

На правах рукописи



Волошкин Артём Александрович

**МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
АВТОНОМНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СБОРА
ФРУКТОВ**

Специальность: 2.5.4 - «Роботы, мехатроника и робототехнические
системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте робототехники и систем управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рыбак Лариса Александровна

Официальные оппоненты: **Малолетов Александр Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, Автономная некоммерческая
организация высшего образования
"Университет Иннополис", Центр
технологий компонентов робототехники и
мехатроники, научный руководитель.

Ларюшкин Павел Андреевич,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «МГТУ им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)», кафедра «Основы
конструирования машин», профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Волгоградский
государственный аграрный университет».

Защита состоится «30» июня 2025 года в 11:00 на заседании
диссертационного совета 24.2.276.07 созданного на базе Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Белгородский государственный технологический университет им.
В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»
и на сайте www.bstu.ru по ссылке https://gos_att.bstu.ru/dis/Voloshkin

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дююн Татьяна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы наблюдается резкое увеличение спроса на интеллектуальных роботов, способных выполнять сложные задачи без вмешательства человека практически во всех отраслях сельского хозяйства. Автоматизация сельскохозяйственных процессов, в том числе сбора урожая, становится одним из перспективных направлений сельского хозяйства. Рост мирового спроса на продовольствие, повышение стоимости ручного труда и стремление повысить эффективность производства заставляют сельхозпредприятия искать инновационные решения. Робототехнические системы для сбора фруктов позволяют не только сократить затраты на ручной труд, но и минимизировать брак собранных фруктов. Они так же, как и люди могут работать в сложных условиях пересечённой местности, ограниченной видимости, но способны это делать вне зависимости от трудового распорядка, что делает их незаменимыми в современном аграрном секторе. Известны разработки российских учёных, таких как Измайлов А.Ю., Хорт Д.О., Солёный С.В. и др., посвящённые разработке автономных роботов для сбора урожая, выявления и удаления сорняков, распыления химикатов и других сельскохозяйственных задач. Однако, при этом существует ряд проблем, связанных с повреждением фруктов, невысокой производительностью, маневренностью, что ограничивает их широкое применение. Актуальность решения указанной проблемы связана с созданием новых типов автономных робототехнических систем (РТС) для сбора фруктов, которые не оказывают негативного влияния на дерево и собираемые фрукты, обладают высокой степенью маневренности и автономности. Существенный вклад в развитие теории робототехнических систем различного назначения внесли ученые: Глазунов В.А., Каляев И.А., Болотник Н.Н., Брискин Е.С., Яцун С.Ф., Пшихопов В.Х., Жога В.В., и др. При разработке подобных систем возникает ряд проблем, связанных с неравномерностью и сложной геометрией фруктов, которая варьируется по размерам и форме, что затрудняет их точный захват без повреждений. Роботы также должны работать в условиях неструктурированной среды, что приводит к необходимости разрабатывать адаптивные системы управления. В полевых условиях на работу сенсоров влияют условия внешней среды: дождь, ветер и изменения освещённости, что снижает эффективность распознавания объектов. Требования к системе управления зависят от способа отделения фруктов, например, отрывание, требует меньшей вычислительной мощности, чем отрезание, для которого необходимо определять положение плодоножки. Выбор конструкции захватного устройства также оказывает влияние на всю компоновку РТС. Большинство разработчиков подобных систем сосредоточены на отдельных компонентах системы — захвате, подвижной платформе или манипуляторе, что ограничивает целостное решение задачи автоматизации сбора фруктов. Также важно обеспечить транспортировку собранных фруктов без повреждений, включая процесс перемещения фрукта в контейнер, последующие складирования и доставку в пункт разгрузки для последующего хранения.

Целью диссертационной работы является повышение автономности и расширение функциональных возможностей робототехнических систем для сбора фруктов за счёт совершенствования метода проектирования на основе формализации всех его стадий, оптимизации параметров, топологии и машинного обучения.

Для достижения поставленной цели в процессе работы решались следующие **задачи**:

1. Обоснование структуры робототехнической системы для сбора фруктов на основе колесной мобильной платформы и робота-трипода с центральной пассивной кинематической цепью и телескопическим звеном с захватным устройством.

2. Разработка математической модели робототехнической системы, описывающей зависимость положения выходного звена робота-трипода с пассивной центральной кинематической цепью от углов ориентации его рабочей платформы и выдвижения установленного на ней телескопического звена.

3. Синтез эвристического алгоритма многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода с пассивной центральной кинематической цепью на основе комбинации однокритериальных эволюционных алгоритмов с переменными коэффициентами важности с целью расширения диапазонов ориентации робота-трипода и минимизации размеров конструкции.

4. Синтез двухэтапного алгоритма технического зрения для локализации деревьев, а также точного распознавания и захвата фруктов на основе интеграции сверточных нейронных сетей и преобразования Хафа.

5. Разработка комбинированного метода проектирования робототехнической системы на основе формализации всех этапов проектирования и топологической оптимизации распределения материала в конструктивных элементах.

Объект исследования – автономная робототехническая система для сбора фруктов, включающая колесную мобильную платформу и робот-трипод с центральной пассивной кинематической цепью, телескопическим звеном и захватным устройством.

Предметом исследования методы и алгоритмы моделирования, оптимизации геометрических и конструктивных параметров, топологии, а также формализации всех стадий проектирования автономной робототехнической системы.

Методологическая основа исследования. Поставленные задачи решаются с применением методов теоретической механики, математического моделирования, многокритериальной оптимизации, векторной алгебры и вычислительной математики. Для реализации синтезированных алгоритмов разработаны программные модули на языке программирования C++ с использованием библиотеки параллельных вычислений OpenMP, MATLAB. Для визуализации результатов моделирования применено программное обеспечение Blender, которое позволило создать уникальные и наглядные 3D-изображения.

Для разработки электронно-цифровых моделей и имитационного моделирования использован программный комплекс Siemens PLM Software NX.

Научная новизна:

1. Предложена модульная структура робототехнической системы для сбора фруктов, выполненная на базе мобильной колёсной платформы и робота-трипода, в котором для исключения избыточных степеней свободы и повышения управляемости использована пассивная центральная кинематическая цепь с выдвигным телескопическим звеном, а также захватное устройство с гибкой трубой для транспортировки и складирования фруктов; предложена структура и параметризованная модель специального захватного устройства, позволяющего комбинировать методы отрывания и скручивания фруктов за счёт наличия на корпусе винтовой поверхности, по которой перемещается внутренняя труба, имеющая на одном торце пальцы, обеспечивающие захват и отделение фруктов.

2. Разработана математическая модель кинематики робототехнической системы, описывающая зависимость положения телескопического звена с захватным устройством от углов ориентации подвижной платформы робота-трипода, учитывающая положения шарниров крепления кинематических цепей робота-трипода в виде систем нелинейных уравнений, определяющих ограничения на множество достижимых положений и ориентаций выходного звена и допустимых диапазонов движения линейных приводов.

3. Синтезирован эвристический алгоритм многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода, на первом этапе которого выполняется нормализация критериев, а на втором этапе - итеративная процедура оптимизации на основе однокритериальных эволюционных алгоритмов с использованием свёртки критериев с переменными коэффициентами важности. Использование в качестве критериев компактности конструкции и критерия, зависящего от количества недостижимых ориентаций платформы при заданных ограничениях на диапазоны приводных штанг, позволяет расширить функциональные и эксплуатационные характеристики.

