

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

ШЕРЕУЖЕВ Мадин Артурович

**РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Специальность 2.5.4

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Научный руководитель:

К.т.н., доцент

Серебрянный Владимир Валерьевич

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Список сокращений и условных обозначений.....	5
Введение.....	6
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ РОБОТАМИ И АНАЛИЗ СОСТАВА РОБОТА ДЛЯ СБОРА ПЛОДОВ	18
1.1. Основные предпосылки для роботизации процесса сбора плодовоовощных культур	18
1.2. Требования к функциональным характеристикам средств роботизации процесса сбора плодовой продукции	21
1.3. Аналитический обзор подходов к управлению распределенными робототехническими комплексами	26
1.4. Распределение задач при управлении распределенными робототехническими комплексами, представленном в виде мультиагентной системы.....	32
1.5. Обзор робототехнических комплексов для сбора плодовой продукции	34
1.6. Выводы по Главе 1.....	45
ГЛАВА 2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ ДЛЯ СБОРА УРОЖАЯ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ САДА ИНТЕНСИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ	47
2.1. Требования к архитектуре системы управления группой роботов и методы управления	47
2.2. Представление параметров мультиагентной системы с помощью онтологии	53

2.3. Распределение и назначение задач в мультиагентной робототехнической системе	67
2.4. Логическое управление гомогенной группой роботов	82
2.5. Оценка динамических характеристик системы управления группой роботов-агентов для сбора плодов урожая как мультиагентной робототехнической системы	87
2.6. Структура системы управления группой роботов для сбора плодовых культур в условиях сада интенсивного выращивания	97
2.7. Выводы по Главе 2.....	100
ГЛАВА 3. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА-АГЕНТА НА ПРИМЕРЕ РОБОТА ДЛЯ СБОРА ПЛОДОВОЙ ПРОДУКЦИИ.....	103
3.1. Конструкция робота-агента для сбора плодовой продукции.....	104
3.2. Управление мобильной платформой робота-агента для сбора плодовой продукции	108
3.3. Управление манипулятором робота-агента для сбора плодов.....	110
3.4. Проектирование системы технического зрения робота-агента для сбора плодовой продукции	128
3.5. Локализация и планирования движения робота-агента для сбора плодовой продукции	148
3.6. Выводы по Главе 3.....	155
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СБОРА ПЛОДОВОЙ ПРОДУКЦИИ	157

4.1. Общая структура системы управления движением робота-агента для сбора плодов	158
4.2. Моделирование и исследование алгоритмов группового управления	167
4.3. Эксперимент по проверке работы системы распознавания положения плодовой продукции и управления манипулятором	178
4.4. Эксперимент по управлению гомогенной группой роботов-сборщиков	182
4.5. Выводы по Главе 4.....	191
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	192
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ	213

Список сокращений и условных обозначений

РТК	– робототехнический комплекс
РРТК	– распределенный робототехнический комплекс
СХ	– сельское хозяйство (сельскохозяйственный)
СУ	– система управления
СТЗ	– система технического зрения
МРТС	– мультиагентная робототехническая система
КА	– конечный автомат
СУАД	– система управления автономным движением
ГНС	– глобальная навигационная система
ЛНС	– локальная навигационная система
ГИС	– геоинформационная система
OWL	– Web Ontology Language
RDF	– Resource Description Framework
RGBD	– Red, Green, Blue, Depth
ROS	– Robot Operating System

Введение

Актуальность темы исследования.

Производство доброкачественной сельскохозяйственной продукции в достаточном количестве является необходимым условием устойчивого развития общества. В последние десятилетия повышение эффективности и рост производительности труда в сельском хозяйстве осуществляется за счет механизации и автоматизации производственных процессов с выполнением трудоемких, монотонных или вредных для здоровья работников операций. Для развития в рамках современной экономической парадигмы сельскохозяйственная отрасль Российской Федерации нуждается в новых способах увеличения показателей роста и эффективности производства [1]. Последние годы наиболее критичными стали вопросы применимости мировой практики использования современных информационных систем для интеллектуализации сельскохозяйственных машин в аграрном секторе экономики РФ [2, 3, 4, 5].

В настоящий момент достигнуты пределы повышения эффективности производства основных групп сельскохозяйственной продукции за счет интенсификации машинных технологий и народному хозяйству требуются новые решения, не влекущие за собой последствия в виде нарушения структуры почв и деградации экосистем [6]. Парадигмой развития аграрной отрасли стал ресурсоориентированный принцип производства сельскохозяйственной продукции, реализуемый средствами и методами цифровизации и роботизации производственных процессов [7] [8]. Соответственно, необходимым условием модернизации отрасли с внедрением специализированных средств автоматизации, в том числе роботов, становится расширение производства широкой номенклатуры датчиков состояния сельскохозяйственного пространства и отдельных живых организмов, мехатронных систем для

взаимодействия с живыми организмами и разработка интеллектуальных систем обработки данных и принятия решений [9].

Роботизация сельского хозяйства позволяет комплексно решить задачи сокращения производственных расходов, обеспечения стабильно высокого качества продукции, улучшения условий труда рабочих, обеспечения роста объемов производства, увеличения технологической гибкости производства, сокращения производственных отходов и увеличения выхода продукции, обеспечения соответствия требованиям техники безопасности и повышение качества охраны труда, сокращения текучести персонала и сложностей при подборе кадров, сокращения капитальных затрат (производственные ресурсы, незавершенное производство), экономии производственных площадей [10]. Также роботизация сельского хозяйства способствует минимизации человеческого влияния при управлении цепочкой технологических процессов и управлении парком сельскохозяйственной техники, и происходит, с одной стороны, посредством создания специализированных технических решений под требуемые технологические процессы, и, с другой стороны, посредством создания и внедрения автоматических сельскохозяйственных машин [11, 12].

Наиболее эффективным способом роботизации сельского хозяйства является создание интеллектуальных систем, охватывающих все этапы производства. Это позволяет говорить о внедрении в сельском хозяйстве обволакивающих интеллектуальных систем с сенсорно-информационно-коммуникационной сетью и мультиагентным управлением эффекторами – многокомпонентными робототехническими системами различного назначения. Такие тенденции можно наблюдать на мировом рынке сельскохозяйственной техники, где основные мировые производители сельскохозяйственной продукции уже переходят на сквозные роботизированные решения [13].

Актуальным является создание интегрируемых функциональных решений для производственных процессов по примеру сферы услуг. Создание подобных решений возможно по аналогии с получившим широкое распространение в

цифровизации процессов, в том числе и в сельском хозяйстве - SaaS (Software as a Service – *англ.* «программное обеспечение как сервис»). Решения осуществляются в виде формирования феномена «сервисной робототехники», или RaaS (Robotics as a Service– *англ.* «робототехника как сервис») [14]. Общемировая тенденция эксплуатации RaaS в сельском хозяйстве заключается в предоставлении заинтересованному бизнесу необходимого количества производственных или сервисных роботов в аренду, или лизинг.

Традиционный сбор плодовой продукции, а именно фруктов, овощей и ягод для торговли в свежем виде на территории РФ – трудоемкая на всех этапах решения задача, требующая утомительной низкоквалифицированной ручной работы [15]. Для регионов РФ характерно значительное сокращение доступных в сельском хозяйстве трудовых ресурсов обусловленное демографической ситуацией в стране и оттоком мигрантов [16] как вследствие закономерного повышения уровня жизни, так и различных внешнеэкономических и глобальных факторов. Например, вследствие пандемии COVID-2019 наблюдался значительный отток трудовых мигрантов из стран ближнего зарубежья. Особенно остро проблема доступности трудовых ресурсов стоит в период сбора урожая плодовых и овощных культур.

Для достижения основной цели внедрения робототехнических систем в производстве плодовой продукции – повышения производительности, снижения затрат и обеспечение своевременного сбора урожая – в большинстве производственных процессов целесообразно использование групп роботов для единовременной обработки больших территорий и коллаборативных робототехнических систем, предусматривающих возможность функционирования роботов в производственной среде совместно с людьми [17]. В отличие от полеводства и луговодства, характеризующихся относительно простыми алгоритмическими и кинематическими операциями, достаточно эффективно выполняемыми средствами механизации и автоматизации, повышение эффективности производства плодовоовощных культур требует

роботизации производственных процессов многомерными робототехническими комплексами, распределёнными в пространстве в виде отдельных самостоятельных РТК.

В данной работе рассматривается возможность создания аппаратно-программных решений, обеспечивающих функционирование распределенного робототехнического комплекса для сбора плодовой продукции, в частности яблок, выращиваемых в интенсивных садах.

Степень научной разработанности темы

Начало исследований научно-технических проблем и разработок технических систем для роботизации сбора плодово-ягодных и овощных культур относят к 1980-м годам. Пионерами в этой области являлись Япония, США и Нидерланды. Первые работы были посвящены нахождению положения плодов с помощью монохромных камер. В последующем появились системы, которые с достаточной точностью осуществляют сбор плодов в условиях частичной, или слабой детерминированности окружающей среды, что требует, в свою очередь, создания дорогостоящего инфраструктурного обустройства роботизируемого производственного участка. В РФ также были выполнены пионерские разработки в области синтеза компонент и систем управления сельскохозяйственными роботами, проведённые под руководством Ронжина А.Л. (СПИИ РАН), Измайлова А.Ю. и Смирнова И.Г. (ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ») Нагоева З.В. и Хамукова Ю.Х. (КБНЦ РАН).

Ряд российских организаций ведут разработки, непосредственно связанные с темой диссертационной работы. Так в ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ» ведется разработка робототехнических систем и автоматизированных комплексов для задач ухода, сбора и сортировки плодов для культур, выращиваемых в пространстве интенсивного сада и промышленных теплиц. На базе КБНЦ ИИПРУ РАН проводятся поисково-экспериментальные работы по созданию мультиагентных робототехнических систем для сбора плодов на полях, в частности огурцов и томатов, и ведутся разработки монтируемых на

мобильные платформы универсальных автономных антропоморфных двуруких манипуляционных роботов для решения задач производства плодоовощных культур в садах. Компания Cognitive Technologies совместно со специалистами из ТУСУР и компанией Ростсельмаш ведут разработки в области создания системы управления автономным движением сельскохозяйственной техники. Разработка предусматривает возможность реализации управления группой мобильных автономных сельскохозяйственных машин.

В отличие от подобных решений, в случае роботизации процессов в саду интенсивного выращивания важнейшими ключевыми факторами являются длительность цикла сбора единицы продукции – плода – в процессе отделения его от посадок и перемещения в тару, и сохранность продукции. В относительно ранних работах [18] для уборки урожая садовых культур использовались промышленные манипуляторы, базированные на специальных мобильных платформах, приводимых в движение за счет трактора. Как показано в обзоре [19], в работе [18] представлен робот с шестью степенями подвижности манипулятора, гибким захватным устройством и длительностью цикла сбора единицы продукции в 10-15 секунд. В ряде работ ([20], [21]) был достигнут цикл сбора в 9 секунд. В работе [21] показано решение задачи проектирования гибкого захватного устройства для сбора яблок и других округлых плодов и задачи распознавания яблок во всевозможных условиях при ясном дневном освещении. В работе [22] показано, что решения по роботизации сбора яблок могут быть не всегда связаны только с процессом сбора самого плода, но и с минимизацией трудозатрат на логистику. В работе продемонстрирована возможность использования мультиагентной системы для оптимизации логистики расстановки тары, в которую рабочие осуществляют сбор продукции на обрабатываемой площади.

В целом, для роботизации сбора урожая садовых культур необходимо решить целый ряд задач по обеспечению необходимой точности и быстродействия систем распознавания продукции и обеспечению её

сохранности при манипуляциях. Решению проблем проектирования отдельных компонент роботов, элементов систем управления и способам управления роботами посвящён широкий спектр научных и практических исследований отечественных и зарубежных учёных (Зенкевич С.Л., Ющенко А.С., Рубцов И.В., Заборовский В.С., Лесков А.Г., Лохин В.М., Макаров И.М., Манько С.В., Носков В.П., Павловский В.Е., Подураев Ю.В., и других).

К настоящему времени сформировались направления роботизации как в виде автономизации существующей сельскохозяйственной техники, так и в виде создания специализированных робототехнических средств [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. В частности, обзор литературы свидетельствует о наличии множества различных прототипов устройств для сбора плодовых культур, в частности яблок и томатов. Также, существуют отдельные решения по оптимизации логистики в рамках сбора урожая плодовых культур. Однако, все существующие решения имеют общий недостаток в виде неполной автономности РТК.

Также, при анализе литературы не было выявлено работ, связанных с реализацией систем группового управления и проектированием сенсорно-информационных сетей для решения задачи сбора яблок и томатов распределёнными РТК. В связи с этим, представляется актуальным рассмотреть основные вопросы подбора компонент РТК для сбора плодов, в том числе на базе существующей техники, с учетом последующего функционирования в составе группы и, таким образом, реализовать алгоритмы управления группами РТК с учетом наличия «обслуживающих роботов». Иными словами, актуализировалась задача обеспечения группового гетерогенного управления.

Применение группы сельскохозяйственных роботов в недетерминированной среде ставит задачу реализации мультиагентного управления коллаборативными роботами. Решению задач управления мультиагентными мобильными коллаборативными роботами посвятил ряд работ Ющенко А.С. В работах Зенкевича С.Л., Назаровой А.В. и Рыжовой Т.П. отображены вопросы распределения задач внутри групп роботов. Общие

вопросы управления мультиагентными мобильными РТК отображены в трудах Мещерякова Р.В., Пшихопова В.Х., Ронжина А.Л. и других авторов из ЮФУ, СПИИ РАН, ИПУ РАН, СПбФИЦ.

Объект исследования

Объектом исследования являются распределенные робототехнические комплексы сельскохозяйственного назначения, а именно группы роботов для обслуживания производств плодовой продукции в садах интенсивного выращивания. В работе представлены подходы к решению задач роботизации производственных процессов по сбору урожая в интенсивных яблоневых садах, и подходы к проектированию модулей систем управления, необходимых для управления группами роботов на базе системы мультиагентной архитектурой.

Предмет исследования

Предметом исследования являются система группового управления распределённым сельскохозяйственным робототехническим комплексом для обслуживания производства плодовоовощных культур в части обеспечения безлюдного сбора яблок в садах с интенсивным производством, а также методы и алгоритмы группового управления сельскохозяйственными роботами.

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка средств автоматизации процесса сбора урожая плодовых культур, в частности яблок в садах с интенсивным производством, посредством интеграции в СХ-производство распределенных робототехнических комплексов.

Основные задачи исследования

В соответствии с целью в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

- проведен аналитический обзор существующих методов управления распределенными робототехническими комплексами и средств роботизации сбора плодовоовощных культур и подходов к организации автоматизированного сбора культур за счет применения робототехнических комплексов;

- разработана архитектура системы управления распределенного робототехнического комплекса для сбора плодовой продукции в саду интенсивного выращивания, описанного в виде мультиагентной робототехнической системы;

- в составе системы управления мультиагентной робототехнической системы для сбора плодовой продукции разработана онтология для представления состояния и параметров производственной среды, роботов-агентов и задач, назначаемых роботам-агентам;

- предложена реализация системы распределения задач между роботами-агентами, осуществляющими сбор плодовой продукции в садах интенсивного производства;

- разработаны структура системы управления робота-агента и конструктивная схема робота-агента для сбора плодовой продукции, функционирующего в составе гомогенной группы роботов;

- разработаны алгоритмы функционирования и общая структурная схема системы технического зрения робота-агента, с учетом специфики выполняемых задач при сборе плодовой продукции;

- осуществлена программная реализация модели мультиагентной системы управления группой роботов, осуществляющих сбор урожая плодовой продукции.

Область исследования

Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами паспорта специальности 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы:

П.5. Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление.

П.6 Математическое и программное обеспечение, компьютерные методы и средства обработки информации в реальном времени в роботах, робототехнических и мехатронных системах.

П.8 Планирование и реализация действий и движений, индивидуальное и групповое управление мобильными роботами наземного, воздушного, надводного, подводного, многосредного и космического применения.

Достоверность

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректностью и полнотой исходных положений и непротиворечивостью математических выкладок. Результаты теоретических исследований подтверждены компьютерным и натурным моделированием и результатами экспериментов с вновь созданным программно-аппаратным оборудованием.

Положения, выносимые на защиту:

1. Архитектура системы управления распределенного робототехнического комплекса, представленного в виде мультиагентной робототехнической системы (МРТС) с гомогенными коалициями и системой назначения задач на базе онтологии и венгерского алгоритма.

2. Структура системы управления движением робота-агента для решения задачи сбора плодов в интенсивном саду, функционирующего в составе мультиагентной системы и алгоритмы функционирования элементов системы управления.

3. Структура системы технического зрения робота-агента для сбора плодов с модулями распознавания плодов и формирования данных для системы визуальной одометрии;

4. Модель системы управления МРТС для сбора плодовой продукции с модульным программным обеспечением.

Методы исследования (методологическая основа).

В работе использованы методы современной теории автоматического управления, методы группового управления, методы рекуррентной фильтрации Калмана, математическое и имитационное моделирование и натурные эксперименты с опытными образцами программно-аппаратных решений.

Научная новизна.

1. В рамках архитектуры системы управления МРТС для сбора плодов разработана концептуальная и структурно-функциональная модель взаимодействия роботов-агентов в сельскохозяйственной среде, с формированием гомогенных подгрупп и предложена система распределения задач для мультиагентной системы с применением метода решения задачи о назначении за полиномиальное время с использованием онтологической базы знаний и формирования стоимости выполнения задач с учетом особенностей функционирования робота-агента.
2. Разработана структура системы управления движением робота-агента для сбора садово-плодной продукции, функционирующего в частично детерминированной среде, сопряженная с логическим уровнем системы управления и СТЗ.
3. Разработана структура системы технического зрения и отдельные элементы СТЗ робота-агента для сбора садово-плодной продукции, функционирующего в частично детерминированной среде.

Практическая ценность

Практическая значимость работы заключается в применимости разработкой системы управления группой сельскохозяйственных роботов на основе мультиагентной архитектуры для задач сбора плодовой продукции. Также, практически значимыми результатами являются разработанные элементы системы управления отдельными роботами-агентами с учетом их группового применения, что позволит расширить функциональные возможности и области применения робототехники. В целом, внедрение распределенных

робототехнических комплексов, реализованных с использованием результатов диссертационной работы для производства плодовой продукции позволит обеспечить восполнение робототехническими комплексами дефицита трудовых ресурсов в сельском хозяйстве.

Апробация результатов

- Международная научная конференция «Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем» ММИИУС – 2017 (Нальчик, 2017 г.)
- Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные машинные технологии и техника в сельском хозяйстве» (2019 г.);
- «Современные проблемы робототехники». Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти академика РАН Попова Е.П. (Москва, 2019 г.);
- Международная конференция «Завалишинские чтения 2017», (Санкт-Петербург, 2017);
- Международная конференция «Завалишинские чтения 2019», (Курск, 2019);
- Международная конференция молодых учёных и студентов МИКМУС-2019 (Москва, 2019);
- 1st International Conference on Mechanical System Dynamics (Нанкин, 2021);
- Международная конференция «Моделирование в инженерном деле» (Москва, 2021).

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использовались для проведения научно-практических и исследовательских работ на базе кафедры СМ7 и ИЦ «Робототехника и автоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ». Акты о внедрении результатов диссертационной работы приведены в приложении.

Публикации

Полученные в ходе работы результаты отображены в следующих публикациях: [125, 128, 129] – ВАК, [131, 132, 133, 134, 135] – Web of Science и SCOPUS.

Личный вклад автора

Формализация проблем управления группировками роботов и актуализация решаемой задачи осуществлялись автором исследования совместно с сотрудниками предприятий по производству сельскохозяйственной продукции и со специалистами в области автоматизации процессов в сельском хозяйстве. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все изложенные в диссертационной работе результаты исследования получены автором лично. Для робототехнической платформы, предоставленной ФГБНУ ФАНЦ «ВИМ», автором лично были реализованы компоненты системы управления манипуляционным механизмом и мобильной робототехнической платформой, а также системы технического зрения. Автором лично реализовано программное обеспечение для моделирования работы группы роботов и демонстрации работоспособности предложенных методов и алгоритмов управления.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, содержания и приложения.

Работа изложена на 229 страницах, содержит 115 иллюстраций, 19 таблиц.

Библиография включает 133 наименования.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ РОБОТАМИ И АНАЛИЗ СОСТАВА РОБОТА ДЛЯ СБОРА ПЛОДОВ

В этой главе рассмотрена постановка задачи управления распределённым робототехническим комплексом для сбора урожая плодовых культур. Представлено описание распределенного РТК в виде мультиагентной робототехнической системы (МРТС) и рассмотрены варианты реализации элементов системы управления МРТС. Рассмотрена архитектура системы управления МРТС, предполагающая наличие на уровне роботов-агентов формализованного конечно-автоматного контура для выполнения технологических операций и наличие адаптивного контура для безопасного функционирования при возникновении недетерминированных ситуаций. Предложены способы решения задач символьного представления среды и состояния роботов с использованием онтологий, а также способ распределения задач на уровне МРТС и отдельной гомогенной коалиции роботов.

1.1. Основные предпосылки для роботизации процесса сбора плодовоовощных культур

Сельскохозяйственная отрасль, как совокупность технологий, включает в себя осуществление широкого ряда разнородных самостоятельных производственных процессов. Характер алгоритмических, кинематических и динамических задач, решаемых в этих производственных процессах, определён геометрическими, физическими и химическими свойствами производственной среды и характером её структуризации, отличающимся высокой динамичностью. Вследствие этого, особенностью сельскохозяйственной отрасли является низкая степень замещаемости операций в разных технологиях и, соответственно, механизация производственных операций в отрасли осуществляется посредством создания большой номенклатуры специализированных агрегатов.

Производственная среда в той части сельскохозяйственной отрасли, которая представлена в форме возделывания культур в открытом грунте, трудно формализуема в полностью детерминированной форме. Следовательно, здесь малопригоден опыт применения разнообразных промышленных манипуляторов и промышленных мобильных платформ, успешно выполняющих определённые кинематические и динамические задачи по циклограммам. В свою очередь, тенденции к автоматизации производственного процесса в теплицах и выращиванию культур и городских вертикальных фермах с высокоструктурированной и детерминированной производственной средой позволяет говорить о возможности «промышленного» подхода к роботизации с интеграцией существующих многокомпонентных мобильных и манипуляционных систем [30].

