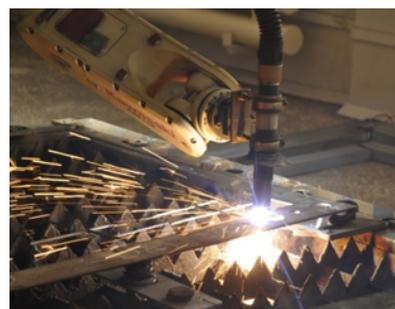
В период с 01 июня 2020 г. по 01 октября 2020 г. были проведены испытания в производственных условиях «ИП Абакумов С.А.» восстановленной дробящей плиты (подвижной) в щековой дробилке СМД-108А, предназначенной для измельчения минерального сырья. Испытания восстановленной и упрочненной плиты проводились в условиях измельчения полиметаллических руд различной твердости. Испытания проводились ежедневно при непрерывной работе дробилки в течение не менее 30 мин. с загрузкой от 70 до 100% высоты камеры дробления в соответствии ГОСТ 27412-93 (Межгосударственный стандарт «Дробилки щековые. Общие технические условия»).

Обработанная после выработки основного ресурса подвижная плита щековой дробилки дополнительно эксплуатировалась в течение 6-ти месяцев, подвергаясь оптимальной нагрузке по 5-6 часов в смену, таким образом, ресурс ее работы был продлен при неизменной производительности дробилки.

Была произведена плазменная резка не подлежащих восстановлению плит (рисунок 4.9) с целью отработки технологии и для облегчения утилизации обработанных материалов (облегчить погрузку и перевозку).



а



б

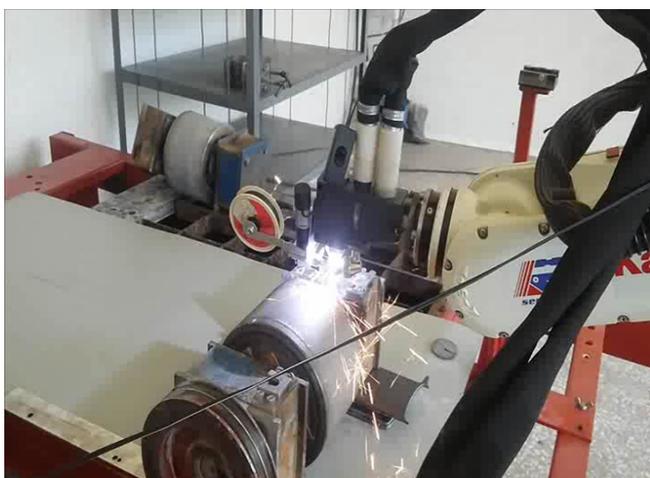
Рисунок 4.9 - Рабочий участок роботизированной плазменной резки (а) и процесс роботизированной плазменной резки плиты щековой дробилки (б)

Получен акт производственных испытаний № 1 от 01.10.2020, в котором сделано заключение, что ресурс работы подвижной плиты щековой дробилки восстановленной путем роботизированного плазменного напыления износостойких защитных покрытий на разрушенные участки плиты, был

повышен на 15% по сравнению с плитами, не подвергавшимися восстановлению (Приложение Б).

Пример 2. Роботизированное МПН защитных покрытий и покрытий из биосовместимых материалов на поверхности тел вращения.

По технологии роботизированного МПН выполнялась также обработка поверхности изделий, для которых не требовалось построение модели поверхности. Было выполнено восстановление и упрочнение валков дробилки валковой для измельчения минерального сырья (рисунок 4.10.а) путем плазменного нанесения защитных покрытий из порошка композиционного сплава ПТ-19Н-01 (ГОСТ 9722-97) . Было выполнено МПН двухслойных металлокерамических покрытий на поверхность имплантата тазобедренного сустава (рисунок 4.10 б)



а



б

Рисунок 4.10 - Процесс МПН защитного покрытия на поверхность валка дробилки валковой (а) и имплантат тазобедренного сустава человека с микроплазменным металлокерамическим покрытием из биосовместимых материалов (б)

Мы приводим здесь эти примеры с целью подчеркнуть практическую важность разработанных алгоритмов управления, позволяющих контролировать скорость перемещения рабочего инструмента и расстояние до поверхности обрабатываемой детали.

Выводы по разделу 4

1. Разработан оригинальный алгоритм управления роботом-манипулятором, при котором автоматическое планирование траектории и генерация программы движения робота – манипулятора производится по данным 3D-сканирования поверхности обрабатываемого роботом изделия. Алгоритм планирования траектории основывается на выборе стартового сегмента траектории как геодезической линии на поверхности, направление которой выбирается согласно описанным в диссертации критериям.

2. Для генерации программы робота разработан новый алгоритм оптимальной аппроксимации плоской кривой последовательностью отрезков и дуг окружности, путем введения функции угловой характеристики кривой. Новый алгоритм позволяет уменьшить ошибки аппроксимации и обладает малой вычислительной емкостью и легкостью программной реализации. Новый алгоритм генерации программы робота обеспечивает плавное перемещение рабочего инструмента робота-манипулятора с постоянной по модулю скоростью вдоль гладкой кривой - 3D модели изделия, без риска возникновения и нежелательных больших значений центростремительного ускорения при маневрах манипулятора

3. Разработано теоретическое обоснование и выполнена практическая реализация разработанных алгоритмов управления роботом-манипулятором Kawasaki с использованием языка AS. Разработанные алгоритмы автоматического планирования траектории и генерации программы робота-манипулятора Kawasaki с использованием языка AS являются совершенно новыми и впервые применены для управления роботом-манипулятором при выполнении технологических операций плазменной резки и микроплазменного напыления покрытий.