4. Синтезирован двухэтапный алгоритм технического зрения для локализации деревьев и распознавания фруктов на основе интеграции нейросетевых алгоритмов и преобразования Хафа; на первом этапе алгоритма выполняется формирование списка заданий на основе идентификации крон деревьев, а на втором - актуализация списка заданий на основе идентификации и сегментации плодов с учётом их спелости, что позволяет на основе визуальных данных комбинировать автономную навигацию и идентификацию координат объектов.

5. Разработан комбинированный метод проектирования робототехнической системы для сбора фруктов, включающий формализацию всех стадий проектирования: создание математических и электронно-цифровых моделей, цифровых двойников, топологическую оптимизацию распределения материала в конструктивных элементах с использованием CAD/CAE-систем, позволяющий на основе полной динамической и имитационной моделей получить

детализированный цифровой двойник робототехнической системы и ее рациональную конструкцию.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в развитии научных основ математического и имитационного моделирования, проектирования, включая новые схемно-технические решения, модели, алгоритмы технического зрения и машинного обучения, а также высокопроизводительные методы многокритериальной оптимизации геометрических и конструктивных параметров робототехнических систем на базе робота-трипода с дополнительной кинематической цепью.

Практическая значимость состоит в следующем:

- реализованы в виде прикладных программ практические эвристические алгоритмы многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода с пассивной центральной кинематической цепью, а также оптимизации параметров захватного устройства для обеспечения компактности конструкции и маневренности робота;

- предложена и отработана методика экспериментальной проверки синтезированного SLAM алгоритма одновременной локализации и построения трехмерной карты местности, а также алгоритма распознавания и захвата плодов для автоматизированного сбора плодов, обеспечивающих автономную навигацию в пространстве;

- разработан метод проектирования робототехнических систем, включающий формализацию всех стадий проектирования: создание математических и электронно-цифровых моделей, цифровых двойников и прототипов с использованием CAD/CAE-систем, методы топологической оптимизации распределения материала в конструктивных элементах, позволяющий повысить точность и достоверность расчетов, а также производительность;

- разработана и апробирована конструкция специального захватного устройства, позволяющего комбинировать методы отрывания и скручивания фруктов, обеспечивая надежный захват и отделение их без повреждений;

- с использованием предложенных в работе методов разработана и апробирована в лабораторных и реальных условиях плодового сада конструкция полномасштабного экспериментального образца автономной робототехнической системы для сбора фруктов, позволяющая обеспечить надежный захват и отделение фруктов без повреждений, а также складирование и транспортировку.

Результаты исследований создадут предпосылки для создания и внедрения новых типов робототехнических систем в агропромышленный комплекс для автоматизации полного цикла процесса сбора урожая фруктов, включая транспортно-технологические, погрузочно-разгрузочные, складские работы при уборке урожая, позволит повысить производительность труда, улучшить качество собранных фруктов.

Результаты исследований имеют потенциал практического использования в практике отечественной сельскохозяйственной отрасли, тепличных,

фермерских хозяйств и питомников, занимающихся возделыванием плодовых культур. Практическое внедрение результатов позволит расширить возможности оптимизации логистических процессов, автономной навигации и управляемости.

Положения, выдвигаемые на защиту:

1. Структура робототехнической системы для сбора фруктов, выполненная на базе мобильной колёсной платформы и робота-трипода, в котором для исключения избыточных степеней свободы и повышения управляемости использована пассивная центральная кинематическая цепь с выдвижным телескопическим звеном, а также захватное устройство с гибкой трубой для транспортировки и складирования фруктов; структура и параметризованная модель захватного устройства, позволяющего комбинировать способы отрывания и скручивания фруктов, а также автоматическое перемещение в контейнер.

2. Математическая модель кинематики робототехнической системы, описывающая зависимость положения телескопического звена с захватным устройством от углов ориентации подвижной платформы робота-трипода, учитывающая положения шарниров крепления кинематических цепей робота-трипода к платформам в виде систем нелинейных уравнений, определяющих ограничения на множество достижимых положений и ориентаций выходного звена, а также допустимых диапазонов движения линейных приводов.

3. Алгоритм многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода с пассивной кинематической цепью, на первом этапе которого выполняется нормализация критериев, а на втором этапе - итеративная процедура оптимизации на основе однокритериальных эволюционных алгоритмов с использованием свёртки критериев с переменными коэффициентами важности.

4. Двухэтапный алгоритм технического зрения для локализации деревьев и распознавания фруктов на основе интеграции нейросетевых алгоритмов и преобразования Хафа; на первом этапе алгоритма выполняется формирование списка заданий на основе идентификации крон деревьев, а на втором - актуализация списка заданий на основе идентификации и сегментации плодов с учётом их спелости;

5. Метод комбинированного проектирования робототехнической системы на основе формализации всех стадий проектирования, включая создание математических и электронно-цифровых моделей, цифровых двойников, топологическую оптимизацию распределения материала в конструктивных элементах с использованием CAD/CAE-систем.

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором и выдвигаемые для защиты.

1. Структура робототехнической системы для сбора фруктов, выполненная на основе колёсной мобильной платформы и робота-трипода с центральной пассивной кинематической цепью и телескопическим звеном с захватным устройством.

2. Математическая модель робототехнической системы, описывающая зависимость положения выходного звена робота-трипода с пассивной

центральной кинематической цепью от углов ориентации его рабочей платформы и выдвижения установленного на ней телескопического звена.

3. Алгоритм многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода с пассивной центральной кинематической цепью на основе комбинации однокритериальных эволюционных алгоритмов с переменными коэффициентами важности с целью расширения диапазонов ориентации робота-трипода и минимизации размеров конструкции.

4. Алгоритм технического зрения для локализации деревьев, а также точного распознавания и захвата фруктов на основе интеграции сверточных нейронных сетей и преобразования Хафа.

5. Комбинированный метод проектирования робототехнической системы на основе формализации всех этапов проектирования и топологической оптимизации распределения материала в конструктивных элементах.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается строгими математическими выводами, согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов, подтверждается результатами компьютерного моделирования (с проверкой применённых моделей и алгоритмов на задачах, имеющих аналитическое решение), лабораторными и натурными испытаниями разработанного экспериментального образца автономной робототехнической системы для сбора фруктов. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях, получили положительный отзыв научной общественности, а также предприятий агропромышленного комплекса.

Апробация работы. Основные результаты представлены на следующих конференциях:

- XIV Международная конференция «Оптимизация и Приложения» OPTIMA, (Петровац, Черногория, 2023);
- VI, Международная конференция «Достижения в робототехнике» AIR:2023 (г. Пенджаб, Индия, 2023);
- Международная конференция IFToMM по механизмам, передачам и приложениям MeTrApp (Пуатье, Франция, 2023);
- 15-я Международная конференция «Интеллектуальные системы» INTELS'2022 (г. Москва, Россия);
- XXXIV Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС (г. Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2022).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 22 научных работы, из них 7 в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и 15 в научных изданиях, входящих в Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ на изобретение и 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий

объем диссертации 176 страниц. Диссертационная работа содержит 10 таблиц, 82 рисунка и 5 приложений. Список литературы включает 128 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследования, используемые в работе. Представлены сведения об апробации работы, публикациях, теоретической и практической значимости результатов исследования.