Роботизация отличается от механизации способностью к практически неограниченной универсализации робототехнических систем. В настоящее время роботизация сельскохозяйственной отрасли на основе новейших результатов в области создания систем искусственного интеллекта и робототехники позволяет перейти к стратегии дополнения возможностей человека на всех этапах производственной деятельности [31].

При этом системная роботизация сельскохозяйственного производства потребует создания отдельных семейств исполнительных агрегатов и машин для решения специфических алгоритмических, кинематических и динамических задач в каждом из видов производственных процессов [32]. Специфичными будут, естественно, массогабаритные и энергетические характеристики и кинематические схемы исполнительных агрегатов. В то же время, в отношении систем управления робототехнических комплексов уже в настоящее время можно рассчитывать на высокую степень унификации. Степень универсализации устройств систем управления робототехнических комплексов различного назначения будет возрастать.

В предыдущие десятилетия вследствие дороговизны и недостаточного развития систем распознавания образов в неструктурированных потоках многомодальных данных датчиков и недостаточной эффективности сенсорных систем сельскохозяйственная робототехника уступала по показателям экономической эффективности с традиционными направлениями механизации производственных процессов и «живым» человеческим трудом [33, 34].

В современных условиях ключевым обстоятельством внедрения робототехники является экономическая оправданность роботизации производства плодоовощных культур, обусловленная сложившимся демографическим кризисом и нехваткой рабочей силы и тем, что коммерческая значимость сбора единицы продукции в этом виде производства стала относительно высока [35].

Роботизированной технике, предназначенной для замещения человека в процессе сбора урожая плодовой продукции, в частности яблок в интенсивных садах, для принятия решений и выработки управляющих сигналов для рабочих органов достаточно результатов анализа относительно небольших объёмов сенсорных данных о состоянии производственной среды с достаточно высокой степенью структурированности. Во-вторых, кинематические и динамические задачи, возникающие при выполнении производственной операции по сбору единицы продукции, могут быть решены рабочим органом с относительно небольшим количеством степеней подвижности и невысокими силомоментными характеристиками.

Разнородность выполняемых в аграрном производстве кинематических и динамических действий, требование возможности перемещения автономных агрегатов по сельскохозяйственным ландшафтам в сложных инженерно-геологических условиях с рыхлыми грунтами, способность манипулирования объектами в сложноорганизованном рабочем пространстве и т.п. обстоятельства позволяют говорить о средстве роботизации конкретного технологического процесса в сельском хозяйстве – робототехническом комплексе (РТК) – как о

симбиозе разнообразных технических устройств и программных средств (например, мобильной платформы, манипулятора, системы технического зрения и т.д.). Выполняемые РТК отдельные технологические операции являются частью взаимосвязанных технологических процессов. Например, технологический процесс по сбору плодовой продукции в саду требует сбора плодов с отдельных деревьев, сортировки плодов и распределения их по транспортным тарам, перемещения пустых и заполненных тар с плодами по угодьям и в помещениях для хранения, обработки и/или продажи. Совокупность РТК, выполняющих отдельные технологические операции в рамках единого технологического процесса, назовем Распределённым Робототехническим Комплексом (РРТК).

1.2. Требования к функциональным характеристикам средств роботизации процесса сбора плодовой продукции

Предполагаемая среда функционирования РРТК для сбора плодовой продукции (Рисунок 1.1) представляет собой рядные насаждения культур с вертикальной формацией плодов вокруг ствола (схожими характеристиками обладают насаждения томатов). Сбор плодов осуществляется в пространстве между рядами (Рисунок 1.2). Как правило, грунт между рядами оголенный, уплотненный, относительно ровный. Возможна относительная кривизна поверхности грунта, с небольшими косогорами (до 10°). В зависимости от конкретных хозяйств сбор, сортировка и упаковка может осуществляться одновременно на месте с последующим вывозом в зону отгрузки, или последовательно, с перемещением всей собранной массы в специальную зону сортировки, упаковки и отгрузки.

Определим технологические ограничения применения РТК в СХ. Технологические ограничения применения робототехнических комплексов для работы на участках выращивания и сбора плодов связаны с технической сложностью роботизации рутинной манипуляционной работы, обычно

выполняемой людьми. Это обстоятельство обусловлено так называемым «парадоксом Моравека», фиксирующим существенное превышение сложности управления «низкоуровневыми» когнитивными процессами при выполнении кинематических действий рабочими органами, над сложностью осуществления «высокоуровневых» когнитивных процессов при решении логических задач.



Рисунок 1.1.

Внешний вид предполагаемой среды функционирования РТК для сбора плодов, слева - яблоневый сад интенсивного выращивания [36], справа, схожая по характеристикам теплица для выращивания томатов полуоткрытого типа [37]

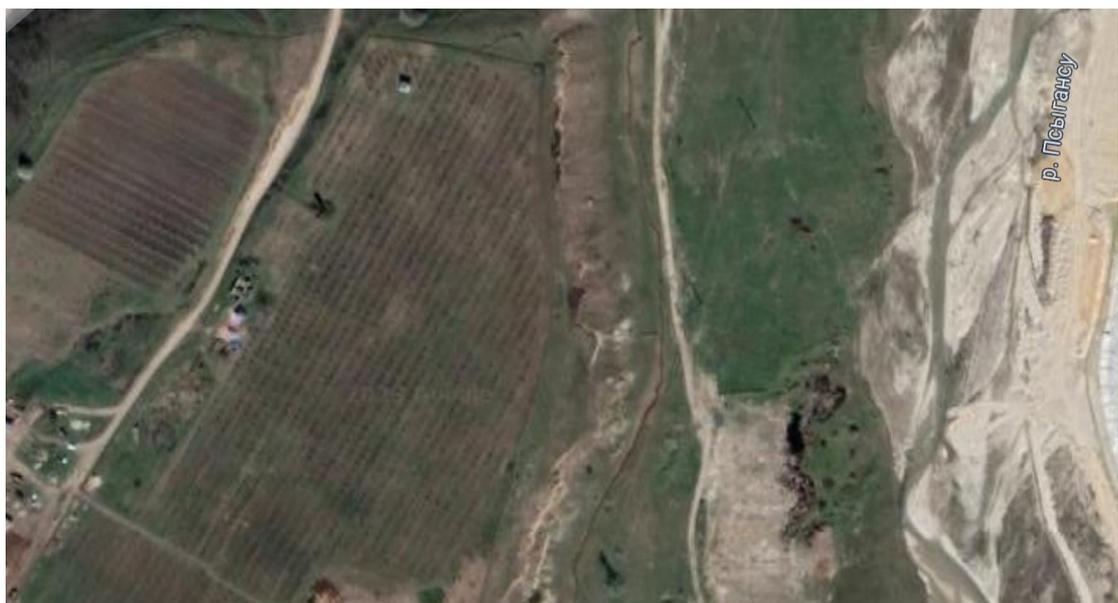


Рисунок 1.2.

Спутниковый снимок предполагаемой среды функционирования РТК для сбора плодов - яблоневый сад интенсивного выращивания

Дополнительными причинами сложности роботизации простейших, на первый взгляд, операций являются высокие требования к точности позиционирования мобильных платформ осуществляющих сбор плодов манипуляционных агрегатов относительно посадок, а также ориентирования и позиционирования обслуживающих роботов относительно рабочих агрегатов мультиагентной системы.

Геометрический образ производственной среды традиционных теплиц и садов интенсивного производства, при том, что это относительно высокоструктурированная среда, остаётся крайне неоднородным по типам составляющих геометрический образ среды поверхностей, меняющих, к тому же, свои свойства под воздействием погодных условий. Вследствие этого неизбежно накопление дополнительной погрешности данных датчиков в составе систем ориентации и навигации, и, соответственно, ограничение функциональности датчиков в меняющихся погодных условиях. К тому же роботизация рутинной для человека манипуляционной работы, например сбора урожая плодово-ягодных культур (яблоки, клубника, виноград, дыни и т.п.), осложнена необходимостью выполнения сложных для технических устройств процедур поиска плодов под листвой, сортировки плодов по спелости, целостности и наличия повреждений. Затем, необходимо провести неповреждающее отделение плода (грузки плодов) от плодоножки с последующими сортировкой плодов и их складированием и транспортировкой. Разнообразие форм, размеров и массы плодов не позволяет использовать универсальные механизмы для сбора плодов, а оценка качества плода требует наличия высококачественного технического зрения и высокоскоростного обращения к базе знаний для сравнения оцениваемого плода с эталонным.

Возможные варианты решения указанных задач представлены ниже в Таблице 1.

Таблица 1.

Варианты роботизации ручных операций

№ п/п	Нерешенная задача	Предлагаемая технология решения задачи
1.	Поиск плодов под листвой	Система технического зрения, способная по видимым частям искомого объекта (перекрытого не более чем на две трети) идентифицировать его, совмещая доступное изображение с базой данных
2.	Определением спелости плода	Система технического зрения, сканирующая плоды (видимый диапазон, совмещенный с подсветкой ультрафиолетовой подсветкой, инфракрасный диапазон).
3.	Определение целостности и отсутствия повреждений	
4.	Отделение плода (грузки плодов) от плодоножки	В части захвата и переноса плода требуется захватное устройство на выполняющем локальные перемещения манипуляторе, способное распределять усилия по фалангам исполнительных групп с целью минимизировать возможное сдавливание плода за счет увеличения количества точек контактного взаимодействия. В части транспортировки плодов – требуется разработать универсальный манипулятор для выполнения региональных перемещений плодов.
5.	Складирование плодов и их транспортировка	
6.	Облегчение ручного труда при сборе и при сортировке и упаковке продуктов	Исследование и создание носимых экзоскелетных комплексов, разгружающих руки и /или опорно-двигательный аппарат.
		Исследование и создание коллаборативных робототехнических комплексов, совместно функционирующих с рабочими в одном пространстве.

С учетом описанных в начале раздела особенностей среды функционирования РТК, для повышения эффективности технологических процессов, например, с точки зрения минимизации времени сбора плодовой продукции, целесообразно применение нескольких РТК, объединенных в единый, распределённый в пространстве, комплекс. Выделим требования к возможностям системы управления сельскохозяйственных распределённых РТК (СХ РРТК).

Формализация характеристик подобной сложной среды и мониторинг функционирования РТК в ней связаны с высокими требованиями к пропускной способности каналов связи и скорости обработки данных. Комплексность типов работ, выполняемых в сельском хозяйстве, обуславливает необходимость разработки системы целеуказания и распределения задач между элементами РРТК.

Для совместного функционирования нескольких РТК в составе единого распределенного РТК (РРТК) необходимо формирование стратегии работы комплекса исходя из требуемого функционала для выполнения технологического процесса, расположения и размеров, обслуживаемых РРТК участков, что подразумевает наличие возможности определения параметров обрабатываемых площадей из геоинформационных систем (ГИС) и других источников и автоматический выбор режима функционирования роботов в составе группы в зависимости от параметров обрабатываемых площадей.

Исходя из параметров обрабатываемых площадей, состояния технологических объектов и оборудования необходимо провести расчет параметров функционирования системы с учетом оптимальных значений управляющих воздействий отдельных РТК в составе РРТК. Система управления (СУ) РРТК при инициализации работ должна настраиваться через задание/изменение конфигурационных параметров элементов системы. Для экономии ресурсов и уменьшения износа устройств целесообразно заложить возможность изменения количества отдельных РТК, используемых для выполнения технологических операций в зависимости от объема требуемых работ, что предъявляет требования по обеспечению масштабируемости состава РРТК. Разнородность типов технологических операций, также обуславливает требование по универсальности отдельных РТК в составе РРТК или же наличие специализированных типов РТК под отдельные виды операций в рамках технологических процессов.

В процессе эксплуатации системы потребуется возможность настройки, калибровки и диагностирования состояния элементов системы, что потребует наличия как автономного, так и ручного режимов управления, в рамках которого человек может определять функционирование системы на уровне отдельных устройств и на уровне распределённого комплекса.

Полная роботизация и автоматизация сельскохозяйственного производства процесс итеративный. С первого этапа процесса требуется обеспечение безопасности нахождения человека, животных, техники и объектов инфраструктуры в среде функционирования РРТК. Роботизация предъявляет дополнительно требование возможности взаимодействия роботов с эргатическими системами со всеми эффектами влияния «человеческого фактора».

1.3. Аналитический обзор подходов к управлению распределенными робототехническими комплексами

Основные причины использования распределенных РТК обусловлены рядом факторов. Прежде всего, причиной использования РРТК является необходимость решения комплексных задач, требующих одномоментного выполнения операций, по самой своей природе распределённых в пространстве. Также, они могут быть обусловлены высокой сложностью задачи выполнения производственной операции одним РТК. Создание и совместное применение нескольких ограниченных в функционале роботов различного назначения в большинстве случаев выгоднее создания одного унитарного универсального робота. Несколько роботов могут решить задачу быстрее за счет распараллеливания процессов.

Предположим, что последовательно соединенные элементы «сложного» робота $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ отказывают независимо друг от друга. Тогда по правилу умножения вероятностей для независимых событий вероятность отказа системы выражается следующим образом: $P(S) = P(s_1) \times P(s_2) \times P(s_3) \times \dots \times P(s_n)$.

Если система состоит из «простых» взаимозаменяемых параллельно функционирующих роботов с вероятностью отказа каждого робота P_i , то вероятность отказа всей группы роботов выражается следующим образом:

$$P_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i); \quad (1.1)$$

Таким образом использование нескольких «простых» роботов вместо одного «сложного» увеличивает вероятность безотказного выполнения необходимых действий как за счёт статистического эффекта по формуле оценки вероятности безотказной работы сложной системы, так и за счёт «эффекта избыточности», возникающего при реализации возможности замещения роботов или отдельных элементов конструкции различных роботов при отказе одного робота или его элемента. Т.е. надёжность (вероятность работоспособного состояния) простой системы, составленной из независимых по отказам, последовательно соединённых элементов, равна произведению надёжностей $Q_i = (1 - P_i)$ ее элементов.

Производительность существующих роботов для сбора урожая обычно недостаточно высока, а срок окупаемости слишком большой, чтобы рассматривать роботизированную уборку унитарными роботами-уборщиками как альтернативу сезонному найму уборщиков-людей. Развитие технологий применения распределённых робототехнических комплексов в виде мультиагентных систем направлено на достижение экономической эффективности и, соответственно, коммерческой востребованности групп роботов, осуществляющих сбор урожая плодовых культур и самообслуживание группы в ходе эксплуатации [38]. Подобные группы для интеграции в рабочую среду должны обладать групповой автономностью и, при этом, состоять из индивидуально автономных роботов с развитыми коммуникативными способностями и способностями восстанавливать в своей программе управления геометрический образ производственной среды по потокам информации от сенсорной системы и вырабатывать управляющие решения с помощью бортовых

вычислительных мощностей и/или в режиме коллективного использования объединённых вычислительных мощностей всей группы или её части.

1.3.1. Управление распределёнными РТК

Подходы к созданию распределённых РТК можно разделить на две большие группы: коллективные роевые системы (collective swarm systems) и намеренно кооперативные системы (intentionally cooperative systems) [39, 40]. Коллективные роевые системы — это те, в которых роботы выполняют свои собственные задачи с минимальной потребностью в знаниях о других роботах в группе. Эти системы характеризуются большим числом однородных роботов, в которых используются локальные законы управления для генерации глобально согласованного поведения команды, при этом минимизирован обмен данными между роботами [41].

В роботах, функционирующих в намеренно кооперативных системах, требуется реализовать возможность получения знаний о присутствии других роботов в окружающей среде. Роботы в подобных системах действуют сообща, поведение отдельного робота генерируется на основе оценки состояния, действий или возможностей других роботов в группе для достижения единой цели. Намеренно кооперативные системы различаются в той степени, в которой роботы учитывают действия и состояние других роботов и, соответственно, возможна реализация сильно или слабо кооперирующих решений.

Сильно кооперирующие решения требуют, чтобы роботы действовали согласованно для достижения цели, выполняя задачи, которые не являются тривиально реализуемыми. Как правило, эти подходы требуют определенного типа связи и синхронизации режимов выполнения действий между роботами. Слабо кооперирующие решения позволяют роботам иметь периоды независимости, после координации их выбора задач, или ролей. Целенаправленно кооперирующие распределённые РТК могут быть гетерогенными по составу, в которых члены команды различаются по своим сенсорам и эффекторным возможностям. В этих командах координация роботов

может сильно отличаться от коллективно-роевого подхода, поскольку роботы не взаимозаменяемы.

Наиболее распространённым способом описания РРТК с наличием кооперации роботов является представление в виде мультиагентной робототехнической системы (МРТС).

1.3.2. Архитектура системы управления распределённого робототехнического комплекса, представленного в виде МРТС

Общая архитектура системы управления для мультиагентной системы оказывает значительное влияние на надежность и масштабируемость системы. Архитектура СУ группой должна учитывать взаимодействие роботов-агентов и то, как поведение группы будет генерироваться из поведения отдельных роботов. Известные архитектуры систем управления мультиагентных робототехнических систем (СУ МРТС): централизованные, иерархические, децентрализованные и гибридные.

Теоретически возможно использование централизованных архитектур систем управления, где координация всей группы роботов происходит в едином командном пункте. Подобные системы практически не реализуемы в задачах, где необходима беспроводная связь из-за их уязвимости, связанной с сосредоточением пункта принятия решений в одной точке, из-за трудностей передачи всего состояния системы в управляющий центр, а также невозможность управления в реальном времени. Ситуациями, в которых эти подходы являются релевантными, являются случаи, когда централизованный контроллер имеет возможность получения данных о состоянии роботов в режиме реального времени, и может легко передавать групповые сообщения для всех роботов, например управление группой роботов на производственной линии с одной стойки управления с помощью промышленного интернета.

Для иерархических архитектур свойственно наличие нескольких уровней принятия решений. Положение роботов в иерархии определяется коммуникационными свойствами, робот верхней иерархии является

коммуникационным узлом роботов нижней иерархии и наблюдает за действиями относительно небольшой группы других роботов внутри этого уровня, каждая из которых, в свою очередь, контролирует еще одну группу роботов и т. д. вплоть до роботов самого низкого уровня, которые являются только исполнителями поставленных задач. Эта архитектура масштабируется лучше, чем централизованная, и напоминает военное командование. Главный недостаток иерархической архитектуры управления — это восстановление от сбоев роботов, находящихся в дереве управления. Применение подобной архитектуры целесообразно в случае наличия ограничений по каналам связи.

Децентрализованные архитектуры управления применяются для управления группами роботов, где требуется, чтобы роботы предпринимали действия, основанные только на локальных ситуативных знаниях [42, 44, 45]. Этот способ управления устойчив к сбою коммуникационных систем отдельных роботов, поскольку нет жесткой иерархии и никакой робот не несет ответственности за контроль над другим роботом. Однако достижение глобальной согласованности в системах с децентрализованной архитектурой может быть затруднительным, поскольку цели высокого уровня должны быть распределены на локальном уровне и требуют включения системы управления каждого робота [43]. Если назначаемые цели параметризованы и параметры меняются во времени, дополнительную сложность представляет адаптация поведения отдельных роботов к новым целям за предсказуемые промежутки времени.

1.3.3. Постановка задачи группового управления для задачи сбора плодовой продукции

Рассмотрим вопрос выбора архитектуры СУ МРТС для задачи сбора плодов в садах интенсивного выращивания.

Сравнительный анализ подходов к проектированию СУ группой роботов в работе [46] показал, что локальную адаптивность и надежность децентрализованных систем и эффективность целеполагания и координации

централизованных систем можно объединять с использованием так называемых гибридных архитектур. Архитектуры гибридного управления сочетают высокоуровневые средства целеуказания и распределения задач для локальных групп и распределение задач внутри локальных групп и адаптивность к изменениям среды на уровне отдельного робота [47, 48], что актуально для выполнения частично детерминированных задач для различных типов роботов при роботизации процесса сбора плодов в интенсивных садах.

Кроме того, гибридное управление группой роботов обеспечивает возможность масштабирования, а именно добавление и использование в рамках единой сенсорно-информационной сети автономных подгрупп роботов, одновременно обслуживающих несколько участков. Данное свойство обосновывает возможность реализации подхода RaaS и возможность применения групп роботов как альтернативу сезонному найму людей.

Для обеспечения автономного функционирования РТК [97] в пространстве обрабатываемого сельскохозяйственного участка требуется наличие системы ориентации и навигации (СОН), системы технического зрения (СТЗ) как для задач распознавания так и задач ориентации, системы передачи данных и коммуникации, системы управления исполнительными элементами и системы энергообеспечения структурных элементов РТК.

Для группового применения мобильных РТК необходимо, чтобы навигационная система, установленная на их борту, дополнительно имела в своем составе средства измерения относительного положения МРТК, бортовую или стационарную ЭВМ с алгоритмами и программами обработки данных и управления, и средства индикации изменений в окружающей среде [50].

Для реализации системы управления группой мобильных РТК в пространстве интенсивного сада необходимо решение следующих технических задач, которые коррелируют с задачами данного исследования:

Задача 1. Синтезировать законы управления для сельскохозяйственных РТК, обеспечивающие на основе гибридной архитектуры взаимодействия, вывод

группы РТК для сбора плодов из исходной точки базирования в точки распределения в междурядьях.

Задача 2. Синтезировать алгоритмы формирования управляющих сигналов, которые позволят гарантировать точность определения положения РТК в составе группы относительно глобальной точки отсчета и относительно других РТК.

Задача 3. Синтезировать и реализовать систему управления роботами для осуществления процесса автономного распределения РТК в междурядье и совершения операции сбора плодов и перераспределения по ходу обработки угодья, в том числе с обеспечением совместного функционирования нескольких РТК в одном междурядном пространстве.

Задача 4. Проверить эффективность и работоспособность предлагаемых подходов с помощью компьютерного моделирования.