4. Отработаны технологические решения на опытном производственном роботизированном участке, получен 1 акт производственных испытаний обработанных по новой технологии изделий (Приложение Б). Установлено, что автоматическое планирование траектории с последующей генерацией программы движения руки робота с закрепленным на ней рабочим инструментом позволяет обеспечить равномерность толщины плазменного покрытия (или плазменного среза) вдоль всей траектории перемещения плазменного источника.

Таким образом, подтверждено второе выносимое на защиту положение: автоматическое планирование траектории и генерация программы движения робота – манипулятора по спланированной траектории.

Результаты, представленные в данном разделе, также нашли отражение в наших публикациях [11, p.146; 68, p. 180; 88, p. 280; 89, p. 212; 90, p.95; 96-99].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационного исследования:

1. На основе проделанного анализа современных методов и оборудования 3D-сканирования для реализации технологических процессов плазменного напыления и резки, была обоснована необходимость разработки процедуры сегментации для восстановления 3D модели поверхности при сканировании изделий сложной формы (с гранями и сочленениями) и выбран тип бесконтактного датчика расстояния, а именно триангуляционный лазерный датчик расстояния.

2. Выбрано и описано основное экспериментальное оборудование для проведения роботизированной плазменной резки и обработки поверхности микроплазменным напылением (МПН). Разработаны и апробированы алгоритмы управления роботом - манипулятором для перемещения инструмента (плазменного источника) по заранее заданным сложным траекториям в плоскости и для реализации 3D сканирования объектов.

3. Подготовлено техническое описание и выбраны три типа лазерных триангуляционных датчиков расстояния, два вида преобразователя сигналов и цифровая камера машинного зрения с необходимыми характеристиками, нужными для проведения натурального эксперимента по роботизированному 3D сканированию с использованием различных вариантов построения системы сканирования.

4. Разработан алгоритм распознавания сканированных изображений и разработана компьютерная программа для интерактивного взаимодействия с оператором робота (с человеком, выполняющим процесс) при сканировании. Программа дает возможность оператору во время процесса 3D сканирования задавать, тестировать и сохранять параметры процесса распознавания для дальнейшего использования в процессе автоматической обработки данных 3D сканирования.

5. Разработана схема 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе. Схема включает промышленный робот-манипулятор Kawasaki с установленным на нем датчиком расстояния, контроллер робота-манипулятора, персональный компьютер, связанный с контроллером робота-манипулятора и датчиком расстояния через последовательный интерфейс RS232. Робот-манипулятор Kawasaki позволяет осуществлять высокоточное позирование рабочего инструмента, за счет чего данная схема позволяет реализовать относительно недорогую для достигнутых характеристик систему 3D-сканирования, обладающую высоким разрешением и точностью;

6. Разработан оригинальный алгоритм процедуры сегментации поверхности с построением аналитической модели поверхности, в котором впервые в качестве критерия однородной геометрической структуры двух локальных регионов поверхности используются численные величины Гауссовой и средней кривизны поверхности. Алгоритм основан на применении локальной параметрической модели и последующего объединения локальных

участков поверхности, обладающих однородной геометрической структурой, что позволяет без априорных предположений о геометрическом строении поверхности строить аналитическую 3D модель поверхности со сложным строением.

7. Разработан оригинальный алгоритм управления роботом-манипулятором, при котором автоматическое планирование траектории и генерация программы движения робота – манипулятора производится по данным 3D-сканирования поверхности обрабатываемого роботом изделия. Алгоритм планирования траектории основывается на выборе стартового сегмента траектории как геодезической линии на поверхности, направление которой выбирается согласно описанным в диссертации критериям.

8. Разработан новый алгоритм оптимальной аппроксимации плоской кривой последовательностью отрезков и дуг окружности для генерации программы робота. Новый алгоритм генерации программы робота обеспечивает плавное перемещение рабочего инструмента робота-манипулятора с постоянной по модулю скоростью вдоль гладкой кривой - 3D модели изделия, без риска возникновения и нежелательных больших значений центростремительного ускорения при маневрах манипулятора.

9. Разработано теоретическое обоснование и выполнена практическая реализация алгоритмов управления роботом-манипулятором Kawasaki с использованием языка AS. Алгоритмы автоматического планирования траектории и генерации программы робота-манипулятора Kawasaki с использованием языка AS являются совершенно новыми и впервые применены для управления роботом-манипулятором при выполнении технологических операций плазменной резки и микроплазменного напыления покрытий.

10. Отработаны технологические решения на опытном производственном роботизированном участке, получен 1 акт производственных испытаний обработанных по новой технологии изделий. Установлено, что автоматическое планирование траектории с последующей генерацией программы движения руки робота с закрепленным на ней рабочим инструментом позволяет обеспечить равномерность толщины плазменного покрытия (или плазменного среза) вдоль всей траектории перемещения плазменного источника.