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих РТС для сбора фруктов. Устройства для сбора фруктов классифицируются на две основные категории: системы для массового и штучного сбора. В случае массового сбора основной акцент делается на обеспечение высокой скорости и объема сбора, при этом сохранность отдельных плодов не является приоритетной задачей. При штучном сборе ключевыми требованиями становятся минимизация повреждений плодов и обеспечение автономности используемых РТС. Примером систем для массового сбора являются: вибрационные установки, воздействующие на ствол дерева или крону; системы с воздушным всасыванием, в которых плоды засасываются в загрузочную воронку. К их недостаткам относятся высокий уровень повреждений плодов, неполный сбор, сложность адаптации к различным культурам. Штучный сбор реализуется РТС с установленными манипуляторами и различными типами захватных устройств (механические, пневматические, мягкие). Существуют РТС, где роль манипулятора выполняют беспилотные летательные аппараты (БПЛА), работа которых зависит от погодных условий и требует качественной подрезки сада. Основными отличиями РТС для штучного сбора плодов являются габариты, уровень автономности, способ складирования, тип шасси и тип захватного устройства (ЗУ). ЗУ является ключевым элементом РТС для сбора фруктов и имеет следующие критерии: степень повреждения плодов, скорость сбора, универсальность. В обзоре также рассмотрены типы ЗУ. Механические ЗУ самые распространенные, имеют простую контракцию и высокую надежность, но при этом использование жестких механизмов приводит к повреждениям из-за чего требуется реализация обратной связи. Вакуумные ЗУ применяют присоски для надежной фиксации плодов, что обеспечивает их сбор без повреждений. Однако для функционирования таких устройств требуется установка дополнительного вакуумного оборудования, что может увеличивать энергопотребление и усложнять конструкцию системы. Мягкие ЗУ изготовлены из эластичных материалов, что позволяет минимизировать риск повреждений. Недостатки мягких ЗУ — это сложность разработки и изготовления, низкая скорость работы. Наиболее перспективным методом отделения плодов является комбинация отрывания и скручивания. Этот подход позволяет минимизировать механическое воздействие на растение и снизить риск повреждения самих плодов, обеспечивая при этом высокую скорость сбора урожая.

Обзор методов оптимизации, включая эвристические, детерминированные и методы многокритериальной оптимизации показал, что наиболее подходящими для оптимизации конструктивных параметров являются эвристические методы.

Для разработки РТС сформулированы ключевые требования: система должна автоматически корректировать режимы работы в зависимости от внешних условий (расположение плодов, состояние дерева, погода); возможность сбора плодов на поверхности кроны и в глубине до 200 мм с точностью позиционирования 10–20 мм; метод отделения плодов комбинация отрывания и скручивания; конструкция захвата должна иметь полость для гибкой трубы; рабочая область — вертикальная зона 1000–3000 мм, горизонтальная — до 1500 мм; масса манипулятора не более 60 кг, способность поднимать объекты от 1 кг.

Сформулирован общий подход к решению задачи проектирования РТС, содержащий формализацию всех этапов: обзор аналогов и выбор базовой структуры, создание математических и параметризованных моделей, оптимизацию параметров (построение Парето множества), имитационное моделирование, топологическую оптимизацию конструкции, разработку электронно-цифровых моделей и изготовление прототипов, проведение экспериментальных исследований.

Во второй главе рассмотрена структура, математическая модель разрабатываемой РТС и алгоритм оптимизации геометрических параметров, выполненный на основе нормализации критериев и однокритериальных эволюционных алгоритмов с использованием свёртки критериев с переменными коэффициентами важности. Синтезирован двухэтапный алгоритм технического зрения для локализации деревьев и распознавания фруктов на основе интеграции нейросетевых алгоритмов и преобразования Хафа. Представлены результаты численного моделирования.

Схема РТС для сбора фруктов представлена на рисунке 1а. В состав системы входит мобильная колёсная платформа 1 с корзиной для сбора фруктов 2. На колёсной платформе установлен робот-трипод 3 с телескопическим звеном 4, которое обеспечивает досягаемость и захват фруктов на большой высоте с помощью установленного на нем захватного устройства 5. Робот-трипод включает три приводные кинематические цепи 6 типа RRPS с центральной кинематической цепью 7, каждая из которых сопряжены с неподвижной 9 и подвижной 10 платформами через сферический шарнир 8 (Рис. 1б). Таким образом, за счёт изменения длин l_i штанг A_iB_i обеспечивается требуемый поворот подвижной платформы по всем осям относительно центра шарнира С. Неподвижная платформа $A_1A_2A_3$ и подвижная платформа $B_1B_2B_3$ механизма представляют собой правильные треугольники с радиусами R_1 и R_2 соответственно.

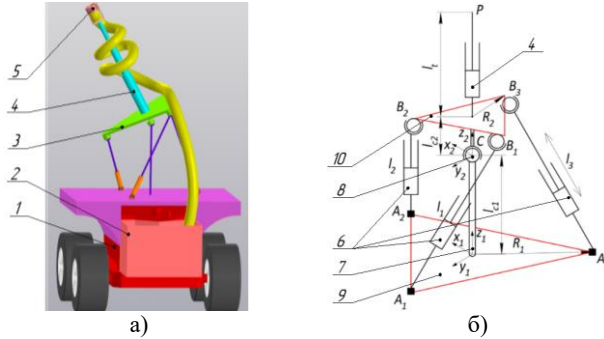


Рис. 1 - Схема РТС для сбора фруктов: а - 3D модель, б - расчётная схема платформы.

Геометрические параметры РТС должны обеспечивать достижимость фруктов в заданной области кроны деревьев, т.е. для любой произвольной точки в пределах заданной области кроны существует хотя бы одно значение обобщенных координат робота-трипода, при которой его рабочий орган (выходное звено) может физически достичь и выполнить захват фрукта. В зависимости от положения робота-трипода захватываемый объект (фрукт) может оказаться в точке, при достижении которой возникает особое положение или пересечение звеньев. Для исключения таких положений важно определить рабочую область с учетом особых положений и пересечений звеньев.

Положение выходного звена робота-трипода зависит от выдвижения телескопического звена и углов ориентации подвижной платформы. Входными координатами являются длины приводных звеньев l_1, l_2, l_3 , выходными – координаты точки P выходного звена x_P, y_P, z_P . Определим координаты точки P по следующей формуле

$$P = \begin{bmatrix} S_a S_\beta (l_{c2} + l_t) \\ -C_a S_\beta (l_{c2} + l_t) \\ l_{c1} + C_\beta (l_{c2} + l_t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $C_a = \cos \alpha$, $S_a = \sin \alpha$, $C_\beta = \cos \beta$, $S_\beta = \sin \beta$, $C_\gamma = \cos \gamma$, $S_\gamma = \sin \gamma$, а l_i определим как

$$l_i = \sqrt{(x_{Bi} - x_{Ai})^2 + (y_{Bi} - y_{Ai})^2 + (z_{Bi} - z_{Ai})^2} \quad (2)$$

где x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai} и x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi} – координаты центров шарниров A_i и B_i соответственно в неподвижной системе координат $X_1 Y_1 Z_1$.

Таким образом, задавая углы Эйлера, становится возможно определить положение выходного звена.

Предложен численный метод определения рабочей области, который учитывает следующие ограничения:

1. Геометрические параметры механизма, которые учитывают предельные значения длин штанг $l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}$.

2. Особые положения, используя матрицу Якоби, $\det(J_A) = 0$.