1.4. Распределение задач при управлении распределенными робототехническими комплексами, представленном в виде мультиагентной системы

Для распределения задач в рамках СУ МРТС существует большое количество методов. Отечественными и зарубежными авторами разработаны методики применения линейного и динамического программирования, методов теории графов, теории игр, оптимизации распределённых ограничений, оптимизации роя частиц, машинного обучения с подкреплением и др. Несмотря на существование множества доступных методов назначения задач, как показано в анализе методов назначения в работе [49] выбор метода назначения определяется оптимальностью окончательного решения, временем, необходимым для обработки введенных значений, и требованиями алгоритма к памяти.

В частности алгоритм аукциона определён в работе [49], как оптимальный для гибридной архитектуры мультиагентной системы управления (архитектура

предложена в работе [46]). Однако в рамках работы [49] алгоритм распределения задач в виде алгоритма решения задачи о назначениях не рассмотрен. Обзор литературы показал, что одним из наиболее эффективных способов решения задачи о назначениях является венгерский алгоритм.

Венгерский алгоритм — популярный метод оптимизации для решения задачи распределения задач в системах с несколькими роботами. Это алгоритм комбинаторной оптимизации, который находит оптимальное распределение между набором задач и набором роботов на основе матрицы затрат, которая представляет стоимость или выгоду каждого задания. В нескольких исследованиях было предложено использовать венгерский алгоритм для распределения задач в системах с несколькими роботами, например [51], [52], [54], [55], [56] и [57]. Например, в [51] использован венгерский алгоритм в сочетании с нечетким определением ограничений для распределения задач между несколькими роботами на основе онтологии зависимостей задач и ограничений. В работе [52] представлен масштабируемый алгоритм распределения задач для нескольких роботов, в котором использовался венгерский алгоритм для распределения задач на основе их приоритета и выполнимости. В работе [54] использовали подход, основанный на переговорах, который включал венгерский алгоритм для оптимизации распределения задач между несколькими роботами на основе их текущего состояния и возможностей. Авторы работы [55] предложили гибридный алгоритм, сочетающий венгерский алгоритм с оптимизацией роя частиц для повышения эффективности и надежности распределения задач в системах с несколькими роботами. Авторы работы [56] использовали улучшенный алгоритм оптимизации муравьиной колонии, который включал венгерский алгоритм для оптимизации распределения задач в динамичной и неопределенной среде. В работе [57] представили кооперативный алгоритм оптимизации муравьиной колонии, в котором использовался венгерский алгоритм для оптимизации распределения задач распределенным и децентрализованным образом.

1.5. Обзор робототехнических комплексов для сбора плодовой продукции

Для роботов, осуществляющих сбор плодов с посадок садовых культур, плодоношение которых происходит в зоне досягаемости человека среднего роста, характерно наличие манипулятора с захватным устройством [53] и системой распознавания и определения положения плодов, агрегатированного на мобильное шасси с системой автономного управления движением.

Как правило, в составе конструкции предусмотрена зона отгрузки собранных плодов в контейнеры, расположенные на борту, или на сопровождающем роботе. Робот с наличием указанных элементов показан ниже (Рисунок 1.3).



Рисунок 1.3.

Основные компоненты робота для сбора плодов [58]

В зависимости от собираемой культуры, возможно использование СТЗ различных типов и захватных устройств, реализующих разные способы отделения плодов от посадок, в том числе захватом объекта с заданной силой захвата или с силовым очувствлением [60, 61].

Т.к. яблоки и томаты относительно твердые плоды для их сбора используют манипуляторы с фиксированной силой захвата или специальные фиксирующие захваты со скручиванием для отрыва от ветки (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.4.

Пример роботизированной установки для сбора яблок на базе промышленного манипулятора и трактора [59]



(а)

(б)

Рисунок 1.5.

Роботы для сбора плодовой продукции: (а) – робот для сбора яблок [64]; (б) – робот для сбора томатов [65]

1.5.1. Анализ типов шасси сельскохозяйственных РТК для сбора плодов

Энергетический блок в составе шасси РТК

Энергетической установкой большей части, существующей мобильной сельскохозяйственной техники, является двигатель внутреннего сгорания. Образцы техники с ДВС встречаются и для задач выращивания и сбора яблок и томатов.



(а)



(б)

Рисунок 1.6.

Пример техники с ДВС используемой в интенсивных садах: (а) – малый трактор [66]; (б) – прицеп для сбора яблок в садах интенсивного [67]

Одной из ключевых характеристик робототехники с ДВС, определяющей эффективность применения её для задач выращивания и сбора яблок и томатов, являются управляемость и наблюдаемость управления при передвижении агрегата в междурядьях посадок. Для обеспечения достаточной точности управления прямолинейным движением агрегата с ДВС необходимо подбирать элементы, входящие в состав системы управления автономным движением. На рисунке ниже (Рисунок 1.7) представлен перечень факторов, оказывающих влияние на прямолинейное движение транспортного средства с ДВС.

На первом этапе роботизации мобильной техники с двигателем внутреннего сгорания и дальнейшей интеграции в мультиагентную роботизированную систему необходимо выбрать архитектуру системы управления автономным движением (СУАД). Архитектура СУАД должна учитывать особенности используемых технологий навигации (ГНС – глобальной навигационной системой, ЛНС – локальной навигационной системой или бортовые системы на основе СТЗ).

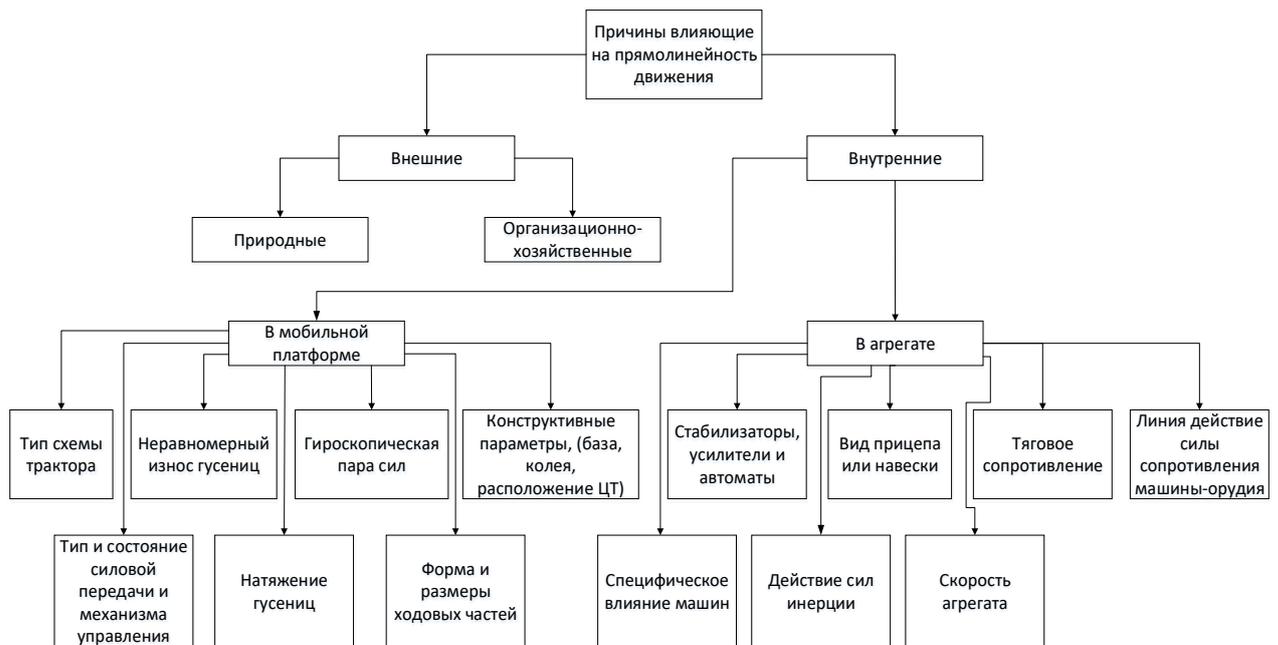


Рисунок 1.7.

Факторы влияющие на управляемость движения трактора с ДВС [125]

Кроме того, требуется решение задачи сопряжения органов управления техникой (руль, педаль газа, педаль тормоза и др.) с интерфейсами передачи цифровых управляющих сигналов СУАД. Современная СХ-техника оснащается подобными интерфейсами [68].

Проблему обеспечения передачи управляющих сигналов от СУАД на механические и гидравлические узлы мобильной СХ техники, не оснащенной электронными блоками управления целесообразно решить с помощью промышленных сервоприводов, устанавливаемых на рычаги управления дроссельной заслонкой; рулевым приводом, тормозной системой, трансмиссией, сцеплением, гидроприводами навесного оборудования, вспомогательными системами (освещение, обогрев и т.п.).

Сопряжение высокоуровневых команд системы управления верхнего уровня, с командами, подаваемыми на сервоприводы рычагов управления, и обеспечение контроля текущих параметров с бортовых датчиков, таких как датчики температуры, давления, напряжения, скорости и т.д., требуют

реализации микроконтроллера исполнительного уровня, и, соответственно, разработки и реализации системы согласования сигналов с бортовых датчиков, с микроконтроллером и разработки управляющей программы.

Роботизация техники с электрической силовой установкой

Электрический транспорт в сельскохозяйственном производстве используется для обеспечения тяги для специализированных устройств и решения логистических задач (Рисунок 1.8) в помещениях и решения логистических задач, что актуально для роботизации процессов в промышленных теплицах.



Рисунок 1.8.

Пример электрического малого трактора [62], используемого для обслуживания промышленных теплиц и электрического подъемника [63]

Основным отличием системы управления верхним уровнем для электрического трактора от системы для трактора с ДВС является наличие у нее связи с уже существующей штатной бортовой системой управления движением трактора и навесным оборудованием.

Этап разработки деталей для механического соединения шасси с навесными системами значительно проще по сравнению с аналогичным этапом для трактора на базе ДВС, из-за отсутствия необходимости в механическом соединении сервоприводов с рычагами управления.

На рисунке ниже (Рисунок 1.9) показана разработанная структурная схема роботизированного роботизированной транспортной платформы на базе

электрического двигателя, разработанная в ходе выполнения опытно-экспериментальной части исследования.

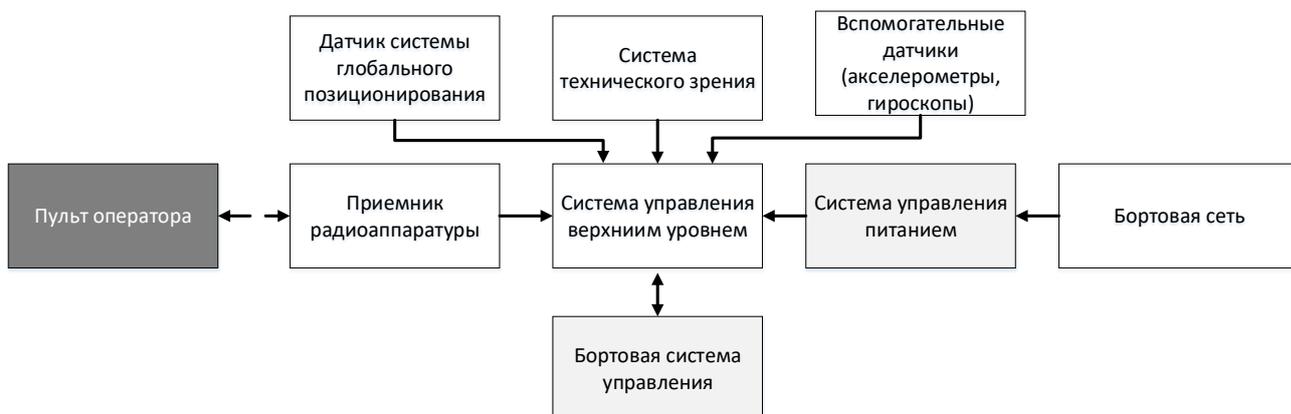


Рисунок 1.9.

Схема роботизированной электрической транспортной платформы [125]

Следует отметить, что количество элементов представленной на рисунке выше (Рисунок 1.9) системы значительно меньше, чем у системы для транспортной платформы с ДВС. Данное отличие упрощает задачу разработки, создания и применения построения такой системы, и обеспечивает более высокую надежность.

Также, при решении задачи роботизации трактора с ДВС, необходимо будет решить задачу автоматизированной заправки топливом с обеспечением всех противопожарных и прочих мер безопасности, что может представлять собой отдельную научно-техническую проблему. Кроме того, дополнительные сложности будут создавать управление сцеплением и трансмиссией, а также нелинейности технических характеристик ДВС.

Таким образом, независимо от вида роботизируемой техники, проектирование системы управления для роботизации сельскохозяйственной техники требует решения ряда вопросов, связанных с подбором и интеграцией датчиков внутреннего состояния систем и элементов агрегата, разработкой и интеграцией бортовых вычислителей, системы технического зрения, подбора приводов и др.

Помимо этого, система управления электропитания вычислительной системы роботизированной техники должна учитывать диапазон отклонений напряжений бортовой сети и допустимых напряжений питания для систем управления верхним и нижним уровнем, потребляемую мощность системами управления верхним и нижним уровнями. Для функционирования мобильного робота необходимы интерфейсы связи, обеспечивающие дистанционную смену программы выполнения миссии, определяемую оператором, на бортовую систему управления верхнего уровня. Также данные интерфейсы могут использоваться для непосредственного управления. Отдельную и достаточно сложную задачу представляет собой разработка конструкций механического соединения шасси с навесными системами и коммутации сервоприводов с рычагами управления.

На рисунке ниже (Рисунок 1.10) покажем структурная схему роботизированной транспортной платформы с ДВС.



Рисунок 1.10.

Структурная схема системы управления роботизированного трактора с ДВС

Как видно из рисунка выше, система включает большое количество элементов, что в свою очередь влечет большую сложность построения такой системы. В случае необходимости установки сервоприводов на органы управления (техника с механическими или гидравлическими усилителями) теряется возможность управления трактором из кабины водителя. В рамках опытно-экспериментальной части данной работы использовалась схема с роботизированной электрической транспортной платформой.

1.5.2. Мероприятия для создания средств роботизации процесса сбора урожая плодовых культур

Исходя из проведенного обзора вариантов РТК для сбора плодовой продукции с учетом требований по групповому применению РТК, сформируем основные шаги создания средства роботизации для выполнения сельскохозяйственных задач:

1. Определение возможности разбиения сложного процесса на более простые подпроцессы, выполняемые специализированными РТК.
 - 1.10 Выявление требований к пространственно-механическим возможностям роботов.
 - 1.11 Определение возможности эффективного выполнения процессов несколькими роботами одновременно.
 - 1.11.1 Определение типов роботов и типа представления системы группового управления.
2. Определение требований к системе управления для отдельного РТК.
 - 2.1 Реализация блока логического управления.
 - 2.1.1 Формализация выполняемых задач в виде машины состояний.
 - 2.1.2 Реализация двухконтурной системы управления с контуром системы безопасности.
 - 2.2 Определение требований к механическим характеристикам РТК.
 - 2.2.1 Определение требований к мобильности и проходимости шасси.

2.2.1.1 Конструирование механических элементов шасси.

2.2.1.2 Энергетический расчет приводов шасси.

2.2.1.2.1 Синтез СУ управления приводами шасси.

2.2.1.2.2 Синтез СУ управления шасси.

2.2.1.2.3 Интеграция СУ шасси в тактический уровень СУ РТК.

2.2.2 Выявление требований по манипулированию объектами.

2.2.2.1 Требования к рабочей зоне манипулятора.

2.2.2.1.1 Требования к точности и скорости манипулирования объектами.

2.2.2.1.1.1 Энергетический расчет компонент манипулятора.

2.2.2.1.1.2 Синтез СУ приводами манипулятора.

2.2.2.1.1.3 Решение ОЗК, ОЗД.

2.2.2.1.1.4 Реализация планировщика траекторий манипулятора.

2.2.2.1.1.5 Реализация СУ управления захватным устройством.

2.2.2.1.1.6 Интеграция СУ манипулятора в логический уровень СУ РТК.

2.2.2.2 Выявление разнообразия распознаваемых объектов для манипулирования.

2.2.2.2.1 Реализация системы классификации и распознавания объектов манипулирования

2.2.2.2.2 Реализация системы локализации объектов манипулирования.

2.2.2.2.3 Интеграции системы распознавания и локализации объектов манипулирования с СУ управления манипулятором.

2.3 Определение требований к степени детерминированности среды и автономности движения робота.

2.3.1 Система обеспечения автономного движения робота.

2.3.1.1 Выявление геометрических особенностей внешней среды.

2.3.1.1.1 Подбор датчиков формирования модели внешней среды.

2.3.1.1.2 Комплексирование данных датчиков в системе формирования модели внешней среды.

2.3.1.2 Выявление необходимости измерения дополнительных параметров внешней среды.

2.3.1.2.1 Интеграция показаний дополнительных датчиков в модель внешней среды

2.3.1.3 Реализация системы картографирования.

2.3.1.4 Реализация системы локализации

2.3.1.5 Реализация системы навигации

2.3.2 Система дистанционного управления.

2.3.2.1 Реализация интерфейса дистанционного ручного управления.

2.3.2.2 Реализация системы мониторинга состояния робота.

2.3.2.3 Интеграция показаний внутренних и внешних датчиков робота в систему диспетчеризации.

3. Реализация уровня групповой системы управления.

3.1 Представление элементов внешней среды и возможных событий и действий робота в онтологии.

3.1.1 Представление функции робота в виде формально-логических символьных выражений.

3.1.2 Сопоставление логическим выражениям, определяющим действия робота состояний, определяемых блоком логического управления.

3.1.3 Формирование состояний, определяемых блоком логического управления.

3.2 Реализация блока распределения задач между роботами по целевым заданиям, представленным в виде символьных выражений.

Удовлетворение указанных ранее функциональных требований к возможностям системы управления РРТК следует обеспечить в ходе выполнения некоторой минимальной последовательности мероприятий по созданию средств роботизации процесса сбора урожая плодовых культур. В эту последовательность входят:

- разработка системы назначения задач по выполнению работ для сбора урожая исходя из информации, исходя из предоставляемой оператором информации и правил распределения задач между отдельными роботами;
- разработка на базе функциональности манипуляционных роботов алгоритмов решения задач и разработка технических проектов мехатронных компонентов манипуляционных и мобильных РТК;
- разработка аппаратно-программных средств для обеспечения автономного движения СХ РТК, в том в составе распределенной системы;

Учитывая объем технических и исследовательских задач в рамках данной работы принято решение сосредоточиться на части основных задач, связанных с реализацией управления РРТК и отдельным видом РТК для сбора урожая плодовых культур, которые представлены ниже – Рисунок 1.11.

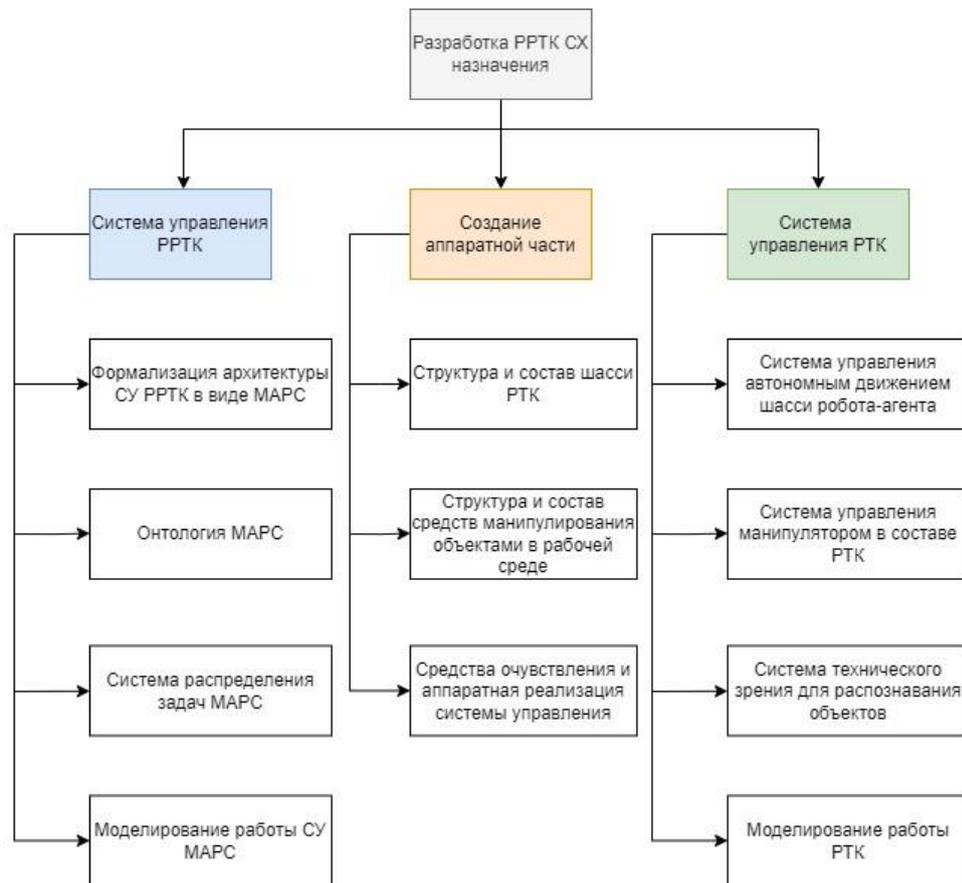


Рисунок 1.11.

Вопросы, решение которых рассмотрены в рамках данной работы.

1.6. Выводы по Главе 1

В Главе 1 индуктивно-дедуктивным методом проанализированы основные предпосылки и преграды для роботизации уборки урожая плодовоовощных культур. Выявлен ряд фундаментальных и технических ограничений роботизации аграрной отрасли на современном этапе развития ключевых элементов робототехники.

Сформулированы требования к характеристикам средств роботизации сбора урожая плодов в интенсивных садах. Анализ современного уровня развития робототехники показал целесообразность использования робототехнических систем со специальными эффекторами в группах для решения задачи сбора садово-плодной продукции.

Проанализированы способы группового управления и сформулированы основные технические задачи в части реализации элементов системы группового управления МРТС для сбора плодов, решение которых потребуется для достижения целей данного исследования.

Определены основные требования к характеристикам РТК для сбора урожая плодовых культур.