Таким образом, подтверждены выносимые на защиту положения:

1) схема системы 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе и алгоритм сегментации с построением аналитической модели поверхности;

2) автоматическое планирование траектории и генерация программы движения робота – манипулятора по спланированной траектории.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

- разработана схема 3D-сканирования лазерным триангуляционным датчиком расстояния, укрепленным на роботе-манипуляторе. Схема включает промышленный робот-манипулятор Kawasaki с установленным на нем датчиком расстояния, контроллер робота-манипулятора, персональный компьютер, связанный с контроллером робота-манипулятора и датчиком расстояния через последовательный интерфейс RS232. Робот-манипулятор

Kawasaki позволяет осуществлять высокоточное позирование рабочего инструмента, за счет чего данная схема позволяет реализовать относительно недорогую для достигнутых характеристик систему 3D-сканирования, обладающую высоким разрешением и точностью;

- разработан оригинальный алгоритм процедуры сегментации поверхности с построением аналитической модели поверхности. Алгоритм основан на применении локальной параметрической модели и последующего объединения локальных участков поверхности, обладающих однородной геометрической структурой, что позволяет без априорных предположений о геометрическом строении поверхности строить аналитическую 3D модель поверхности со сложным строением;

- разработан алгоритм управления роботом-манипулятором, при котором автоматическое планирование траектории и генерация программы движения робота – манипулятора производится по данным 3D-сканирования поверхности обрабатываемого роботом изделия. Алгоритм планирования траектории основывается на выборе стартового сегмента траектории как геодезической линии на поверхности, направление которой выбирается согласно описанным в диссертации критериям. Автоматическое планирование траектории с последующей генерацией программы движения руки робота с закрепленным на ней рабочим инструментом позволяет обеспечить равномерность толщины плазменного покрытия (или плазменного среза) по всей поверхности.

Научная и практическая значимость работы. Комплекс полученных в диссертационном исследовании теоретических и экспериментальных результатов позволил разработать научные основы роботизированной технологии плазменной резки и обработки крупногабаритных изделий сложной формы. Зарегистрирована программа для ЭВМ, позволяющая реализовать интерактивное взаимодействие с человеком - оператором робота во время выполнения процесса 3D-сканирования, а также распознавать и анализировать изображения, полученные в результате сканирования. Получен акт производственных испытаний обработанного по новой технологии промышленного изделия, где подтверждено увеличение срока службы плиты щековой дробилки с плазменным покрытием изношенной поверхности. Новые алгоритмы, разработанные в диссертации, представляют интерес для широкого круга исследователей в области автоматизации и управления, в частности, в области интеллектуального управления роботами-манипуляторами.

Результаты диссертации перспективны для создания наукоемкого производства, внедрение в производство интеллектуальной роботизированной системы позволит оптимизировать технологию плазменной резки и обработки изделий, улучшить эксплуатационные характеристики обрабатываемых изделий, экономически эффективно производить роботизированное плазменное напыление покрытий на детали или изделия сложной формы, а также плазменную резку крупногабаритных мелкосерийных и штучных изделий.

Данная диссертационная работа представляет теоретическое и экспериментальное исследование по разработке алгоритмов интеллектуального управления движением рабочего инструмента робота-манипулятора при выполнении операций плазменной резки и напыления, при этом программная траектория движения манипулятора не задается заранее, а формируется системой управления роботом на основе информации о текущем состоянии внешней среды, а именно - по построенной по результатам предварительного роботизированного сканирования 3D-модели обрабатываемой поверхности.

Разработанные в диссертации схема роботизированного сканирования и алгоритмы управления роботом-манипулятором, включая алгоритм сегментации и алгоритмы автоматического планирования траектории и генерации программы манипулятора, являются новыми и представляют интерес для широкого круга исследователей в области автоматизации и управления, робототехники. Результаты диссертации позволяют решать проблему автоматического управления роботом-манипулятором для эффективного и точного роботизированного плазменного напыления покрытий на детали или изделия сложной формы, а также роботизированной плазменной резки крупногабаритных мелкосерийных и штучных изделий.

Совокупность полученных в диссертации теоретических и экспериментальных результатов позволила разработать научные основы роботизированной технологии плазменной резки и обработки крупногабаритных изделий сложной формы. Получено свидетельство интеллектуальной собственности Республики Казахстан о государственной регистрации на объект авторского права (программа для ЭВМ) под названием «Программа выделения лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования» № 5870 от 17 октября 2019. Получен акт производственных испытаний «ИП Абакумов С.А.» № 1 от 01.10.2020, в котором подтверждено увеличение срока службы плиты щековой дробилки с полученным по новой технологии плазменным покрытием изношенной поверхности.

Основные результаты диссертации представлены в 15 статьях, из них: 11 статей опубликованы в рецензируемых научных журналах, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ККСОН и 7 статей в журналах, индексируемых Scopus, в том числе 2 статьи в периодических выпусках журналов, индексируемых в базах Web of Science и Scopus с квартилями Q2 и Q1 по Web of Science и с процентилями по CiteScore в базе Scopus 75 % и 80% соответственно, а также 1 статья в журнале, индексируемом в Scopus с процентилем по CiteScore 26%.