3. Ограничение на ориентацию платформы (телескопическое звено должно быть направлено вверх) $z_p > l_{c1}$.

4. Пересечения звеньев с учетом толщины в форме сфероцилиндров.

Задача определения рабочего пространства робота-трипода с телескопическим звеном решалась численно в два этапа. На первом этапе выполнялась аппроксимация множества системы неравенств (2), описывающих сформированные ограничения. Система имеет три переменных, соответствующих углам Эйлера α , β и γ ориентации платформы. Аппроксимация выполнена с использованием детерминированных методов глобальной оптимизации. Полученное аппроксимированное множество характеризует множество допустимых ориентаций подвижной платформы трипода. На втором этапе выполнено отображение из пространства ориентаций платформы в пространство координат телескопического выходного звена. Ввиду того, что одной и той же ориентации платформы соответствуют различные положения выходного звена, зависящие от выдвижения телескопического звена, задача отображения для каждой из допустимых ориентаций предполагала определение множества положений выходного звена в дискретизированном пространстве. Для этого синтезирован модифицированный алгоритм Брезенхема, отличающийся от классического алгоритма использованием начальной и конечной точек в пространстве действительных чисел, что повышает его точность. В результате отображения с использованием алгоритма получены подмножества, объединение которых позволило сформировать рабочее пространство.

Численное моделирование выполнено для следующих параметров: $R_1 = 300$ мм, $R_2 = 200$ мм, $l_{min} = 360$ мм, $l_{max} = 600$ мм, $l_{c1} = 500$ мм, $l_{c2} = 0$ мм, $l_{t,min} = 500$ мм, диаметр звеньев $D_{link} = 20$ мм, минимальный угол между звеньями $\varphi_{min} = 10^\circ$. Рабочая область в пространстве координат α, β, γ ориентации подвижной платформы без учёта особых положений показана на рисунке 2а. На рисунке 2б показана рабочая область в пространстве координат выходного звена x_p, y_p, z_p .

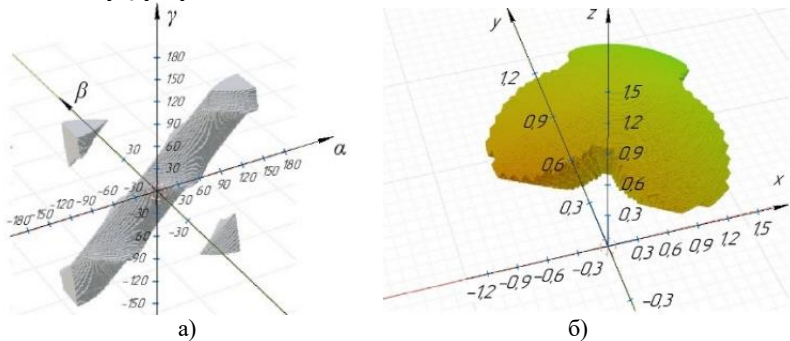


Рис. 2 - Рабочее пространство концептуальной платформы: а) в координатах (α, β, γ) ; б) в координатах (x_p, y_p, z_p) .

Выявлено, что рабочая область в пространстве координат (α, β, γ) разделяется на две части, однако рабочая область в пространстве координат (x_p, y_p, z_p) практически совпадает для различных знаков определителя матрицы Якоби. В обоих случаях из рабочей области исключена центральная зона, в которой определитель матрицы Якоби равен нулю. Таким образом, если конструкция захвата РТС вместе с закрепленной на нем гибкой трубой обеспечивает сбор фруктов при любой ориентации выходного звена, это свидетельствует о том, что система функционирует корректно как при положительных, так и при отрицательных значениях определителя матрицы Якоби. Выявлено, что при заданных исходных данных для моделирования пересечение звеньев отсутствуют. Увеличим диапазоны изменения длин штанг с сохранением соотношения $l_{min}/l_{max}=0.6$ для обеспечения достаточного пространства внутри штанги для размещения шарико-винтовых пар. При увеличении размеров до $l_{min} = 420$ мм, $l_{max} = 700$ мм, возникают пересечения центральной кинематической цепи с подвижной платформой. Для определения оптимальных соотношений длин звеньев и оптимальной рабочей области выполнена оптимизацию геометрических параметров.

Рассмотрена задача оптимизации параметров робота-трипода с центральным телескопическим звеном в составе РТС. Сформулирована постановка задачи оптимизации параметров:

1. Параметры оптимизации: радиусы платформ R_1 и R_2 , предельные значения длин приводных штанг L_{min} и L_{max} , а также длины звеньев центральной кинематической цепи l_{c1} и l_{c2} ;

2. Критерии оптимизации: K_1 и K_2 , при этом K_1 выбирается, исходя из обеспечения компактности конструкции, а K_2 учитывает объём рабочего пространства и характеризует диапазоны недостижимых ориентаций платформы с учётом пересечений звеньев.

3. Введены ограничения на соотношение минимальной и максимальной длин приводных штанг $\frac{l_{min}}{l_{max}} \geq 0.6$.

Синтезирован универсальный алгоритм многокритериальной оптимизации, который состоит в нормализации критериев и итеративной процедуре оптимизации с использованием однокритериальных эволюционных алгоритмов и свёртки критериев с переменными коэффициентами важности, которые имеют две составляющие. Первая составляющая β_i обеспечивает равноценность критериев и является постоянной. Вторая составляющая коэффициентов важности α_i является переменной. После выполнения нормализации критериев в алгоритме выполняется итеративная однокритериальная оптимизация и обновление Парето множества с использованием эволюционных алгоритмов с различными коэффициентами важности, которые определяются как

$$\beta_i = \frac{1}{K_i \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{K_j} \right)}; \alpha_i = \frac{\beta_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i},$$

где K_i — среднее значение i -го критерия, $\gamma_i \in [0,1]$ — составляющие коэффициентов важности, изменяемые после каждой итерации однокритериальной оптимизации в соответствии с n -мерной сеткой, имеющей диапазоны по каждому из измерений $[0;1]$ и шагом δ_γ . Многократное выполнение процедуры позволяет последовательно сформировать участки Парето множества.

Исходные данные для вычислительного эксперимента: Диапазоны параметров оптимизации: $R_1 \in [200;1000]$, $R_2 \in [200;1000]$, $L_{min} \in [200;1200]$, $L_{max} \in [400;1400]$, $l_{c1} \in [200;1400]$, $l_{c2} \in [0;800]$, коэффициент штрафа $p_1 = 1000$, количество узлов сетки для каждого измерения для перечисления компонента γ_i равно 20. Число особей, поколений выбрано экспериментально. При сравнении нескольких алгоритмов выбраны схожие параметры.

Каждая итерация однокритериальной оптимизации выполнена в два этапа. В качестве алгоритмов однокритериальной оптимизации используются модификации эволюционных алгоритмов с параллельным вычислением функций приспособленности, такие как генетический алгоритм (GA), алгоритм серых волков (GWO) и алгоритм роя частиц (PSO)). На первом этапе диапазон параметров изменялся в исходных диапазонах, приведённых выше. На каждом последующем этапе диапазоны уменьшались в 10 раз. При этом центр диапазонов соответствовал лучшему результату, полученному на предыдущем этапе. На рисунке 3, а показана аппроксимация Парето-множеств с использованием каждого из алгоритмов, после чего выполнено объединение множеств и исключение из результирующего множества точек, не удовлетворяющих условию по Парето-оптимальности (Рис. 3б).