Определены актуальные геометрические и физические особенности среды функционирования РТК для сбора урожая плодовых культур.

Проведенный анализ существующих решений для роботизации сельского хозяйства и сбора урожая плодовых культур показал необходимость создания многоуровневых комплексных систем управления роботами и средств очувствления для выявления внутреннего состояния робота и состояния внешней среды.

К результатам главы также относится определение ключевых элементов методики роботизации существующего парка сельскохозяйственной техники, функционирующей как на базе ДВС, так и электрических силовых установок.

ГЛАВА 2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ ДЛЯ СБОРА УРОЖАЯ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ САДА ИНТЕНСИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

2.1. Требования к архитектуре системы управления группой роботов и методы управления

Требования к архитектуре системы управления группой роботов определены, исходя из содержания действий в отдельных пунктах алгоритма решения задачи уборки урожая. Алгоритм включает шаги активации роботов и инициализации взаимного положения роботов, инициализации состояния ресурсной базы роботов и получения данных от пользовательского интерфейса по целевой задаче.

2.1.1. Специфика функционирования МРТС для сбора плодовой продукции

Управление многокомпонентными РТК в составе МРТС происходит в форме решения потока задач управления перемещениями, возникающих в результате взаимодействий роботов с рабочей средой и между собой. Способы решения задач зависят от располагаемых сенсорных и эффекторных возможностей роботов. Исходя из этих возможностей будем формировать гомогенные коалиции роботов (Рисунок 2.1).

Для решения более широкого спектра задач возможно использование гетерогенных групп роботов с использованием БПЛА как источника информации, как показано в работе [74]. В рамках данной работы, учитывая достаточно высокую степень структурированности и детерминированности рабочей среды, ограничимся организацией процесса сбора яблок с помощью гомогенных коалиций роботов и предварительно сформированной информации о состоянии окружающей среды.

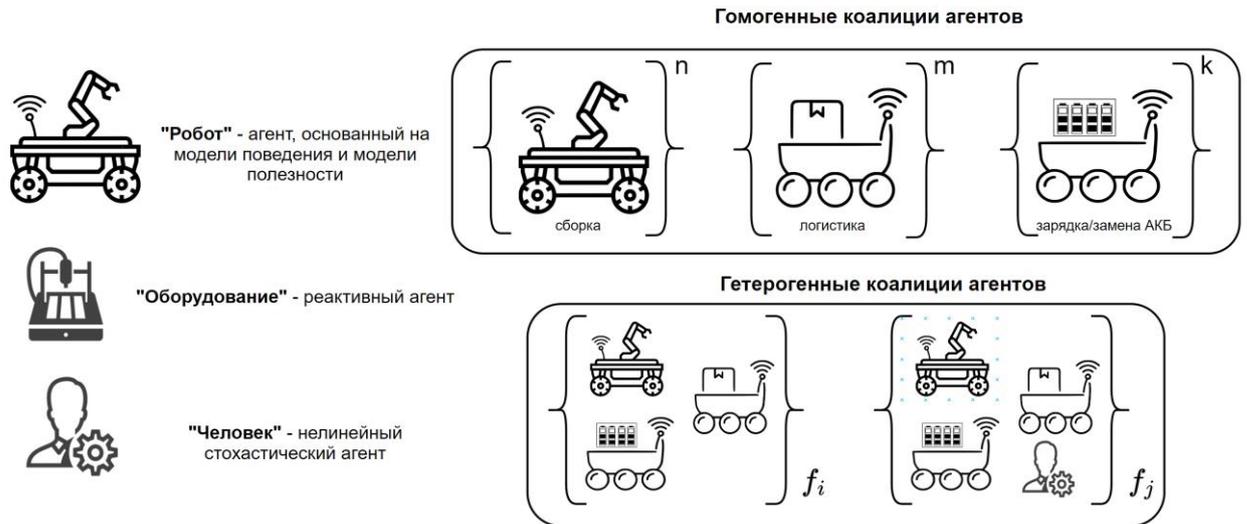


Рисунок 2.1.

Типы агентов мультиагентной сети и варианты формирования коалиций агентов

Выполнение робототехническим комплексом задачи на ландшафте сопряжено с организацией перемещения роботов к месту выполнения задачи, и, соответственно построением конвоя или другой формации движения роботов [70] (например, возможно движение определенных роботов в разные промежутки времени) [71]. Перемещение конвоя или другой формации роботов должно приводить к прибытию их к точке распределения роботов по рядам. Далее начинается выполнение целевой операции, например, в нашем случае - сбор яблок с посадок в контейнеры или иную тару. После окончания выполнения целевой операции необходимо осуществить обратный сбор группы роботов в линейную формацию – конвой [72] или другую целевую формацию и перемещение на базовую площадку, где происходит завершение функционирования группы роботов. Представим описанный алгоритм действий робототехнического комплекса в форме блок-схемы функционирования управляющего вычислителя в общем виде (Рисунок 2.2).

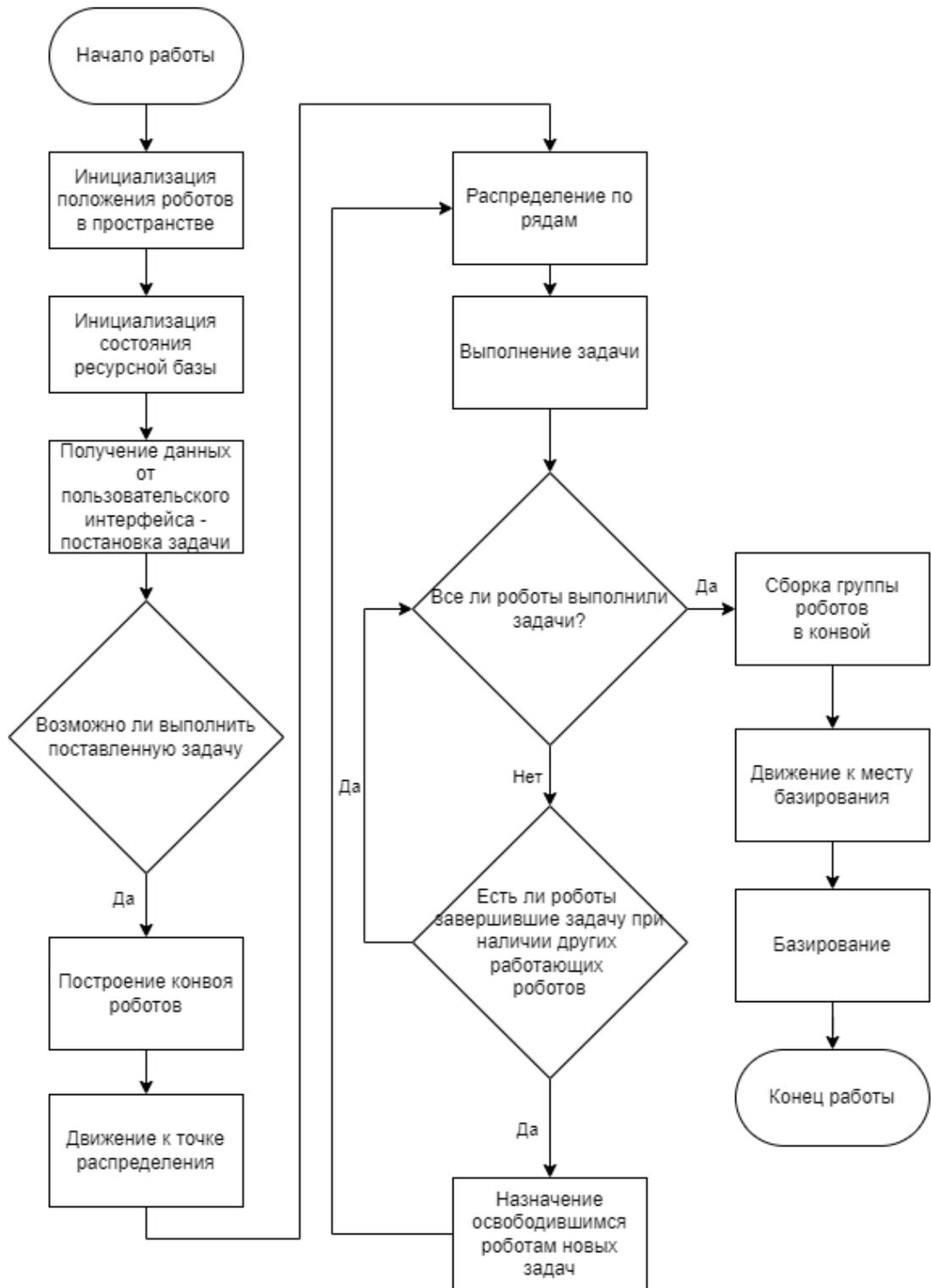


Рисунок 2.2

Алгоритм работы группы РТК для обслуживания интенсивного сада

2.1.2. Типы агентов в составе МРТС

Агент МРТС с гибридной архитектурой СУ.

Как показано в разделе «Требования к характеристикам средств роботизации сбора плодов», состояние среды функционирования робота может меняться от детерминированного до полностью недетерминированного. Робот, функционирующий в достаточно детерминированной среде, функционирует как конечный автомат и для мультиагентной системы формализован в виде простого рефлексного агента (Рисунок 2.3) [75].

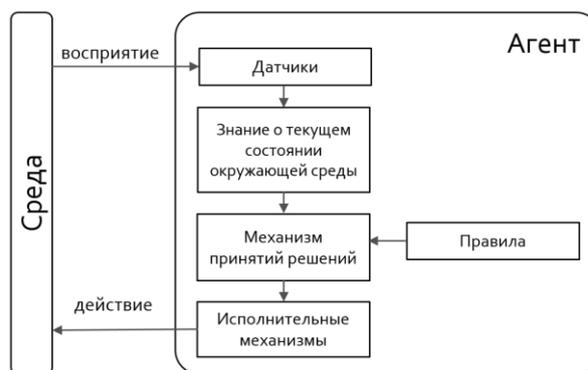


Рисунок 2.3.

Структура простого рефлексного агента

Такие задачи как вывод группы роботов в рабочую конфигурацию, настройка системы для функционирования на новом участке и сбора новых сортов продукции предполагают наличие инструментов формирования динамической модели внешней среды и принятия решений исходя из оценки пользы робота-агента для достижения цели. Таким образом предполагается наличие конфигурации системы управления роботом, основанной на модели оценки полезности (Рисунок 2.4) [75].

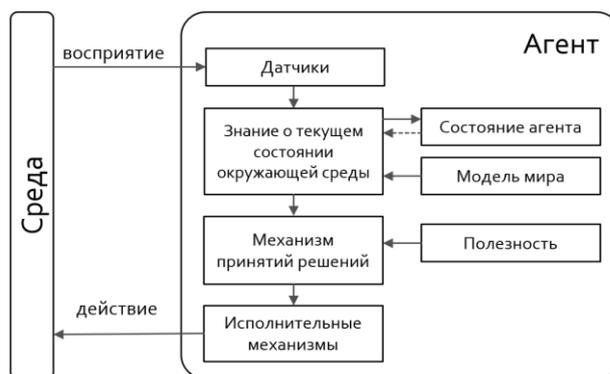


Рисунок 2.4.

Структура агента, основанного на модели и на полезности

2.1.3. Элементы МРТС с гибридной архитектурой СУ

В рамках решения задачи сбора плодовой продукции, а именно яблок, систему управления СХ РРТК, функционирующей описанным выше образом, определим как мультиагентную систему с сетевой структурой. В состав сетевой структуры входит управляющий вычислитель и несколькими типами роботов, образующими гомогенные подгруппы или коалиции [73]. Отдельный робот в составе МРТС описывается в виде конечно-автоматной сети в программном контуре управления и в виде сконфигурированной модели поведения, согласованной с супервизорной системой в адаптивном контуре управления.

Управляющий вычислитель, включающий интерфейс для целеуказания оператором миссии, осуществляет предварительную классификацию задач по выполнимости их отдельно-взятой гомогенной коалицией роботов в составе мультиагентной системы.

В упрощенном виде вычислитель верхнего уровня МРТС с гибридной архитектурой для представления миссии назначенной человеком имеет элементы формализации задач и состояний роботов, блок распределения задач и коммуникационный модуль для взаимодействия с агентами (Рисунок 2.5).

В предлагаемой структуре взаимодействия верхнеуровневого вычислителя и роботов-агентов обеспечивается наличие коммуникационных интерфейсов,

через которые передается информация и назначенной задаче. Гибридный элемент архитектуры реализуется за счет наличия в гомогенных коалициях роботов ведущих роботов и ведомых роботов. По истечению определенного периода выполнения задач, назначенных верхнеуровневым вычислителем ведомый роботов по собранной информации о фактическом состоянии роботов осуществляет переназначение задач.

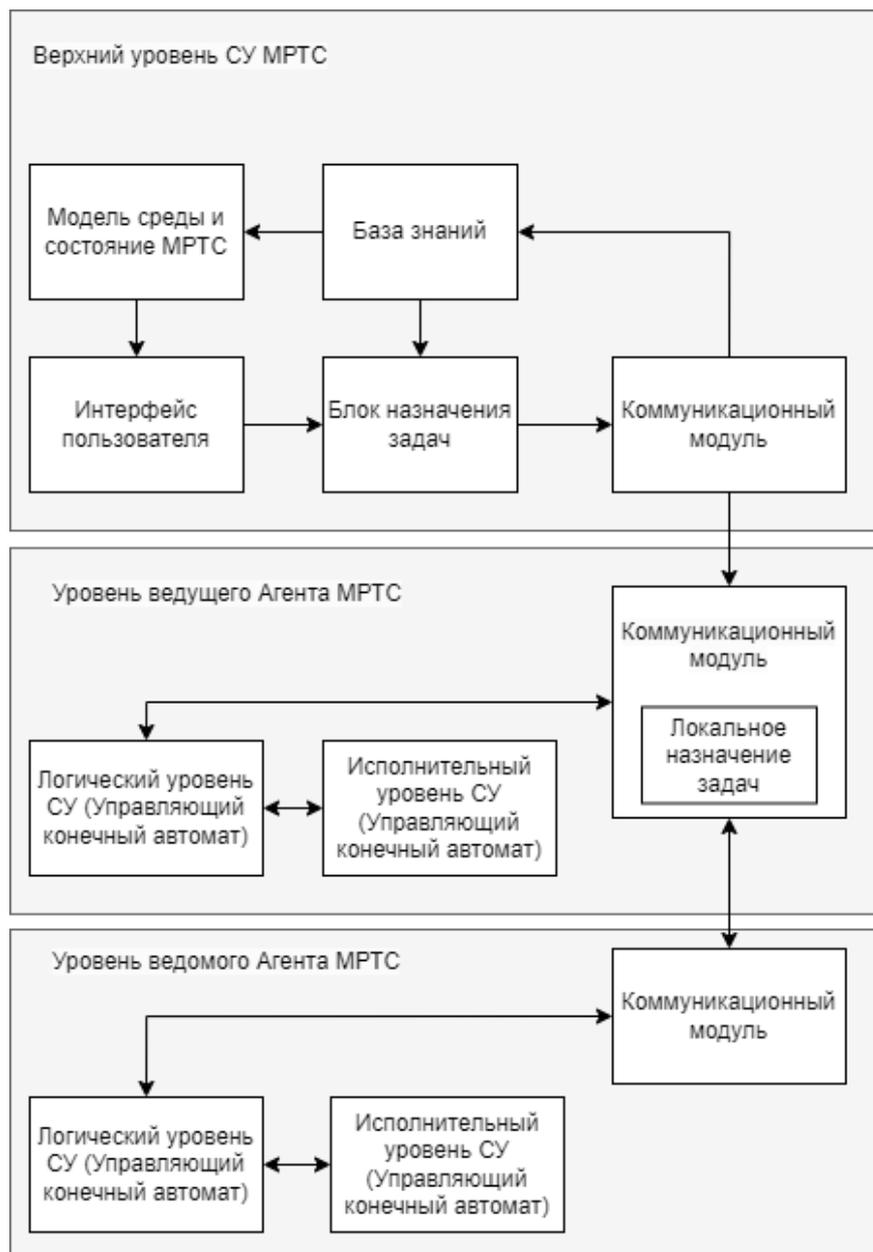


Рисунок 2.5.

Упрощенная структура архитектуры двухконтурной системы управления СХ МРТС

2.2. Представление параметров мультиагентной системы с помощью онтологии

2.2.1. Понятие онтологии МРТС

При групповом управлении роботами распределение задач между отдельными роботами и группами роботов предполагает регистрацию и анализ их возможностей, доступности ресурсов и соответствие требованиям задач [69].

Для систематизации предметной области и доступных агентам знаний в мультиагентных системах применяются онтологии. Для МРТС онтология частично едина и частично – распределена. Как правило, для работы с мультиагентными системами применяются таксономические онтологии, представляющие знания в виде иерархии классов. При распределении задач также возможно использование онтологий, поскольку они предоставляют необходимую информацию для определения соответствия задач и роботов-агентов. Онтология системы управления группой роботов должна включать в себя знания о компонентах производственной системы, включая технико-эксплуатационные характеристики роботов, перечень возможных задач и взаимосоответствие функционала и доступных ресурсов роботов и перечня задач. Онтология, также, определяет словарь и правила информационного взаимодействия и описания системы, и ее поведения, что имеет решающее значение для эффективного общения между роботами и согласования действий.

В целом, предполагается использовать весь потенциал онтологий как мощного инструмента для представления и управления знаниями о предметной области в нашей задаче. В том числе онтология системы управления группой роботов может быть использована для разработки конечных автоматов логического уровня управления действиями отдельных роботов. Например, онтология предоставит информацию о типах задач, которые могут выполнять роботы и которые можно использовать для разработки состояний и переходов в управляющих конечных автоматов (КА) отдельных роботов.

Кроме того, онтология может предоставлять способ хранения и представления информации о среде, в которой работают роботы. В приложении к управлению группами роботов онтология может использоваться для определения и моделирования проблемы распределения задач посредством формализации концепции предметной области, отношений и ограничений. Представление проблемы распределения задач в виде онтологии позволяет сделать ее более структурированной, модульной и интероперабельной, что может облегчить разработку и интеграцию алгоритмов распределения задач. В ряде исследований [76], [51], [77] было предложено использовать онтологию при распределении задач для систем с несколькими роботами. Например, в [76] представлена архитектура координации действий нескольких роботов, в которой используются спецификация задач на основе онтологии и рыночный механизм распределения задач. В [51] использовали нечеткое удовлетворение ограничений для распределения задач между несколькими роботами на основе онтологии зависимостей задач и ограничений. Авторы работы [77] предложили основанный на распределенных переговорах подход к распределению задач, в котором использовалась онтология возможностей роботов и требований к задачам. В работе [121] использовали теорию графов для моделирования и решения проблемы распределения задач для нескольких роботов на основе онтологии свойств робота и задачи.

2.2.2. Онтология МРТС и распределение задач

Задача мультиагентной системы декомпозируется на подзадачи, также представляемые в виде символьных выражений, состоящих из элементов базы знаний – онтологии.

Происходит первичная классификация задач – необходимо определить типы РТК, подходящие для выполнения задач.

После классификации задач необходимо определить оптимальные параметры групп роботов, такие как количество, формация и др. с учетом приоритетов пользователя.

Если указано время, то оно является первичным приоритетом и главным критерием оптимизации решений. После времени используются ресурсные критерии, а именно минимизация энергозатрат, минимизация износа оборудования и конструкций РТК.

Количество задействованных РТК для выполнения задачи сбора плодов определяется по данным об урожае на участке и фактической производительности одного робота. В случае необходимости выполнения дополнительно других операций количество роботов будет также определяться специфичными для выполняемой задачи параметрами. Автономность РТК для решения задачи сбора урожая плодов предполагает применение «обслуживающих» роботов. Например, роботов для подзарядки или замены аккумуляторных батарей и восполнения запасов расходных материалов на роботах-уборщиках, логистических роботов для перемещения собранного урожая и т.п.

После определения перечня и количества необходимых типов роботов в гомогенных подгруппах необходимо распределить задачи внутри подгрупп. Для этого воспользуемся методами решения задач о назначении, которые далее раскрываются в этом разделе. Каждой назначенной задаче, представленной в виде символического выражения, система должна ставить в соответствие последовательность состояний робота, а параметры целевых состояний и условия перехода между состояниями должны определяться параметрами, указанными в задаче пользователем.

Работа алгоритма распределения задач требует включения знаний и правил, определенных в онтологии. В рамках работы предлагается несколько способов включения онтологии в алгоритм распределения задач:

1. Представление требований к задачам и возможностей роботов: онтология может определять словарь и правила для описания задач и их требований, а также возможности и ограничения роботов. Эта информация

может быть использована для установления совместимости задач с подходящими по возможностям роботами.

2. Идентификация характера взаимозависимостей задач: онтология может представлять зависимости между задачами, такие как предварительные и постусловия задачи, которые можно использовать для определения приоритетов и соответствующего планирования задач. Например, если для запуска решения задачи требуется предварительное завершение другой задачи, онтология позволяет определить эту зависимость и обеспечить выполнение задач в правильном порядке.

3. Моделирование политик распределения задач: онтология может представлять политики и правила для распределения задач между роботами, например балансировка нагрузки или максимальное увеличение скорости выполнения задач. Эта информация может использоваться для оптимизации распределения задач на основе общих целей системы.

4. Предоставление обратной связи и мониторинг: онтология может предоставлять обратную связь о ходе выполнения задач и состоянии системы. Это можно использовать для мониторинга производительности системы и корректировки распределения задач по мере необходимости.

5. Внедрение рассуждений и принятия решений: онтология может предоставить базу знаний для алгоритма распределения задач, чтобы рассуждать о задачах и роботах и принимать разумные решения. Например, алгоритм может использовать рассуждение для определения наиболее подходящего робота для данной задачи на основе определенных в онтологии профилей и зависимостей.

Функционирование блока назначения задач рассмотрим на примере конкретной операции сбора плодов (Рисунок 2.6).