Благодарность. Данная докторская диссертация выполнена в рамках проекта № AP05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы» с грантовым финансированием Комитета науки МОиН РК на 2018-2029 годы, по приоритету «Информационные, телекоммуникационные и космические технологии, научные исследования в области естественных наук».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Макарычев В.П., Юревич Е.И. Супервизорное управление космическими манипуляторами. - Санкт-Петербург: Астерион, 2005. – 108 с.
- 2 Макарычев В.П., Половко С.А. Математическое обеспечение системы управления манипуляторов космического корабля «Буран». Робототехника и техническая кибернетика // Сборник научных трудов - Санкт-Петербург: Санкт Петербургский государственный технический университет, 2008. - С. 75-80.
- 3 Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. От интеллектуальных роботов – к мультиагентным робототехническим системам // Военный парад. - 2010. - №5(101). – 6 с.
- 4 Kevin M. Passino Intelligent Control: An Overview of Techniques // The Ohio State University. – Columbus, 2015. – 34 p.
- 5 Zilouchian A., Jamshidi M. Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies Intelligent control systems using soft computing methodologies. - CRC press: Copyright Year, 2001. - 492 p.
- 6 Vassilyev S.N., Kelina A.Yu., Kudinov Y.I., Pashchenko F.F. Intelligent control systems // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. - P.623–628.
- 7 Остроух А.В. Интеллектуальные системы // Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. – 110 с.
- 8 Alontseva D. The Development of Intelligent Robotic System for Plasma Processing of Medical Products with Complex Shape // Abstracts of 2018 EMN Croatia & Plasma Physics & CCPTS & CCBD. -Dubrovnik, 2018. -P.13-14.
- 9 Alontseva D. Automation of Industrial Sites with Mechatronic Systems // Conference Abstract «2nd European Conference on Materials, Mechatronics and Manufacturing» (ECMMM 2018). -Krakow, 2018. – 12 p.
- 10 Alontseva D., Ghassemieh E. Development of Robotic Microplasma Spraying Technology for Applying Coatings from Biocompatible Materials onto Medical Implants //16th International Conference on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen (PSE 2018). - Germany, 2018. – 399 p.
- 11 Alontseva D. L., Krasavin A. L., Russakova A. V., Kadyroldina A. T. Automation of Industrial Sites with Mechatronic Systems // International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications. – October, 2018. - Vol. 7, No. 4. - P. 146-151. - Doi: 10.18178/ijeetc.7.4.146-151.
- 12 Mechatronics. <https://en.wikipedia.org/wiki/Mechatronics>. 22.09.2018.
- 13 Zhao R. Trajectory planning and control for robot manipulations: doctoral thesis: 24.09.2015 / Université Paul Sabatier. – Toulouse, 2015. - 158 p.
- 14 Campa R., Ramirez C., Camarillo K., Santibanez V., Soto I. Motion Control of Industrial Robots in Operational Space: Analysis and Experiments with the PA10 Arm / Advances in Robot Manipulators, Ernest Hall (Ed.). - InTech, 2010. - P. 417-442.
- 15 Liu Zh.G, Huang J.M. A New Adaptive Tracking Control Approach for Uncertain Flexible Joint Robot System // International Journal of Automation and Computing. - 2015. - Vol. 12(5). - P. 559-566.

- 16 Wang Zh., Liu W., Cui B., He J., Li Zh., and Zhao Yo. Research on Robot Surface Tracking Motion Based on Force Control of Six-Axis Wrist Force Sensors // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014. - P.1-9. - Article ID 249696
- 17 Chromy A., Zalud L. Robotic 3D scanner as an alternative to standard modalities of medical imaging // *Springerplus*. -2014. - Vol. 3. - P. 1-10.
- 18 Chromy A. Application of High-Resolution 3D Scanning in Medical Volumetry // *INTL Journal of Electronics and Telecommunications*. - 2016. - Vol. 62, No. 1. - P. 23-31.
- 19 Walker Ian D. Continuous Backbone “Continuum” Robot Manipulators // *Hindawi Publishing Corporation ISRN Robotics*. - 2013. - Vol. 2013. - P.1-19.
- 20 McMorran D., Chung D.C.K., Li J., Muradoglu M., Liew O.W., Ng T.W. Adapting a Low-Cost Selective Compliant Articulated Robotic Arm for Spillage Avoidance // *Journal of Laboratory Automation*. – 2016. - Vol. 21. - P. 799-805.
- 21 Stumm S., Neu P., Brell-Cokcan S. Towards Cloud Informed Robotics Proceedings // *Proc. 34th International Symposium on Automation and robotics in Construction*. - Taipei, 2017. - P. 59-64.
- 22 Curless B., Seitz S. 3D photography // in *ACM SIGGRAPH Course Notes*. -2000.-No.19.-420 p. <http://www.cs.cmu.edu/~seitz/course/Sigg00/notes.html>. 24.02.2018.
- 23 Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения. Учеб. Пособие /Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. - 82 с. - ISBN: 978-5-7782-2727-9.
- 24 Batlle J., Mouaddib E., Salvi J. Recent Progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem // *Pattern Reorganization*. - 1998. - Vol. 31(7). P. 963-982.
- 25 Miyazawa K., Aoki T. A robot-based 3d body scanning system using passive stereo vision // *15th IEEE International Conference on Image Processing*. - San Diego, 2008. - P. 305-308.
- 26 Borangiu T., Dumitrache A. Robot Arms with 3D Vision Capabilities. - *Advances in Robot Manipulators*, Ernest Hall (Ed.). – 2010. - P. 503-514. - ISBN: 978-953-307-070-4.
- 27 Francisco J.B., Juan J., David G. Jorge S. 3D Geometrical Inspection of Complex Geometry Parts Using a Novel Laser Triangulation Sensor and a Robot // *Sensors*. - 2011. – Vol. 11. - P. 90-110. - DOI:10.3390/s110100090.
- 28 Bellandi P., Docchio F., Sansoni G. Roboscan: A combined 2D and 3D vision system for improved speed and flexibility in pick-and-place operation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 69. – P. 1873-1886. - DOI 10.1007/s00170-013-5138-z.
- 29 Canduo Sh., Sheng Zhu. A Robotic System for Surface Measurement Via 3D Laser Scanner // *The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*. Published by Atlantis Press. - Paris, 2012. -P. 1237- 1239.
- 30 Shen C., Zhu S. A Robotic System for Surface Measurement Via 3D Laser Scanner// *Proc. The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*. - Paris, 2012. - P.1237-1239.