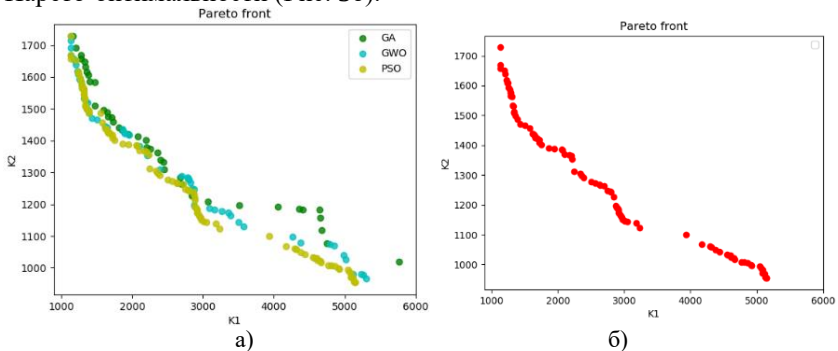


Рис. 3 – Парето-множества: а) алгоритм GA, алгоритм GWO, алгоритм PSO; б) Парето множество, полученное на основе трех алгоритмов.

Алгоритм PSO показал лучшие показатели эффективности и позволил получить более 86,4% точек Парето множества, в то время как GA и GWO позволили получить лишь 2,1% и 13,5% соответственно.

Разработан двухэтапный алгоритм технического зрения для определения координат фруктов с использованием данных, полученных с двух бинокулярных

камер. Камеры расположены на фронтальной части мобильной платформы и на захватном устройстве. Система автоматического сбора фруктов выполняет распознавание в два этапа. На первом этапе фронтальная RGB-D камера, установленная на мобильной платформе, определяет положение деревьев и фруктов. Нейронная сеть сегментирует кроны деревьев и выявляет фрукты, используя данные глубины для фильтрации объектов за пределами дерева. Вычисленные 3D-координаты фруктов позволяют мобильной платформе ориентироваться относительно дерева. На втором этапе камера, установленная на захватном устройстве, уточняет координаты фруктов. С помощью нейронной сети и метода преобразования Хафа выделяются границы объектов, определяются размеры, а проверка в HSV-пространстве исключает неподходящие объекты. Объединение данных двух камер с помощью фильтра Калмана исключает дубликаты, обеспечивая точное позиционирование для сбора. Проведено тестирование разработанной системы технического зрения на тестовом наборе данных. Результаты тестирования представлены на рисунке 4. Как видно из рисунка 4б, при определении близко расположенных фруктов происходит их объединение в один объект. Также при перекрытии распознаваемых объектов сегментацией изображения не удастся получить полноценную геометрию плода. На рисунке 4в показан результат обработки изображения после применения преобразования методом кругов Хафа, что позволило уточнить размеры фруктов.

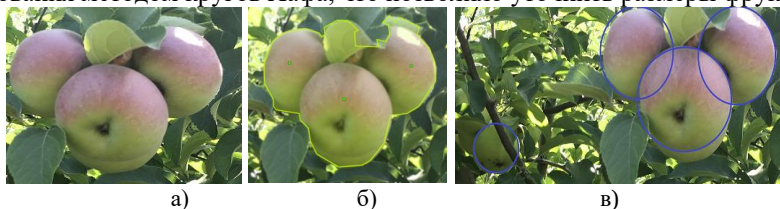


Рис. 4 – Визуализация результатов определения фруктов на каждом этапе распознавания.

Конфигурации робототехнической системы рассматривалась с учётом сбора яблок и в соответствии с требованиями разработано схемно-техническое решение захватного устройства для сбора без повреждений (Рис. 5а).

Захватное устройство состоит из внешней трубы 1 и внутренней трубы 2, которая вкручивается во внешнюю трубу. На внешней трубе 1 установлен шаговый двигатель 3, который вращает внутреннюю трубу 2 посредством зубчатой передачи 4. Внутренняя труба 2 на внешней стороне имеет зубчатый профиль 5, выполненный параллельно спирали шарико-винтовой передачи 6. На торце внутренней трубы 2 расположен корпус захвата 7, выполненный из 10 сегментов. Каждый сегмент представляет собой вращающийся палец 12 с закреплённым на нём роликом 11 и храповым колесом 10. Поворот пальца против часовой стрелки блокируется собачкой 8, которая прижимается к колесу 10 за счёт пружины 9. Сжатие пальцев происходит за счёт движения ролика 11 по внутренней поверхности обоймы конуса 13, которая вращается внутри конуса 14.

На конце каждого пальца установлена мягкая губка 15, которая может поворачиваться в небольшом диапазоне.

Для определения параметров ЗУ составим расчетную схему (Рис. 5б).

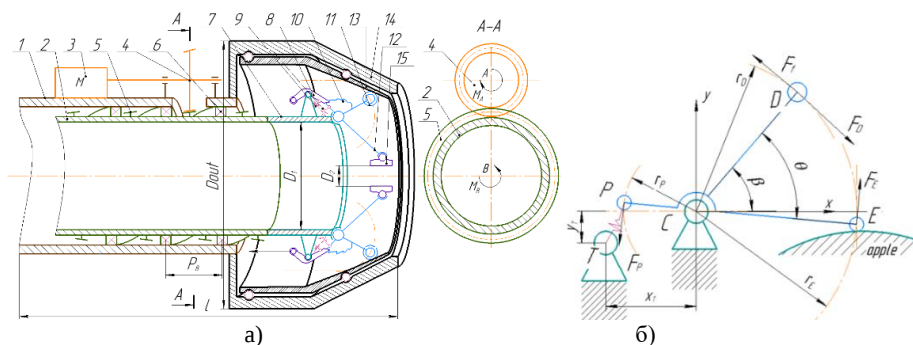


Рис. 5 - Расчётная схема: а – схема взаимодействия пальца и конуса; б – расчётная схема пальца.

Представим механизм ЗУ в виде плоской схемы. Сила F является результирующей поступательного движения внутренней трубы, которая прикладывается к одному пальцу. Поворот пальца относительно шарнира С осуществляется за счёт реакции конуса, которая возникает в результате действия силы ролика R_D . Рассмотрим систему в статическом равновесии, тогда требуемый крутящий момент для сжатия пальца будет равен

$$M = \frac{(F_E r_E + F_P r_P + F_f r_D)}{r_D \cos(90^\circ - \alpha - \beta) \cdot \cos(\alpha + \beta)} P_B z_1 n, \quad (3)$$

где η коэффициент полезного действия, принимаемый для шарико-винтовой передачи равным 0,88; n – количество пальцев захватного устройства; F_E – сила сжатия пальцев; F_P – сила упругости пружины рычаг; r_D, r_E, r_P — это радиусы поворота рычагов; P_B – шаг винтовой поверхности; z_1, z_2 число зубьев трубы 2 и приводного колеса 4 соответственно.

Полученный в выражении (3) момент M используем в качестве критерия, минимизирующего энергопотребление электродвигателя. Задача оптимизации сформулирована следующим образом:

1. Критерии оптимизации: момент двигателя $M \rightarrow \min$, наружный диаметр корпуса $D_{out} \rightarrow \min$, длина трубы $l \rightarrow \min$.
2. Параметры оптимизации: радиус закрепления пружины на пальце, длина пальца, угол конуса относительно оси захватного устройства α° , угол между пальцем и рычагом кулачка θ° .
3. Ограничения оптимизации: угол между пальцем СЕ и рычагом CD $0 < \theta < 90 - \alpha$, при этом $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, угол поворота пальца $0 \leq \beta \leq \theta$, длины рычагов в диапазоне $0 < r_p < r_d$.