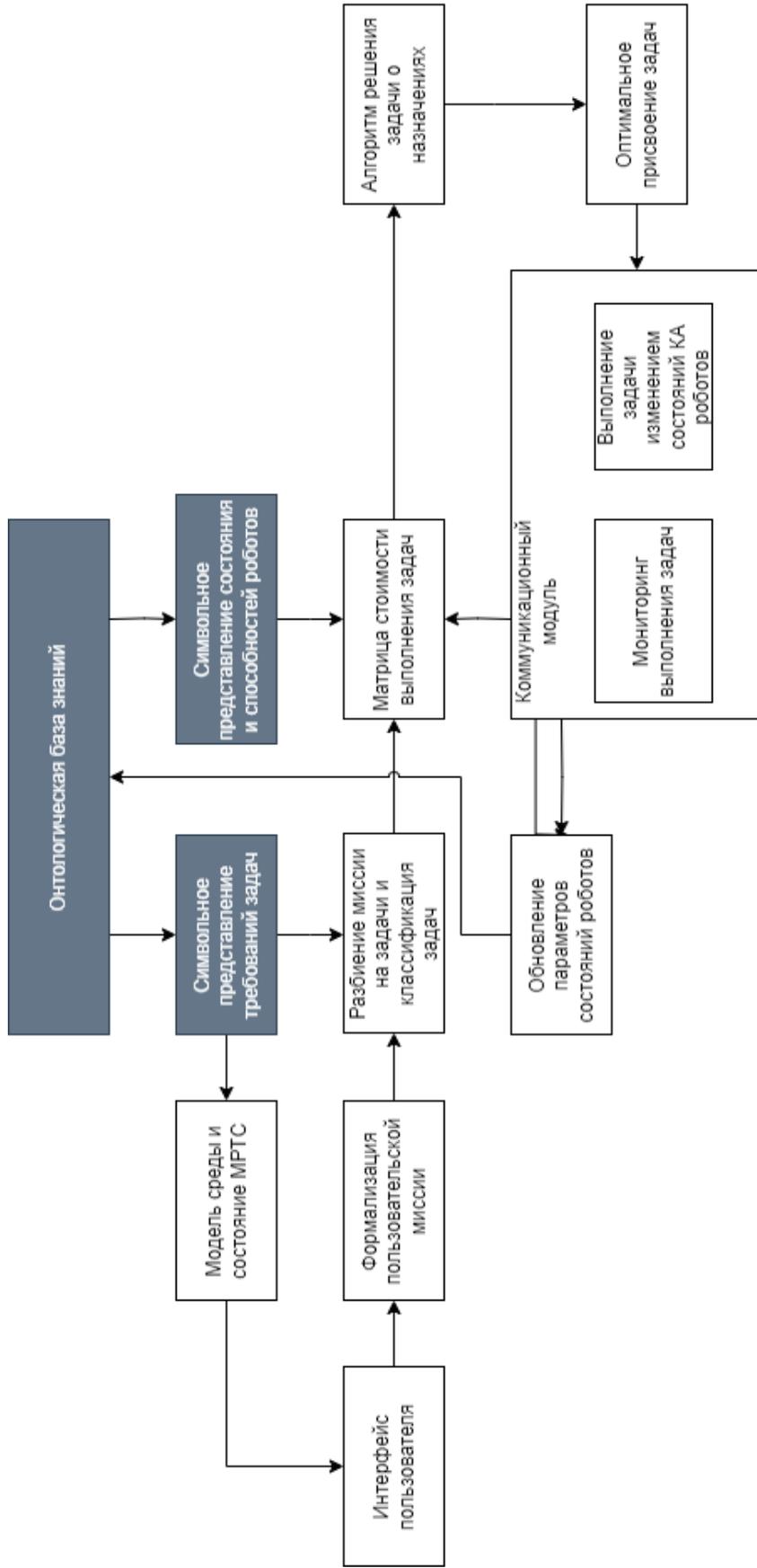


Рисунок 2.б.

Элементы системы распределения задач с использованием онтологии

Интерфейс пользователя интерпретирует введенные данные и ставит им в соответствие символьные выражения, совокупность которых определяют и формализуют итоговую целевую задачу. Прежде всего, пользователь определяет участок или участки работ, желаемое время выполнения работ на каждом отдельном участке с расставлением приоритетов, указывает общее желаемое время или желаемый временной промежуток начала и окончания работ. Интерфейс пользователя на базе ГИС, реализующий описанный функционал, приведен в экспериментальной части работы.

Сформулированная в виде символьных выражений задача передается в центр (центры) принятия решений.

2.2.3. Формализация онтологии МРТС и символьное представление элементов онтологии

Реализуем формальную систему F , включающую конечное множество символов, правил грамматики применимых к символам, множество аксиом и множество правил вывода. На базе формальной системы F реализуем язык L . Зададим отображение I , которое всякому константному символу, предикатному символу и функциональному символу языка F ставит в соответствие элемент из алгебраической системы S . Алгебраическая система S в случае формирования управляющих воздействий для группы СХ РТК представляется собой множество состояний системы, описанных в виде конечных автоматов. Отображение I соответствует правилам отображения символьных фактов формальной системы F в соответствующие последовательности состояний роботов-агентов в составе СХ РТК при определении выполнимости правил формальной системы:

$$I: F \rightarrow S \quad (2.1)$$

Сущности формальной системы для управления группой СХ-роботов представим в виде моделей утверждений, имеющих вид «*субъект – предикат – объект*». Для этого используем модель представления данных RDF (RDF-

Resource Description Framework, среда описания ресурса). Утверждение, высказываемое о ресурсе, имеющем вид «субъект – предикат – объект» и называется триплетом (Рисунок 2.7).

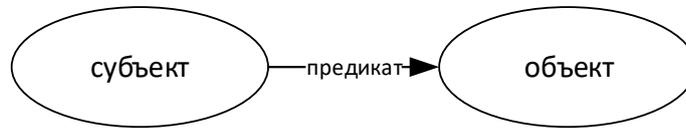


Рисунок 2.7. RDF-триплет

Систематизируем сущности формальной системы в виде онтологии. Онтология содержит правила и описания классов сущностей для возможности совершения формально-логического вывода о конкретной сущности. Онтология робота-агента должна различать сущности, связанные с собственным состоянием, состоянием окружения и состояниями других агентов. Целесообразным является введение фундаментального различия между пространственными и временными сущностями. Типичное представление пространственной сущности может выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{КРАСНОЕ_ЯБЛОКО} \equiv \text{Плод} \wedge \text{Зрелый} \wedge \text{ОбъектДляЗахвата} \wedge \\ \text{имеетФорму} \in \text{Сфера} \wedge \text{имеетОсновныеРазмеры} \in [0,07]. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Формальные логические выражения komponуются из сущностей онтологии робота. Скомпонованные логические выражения целесообразно хранить в базе знаний на уровне управления всей группой и на уровне управления отдельными роботами-агентами. Представим базу знаний как семантическую доску, аккумулирующую символичные рассуждения (факты) об окружающей среде. Символичные факты об окружающей среде будем генерировать на основе информации, предоставленной системой формирования модели внешней среды. Эти логические утверждения необходимо хранить в базе знаний и запрашивать по мере необходимости модулем обработки языков, символическим (формально-логическим) планировщиком задач, и контроллером исполнительной системы. Выходные данные модуля обработки языка и действия робота, также сохраняются в виде символических операторов.

Символьное (формально-логическое) представление необходимо для пополнения базы знаний, основанной на онтологии, двунаправленными взаимосвязями между воспринимаемой субсимвольной информацией (данные датчиков, низко уровневые действия) и объектами реального мира. Таким образом восстанавливается соответствие между моделью знаний и сенсорными и эффекторными возможностями групп роботов на стратегическом уровне верхеуровневого вычислителя и отдельных роботов-агентов стратегическом уровне самих роботов.

Онтология СХ РТК для выполнения операции сбора плодов предполагает наличие информации о специфических сущностях, а именно такие пространственные закреплённые сущности как «ряд насаждений», «дорога», такие целевые действия как «сбор плодов», «снижение заряда», «замена заряда», «вывоз плодов», «движение к месту». Кроме того, предусмотрим в онтологии такие сущности, необходимые для идентификации задачи и определения возможности выполнения задачи тем или иным типом РТК, как «плод», «тип робота» и др. (Рисунок 2.8).

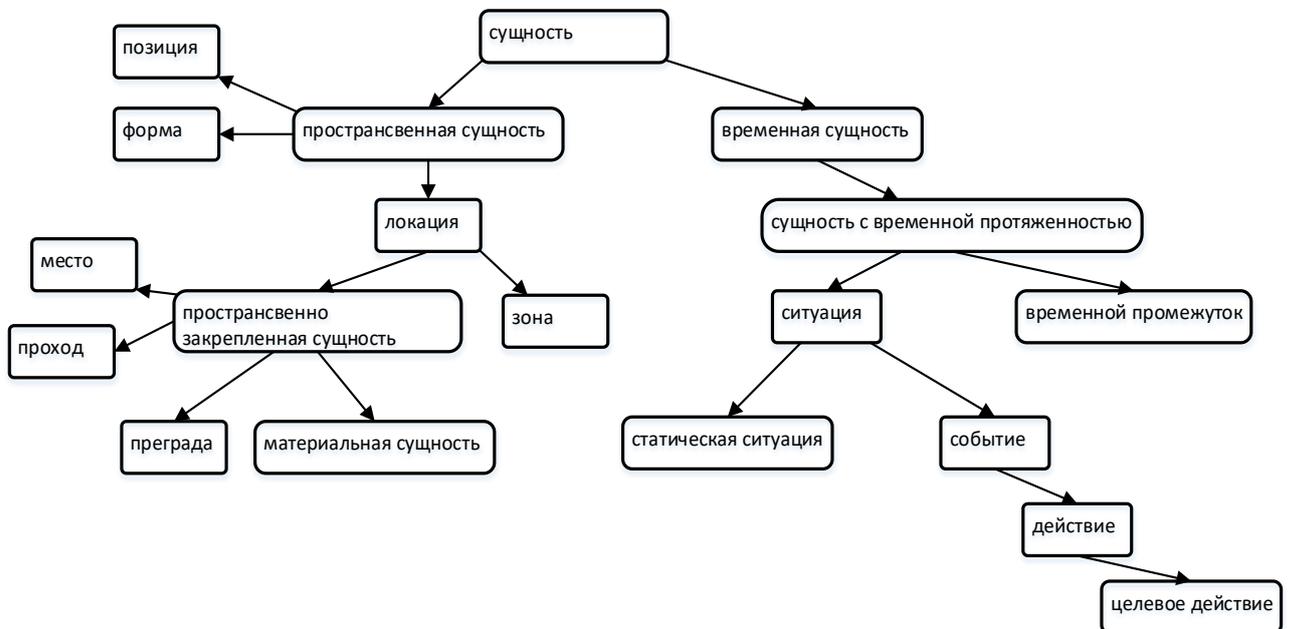


Рисунок 2.8.

Пример верхнего уровня онтологии

Онтология системы с несколькими роботами, состоящей из роботов-сборщиков яблок, логистических роботов, перемещающих ящики с яблоками, и роботов для зарядки аккумуляторов, может включать информацию, представленную в таблице ниже (Таблица 2). Достижение общей цели мультиагентной системы осуществляется через выполнение, на начальном этапе, классификации подлежащих решению задач, исходя из требований к наличию определенных «навыков» или «способностей» у роботов-исполнителей. Выявление пригодности «возможностей» роботов-агентов для решения задач предлагается выполнить через формализацию как «возможностей», так и «задач» в базе знаний в виде логических выражений, конкретная реализация которых зависит от используемого инструмента для описания онтологии.

Таблица 2.

Информация в онтологии о роботах в составе МРТС для сбора яблок

Назначение робота	Возможности	Требования	Ограничения
1	2	3	4
Роботы для сбора яблок:	Способность обнаруживать и отделять неповреждающим способом спелые яблоки от посадок и перемещать их в контейнер	Доступ к посадкам (деревьям, рядам деревьев), способность к целенаправленному перемещению и позиционированию в междурядьях	Ограниченность эффективности СТЗ и системы распознавания состояния и качества плодов, длительность цикла съёма плода с дерева и перемещения к транспортёру или в контейнер
Логистические роботы	Возможность перемещать контейнеры/ящики с яблоками, возможность перемещаться между садом и складом	Доступ к контейнерам/ящикам с яблоками, способность перемещаться между садом и складом	Ограничения по проходимости, маневренности и наблюдаемости управления движением, длительность цикла фиксации и подъёма груза, низкая скорость перемещения

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4
Сервисные роботы для подзарядки или замены аккумуляторов	Возможность заменять аккумуляторные батареи на других роботах или заряжать аккумуляторы	доступ к зарядным станциям и к другим роботам во всём рабочем пространстве	длительность цикла позиционирования относительно зарядной станции и/или обслуживаемого робота, низкая скорость передвижения в условиях рабочего пространства

2.2.4. Реализация онтологии

В связи с приведёнными обстоятельствами были рассмотрены существующие инструменты формирования онтологии. Представление действий робота и сущностей в пространстве функционирования робота целесообразно осуществлять с помощью Web Ontology Language (OWL) и библиотеки Semantic Sensor Network Ontology – Рисунок 2.9.

Представим структуру системы, в которой формализованы или динамически формализуются все возможные типы низкоуровневых действий отдельных агентов и «стоимость» выполнения» этих действий как отдельным агентом, так и группой агентов в виде связанных модулей формализации задачи с помощью онтологической базы знаний и модулей распределения задач на основе правил [78] – Рисунок 2.10.

Для символического представления задач для группы СХ-роботов рассмотрим следующую структуру онтологии, включающую в себя описание типов операций, описание типов навесного оборудование, описание объектов внешней среды, описание типов и возможных конфигураций РТК

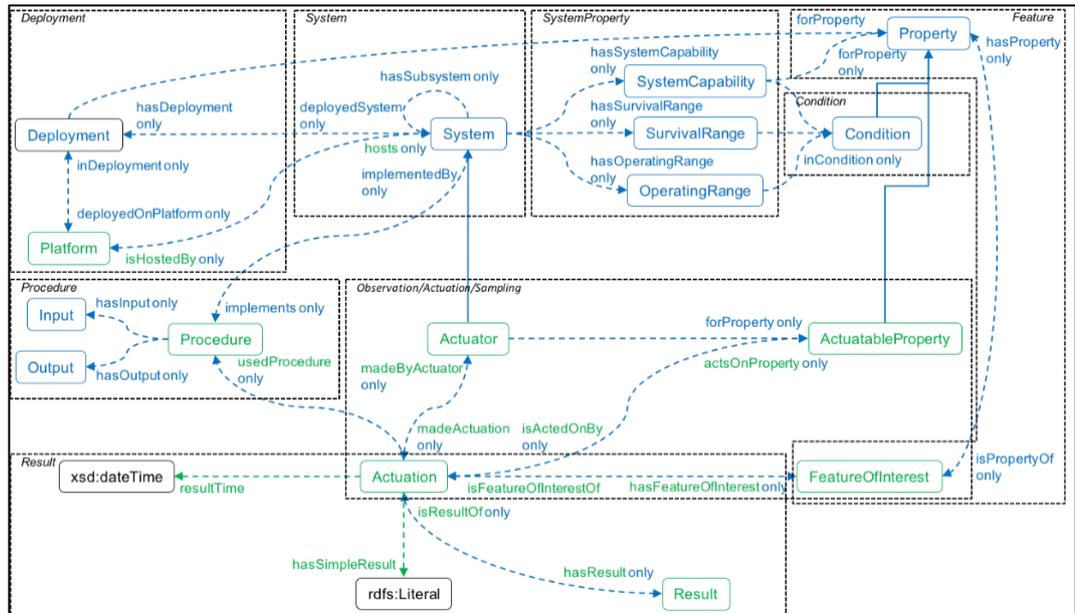


Рисунок 2.9.

Пример реализации элементов онтологии с помощью OWL [87]

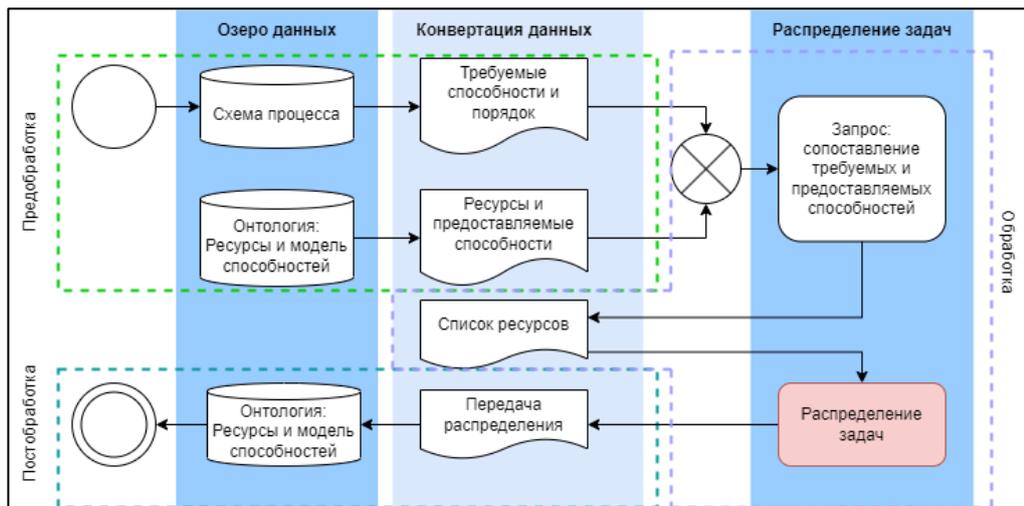


Рисунок 2.10.

Схема элементов системы распределения задач с формализацией задач на основе онтологии

Структура онтологии системы управления группой роботов, состоящей из роботов-сборщиков яблок, логистических роботов, перемещающих ящики с яблоками, и сервисных роботов для зарядки/замены аккумуляторов, состоит из

набора понятий о концепциях, свойствах и взаимосвязей между ними – Таблица 3.

Таблица 3.

Структурные элементы в онтологии МРТС для сбора яблок

Концепции:	Характеристики:	Отношения:
<p>Робот: физическое устройство, способное выполнять задачи</p> <p>Задача: определенное действие или работа, которую должен выполнить робот.</p> <p>Робот-сборщик яблок: робот, специально разработанный для сбора яблок с деревьев в тару</p> <p>Логистический робот: робот, специально разработанный для перемещения тары с яблоками.</p> <p>Робот для замены/зарядки аккумуляторов: робот, специально разработанный для доставки и замены/зарядки аккумуляторов других роботов.</p> <p>Яблоня: дерево, которое производит яблоки.</p> <p>Тара с яблоками: контейнер/ящик, наполненный яблоками, который нужно переместить в зону сортировки/ хранения.</p> <p>Зарядная станция: специальное устройство для зарядки аккумуляторов роботов.</p>	<p>Возможности: особые способности и навыки робота.</p> <p>Требования: ресурсы и условия, необходимые роботу для выполнения задачи.</p> <p>Ограничения: пределы скорости движения по рабочему пространству и скорости региональных и локальных перемещений рабочих органов ограничения робота, длительность времени распознавания продукции (яблок) и её характеристик.</p> <p>Приоритет: важность или срочность задачи</p>	<p>Имеет возможности: у робота есть определенные возможности, такие как обнаружение яблок в листе, съём яблок с посадок, перемещения различного вида яблок и контейнеров/ ящиков с урожаем/ продукцией</p> <p>Требуется: задача требует определенных ресурсов или условий, таких как доступ к яблоням или зарядным станциям.</p> <p>Имеет ограничение: у робота есть определенные ограничения, такие как ограничения работоспособности по погодным условиям, ограниченная скорость глобальных перемещений, региональных перемещений, или ограничения по условиям обнаружения продукции по метеоусловиям и т.п.</p> <p>Зависимости: от состояний грунта в междурядьях, от режима инсоляции, от времени суток и/или сезона и т.п.</p>

Таким образом верхний уровень онтологии учитывает наличие в системе различных типов роботов и различных типов задач, а также условия совместимости роботов и зада и требования по стоимости выполнения задач.

Разработанная онтология для мультиагентной системы представлена на рисунке ниже (Рисунок 2.11).

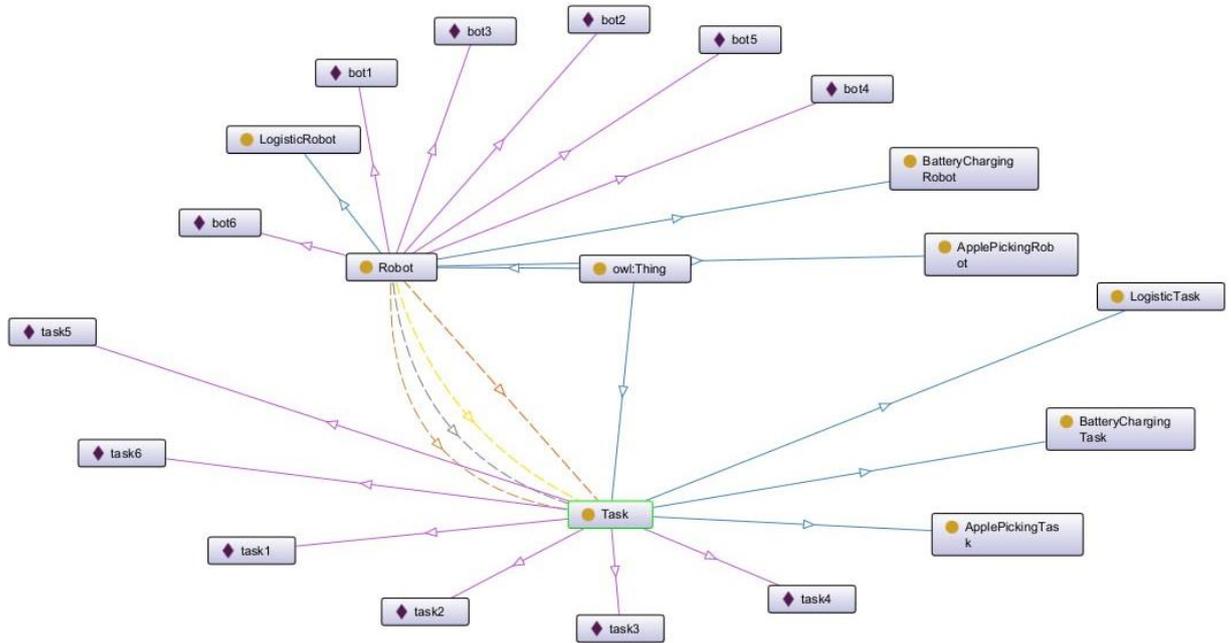


Рисунок 2.11.