- 31 Rossi S., Savino S. A Robotic System to Scan and Reproduce Object // Hindawi Publishing Corporation Journal of Robotics. – 2011. – 11 p.
- 32 Mikołajczyk T. Robot application to surface finish machining // J Polish CIMAC. – 2010. - Vol. 5(3). P. 107-112.
- 33 He F.B., Liang R.F., Wang R.F., Lin Y.S. A Two-stage Improvement Method for Robot Based 3D Surface Scanning // International Conference on Robotics and Mechantronics IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering/ - 2017. - P. 33-38.
- 34 Астапенко Н.В., Кошеков К.Т., Колесников А.Н.. Методика автоматической регистрации 3D-измерений сыпучих объектов в зернохранилищах // Компьютерная оптика. -2018. - Том 42, №3. – С. 510-520.
- 35 Chromy A. 3D Scanning with Proximity Planar Scanner: master's thesis: 11.02.13 / Brno University of Technology. - Brno, 2013. – 81 p.
- 36 Rodrigues M., Kormann M., Schuhler C., Tomek P. Robot Trajectory Planning using OLP and Structured Light 3D Machine Vision // Lecture notes in Computer Science. – 2013. - Part II. -Vol 8034. - P. 244-253.
- 37 Brosted F.J., Santolaria J., Aguilar J.J., Guillomia D. Laser triangulation sensor and six axes anthropomorphic robot manipulator modelling for the measurement of complex geometry products. // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2012. - Vol.28. - P. 660-671.
- 38 Ramesh J., Rangachar K., Brian G. Schunck. Machine Vision / Published by McGraw-Hill, Inc. - 1995. - ISBN 0-07-032018-7. http://www.cse.usf.edu/~r1k/MachineVisionBook/MachineVision.files/MachineVision_Chapter11.pdf. 10.03.2018.
- 39 Rahayem M.R., Kjellander J.A.P. Quadric segmentation and fitting of data captured by a laser profile scanner mounted on an industrial robot // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. -2010. - Vol. 52. - P. 155-169.
- 40 Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F. State-of-the-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation // Sensors. – 2009. - Vol.9. – P. 568-601.
- 41 3D лазерное сканирование. <http://www.baget1.ru/3d-scanning.php>. 25.02.2018.
- 42 Ortis A., Battiato S. A new fast matching method for adaptive compression of stereoscopic images // Three-Dimensional Image Processing, Measurement (3DIPM), and Applications. - 2015. - Vol. 9393. -P. 1-9.
- 43 Shan J., Toth Ch.K. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. - Boca Raton: CRC Press. – 2008. - 616 p. - ISBN 1420051423
- 44 Riza N. A., Marraccini P. J., Member S. Smart Two-Dimensional Laser-Based Display. – 2011. - Vol. 7, № 2. - P. 90–95.
- 45 Comprehensive Guide for Nanocoatings Technology. Properties and Development / Mahmood Aliofkhazraei Ed. – NY: Nova Science Publisher, 2015. - Vol.3. – 481 p. ISBN 978-1-63482-647-1.