Для решения задачи использован генетический алгоритм и среда моделирования MATLAB «gamultiobj». Для формирования множества в качестве критерия использован объём V_{out} , занимаемый захватным устройством.

Результаты расчётов представлены в виде множества Парето (Рис. 6а). Из всего множества Парето выбрано значение, при котором крутящий момент максимально низок, а объём остается в пределах, приемлемых для изготовления. Выбранная из множества Парето конфигурация ЗУ имеет следующие значения параметров: $r_p = 0.005$ м, $r_E = 0.0587$ м, угол конуса $\alpha = 37.4^\circ$, жесткость пружины $k = 2.815 \cdot 10^4$. Получен график требуемого круглящего момента в зависимости от угла поворота пальцев (Рис. 6б). Исходя из графика, следует, что в исходном положении, когда пальцы параллельны трубе, крутящий момент значительно выше, чем при сжатии пальцев.

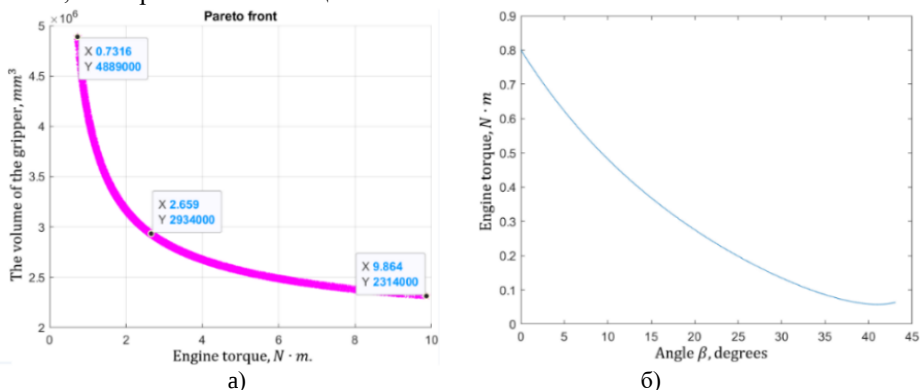


Рис. 6 - Результаты оптимизации: а – множество Парето; б - график крутящего момента двигателя в зависимости от смыкания пальцев.

В третьей главе рассмотрена разработка электронно-цифровых моделей отдельных модулей и РТС в целом, имитационное моделирование. Рассмотрены вопросы проектирования конструктивных узлов РТС с применением САПР Adams и NX.

Используя геометрические параметры робота-трипода, полученные при оптимизации, построена динамическая имитационная модель и выполнена отработка четырех траекторий. Траектории выбраны на основании данных о параметрах рабочей зоны с учетом достижений крайних положений. В результате получены пиковые значения результирующих сил во всех шарнирах с учетом размеров платформ робота-трипода. Сила, действующая на наиболее нагруженный центральный сферическом шарнире (С) в зависимости от радиусов подвижной и неподвижной платформ представлена в виде трёхмерного графика и в виде цветовой карты на рисунке 7. Значение пиковой нагрузки составляет 4500 Н.

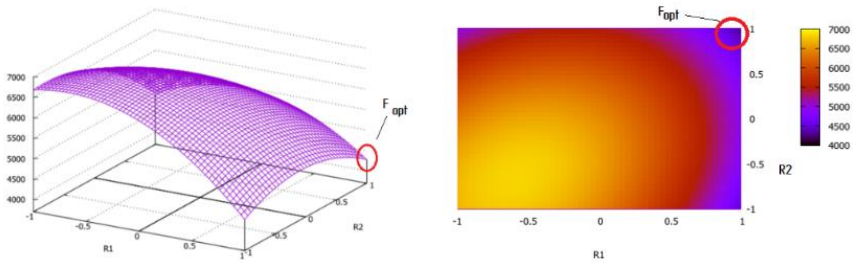


Рис. 7 - Функция отклика и цветовая карта распределения пиковых значений суммы сил в шарнире (C) от радиусов подвижной и неподвижной платформ

На основе полученных пиковых значений действующих сил, проведена топологическая оптимизация нижней платформы робота-трипода. На рисунке 8а и 8б показано исходное тело нижней платформы и полученное в результате нескольких итераций оптимизации. На рисунке 8в показана конструкция неподвижной платформы, выполненная на основе топологической оптимизации.

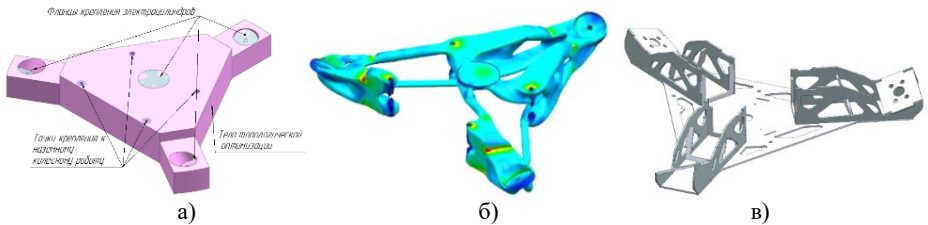


Рис. 8 - Топологическая оптимизация: а – упрощённая ЭЦМ нижней платформы; б – оптимизированное тело с отображением напряжения по Мизесу; в – конструкция неподвижной платформы на основе тела оптимизации.

В результате всех итераций топологической оптимизации при размере ребра конечных элементов 20 мм масса неподвижной платформы составила 6,7 кг.

Выполнено построение электронно-цифровой модели РТС, которая представлена на рисунке 9а. Для осуществления транспортировки и складирования плодов разработано прицепное устройство, состоящее из контейнера, инерциального тормоза и гибкой трубы (Рис. 9б). На основе построенной ЭЦМ проведено имитационное моделирование движения робота-трипода с телескопическим звеном по траектории достигающей крайнего положения (Рис. 9в).

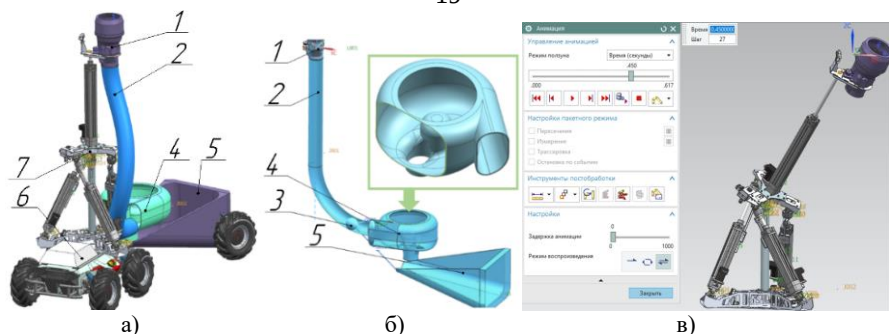


Рис. 9 - Моделирование РТС: а – Общий вид системы; б – имитационное моделирование движений робота-трипода; в – механизм транспортировки фруктов в контейнер (1 – захват, 2 – гибкая труба, 3 – фрукт, 4 – инерционный тормоз, 5 – контейнер для фруктов, 6 – наземный автономный колёсный робот, 7 – робот-трипод).