Разработанная онтология для разных типов роботов и типов задач в разработанной онтологии

В рамках разработанной онтологии реализованы блоки назначения свойств сущностей в онтологии и данных сущностей. Реализованные отдельные классы для описания задач и описания роботов, приведены на рисунке ниже (Рисунок 2.12Рисунок 2.11).

Учет возможных конфигураций робота для выполнения разных классов задач, возможно через формализацию в онтологии совместимости робота с разным типом навесного оборудования (Рисунок 2.13)., а также формализацией как общих классов состояний робота инвариантных к типам выполняемых задач так и формализацией классов, описывающих специфичные для выполняемой задачи состояния (Рисунок 2.14).

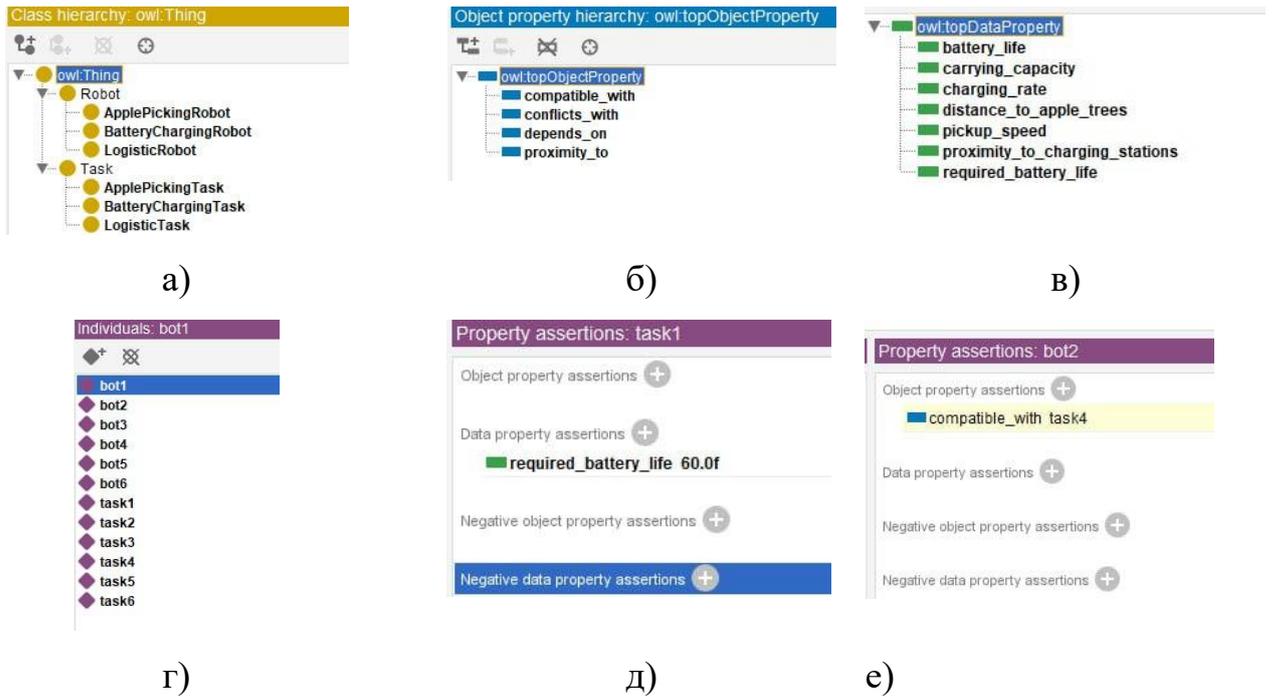


Рисунок 2.12.

Элементы онтологии: где а) – иерархия классов онтологии; б) – свойства сущности в составе онтологии; в) – данные объекта онтологии (приведен для робота для сбора яблок); г) – формализация стоимости выполнения задачи в виде требуемого заряда батареи; д) – обозначение совместимости выполнения задачи для конкретного робота.

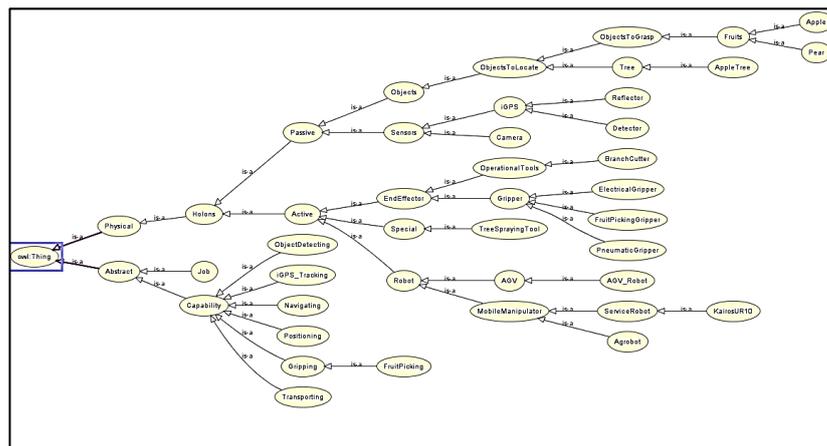


Рисунок 2.13.

Онтология для сельскохозяйственного робота, с учетом возможных конфигураций

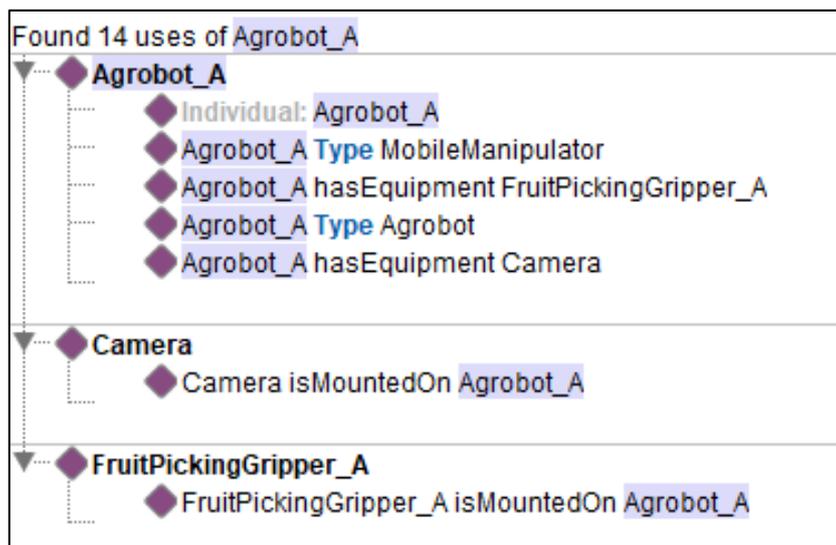


Рисунок 2.14.

Описание конфигурации робота для сбора плодов, согласно классам, описанным в разработанной онтологии

Разработанная онтология позволяет обеспечить хранение информации о возможных состояниях, последовательностях состояний и данных о стоимости выполнения операций роботом при переходе из одних состояний в другие, что в свою очередь позволило реализовать гибкую архитектуру программного обеспечения, где онтология выполняет роль базы знаний и базы данных для алгоритма назначения задач. Описание реализации программного обеспечения приведено в Главе 4.

2.3. Распределение и назначение задач в мультиагентной робототехнической системе

2.3.1. Декомпозиция задач

Проблема распределения задач может быть сформулирована как задача о назначении, где цель состоит в том, чтобы назначать задачи роботам при минимизации общей стоимости или времени.

Чтобы включить онтологию в алгоритм распределения задач, реализуем следующие шаги:

1. Определение специализаций и профилей задач: онтология может определять специализацию и профили решаемых задач, таких как съём плодовой продукции с посадок и укладка её в контейнеры или транспортную/упаковочную тару, перемещение контейнеров с яблоками и замена аккумуляторов, с точки зрения их требований, ограничений и приоритетов.

2. Определение профилей роботов: онтология может определять профили роботов, таких как роботы-сборщики яблок, логистические роботы и роботы для замены и зарядки аккумуляторов, с точки зрения их возможностей, ограничений и готовности к работе.

3. Сопоставление задач и роботов: Алгоритм распределения задач может сопоставлять задачи с подходящими роботами на основе их профилей. Например, задачи по сбору яблок могут быть назначены роботам-сборщикам яблок, задачи по перемещению ящиков могут быть назначены логистическим роботам, а задачи по замене/зарядке аккумуляторов могут быть назначены сервисным роботам для замены аккумуляторов.

4. Включение зависимостей задач: онтология представляет зависимости между задачами, например, требование выполнения задач по сбору яблок перед задачами по перемещению ящиков. Алгоритм распределения задач может использовать эту информацию для определения приоритетов и соответствующего планирования задач.

5. Оптимизация распределения: онтология определяет политики распределения, такие как балансировка нагрузки, для оптимизации распределения задач. Алгоритм распределения задач использует эту информацию для минимизации общей стоимости или времени выполнения задач.

Например, предположим, что у нас есть 10 яблонь, с которых нужно собрать урожай, и 5 ящиков с яблоками, которые нужно переместить на склад. Алгоритм распределения задач может назначить 2 робота-сборщика яблок для сбора яблок и 1, 2 или 3 логистических робота для перемещения

контейнеров/ящиков с урожаем к месту сортировки/складирования. Кроме того, 1 робот для замены аккумуляторов может быть назначен для подзарядки и замены аккумуляторов на роботах-сборщиках и логистических роботах по мере необходимости. Алгоритм распределения задач предназначен для расстановки приоритетов задачи по сбору яблок, которые должны быть выполнены в определённом порядке, чтобы гарантировать постоянную оптимальную загруженность возможностей роботов.

Возможность включения в систему распределения задач разных типов агентов, формализация и контроль выполняемых ими действий обеспечивается наличием соответствующих супервизорных систем и средств очувствления рабочего пространства роботов [80], что может быть достаточно затратно для хозяйств, производящих яблоки и томаты. Однако, подобная система формализуема (Рисунок 2.15) и может быть оптимизирована с существенной экономией ресурсов.

Декомпозиция задач означает, что сложная задача должна быть разложена на несколько простых подзадач – Рисунок 2.16. Как показано на рисунке, иногда возможны случаи наличия альтернативных способов достижения итоговой цели с разными вариантами декомпозиции задачи.

Рассмотрим вариант решения упрощённой проблемы назначения задач в условиях полной детерминированности среды выполнения задач. Для достижения оптимального распределения задач необходимо, чтобы группа роботов выполняла «переговорный» процесс [46] по определению способов выполнения задач с минимальной затратой ресурсов всей системы.

Опишем образованную этим графом вычислительную сеть каждый робот $R_i, i = 1..n$ может выполнять набор действий $D_i = D_{1i}, D_{2i}, \dots, D_{mi}$. С другой стороны, робот должен обеспечить решение целевой задачи $T_j, j = 1..m$ в условиях $f_j = f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jn}$.

Выполнение каждым роботом R_i требуемого действия $D_i, i = 1..n$ означает изменение вектора состояний x_i в ответ на вектор входных воздействий u_i .

Вектора состояний роботов и вектора входных воздействий ограничены пространством возможных состояний и входных воздействий соответственно $x_i \in S_i$, а $u_i \in U_i$.

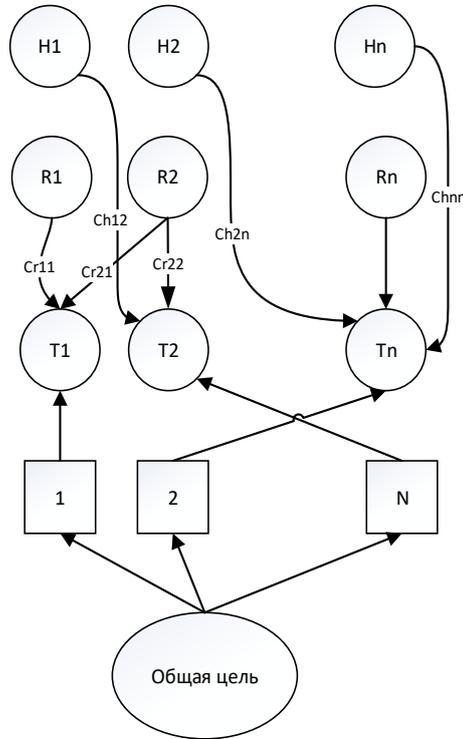


Рисунок 2.15.

Распределение задач в коллаборативной МРТС. R_n – 1-ый тип гомогенных агентов; T_n – задачи; H_n – 2-ой тип гомогенных агентов; $C_{r,mn}$ – стоимость выполнения группой агентов 1 m задачи n ; $C_{h,mn}$ – стоимость выполнения группой агентов 2 m задачи n ; $1, 2, \dots, N$ – классы задач

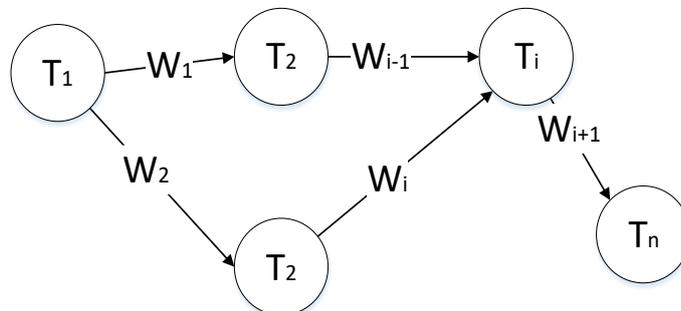


Рисунок 2.16.

Пример декомпозиции решаемой задачи в виде весового графа. $T_1 - T_n$ – подзадачи. $W_1 - W_n$ – стоимость перехода от решения одной задачи к другой

Определим пространство общего состояния системы как $x \in S$, где $x = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$, а $S = (S_1 \times S_2 \times S_3 \times \dots \times S_n)$. Определим общий вход системы как $u \in U$, где $u = (u_1, u_2, u_3 \dots u_n)$, а $U = (U_1 \times U_2 \times U_3 \times \dots \times U_n)$ общее пространство возможных входных воздействий.

Кроме того, на решение целевой задачи T_m накладывается множество других ограничений – $Q_m = \{J(m)\}$ – критерии эффективности, выраженный в виде функции полезности, $t(m)$ – время, необходимое для достижения цели, $n(m)$ – количество роботов в группе, связанных с процессом целевого назначения.

Задача групповой организации – согласование вершин граф-модели группы роботов с вершинами граф-модели целевой задачи, разбитой на подзадачи, таким образом, чтобы уменьшить количество роботов, задействованных в выполнении задачи.

При решении этой задачи узлы графа могут быть объединены по следующим правилам. Для задач, которые могут быть выполнены роботом, выполняются следующие условия:

$$X_T = \{x_{T_1}, x_{T_2} \dots x_{T_m}\}, \quad (2.2)$$

$$A_i = \{a_{1i(m)}, a_{2i(m)}, \dots, a_{ji(m)}\},$$

где $i = 1..n$, $j = 1 \dots m$, X_T – набор состояний системы, соответствующие набору задач $T = T_1, T_2, \dots, T_m$; a_i – набор возможных присвоений задач i -му агенту (роботу), $a_{ji(m)} = T_j$ в случае наличия присвоения, $a_{ji(m)} = \emptyset$ если присвоения нет.

2.3.2. Стоимость выполнения задач

Найдем минимальную стоимость выполнения задачи T_j роботом R_i , как функцию развития системы. Для динамической системы, имеющей вектор состояний x_i и вектор входных воздействий u_i существует оптимальное значение управляющего $u_{i_{opt}}$ на отрезке $[0, t_{T_j}]$, который является кусочно-непрерывным и минимизирует функционал, зависящий от изменения системы. В случае работа

справедливо будет определить функцию, выражающую изменение системы как функцию Лагранжа. Выразим зависимость минимального действия от изменения системы для поиска оптимального входного воздействия:

$$K(x_i^0, x_{T_j}; u \rightarrow u_{i_{opt}}) = \int_0^{t_{T_j}} L_i(x_i(t); u_i(t)) \rightarrow \min_{t \in [0..t_{T_j}]} \quad (2.3)$$

Тогда выразим минимальную стоимость выполнения задания следующим образом:

$$v_i(x_i^0, x_{T_j}) = K_{min}(x_i^0, x_{T_j}; u_{i_{opt}}) \quad (2.4)$$

Пусть за выполнение задачи T_j задано базовое значение вознаграждение $r_{T_j}^b$.

Зададим $\mu_{ij}(x_i^0, x_{T_j})$ – как оценку эффективности работа R_i за выполнение задачи T_j

$$\mu_{ij} = r_{T_j}^b - \tau_{T_j} v_i(x_i^0, x_{T_j}) \quad (2.5)$$

где τ_{T_j} – коэффициент для обеспечения соответствия размерности стоимости выполнения задачи и вознаграждения за выполнение задачи. Заметим, что в рамках функционирования мультиагентной системы подобны подход не предполагает наличия зависимости от востребованности задачи другими роботами. Для учета данного фактора определим вид функции полезности, для которой возможно обновление распределения задач по истечению заданного временного промежутка. Пусть задан профиль присвоения задач $a = a_1, a_2, \dots, a_i$, и задано множество $\{n_1 \dots n_m\}$, определяющее соответствие индексов агентов i , поставленным задачам j . Допустим, что вероятность завершения агентом i задачи j заранее определена $p_{ij} \in [0, 1]$. Общее вознаграждение за выполнение задачи r_{T_j} зададим как зависимость от базового значения вознаграждения $r_{T_j}^b$ и вероятности выполнения таким образом, что вознаграждение тем выше, чем ниже вероятность выполнения задачи всеми агентами:

$$r_{T_j}(a) = \left(1 - \prod_{i=n_1}^{n_m} (1 - p_{ij}) \right) * r_{T_j}^b \quad (2.6)$$

Полная стоимость выполнения задачи заданного профиля присвоения задач:

$$V_{T_j}(a; x_i^0, x_{T_j}) = \sum_{i=n_1}^{n_m} v_i(x_i^0, x_{T_j}) \quad (2.7)$$

Зададим $\mu_{T_j}(x_i^0, x_{T_j})$ – как оценку эффективности системы за выполнение задачи T_j

$$\mu_{T_j}(a; x^0) = r_{T_j}(a) - \tau_{T_j} V_{T_j}(x^0, x_{T_j}) \quad (2.8)$$

Итоговая функция полезности мультиагентной системы примет вид:

$$J(a; x^0) = \sum_{j=1}^m \mu_{T_j}(a; x^0) \rightarrow \max \quad (2.9)$$

Условие (2.11) по сути является локальным правилом распределения задач. Роботы изменяют исходную модель целевой задачи, по мере выполнения, что переопределяет трудоемкость и допустимое время для выполнения, присваивая новые значения оценки эффективности робота и вознаграждения. Метод назначения задач тем эффективней, когда за наименьшее вычислительное время определяется оптимальная конфигурация системы, в которой достигается максимальное значение функции полезности.

Вычисление предложенной функции стоимости на основе Лагранжиана системы (2.7) имеет потенциал универсального применения для расчета стоимости выполнения задач любым типом роботов-агентов в составе МРТС, однако вычисление Лагранжиана в реальном времени для таких комплексных устройств как РТК для сбора плодов может затребовать серьезные вычислительные ресурсы и соответственно увеличивать время распределения задач в полевых условиях при переназначении. Использование формулы (2.7) возможно при инициальном распределении задач на уровне управляющего вычислителя СУ

МРТС. На уровне ведущего робота в составе гомогенной коалиции с учетом особенностей функционирования роботов, предложим следующую упрощенную структуру стоимости назначения задачи t_i для робота r_j :

$$c_{i,j} = w_1 \times d_{i,j} + w_2 \times (B - b_j) + w_3 \times (1 - c_j) \quad (2.10)$$

где $d_{i,j}$ — расстояние между задачей t_i и роботом r_j , B — необходимое время работы от батареи задачи t_i , b_j — оставшееся время работы от батареи робота r_j , c_j — количество задач, назначенных роботу r_j , а w_1 , w_2 и w_3 — весовые коэффициенты, отражающие относительную важность расстояния, времени автономной работы и балансировки рабочей нагрузки. Значения $d_{i,j}$ и B можно получить из онтологии, а значения b_j и c_j можно динамически обновлять по мере назначения задач роботам.

2.3.3. Подход к назначению задач с учетом правил

Разбиение гетерогенной МРТС на гомогенные подгруппы призвано уменьшить вычислительную нагрузку. Однако, ввиду неполной детерминированности всей среды, не всегда возможно обеспечить однозначное поведение группы. Целесообразно применение «социальных» правил для учета текущего состояния и влияния окружающей среды при распределении задач [81].

Рассмотрим основные социальные правила взаимодействия агентов в КМРТС:

1. Нежелательные состояния — соответствуют состоянию внешнего мира, которые являются опасными, неприятными или неадекватными. Пример: робот ставит объект на пол, объект может препятствовать перемещению других агентов. Более опасная ситуация: робот оставляет газ включенным.

2. Нежелательные последовательности — некоторые комбинации, которые доставляют дискомфорт другим агентам. Например, робот берет объект и ставит его, чтобы другой агент его взял, при условии, что можно передать объект сразу, без промежуточных действий.

3. Плохая декомпозиция – используется для выбора наилучшего высокоуровневого способа декомпозиции. Например, если робот должен оставить объект для других агентов, то лучше оставить его в «видимом» месте.

4. Баланс усилий – распределение энергетических затрат между «партнерами». Если речь идет о роботах, то усилия должны быть распределены одинаково. Если речь идет о взаимодействии с человеком, то, например, робот должен приложить большее количество усилий.

5. Таймаут – условие предотвращения долгих временных промежутков между действиями одного агента.

6. Сложные связи между планами – пересекающиеся связи между действиями двух агентов создают сильную зависимость между ними.

Планирование задач в СХ МРТС с учетом социальных правил можно формализовать с помощью набора отношений:

$$P = \langle W_0, D, TTL \rangle, \quad (2.11)$$

где W_0 – начальное состояние внешней среды, TTL – набор деревьев задач, $D = \langle T, R \rangle$ – набор, где T – набор задач, R – набор правил.

$$T = O_p \cup M \quad (2.12)$$

O_p – базовые примитивные задачи, M – сложные (не примитивные) задачи.