- 46 Introduction to Coating Design and Processing ASM Handbook. Thermal Spray Technology / R.C. Tucker, Jr. Editor. – 2013. - Vol. 5A. - P. 76-88.
- 47 Vardelle A., Moreau Ch., Nickolas J., Themelis A. Perspective on Plasma Spray Technology // Plasma Process. – 2015. – Vol. 35. – P. 491 – 509.
- 48 Kuroda S., Kawakita J., Watanabe M., Katanoda H. Warm spraying - a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles // Science and Technology of Advanced Materials. – 2008. – Vol. 9(3). - P.1-17.
- 49 Cao X., Hang G., Liu H., Meng Y., Luo X., Yu D. Hybrid-Pic Simulation of Sputtering Product Distribution in a hall Thruster // Plasma Science and Technology. -2007. – Vol. 9(52). - P.1-8.
- 50 Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology. - Materials Park: ASM International, 2004. - 332 p.
- 51 Racek O. The Effect of HVOF Particle-Substrate Interactions on Local Variations in the Coating Microstructure and the Corrosion Resistance // Journal of Thermal Spray Technology. - 2010. – Vol. 19(5). - P. 841-851.
- 52 Ctibor P., Lechnerová R., Beneš V. Quantitative analysis of pores of two types in a plasma-sprayed coating // Materials Characterization. - 2006.– Vol. 56. - P. 297–304.
- 53 Candel A., Gadow R. Optimized multiaxis robot kinematic for HVOF spray coatings on complex shaped substrates // Surface & Coatings Technology. - 2006. - Vol. 201. - P. 2065-2071.
- 54 Borisov Y., Sviridova I., Lugscheider E., Fisher A. Investigation of the Microplasma Spraying Processes // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. - Germany. - 2002. - P. 335-338.
- 55 Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н. Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов // Автоматическая сварка. – 2002. – № 3. – С.54-55.
- 56 Lugscheider E., Bobzin K., Zhao L. and Zwick J. Assessment of the Microplasma Spraying Process for Coating // Application Advanced Engineering Materials Special Issue: Thick Coatings for Thermal, Environmental and Wear Protection. – 2006. – Vol. 8, Issue 7. - P. 635–639. DOI: 10.1002/adem.200600054.
- 57 Кадыржанов К.К., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Русаков В.С., Туркбаев Т.Э. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. - М.: МГУ, 2005. – 640 с.
- 58 Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Кадыролдина А.Т., Құсайын-Мұрат Ә.Т. Разработка системы 3D-сканирования для интеллектуальной роботизированной системы плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы // Совместный выпуск по материалам Международной конференции CITech-2018 журналов «Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева» и «Вычислительные технологии». - ВКГТУ им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск - ИВТ СО РАН Новосибирск, 2018. - Том 1, Часть 1. – С. 7-19.
- 59 World Patent Appl. 2004/010,747. International Association Intern, 'Plasmatron for Spraying of Coatings' / K. Yushenko, Y. Borisov, S. Voynarovych, O. Fomakin.

- 60 Alontseva D.L., Krasavin A.L., Nurekenov D.M., Zhanuzakov Y.T. Mathematical Modeling of Temperature Fields in Two-Layer Heat Absorbers for the Development of Robotic Technology for Microplasma Spraying of Biocompatible Coatings // *Communications in Computer and Information Science*. – 2019. - Vol. 998. - P. 11-22. - DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-030-12203-4_2.
- 61 Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Жанузаков Е.Т. Математическое моделирование температурных полей для разработки роботизированной технологии микроплазменного напыления биосовместимых покрытий // *Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева*. – 2019. -№ 1. - С. 114-119.
- 62 Алонцева Д., Красавин А., Шадрин Г., Кадыролдина А., Құсайын-Мұрат Ә. Разработка системы управления промышленным роботом-манипулятором для трехмерного сканирования поверхностей // *Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева*. – 2019. - № 1. - С. 81-87.
- 63 AS is a programming language. Programming Guide, Kawasaki Heavy Industries, Ltd. - 2002. – 642 p.
- 64 А.с. 009030 Конвертер для перевода чертежей DXF формата в AS язык робота-манипулятора KawasakiRS010L / Д.М. Нурекепов, А.Л. Красавин, Д.Л. Алонцева; опубл. 21.06.2017, № 1490. – 2 с.
- 65 Shadrin G.K., Alontseva D.L., Kussaiyn-Murat A.T., Kadyroldina A.T., Ospanov O.B., Haidegger T. Application of Compensation Algorithms to Control the Movement of a Robot Manipulator // *Acta Polytechnica Hungarica*. -2020. - Vol. 17, № 1. - P. 191-214. - DOI: 10.12700/APH.17.1.2020.1.1.
- 66 Шадрин Г.К. Синтез алгоритма управления нелинейным объектом на основе коррекции динамики объекта и компенсации возмущений // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. - №12. - С. 667-674.
- 67 Kadyroldina A.T., Kussaiyn-Murat A., Beszedes B., Alontseva D., Krasavin A. Image Acquisition and Processing on Raspberry Pi in Matlab for 3D-Scanning // *Proceedings of International Symposium On Applied Informatics and Related Areas AIS*. – Szekesfehervar, 2019. - P.39-42.
- 68 Alontseva D., Ghassemieh E., Voinarovych S., Kyslytsia O, Polovetskiy Y., Kadyroldina A. Manufacturing and characterisation of robot assisted microplasma multilayer coating of titanium implants: Biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity // *Johnson Matthey Technology Review*. - 2020. -Vol. 64, № 2. -P. 180-191. - DOI: 10,1595 / 205651320X15737283268284.
- 69 А.с. 5870. Программа выделения лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования / А.Л. Красавин, Д.Л. Алонцева, А.Т. Кадыролдина; опубл. 17.10.2019. – 2 с.
- 70 Horton R. The robots are coming. - London: Deloitte, 2015. - 328 p.
- 71 Walker Ian D. Continuous Backbone “Continuum” Robot Manipulators // *Hindawi Publishing Corporation ISRN Robotics*. -2013. - Vol. 2013. - P.1-19.
- 72 Chromy A., Zalud L. Robotic 3D scanner as an alternative to standard modalities of medical imaging // *Springerplus*. -2014. - Vol. 3. - P. 1-10.
- 73 Chromy A. Application of High-Resolution 3D Scanning in Medical Volumetry // *INTL Journal of Electronics and Telecommunications*. - 2016. - Vol. 62, №1. - P. 23-31.