В четвертой главе рассмотрено создание экспериментального образца РТС и проведение экспериментальных исследований.

Экспериментальный образец автономной РТС для сбора фруктов представлен на рисунке 10 и состоит из наземного автономного колёсного робота «Scout 2.0» 1 и робота-трипода, на котором установлено телескопическое звено 2 выполненное в виде электроцилиндра

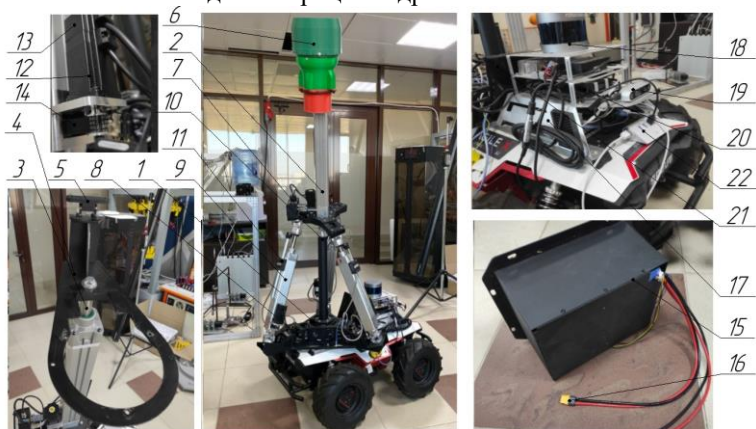


Рис. 10 - Экспериментальный образец автономной РТС для сбора фруктов

На штоке электроцилиндра 3 выполнено крепление для захватного устройства 4. Крепление имеет кронштейн 5 для установки камеры технического зрения. Захватное устройство 6 и его крепление 4 имеют соосные отверстия и соединены посредством винтов. Робот-трипод выполнен из верхней 7 и нижней 8 платформ, которые соединены тремя электроцилиндрами 9 и центральной стойкой 10. На каждом из электроцилиндров установлен линейный датчик 11,

определяющий длину выдвижения электроцилиндра. Каждый из двигателей 12 электроцилиндров имеет энкодер 13, в результате чего становится возможным выполнять сравнение реального удлинения электроцилиндра при заданном количестве оборотов двигателя 12 и определять ошибку. Винт каждого электроцилиндра приводится в движение посредством ремённой передачи 14. «SCOUT 2.0» 1 имеет съёмную батарею 15 на 24V и 30 А/час, которая имеет разъёмы 16 для подключения дополнительного оборудования. В передней части «Scout 2.0» 1 установлен металлический корпус 17, на котором выполнен монтаж лазерного датчика 18 LiDAR, камеры технического зрения 19 «intel realsense 3d», вычислительной системой 20 и монитора 21. Подключение камеры технического зрения 19 и периферийных устройств происходит через Usb-хаб 22.

Для корректной работы робота трипода проведены испытания и определены базовые расхождение движений экспериментального образца и имитационной модели, после чего внесены соответствующие корректировки в регулятор (Рис. 11).

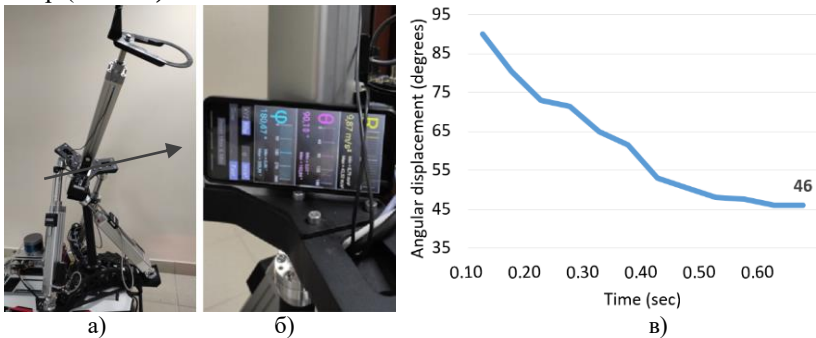


Рис. 11 - Испытания экспериментального образца: а – положение экспериментального образца в крайнем положении; б – показания датчиков при наклоне платформы.

В результате максимальный наклон платформы прототипа при неблагоприятной траектории составил $\pm 44^{\circ}08'$ градусов. Были проведены измерения длины каждого электроцилиндра, в результате которых не было обнаружено расхождений со значениями низкоуровневого контроллера. Значение наклона для имитационной модели составило $\pm 43^{\circ}67'$, а для прототипа $\pm 44^{\circ}08'$, что является расхождением с имитационной моделью менее чем на 1%.

Проведены испытания в промышленном саду «БелСад». РТС осуществляла навигацию (Рис. 12а), остановку возле плодовых деревьев и выполняла позиционирование захватного устройства в местах, где обнаружены плоды (Рис. 12б). РТС демонстрировала способность корректно осуществлять навигацию, выполнять локализацию деревьев, и остановку с учетом досягаемости плодов. Робот-трипод с захватным устройством успешно выполнял захват плодов, расположенных на различной высоте и под разными углами.

Для проверки эффективности и безопасности захвата был проведён сравнительный тест сбора плодов (Рис. 12в). По сравнению с аналогом, разработанный захват показывает более высокую скорость сбора, но при этом процент повреждений оказался выше, в связи с низким качеством изготовления.

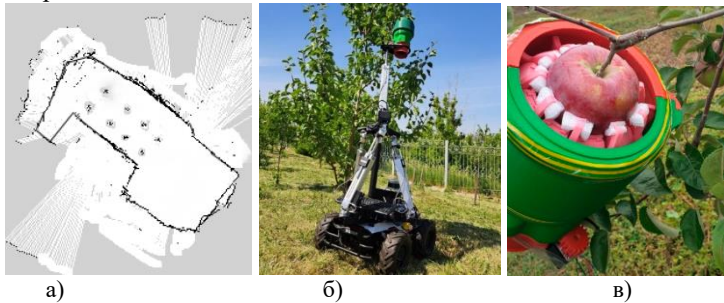


Рис. 12 - Испытания экспериментального образца в реальных условиях: а – навигация в пределах сада; б – остановка и позиционирование ЗУ; в – сбор яблок захватным устройством.

В заключении работы сформулированы основные результаты.

1. Анализ состояния исследований показал, что создание и применение новых типов робототехнических систем для сбора фруктов с высокими показателями структурной жёсткости, автономности, компактности и скорости является важным направлением сбора урожая. Эти системы не являются универсальными, и многое зависит от типа и геометрии собираемого фрукта.

2. Определен наиболее перспективный метод сбора: одновременное отрывание и скручивание фрукта, что учтено при проектировании захватного устройства.

3. Предложена модульная структура робототехнической системы для сбора фруктов, выполненная на базе мобильной колёсной платформы и робота-трипода, в котором для исключения избыточных степеней свободы и повышения управляемости использована пассивная центральная кинематическая цепь с выдвижным телескопическим звеном, а также захватное устройство с гибкой трубой для транспортировки и складирования фруктов.

4. Предложена структура и параметризованная модель специального захватного устройства, позволяющего комбинировать методы отрывания и скручивания фруктов за счёт наличия на корпусе винтовой поверхности, по которой перемещается внутренняя труба, имеющая на одном торце пальцы, обеспечивающие захват и отделение фруктов.