Набор социальных правил $r_i \in R$,

$$r_i = \langle B_i, Pe_i^{Ag,ct}, pr_i \rangle, \quad (2.13)$$

где B_i – описание правила, $Pe_i^{Ag,ct}$ – штраф добавляемый, если правило r_i нарушается в решении плана P .

База данных о состоянии внешней среды может быть представлена набором отношений $Wb = \langle En1, En2, En3, \dots, Enn \rangle$, где каждый элемент уникальнй и определяется набором атрибутов $A_{tt} = \langle C_{t1}, C_{t2}, C_{t3} \rangle$, C_{ti} формируется из онтологии агента.

Базовые примитивные задачи – это набор

$$O_p = \langle Precd, E, C, Du \rangle, \quad (2.14)$$

где: $Precd$ формула предсостояния;

$C: (Ct, agent) \rightarrow \mathcal{R}^+$ ценовая функция выполнения действия;

$Du \in \mathcal{R}^+$ - продолжительность выполнения действия.

Сложные (не примитивные) задачи – это пара $M = \langle goal, D \rangle$, где $goal$ – истинна, если цель достигнута, $D = D_1, \dots, D_n$ – набор декомпозиций задач. $D_i = \langle Precd_i, TL_i, C_i \rangle$, $Precd_i$ – предсостояние, $TL_i \in T$ набор подзадач, C_i – ограничение приоритета.

Используем социальные правила в виде геометрических ограничений, накладываемых на траектории движения роботов для избегания «блокирования» движения одного робота другим..

2.3.4. Алгоритм оптимального распределения задач

Назначение задач гомогенным группам роботов и назначение задач внутри гомогенных групп является задачей о назначениях за полиномиальное время. Формализация данной задачи в виде графа (Рисунок 2.17) предполагает что в графе $G = (S, T; E)$ есть n -вершин соответствующих гомогенным роботам в случае распределения на уровне верхнего вычислителя и отдельным агентам в случае гомогенной группы (S), и n вершин, соответствующих видам работ T .

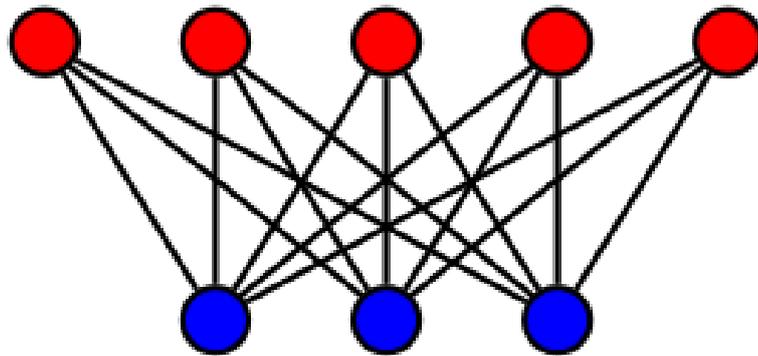


Рисунок 2.17.

Визуализация задачи о назначениях в виде графа (красным обозначены задачи, синим роботы)

Пусть каждая задача T_i имеет набор требований req_i и набор ограничений con_i , а каждый робот r_j имеет набор возможностей cap_j и набор ограничений con_j . Решим проблему распределения задачи, определённом в (2.9)

Для наглядности здесь и ниже полезность решения задачи t_i роботом r_j , выраженное в (2.4) будем рассматривать в упрощённом виде как $c_{i,j}$, которая может быть рассчитана на основе совместимости требований задачи и возможностей робота, а также ограничений задачи. Например, если задача t_i требует возможности собирать яблоки, а робот r_j имеет возможность собирать яблоки, но срок службы батареи робота r_j низкий и он не может выполнить задачу без подзарядки, то стоимость назначения задачи t_i для робота r_j должно отражать как соответствие возможностей, так и ограничение батареи.

Для достижения оптимального режима работы РТК требуется найти совершенное, или полное паросочетание с наименьшей стоимостью.

Венгерский алгоритм можно использовать для решения задачи о назначениях, находя такое задание, которое минимизирует общую стоимость. Алгоритм сначала инициализирует матрицу M размера $m \times n$, где каждый элемент представляет стоимость назначения задачи t_i роботу r_j . Затем алгоритм итеративно сводит матрицу к квадратной матрице размера $m \times m$, где каждая строка и столбец содержат ровно один нулевой элемент, путем вычитания элемента минимальной стоимости каждой строки и столбца из всех остальных элементов. Затем алгоритм идентифицирует набор назначений, которые охватывают все нулевые элементы, и, если количество назначений меньше m , алгоритм итеративно увеличивает набор назначений, находя новые назначения, которые охватывают непокрытые нулевые элементы, пока не будут назначены все задачи (Рисунок 2.19).

1. Инициализация:

Пусть M — матрица размера $m \times n$, где $M_{i,j}$ представляет стоимость назначения задачи t_i роботу r_j . Установим набор назначений A пустым.

Уменьшение матрицы:

Для каждой строки i и каждого столбца j таблицы M необходимо вычесть минимальный элемент строки i и столбца j из всех элементов строки i и столбца j соответственно. Обозначим полученную матрицу как M' .

2. Определение задания:

Пока размер A меньше m , сделать следующие шаги:

Найти нулевой элемент $M'_{i,j}$, который не покрывается никаким присваиванием в A .

Если существуют уникальная строка i и уникальный столбец j такие, что $M'_{i,j} = 0$, то назначаем задачу t_i роботу r_j и добавляем задание (t_i, r_j) в A .

В противном случае пусть S_i будет набором столбцов, в которых нет элементов в строке i , и пусть T_j будет набором строк, в которых нет элементов в столбце j . Пусть S — объединение S_i и T_j . Если S непусто, выбрать любой столбец k .

Если S пусто, алгоритм завершается без действительного присваивания.

В противном случае выбрать любую строку p в S и добавить присваивание (t_p, r_k) к A . Удалить все назначения, которые охватывают любую строку или столбец, которые покрыты назначением (t_p, r_k) . Вернуться к шагу 2.

3. Выход:

Набор заданий A представляет собой оптимальное распределение заданий, минимизирующее общую стоимость.

Рисунок 2.18.

Описание Венгерского алгоритма для распределения задач

2.3.5. Определение функции стоимости в контексте применения Венгерского алгоритма для назначения задач роботам-агентам

Формализованные в виде символьных выражений задачи можно классифицировать, а информация о требуемых ресурсных затратах на выполнение задачи отдельно взятым роботом-агентом и наличие «способности» к выполнению роботами в составе отдельной гомогенной группы являются критериями функционирования алгоритмов распределения задач на стратегическом уровне верхнеуровневого вычислителя. Используем онтологию в составе алгоритма распределения задач для расчета матрицы затрат M на основе совместимости между задачами и роботами. Например, определим набор классов для задач и роботов, таких как «*ApplePickingTask*» (перевод с англ. – «ЗадачаСборЯблок»), «*LogisticTask*» (перевод с англ. – «ЗадачаЛогистики»), «*BatteryChargingTask*» (перевод с англ. – «ЗадачаЗарядкиАккумуляторов»), «*ApplePickingRobot*» (перевод с англ. – «РоботСборщикЯблок»), «*LogisticRobot*» (перевод с англ. – «РоботЛогистический») и «*BatteryChargingRobot*» (перевод с англ. – «РоботДляЗарядкиАккумуляторов»). Каждой задаче и роботу можно назначить набор атрибутов и возможностей, таких как «*required_battery_life*» (перевод с англ. – «требуемая_емкость_аккумулятора»), «*pickup_speed*» (перевод с англ. – «время_сбора»), «*carrying_capacity*» (перевод с англ. – «грузоподъемность»), «*charging_rate*» (перевод с англ. – «скорость_заряда»), и «*distance_to_apple_trees*» (перевод с англ. – «расстояние_до_яблонь»). Также определим набор отношений между задачами и роботами, например «совместимость_с» («*compatible_with*»), «конфликты_с» («*conflicts_with*»), «зависит_от» («*depends_on*») и «близость_к» («*proximity_to*») (Таблица 4).

Используя эту онтологию, рассчитаем матрицу затрат M (2.15), определив набор правил, учитывающих совместимость, ограничения и предпочтения каждой задачи и робота. Например, если задача t_i требует возможности собирать яблоки, а робот r_j имеет возможность собирать яблоки, но срок службы батареи робота r_j низкий и он не может выполнить задачу без подзарядки.

Таблица 4.

Элементы онтологии группы роботов для сбора яблок

	Задачи	Роботы
Классы	<i>ApplePickingTask</i> <i>LogisticTask</i> <i>BatteryChargingTask</i>	<i>ApplePickingRobot</i> <i>LogisticRobot</i> <i>BatteryChargingRobot</i>
Атрибуты	<i>required_battery_life</i> <i>pickup_speed</i> <i>carrying_capacity</i> <i>distance_to_apple_trees</i>	<i>charging_rate</i> <i>battery_life</i> <i>proximity_to_charging_stations</i>
Отношения		<i>compatible_with</i> <i>conflicts_with</i> <i>depends_on</i> <i>proximity_to</i>

$$M = \begin{bmatrix} 10 & 20 & 30 & 40 & 50 & 60 \\ 20 & 10 & 20 & 30 & 40 & 50 \\ 30 & 20 & 10 & 20 & 30 & 40 \\ 40 & 30 & 20 & 10 & 20 & 30 \\ 50 & 40 & 30 & 20 & 10 & 20 \\ 60 & 50 & 40 & 30 & 20 & 10 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Используя эту матрицу затрат, применим венгерский алгоритм, чтобы найти оптимальное распределение задач для системы с несколькими роботами, состоящей из роботов-сборщиков яблок, логистических роботов, перемещающих ящики с яблоками, и роботов для зарядки аккумуляторов:

$$M_{1,2} = w_1 \times d_{1,2} + w_2 \times (B_1 - b_2) + w_3 \times (1 - c_2), \quad (2.16)$$

где $d_{1,2}$ — расстояние между целевой точкой роботом, B_1 — необходимое время работы от батареи задачи по сбору яблок, b_2 — оставшееся время работы от батареи робота, c_2 — это количество задач, уже назначенных роботу, а w_1 , w_2 и w_3 — веса, отражающие относительную важность расстояния, времени автономной работы и балансировки рабочей нагрузки.

Используя венгерский алгоритм с этой матрицей затрат, найдем оптимальное распределение задач, которое минимизирует общую стоимость. Например, начнем с первой строки матрицы затрат и назначим задачу сбора

яблоку третьему роботу (то есть роботу-сборщику яблок) со стоимостью 30. Затем удалим первую строку и третий столбец из матрицы затрат и продолжим с оставшимися строками и столбцами. После применения венгерского алгоритма ко всем строкам и столбцам получим следующий набор назначений:

$$A = \{(1,3), (2,1), (3,2), (4,5), (5,6), (6,4)\} \quad (2.17)$$

где каждое задание (i, j) представляет задание задания i роботу j . Например, $(1,3)$ представляет собой назначение первой задачи (т. е. задачи по сбору яблок) третьему роботу (т. е. роботу-сборщику яблок). Этот набор назначений представляет собой оптимальное распределение задач для системы с несколькими роботами на основе совместимости, ограничений и предпочтений, определенных в онтологии.

Получив набор заданий A , реализуем распределение задач в системе управления группой роботов, назначив каждую задачу соответствующему роботу. Например, назначим задачу по сбору яблок роботу-сборщику яблок, логистическую задачу — логистическому роботу, а задачу зарядки аккумулятора — роботу для зарядки аккумулятора. Затем возможно отслеживать прогресс каждого робота и при необходимости переназначать задачи в зависимости от изменений в окружающей среде, производительности робота или приоритетов задач.

В рамках экспериментальных работ (Глава 4) итоговую стоимость выполнения задания каждым отдельно взятым роботом далее будем рассчитывать в виде, пропорционально зависящем от расстояния, определяемого планировщиком траектории робота и остатка заряда аккумуляторной батареи, которая тем ниже, чем большую траекторию проходит робот и совершает большее количество операций сбора отдельных плодов.

2.4. Логическое управление гомогенной группой роботов

Для выполнения назначенных задач МРТС отдельным роботам-агентам необходимо совершить определенную последовательность действий с учетом состояния окружающей среды, ранее выполненных действий и состояний других роботов. Часть системы управления, отвечающую за логику формирования состояния роботов исходя из выполняемых задач назовем «логический уровень» системы управления. Так как имеется фактическое представление о текущем состоянии роботов и реалистичная оценка возможных затрат ресурсов роботов для выполнения конкретных задач, логический уровень системы управления отдельно взятой гомогенной группы при выполнении можно формализовать в виде сетевого конечного автомата [79].

Рассмотрим задачу вывода группы роботов, осуществляющих сбор плодов в исходное положение.

В работе [82] предложена стратегия организации управления движением группы роботов в строю с иерархической архитектурой системы группового управления и показана возможность организации движения формаций роботов при представлении логического уровня системы управления роботов в виде КА.

Группа роботов состоит из роботов R_{mn} , где m – это количество гомогенных групп, n – количество роботов в группах и центрального управляющего устройства C . К каждой гомогенной группе роботов прикреплен головной робот, ведущий переговоры с вычислительным устройством верхнего уровня (ВУВ). ВУВ получает задание от оператора через диалоговую систему, декомпозирует ее и выдает каждому головному роботу задание.

Система представляет собой сложную систему, потому что граф заданий является связным.

2.4.1. Логический уровень СУ роботов-агентов в виде конечных автоматов

В работах [72] и [83] представлены решения задачи вывода конвоя роботов при использовании КА на логическом уровне. Рассмотрим возможность представления задачи вывода конвоя роботов-сборщиков в виде КА и реализуем КА для управляющего центра, ведущего и ведомых роботов.

Представим выполнение заданий верхнеуровневым вычислителем СУ МРТС, головными роботами и роботами-агентами в группах в виде конечных автоматов. $U = U_1 \dots U_{10}$ — входной алфавит, $z = z_1 \dots z_6$ — выходной алфавит, $x = x_1 \dots x_6$ — множество состояний.

С учетом гибридной структуры системы управления и структурной схемы системы управления группой роботов для сбора плодов управляющий КА отправляет сигналы на ведущих роботов гомогенных подгрупп – Рисунок 2.19, Таблица 5.

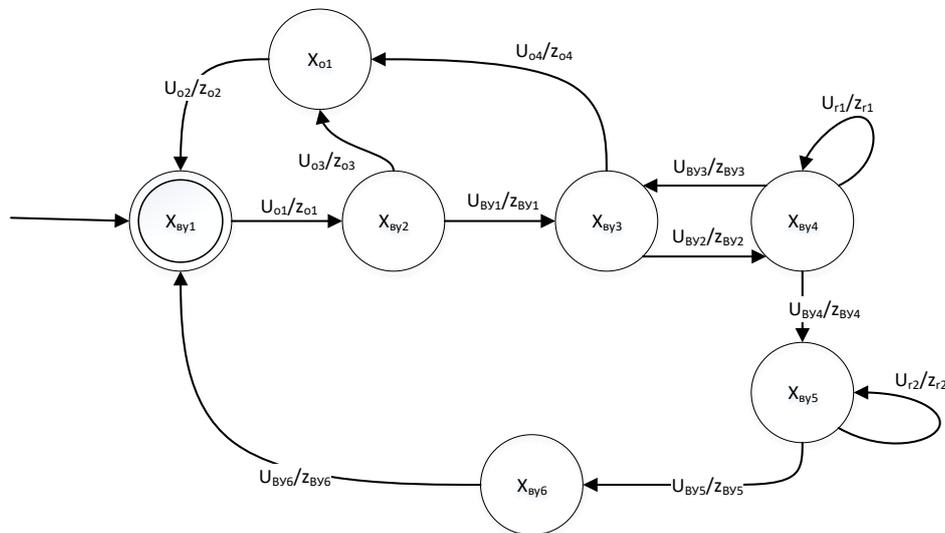


Рисунок 2.19.

Управляющий автомат вычислителя верхнего уровня СУ МРТС

Таблица 5.

Элементы КА вычислителя верхнего уровня управления вычислителя в составе системы управления группой роботов для сбора плодов.

Состояния	Входной алфавит	Выходной алфавит
$X_{вy1}$ — ожидание команды от оператора;	U_{o1} — получение команды от оператора;	Z_{o1} — сообщение оператору о начале работы;
X_{o1} — состояние ошибки в системе;	U_{o2} — сигнал о наличии ошибки;	Z_{o2} — сообщение оператору о переходе системы в начальное состояние;
$X_{вy2}$ — работа системы символьного представления команды;	U_{o3} — ошибка о символьном представлении команды; $U_{вy1}$ — представление команды в символьном виде;	Z_{o1} — сообщение оператору об ошибке символьного представления команды; $Z_{вy1}$ — отправка команды в символьном виде;
$X_{вy3}$ — работа системы классификации и назначения задач;	$U_{вy2}$ — декомпозиция команды на задачи в символьном виде и классификация задач; U_{o4} — ошибка декомпозиции команды на задачи и классификации задач;	$Z_{вy1}$ — отправка перечня задач и соответствующих классов исполнителей в символьном виде; Z_{o4} — сообщение оператору об ошибке декомпозиции команды на задачи и классификации задач;
$X_{вy4}$ — работа коммуникационного блока (ожидание ответов от роботов на предмет возможности выполнения задачи);	U_{r1} — получение информация об успешности назначения задачи; $U_{вy3}$ — наличие ошибки при назначении задачи; $U_{вy4}$ — успешное назначение задач;	Z_{r1} — сообщение роботам; $Z_{вy3}$ — отправка оператору информации о наличии ошибки при назначении задач; $Z_{rвy4}$ — сообщение роботам о прекращении процедуры назначения задач;
$X_{вy5}$ — мониторинг задания;	U_{r2} — получение информации о ходе задания; $U_{вy5}$ — получение сообщение о готовности завершения задания от роботов.	Z_{r2} — сообщение роботу о продолжении задания $Z_{rвy5}$ — сообщение роботам о прекращении выполнения задания;
$X_{вy6}$ — ожидание ответа от головных роботов о корректном окончании задания всех роботов.	$U_{вy6}$ — завершение текущего задания.	$Z_{rвy6}$ — сообщение оператору о завершении задания и переходе в начальное состояние;

Сетевой конечный автомат назначения задач для головного робота получает сигнал о необходимости выполнения операции и информацию о задании для каждого робота внутри гомогенной подгруппы – Рисунок 2.20, Таблица 6.

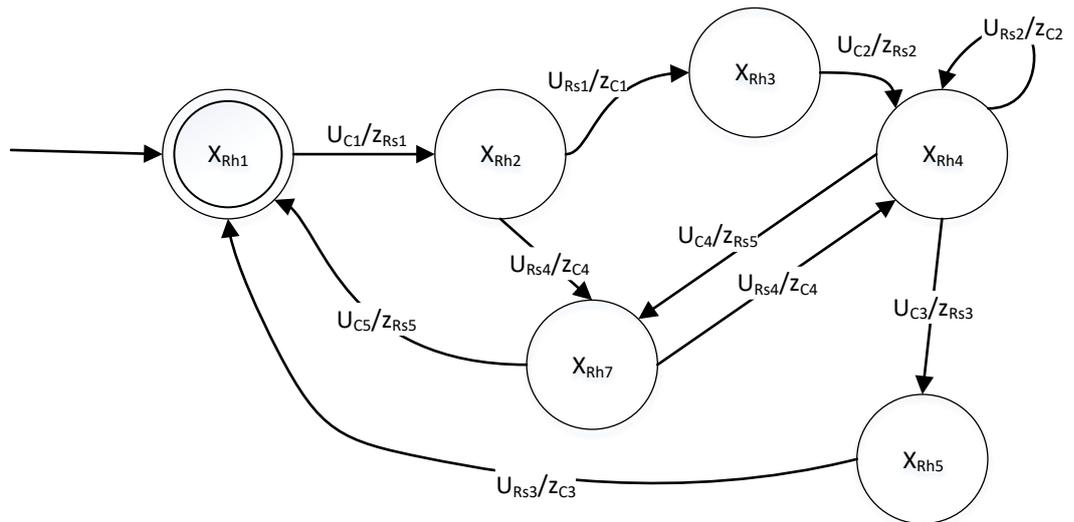


Рисунок 2.20.

Управляющий автомат головного робота Rh

Таблица 6.

Элементы управляющего КА ведущего робота в гомогенной подгруппе в составе системы управления группой роботов для сбора плодов

Состояния	Входной алфавит	Выходной алфавит
1	2	3
X_{Rh1} — ожидание команды от ВУ о старте	U_{c1} — получение команды от ВУ о старте подзадания	z_{rs1} — сообщение о готовности и состоянии робота
X_{Rh2} — ожидание ответа от ведомых роботов Rs	U_{rs1} — получение информации от ведомых роботов; U_{rs4} — сообщение о проблеме/ошибке от RS;	z_{c1} — отправка информации о RS роботам ВУ z_{c4} — отправка сообщения ВУ о возникшей ошибке
X_{Rh3} — ожидание задания от ВУ	U_{c2} — получение сообщения от ВУ о подзадании (маршруты);	z_{rs2} — отправка информации RS
X_{Rh4} — выполнение подзадания	U_{c3} — получение сообщения от ВУ об окончании работ на поле; U_{rs2} — получение сообщения от RS о ходе выполнения подзадания	z_{rs3} — отправка команды RS роботам о возвращении на место старта; z_{c2} — сообщения ВУ о ходе выполнения подзадания
X_{Rh5} — возвращение на место старта задания	U_{rs3} — сообщение от роботов RS о возвращении на место старта	z_{c3} — отправка сообщения ВУ о корректном завершении подзадания

1	2	3
X_{rm6} — ожидание команды от СУ о переходе в режим ожидания		
X_{rm7} — ожидание ответа СУ о возникшей ошибке	U_{c4} — сообщение от ВУ о продолжении выполнения подзадания U_{c5} — сообщение от ВУ о прекращении работы	Z_{rs4} - отправка команды RS роботам о продолжении задания

В зависимости от вида робота состояние X_{Rh4} может иметь различные вложенные состояния, специфичные для функционала робота.