- 74 Stumm S., Neu P., Brell-Cokcan S. Towards Cloud Informed Robotics Proceedings // Proc. 34th International Symposium on Automation and robotics in Construction. - Taipei, 2017. - P. 59-64.
- 75 Feng C., Xiao Y., Willette A., McGee W., Kamat V.R. Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites // Automation in Construction. – 2015. - Vol. 59. - P. 128–138.
- 76 Reyes A.L., Cervantes J. M., Gutiérrez N. C. Low cost 3D scanner by means of a 1D optical distance sensor procedural technology // IJRST. -Vol. 6. - 2013. – P. 223–230.
- 77 Rahayem M.R., Kjellander J.A.P. Quadric segmentation and fitting of data captured by a laser profile scanner mounted on an industrial robot // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - Vol. 52. - 2010. – P. 155-169.
- 78 Berger M. S., Tagliasacchi A., Seversky L., Allies P., Guennebaud G., Levine J., Sharf A., Silva C. A survey of surface reconstruction from point clouds // In Proc. Computer Graphics Forum. – Wiley, 2016. - P. 1-27.
- 79 Li L., Fan Y., Zhu H., Li D., Li Y., Tang L. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells // Remote Sensing. – 2017. - Vol. 9, № 5. -P. 433-446.
- 80 Savant Sh. A Review on Edge Detection Techniques for Image Segmentation // International Journal of Computer Science and Information Technologies. - 2014. -Vol. 5 (4).- P. 5898-5900 .
- 81 Gupta S., Ghosh Mazumdar S. Sobel Edge Detection Algorithm // International Journal of Computer Science and Management Research. – 2013. - Vol. 2, Issue 2. - P. 1678-1583. - ISSN 2278-733X.
- 82 Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image Processing, Analysis and Machine Vision. - Toronto: Thomson, 2008. - 829 p. -ISBN 978-0-495-08252-1.
- 83 Macher H., Landes T., Grussenmeyer P. Validation of point clouds segmentation algorithms through their application to several cases for indoor building modeling // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Prague, 2016. - Vol. XLI-B5. - P. 667-674.
- 84 Kolmogorov V., Zabih R. Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts // In: Proc. of the 8th International Conference on Computer Vision, ICCV. - 2001. - Vol. 2. - P. 508-515.
- 85 Crosilla F., Visintini D., Sepic F. Reliable automatic classification and segmentation of laser point clouds by statistical analysis of surface curvature // Applied Geomatics. - 2009. - P. 17- 30. - DOI 10.1007/s12518-009-0002-4.
- 86 Alontseva D., Krasavin A., Kadyroldina A., Kussaiyn-Murat A. Segmentation Algorithm for Surface Reconstruction According to Data Provided by Laser-Based Scan Point // Communications in Computer and Information Science. – 2019. -Vol 998. - P.1-10.
- 87 Rubin F. The Lee Path Connection Algorithm // IEEE Transactions on Computers. – 1974. - Vol. C-23, Issue 9. – P. 907 – 914.
- 88 Alontseva D. L., Ghassemieh E., Krasavin A. L., Shadrin G. K., Kussaiyn-Murat A. T., Kadyroldina A. T. Development of Control System for

Robotic Surface Tracking // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. -2020. -Vol. 9, No 2. – P.280-286.

89 Alontseva D. L., Ghassemieh E., Krasavin A. L., Kadyroldina A. T. Development of 3D Scanning System for Robotic Plasma Processing of Medical Products with Complex Geometries // Journal of Electronic Science and Technology. – 2020. – Vol. 18(3). – P. 212-222. -DOI: 10.1016/j.jnlest.2020.100057.

90 Кадыролдина А.Т., Құсайын-Мұрат Ә.Т., Красавин А.Л., Прохоренкова Н.В. Күрделі формадағы бұйымдарға плазмалық өңдеуді жүргізетін робот-манипулятор үшін ақпараттық жүйені әзірлеу // Вестник ВКГТУ им. Д.Серикбаева. – 2020. - №3 (89). – С.95-98.

91 Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н., Калюжный С. Н. Исследование пятна напыления и фигуры металлизации в условиях микроплазменного нанесения покрытия из диоксида титана // Автоматическая сварка. – 2014. – №12. - С. 19-21.

92 Chen W., Liu J., Tang Y., Ge H. Automatic Spray Trajectory Optimization on Bézier Surface // Electronics. -2019. – Vol. 8 (168). – P. 1-16.

93 Prasad N.A., Aaron G., Conner C. D., Choset H., Rizzi A. A. Uniform coverage of automotive surface Patches // The International Journal of Robotics Research. - 2005. - Vol. 24, № 11. – P. 883-898.