5. Разработана математическая модель кинематики робототехнической системы, описывающая зависимость положения телескопического звена с захватным устройством от углов ориентации подвижной платформы робота-трипода, учитывающая положения шарниров крепления кинематических цепей робота-трипода к платформам в виде систем нелинейных уравнений,

определяющих ограничения на множество достижимых положений и ориентаций выходного звена и допустимых диапазонов движения линейных приводов.

6. Синтезирован эвристический алгоритм многокритериальной оптимизации параметров робота-трипода, на первом этапе которого выполняется нормализация критериев, а на втором этапе - итеративная процедура оптимизации на основе однокритериальных эволюционных алгоритмов с использованием свёртки критериев с переменными коэффициентами важности. Использование в качестве критериев компактность конструкции и критерия, зависящего от количества недостижимых ориентаций платформы при заданных ограничениях на диапазоны приводных штанг, и отсутствие пересечений звеньев позволяет расширить функциональные и эксплуатационные характеристики робототехнической системы.

7. Синтезирован двухэтапный алгоритм технического зрения для локализации деревьев и распознавания фруктов на основе интеграции нейросетевых алгоритмов и преобразования Хафа; на первом этапе алгоритма выполняется формирование списка заданий на основе идентификации крон деревьев, а на втором - актуализация списка заданий на основе идентификации и сегментации плодов с учётом их спелости, что позволяет на основе визуальных данных комбинировать автономную навигацию и идентификацию координат объектов.

8. Разработан комбинированный метод проектирования робототехнической системы для сбора фруктов, включающий формализацию всех стадий проектирования: создание математических и электронно-цифровых моделей, цифровых двойников, топологическую оптимизацию распределения материала в конструктивных элементах, что позволило повысить точность и достоверность расчетов, сократить время проектирования.

9. С использованием разработанного метода проектирования на базе CAD/CAE - систем получена точная параметризованная электронно-цифровая модель автономной робототехнической системы для сбора фруктов, которая обладает высоким уровнем идентичности с реальным механизмом, что позволяет автоматизировать процесс проектирования и значительно ускорить его реализацию.

10. На основе разработанной электронно-цифровой модели выполнено имитационное моделирование в динамической среде робота-трипода при заданных траекториях движения, что позволило получить полное представление о взаимосвязях кинематических и динамических параметров, а также учесть инерционные характеристики и силы, действующие в приводных парах при различных сценариях сбора фруктов.

11. Выбраны технические средства для оснащения экспериментального образца робототехнической системы, выполнена интеграция системных компонентов, датчиков, контроллера. Разработан и изготовлен полномасштабный экспериментальный образец робототехнической системы для сбора фруктов.

12. Проведены экспериментальные исследования прототипа захватного устройства в садовом хозяйстве, в рамках которых выполнено сравнение с известным аналогом. Определено что, предложенное захватное устройство обеспечивает большую производительность при сборе фруктов, но при этом использование жестких пальцев приводит к увеличению повреждаемых фруктов.

13. Проведены экспериментальные исследования образца робототехнической системы на основе технического зрения для отработки задач локализации и картографирования местности в автономном режиме с использованием Visual SLAM алгоритма и информации, полученной с датчика LiDAR. В результате исследований показано, что РТС выполняет безопасный обход препятствий в условиях неструктурированной среды.

14. Разработана и апробирована в реальных условиях конструкция полномасштабного экспериментального образца автономной робототехнической системы для сбора фруктов, позволяющая комбинировать методы отрывания и скручивания, а также складирование и транспортировку плодов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Бондаренко И.Р., Волошкин А.А., Перевузник В.С., Ковалев Л.А. Расчет силовых и кинематических параметров передаточного механизма на основе цепи скручивающихся рычагов / И.Р. Бондаренко, А.А. Волошкин, В.С. Перевузник, Л.А. Ковалев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). - 2022. - Т. 22. - № 2. - С. 91-98.

2. Волошкин А.А., Рыбак Л.А., Скитова В.М., Ноздрачева А.В., Гапоненко Е.В. создание трёхмерной кинематической модели манипулятора delta при помощи системы автоматизированного проектирования в NX. Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Т. 11. № 1. С. 20-29.

Статьи в зарубежных изданиях, включённых в систему цитирования Scopus

1. Rybak L., Carbone G., Mohan S., Gaponenko E., Malyshev D., Voloshkin A. New design and construction of a mechanical gripping device with a telescopic link of a fruit harvesting robot. *Robotica*. 2024. – P. 1-17.

2. Voloshkin A., Gaponenko E., Rybak L., Perevuznik V. Comparison of Methods of Finite Element Analysis in the Design of Mobile Robot Modules / A. Voloshkin, E. Gaponenko, L. Rybak, V. Perevuznik //Mechanisms and Machine Science. – 2023. – V. 124 MMS. – P. 254–263

3. Rybak, L., Malyshev, D., Voloshkin, A. Algorithm for Multi-criteria Optimization of Robot Parameters for Fruit Harvesting Based on Evolutionary Methods, Taking into Account the Importance of Criteria // Communications in Computer and Information Science. 2024. Pp. 241–255.

4. Voloshin, A., Rybak, L., Malyshev, D., Mohan, S., Gaponenko, E. The design of a gripper device with screw and gear gears in a robotic fruit picking system // AIR

'23: Proceedings of the 2023 6th International Conference on Advances in Robotics. 2023. Vol. 24. Pp 1 -6.

5. Malyshev, D., Rybak, L., Gaponenko, E., Voloshkin, A. Algorithm for Determining the Singularity-Free and Interference-Free Workspace of a Robotic Platform for Fruit Harvesting // 15th International Conference “Intelligent Systems” (INTELS’22). 2022. Vol. 33.

6. Voloshkin, A., Gaponenko, E., Rybak, L., Perevuznik, V. Comparison of Methods of Finite Element Analysis in the Design of Mobile Robot Modules // New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications. MeTrApp. 2023. Vol. 124. Pp. 254–263.

Патенты

1. Пат. 2829514. Автоматизированное захватное устройство для сбора плодов / Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, Е.В. Гапоненко, В.С. Перевузнник, Д.И. Малышев, В.В. Черкасов, В.М. Скитова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2024116272; заявл. 13.06.2024; опубл. 31.10.2024. – 1 с.

2. Пат. 210772. Захватное устройство / Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, В.С. Перевузнник, Е.В. Гапоненко, Д.И. Малышев, И.И. Чередников, В.В. Черкасов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2021132746; заявл. 10.11.2021; опубл. 29.04.2022. – 1 с

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666742 Российская Федерация. Моделирование конструктивных параметров роботизированной платформы подвижности на основе виртуального прототипа и интерфейса Adams-Python: № 2022665899: заявлено 26.08.2022: опубликовано 06.09.2022 / И.А., Дуюн, Т.А. Дуюн, Л.А. Рыбак, А.В. Хуртасенко, Е.В. Гапоненко, Д.И. Малышев, В.С. Перевузнник, А.А. Волошкин, В.В. Черкасов, Д.В. Гаврилов, К.В. Чуев; правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

2. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022666717. Определение рабочей области роботизированной платформы подвижности с учётом особых положений. Малышев Д.И., Рыбак Л.А., Дуюн Т.А., Хуртасенко А.В., Гапоненко Е.В., Перевузнник В.С., Волошкин А.А., Черкасов В.В., Гаврилов Д.В., Чуев К.В., заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 06.09.2022. Заявка № 2022665882 от 26.08.2022.