94 Chern S.S., Chen W.H., Lam K.S. Lectures on Differential Geometry // World Scientific. - 1999. – 368 p.

95 Horst J.A., Beichl I. Efficient piecewise linear approximation of space curves using chord and arc length // Proceedings of the SME Applied Machine Vision '96 Conference. - Cincinnati Ohio, 1996. – P. 1-12.

96 Alontseva D., Borisov Y., Voinarovych S., Kyslytsia O., Kolesnikova T., Prokhorenkova N., Kadyroldina A. Development of technology of microplasma spraying for the application of biocompatible coatings in the manufacture of medical implants // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. - Vol 94, №7. -P.94-97.

97 Алонцева Д.Л., Кадыролдина А.Т., Русакова А.В., Красавин А.Л., Прохоренкова Н.В., Кадыролдина А.Т. Разработка технологии микроплазменного нанесения биосовместимых покрытий для изготовления медицинской продукции // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. - 2017. - №3 (77). - С.65-71.

98 Алонцева Д.Л., Красавин А.Л., Русакова А.В., Кадыролдина А.Т., Прохоренкова Н.В., Кадыролдина А.Т., Құсайын-Мұрат Ә.Т., Нурекенов Д.М. Development of the microplasma spraying technology for applying biocompatible coatings. Proceedings of 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas AIS 2017. –Székesfehérvár, 2017. - P.45-48.

99 Алонцева Д.Л., Құсайын-Мұрат Ә.Т., Кадыролдина А.Т. Күрделі формалы медициналық импланттарды микроплазмалық өңдеуге арналған зияткерлік робот жүйесі // Материалы IV Международной НТК студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых-инновационному развитию Казахстана», 12, 13 апреля 2018 г. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2018. - Часть IV. - С.137-142.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ


ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 5870 от «17» октября 2019 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
АЛОНЦЕВА ДАРЬЯ ЛЬВОВНА, КРАСАВИН АЛЕКСАНДР ЛЬВОВИЧ, КАДЫРОЛДИНА АЛЫБИНА ТАЛАПЖАНОВНА

Вид объекта авторского права: **программа для ЭВМ**

Название объекта: **Программа выделения лазерных полос на цифровых изображениях объектов 3D сканирования**

Дата создания объекта: **16.10.2019**



Подписано ЭЦП


Құжат тұлғусыналығын <http://www.kazpatent.kz/ru> сайтының
"Авторлық құқық" Бөлімінде тексеруге болады. <https://copyright.kazpatent.kz>
Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Абулкаиров Н. А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Копия акта производственных испытаний

АКТ проведения производственных испытаний № 1 от 01 октября 2020 года

В период с 01 июня 2020 г. по 01 октября 2020 г. проведены испытания в производственных условиях «ИП Абакумов С.А.» восстановленной дробящей плиты (подвижной) в щековой дробилке СМД-108А, предназначенной для измельчения минерального сырья. Восстановление дробящей плиты произведено по технологии роботизированного микроплазменного напыления износостойкого хромового покрытия на изношенные части дробящей плиты, в соответствии с технологией, разработанной по проекту № АР05130525 «Интеллектуальная роботизированная система для плазменной обработки и резки крупногабаритных изделий сложной формы». Поверхность дробящей плиты была восстановлена и упрочнена путем роботизированного микроплазменного нанесения покрытия из порошка композиционного сплава АН-35 (ГОСТ 21448-75), применяемого для упрочнения и ремонта трущихся деталей. Нанесение покрытий проводилось по рекомендованному в результате численного эксперимента режиму, указанному в таблице 1. Поверхность дробящей плиты была предварительно подвергнута роботизированному сканированию, затем по новым алгоритмам управления осуществлялось роботизированное микроплазменное напыление защитного покрытия на изношенные участки плиты путем перемещения руки робота-манипулятора с закрепленным на ней плазматроном в соответствии с полученной 3D-моделью изделия.

Таблица 1 Режимы плазменного напыления износостойкого покрытия

Материал покрытия (порошок композиционного сплава)	Мощность, P [Вт]	Дистанция напыления [мм]	Сила тока, I [А]	Расход плазмообразующего газа (Ar) [л/час]	Расход защитного газа (Ar) [л/час]	Скорость перемещения источника [м/с]	Расход порошка [кг/ч]	Коэффициент использования порошка
АН-35	2	100	40	70	360	0.008	2	0.7

Испытания восстановленной и упрочненной плиты проводились в условиях измельчения полиметаллических руд различной твердости. Испытания проводились ежедневно при непрерывной работе дробилки в течение не менее 30 мин. с загрузкой от 70 до 100% высоты камеры дробления в соответствии ГОСТ 27412-93 (Межгосударственный стандарт «Дробилки щековые. Общие технические условия»)

Результаты испытаний

Обработанная после выработки основного ресурса подвижная плита щековой дробилки дополнительно эксплуатировалась в течение 6-ти месяцев, подвергаясь оптимальной нагрузке по 5-6 часов в смену, таким образом, ресурс ее работы был продлен при неизменной производительности дробилки.

Заключение

Ресурс работы подвижной плиты щековой дробилки восстановленной путем плазменного напыления износостойких защитных покрытий на разрушенные участки плиты, был повышен на 15% по сравнению с плитами, не подвергавшимися восстановлению.

Директор ИП Абакумов С.А.



С.А. Абакумов