Управляющий автомат ведомого робота принимает управляющие сигналы от ведущего робота в гомогенной подгруппе – Рисунок 2.21, Таблица 7.

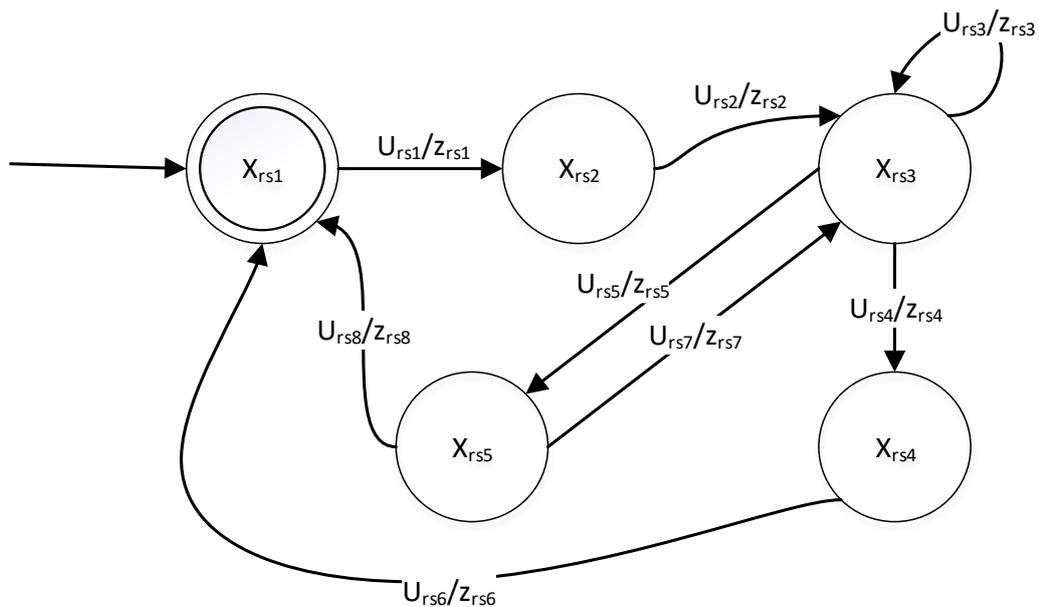


Рисунок 2.21.

Управляющий автомат ведомого робота Rs

Аналогично ведущему роботу в группе, для всех ведомых роботов в зависимости от вида робота состояние X_{Rs3} может иметь различные вложенные состояния, специфичные для функционала робота.

Элементы управляющего КА ведомого робота в гомогенной подгруппе в составе системы управления группой роботов для сбора плодов

Состояния	Входной алфавит	Выходной алфавит
X_{rs1} — ожидание команды от Rh	U_{rs1} — получение команды от Rh о старте задания	Z_{rs1} — сообщение о состоянии системы;
X_{rs2} — ожидание задания от Rh	U_{rs2} — получение команды к выполнению задания;	Z_{rs2} — сообщение о готовности;
X_{rs3} — выполнение задания	U_{rs3} — получение информации о ходе выполнения задания от RM U_{rs4} — получение сообщения о движении на место старта; U_{rs5} — сообщение об ошибке (поломка робота Rs, проблема на поле); U_{rs7} — сообщение от Rh о продолжение выполнения задания;	Z_{rs3} — отправка информации о ходе задания; Z_{rs4} — отправка сообщения Rh о прибытии на место старта; Z_{rs5} — сообщение Rh об ошибке. Z_{rs6} — сообщение о завершении задания и уходе в режим ожидания;
X_{rs4} — движение на место старта	U_{rs6} — получение команды о завершении задания и уходе в режим ожидания;	Z_{rs6} — сообщение о завершении задания и уходе в режим ожидания;
X_{rs5} — ожидание ответа Rh о возникшей ошибке	U_{rs8} — сообщение от Rh о остановке задания;	Z_{rs6} — сообщение Rh об остановке задания;

2.5. Оценка динамических характеристик системы управления группой роботов-агентов для сбора плодов урожая как мультиагентной робототехнической системы

В [84] рассматриваются консенсусные задачи для сетей динамических агентов с постоянной и переключаемой топологиями, в них сначала

устанавливается зависимость между алгебраической связностью сети и эффективностью правил линейного консенсуса, затем предлагается простая функция разногласия, которая является общей функцией Ляпунова для динамики разногласий в направленной сети с топологией переключения.

Например, в работе Leonard и Fiorelli [85] представлен способ решения задач распределенного управления несколькими автономными мобильными роботами с использованием искусственных потенциалов и виртуальных лидеров. Искусственными потенциалами определены силы управления взаимодействием между мобильными роботами и желаемые расстояния между роботами. Виртуальный лидер – это движущаяся справочная точка, которая воздействует на ближнего робота посредством дополнительных искусственных потенциалов. Виртуальные лидеры могут быть использованы для управления строями и движением группы роботов. Наряду с этим, в рамках работы предоставлена конструкция функции Ляпунова для доказательства устойчивости системы с использованием кинетической энергии системы и искусственной потенциальной энергии [86].

Устойчивость функционирования гомогенных подгрупп СХ МРТС характеризуется переходом параметров перемещения в пространстве всех роботов подгруппы в гомогенное состояние Планирование действий с участием гомогенных кластеров СХ роботов, как показано ранее включает два этапа. Первый этап – декомпозиция задач и распределение задач между роботами в группах Второй этап – после назначения задачи каждому роботу в группе необходимо спланировать свои собственные действия (перемещение в среде, использование эффекторов для выполнения задач). Необходимо определить оптимальную структуру группы роботов и условия достижения однородности состояний роботов. Если задача, возложенная на робота, — это внутреннее возмущение, а изменение окружающей среды — внешнее возмущение, то преодоление внешних и внутренних возмущений для группы роботов, как для сети, означает приведение сети к однородному состоянию каждого узла. В

случае нарушения структуры сети (например, выход одного робота или потеря канала связи) необходимо перевести всю сеть в новое состояние с оптимальной структурой.

В рамках предложенной архитектуры МРТС робот-агент с назначенными задачами может быть описан следующими параметрами:

- идентификатор робота, $i \in I \subset Z$;
- состояние $x_i \in X_i \subset R^n$;
- управляющий сигнал $u_i \in U_i \subset R^n, f_i: X_i \times U_i \rightarrow TX_i$, определяемый выполняемой роботом задачей и определяющий динамику робота $\dot{x}_i = f(x_i, u_i)$.

Динамика сети роботов может быть описано следующими уравнением:

$$\dot{x}_i = F(x_i, H_{i1}(x_i, x_1), \dots, H_{in}(x_i, x_n)), i=1 \dots n; \quad (2.18)$$

где n – количество динамических узлов сети, $x_i = x_i(t)$ – вектор-столбец состояний i -ого узла в заданный момент времени, $F(x, y_1, \dots, y_n)$ – обобщенная нелинейная функция, которая определяет взаимовлияние узлов используя функцию пересечений $y_j = H_{ij}(x_i, x_j)$, где $y_j = 0$ означает отсутствие взаимодействия между роботами в рамках решаемых задач.

Таким образом, архитектура робототехнической системы учитывает взаимодействие между роботами. Для класса систем, описываемых формулой в уравнении (1), рассматриваются однородные по сети состояния, заданные формулой

$$x_1(t) = \dots = x_n(t) = x^*(t), \quad (2.19)$$

где x удовлетворяет уравнению для изолированного узла, $x_j = F(x^*, 0, \dots, 0)$.

Для кодирования структуры группы роботов существует постоянная матрица связи $A = (A_{ij})$

Как показано в работе [86] для ненаправленных сетей с фиксированным количеством ссылок $m = \sum_i \sum_{j>i} A_{ij}$ оптимизационная проблема

$$\text{minimize } L_{\max}(A) \quad (2.20)$$

subject to $A_{ij} \in \{0,1\}, A_{ij} = 0, A_{ij} = A_{ji}$

$$\sum_i \sum_{j>i} A_{ij} = m$$

где $\lambda(A)$ - показатель Ляпунова, параметр, показывающий устойчивость состояния сети и наличие хаотичных процессов.

Проведём моделирование систем с двумя типами архитектур гомогенных групп роботов – централизованной с наличием одного ведущего робота и федеративной с возможностью разбиения в несколько подгрупп и определить значение показателя Ляпунова – Рисунок 2.22. В качестве целевой задачи зададим достижение формации подгрупп роботов в виде кругов. Состояние робота в симуляции – линейная, угловая скорость и координаты.

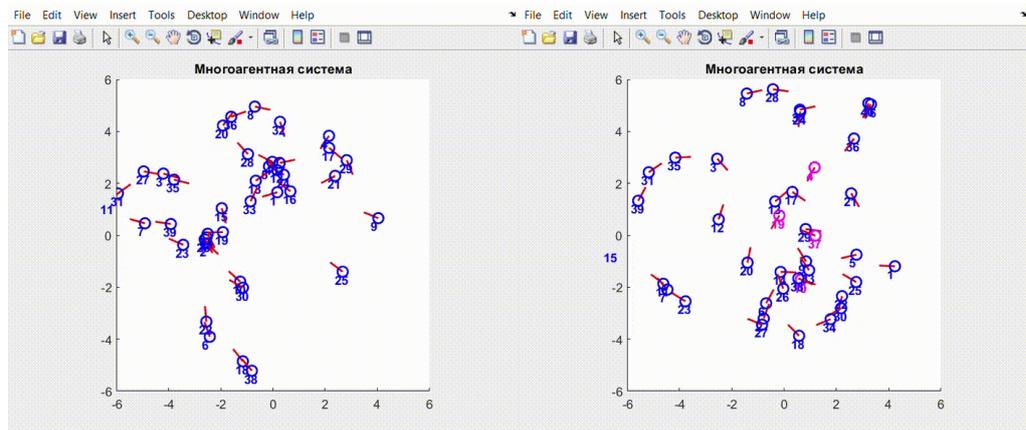


Рисунок 2.22.

Моделирование централизованного и федеративного управления системой с несколькими роботами в MATLAB

Для описания системы управления группой роботов с учетом специфики решения задачи сбора плодов пусть n_i количество роботов в i -ой подгруппе, где i каждого типа роботов (сборщики яблок, логистические роботы, роботы для подзарядки), и пусть:

$$x_i^j(t) = [p_i^j(t), \theta_i^j(t)] \quad (2.21)$$

вектор состояния j -го робота в i -ой подгруппе в момент времени t , где

$$p_i^j(t) = [x_i^j(t), y_i^j(t)]^T \quad (2.22)$$

вектор положения $\theta_i^j(t)$ вектор ориентации в пространстве.

Динамика каждого типа роботов в гомогенных подгруппах может быть описана следующим дифференциальным уравнением:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} \left(\|p_i^j - p_{goal}\|^2 + \frac{1}{2} \omega_i^{j^2} + \frac{1}{2} \gamma_i^{j^2} + \frac{1}{2} (b_i^j - \gamma)^2 \right) \quad (2.23)$$

Для логистического робота и робота для подзарядки (сменны аккумуляторов):

$$\begin{aligned} \dot{p}_i^j &= v_i^j \cos \theta_i^j \\ \dot{\theta}_i^j &= \omega_i^j \\ \dot{\phi}_i^j &= \gamma_i^j \end{aligned} \quad (2.24)$$

где ϕ_i^j – ориентация угла бортового манипулятора для выполнения операций, γ_i^j – скорость изменения угла манипулятора.

Входные управляющие сигналы роботов опишем следующим образом:

$$\begin{aligned} v_i^j &= k_1 \left(\|p_i^j - p_{goal}\| \right) \\ \omega_i^j &= -k_2 (\theta_i^j - \theta_{goal}) - k_3 v_i^j \sin(\theta_i^j - \theta_{goal}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

где p_{goal} и θ_{goal} целевые значения положения и ориентации соответственно, а k_1, k_2, k_3 значения коэффициентов усиления.

Для системы, описываемой дифференциальными уравнениями, в качестве критерия измерения устойчивости целесообразно использовать функцию Ляпунова. Функция Ляпунова системы управления описываемой группы роботов выглядит следующим образом:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} \left(\|p_i^j - p_{goal}\|^2 + \frac{1}{2} \omega_i^{j^2} + \frac{1}{2} \gamma_i^{j^2} \right) \quad (2.26)$$

Производная функции Ляпунова вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} \left((p_i^j - p_{goal}) \cdot \dot{p}_i^j + \omega_i^j \dot{\omega}_i^j + \gamma_i^j \dot{\gamma}_i^j \right) \\
&= - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} k_2 \omega_i^j (\theta_i^j - \theta_{goal})^2 \leq 0
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Чтобы роботы, заряжающие батареи, имели достаточную энергию для выполнения своих задач, модифицируем систему управления, включив в нее механизм контроля уровня заряда батареи и подзарядки. Пусть $b_i^j(t)$ обозначает уровень заряда батареи j -го робота в i -й подгруппе в момент времени t . Изменим уравнение динамики для роботов с зарядкой аккумуляторов, включив в него уровень заряда аккумулятора следующим образом:

$$\begin{aligned}
\dot{p}_i^j &= v_i^j \cos \theta_i^j \\
\dot{\theta}_i^j &= \omega_i^j \\
\dot{\phi}_i^j &= \gamma_i^j \\
\dot{b}_i^j &= -\alpha_i^j + \beta_i^j u_i^j
\end{aligned} \tag{2.28}$$

где α_i^j — скорость энергопотребления манипулятора, β_i^j — скорость зарядки аккумулятора, а u_i^j — бинарная переменная, указывающая, нужна ли батарее робота зарядиться или нет. Если $u_i^j = 1$, то робот-зарядник переместится на зарядную станцию, и аккумулятор будет подзаряжаться со скоростью β_i^j . В противном случае уровень заряда батареи будет уменьшаться со скоростью α_i^j из-за энергопотребления манипулятора.

Чтобы включить механизм контроля уровня заряда батареи и подзарядки в систему управления, изменим управляющие входы для роботов зарядки батареи следующим образом:

$$\begin{aligned}
v_i^j &= k_1 \left(\|p_i^j - p_{goal}\| \right) \\
\omega_i^j &= -k_2 (\theta_i^j - \theta_{goal}) - k_3 v_i^j \sin(\theta_i^j - \theta_{goal})
\end{aligned} \tag{2.29}$$

$$\begin{aligned}\gamma_i^j &= -k_4(\phi_i^j - \phi_{\text{goal}}) \\ u_i^j &= \{1, \text{if } b_i^j(t) \leq \gamma, \text{otherwise } 0\}\end{aligned}$$

где γ — пороговый уровень заряда батареи, а k_4 — усиление контроля за углом манипулятора. Функция Ляпунова для модифицированной системы управления может быть определена как:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} \left(\|p_i^j - p_{\text{goal}}\|^2 + \frac{1}{2} \omega_i^{j2} + \frac{1}{2} \gamma_i^{j2} + \frac{1}{2} (b_i^j - \gamma)^2 \right) \quad (2.30)$$

Производную функции Ляпунова можно вычислить как:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} [(p_i^j - p_{\text{goal}}) \cdot v_i^j \cos \theta_i^j - \omega_i^j k_2 (\theta_i^j - \theta_{\text{goal}}) \\ &\quad - \gamma_i^j k_4 (\phi_i^j - \phi_{\text{goal}}) - (b_i^j - \gamma) (\alpha_i^j - \beta_i^j u_i^j)] = \\ &= - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{n_i} [\alpha_i^j (b_i^j - \gamma) - \beta_i^j u_i^j (b_i^j - \gamma)^2] \leq 0\end{aligned} \quad (2.31)$$

где неравенство выполняется в силу того, что $\alpha_i^j > \beta_i^j (b_i^j - \gamma)$ для всех i и j . Следовательно, система управления глобально асимптотически устойчива, а зарядные роботы всегда будут иметь достаточную энергию для выполнения своих задач.

Чтобы описать динамику роботов-сборщиков яблок с помощью функции Ляпунова и включить данные из онтологии и результаты распределения задач с помощью венгерского алгоритма, определим состояние системы как положение и ориентацию каждого робота-сборщика яблок, обозначаемого как p_i и θ_i соответственно. Определим матрицу назначения задач T_{ij} , которая принимает значение 1, если роботу i назначено собирать яблоки в секторе j , и 0 в противном случае.

Имея эту информацию, возможно построить функцию Ляпунова, отражающую энергию системы:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M T_{ij} w_{ij} (f(p_i, \theta_i))^2 \quad (2.32)$$

где N — количество роботов, а M — количество обрабатываемых секторов сада с прогнозируемым одинаковым количеством плодов. Эта функция отражает общую энергию, необходимую для выполнения задачи, с учетом расстояния до каждого яблока и желательности каждого задания.

Чтобы включить результаты распределения задач с использованием венгерского алгоритма, используем матрицу назначения задач T_{ij} , чтобы определить управляющий вход u_i для каждого робота:

$$u_i = \{v_{\max} \text{ if } \sum_{j=1}^M T_{ij} = 1, \text{ otherwise } 0\} \quad (2.33)$$

Этот управляющий ввод гарантирует, что каждый робот движется к назначенному ему сектору с плодами с максимальной скоростью, оставаясь при этом неподвижным, если ему не назначен сектор для сбора плодов.

Тогда динамика каждого робота может быть описана следующими уравнениями движения:

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= v_i \cos \theta_i \\ \dot{\theta}_i &= \{k_1 \sum_{j=1}^M T_{ij} w_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) \text{ if } \sum_{j=1}^M T_{ij} = 1, \text{ otherwise } 0\} \end{aligned} \quad (2.34)$$

где k_1 — константа, определяющая скорость выравнивания между роботами, а v_i — скорость робота i , определяемая по формуле:

$$v_i = \{v_{\max} \text{ if } \sum_{j=1}^M T_{ij} = 1, \text{ otherwise } 0\} \quad (2.35)$$

Используя функцию Ляпунова V и управляющий вход u_i , покажем, что динамика системы глобально асимптотически устойчива, а это означает, что роботы в итоге сойдутся к назначенным им целевым положениям насаждения с плодами (яблоками) и выполнят задачу, не сталкиваясь друг с другом.

Для случайного движения роботов показатель Ляпунова имеет положительное значение, что говорит о хаотичности системы - Рисунок 2.23. Для случайного изменения значения положений и скоростей роботов как показано на рисунке ниже показатель Ляпунова в конечном положении достигает значения от 0.1 до 1.8.

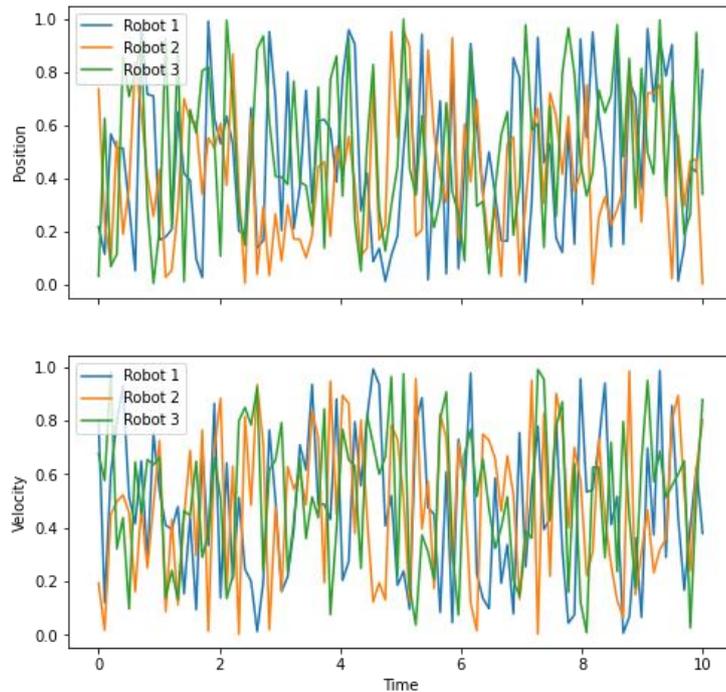


Рисунок 2.23.

График случайного изменения положения и скоростей трех роботов при котором функция Ляпунова системы имеет положительное значение

Зададим положение и ориентацию трех роботов сборщиков яблок и положение трех деревьев - Рисунок 2.24. На графике ниже отображено положение роботов в виде красных кругов соответственно, а их ориентации — в виде стрелок и положение деревьев в виде зеленых точек.

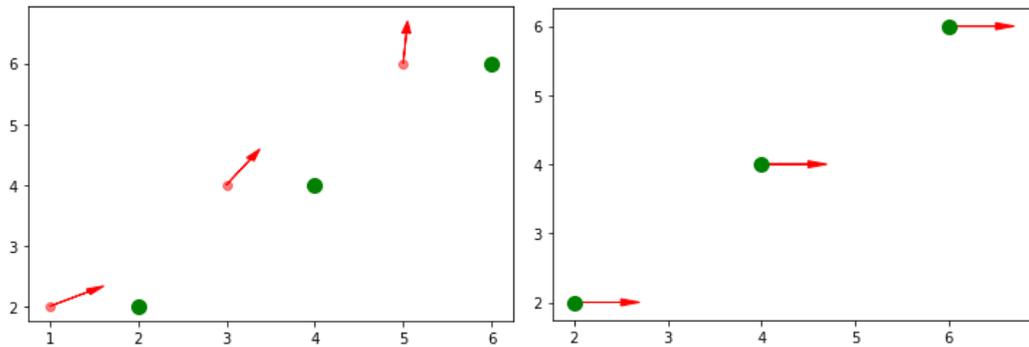


Рисунок 2.24.

Положение и ориентация роботов-сборщиков до достижения положения целевых деревьев и после достижения

Зададим положение и ориентацию трех логистических роботов и трех роботов для зарядки аккумуляторов, а также положения трех роботов-сборщиков для подзарядки и одного места логистики - Рисунок 2.25. На графике отображено положение логистических роботов и роботов для зарядки аккумуляторов в виде синих и желтых кругов соответственно, а их ориентации — в виде стрелок. Отобразим положение зарядных станций в виде зеленых крестиков и точки логистики в виде красных крестиков.

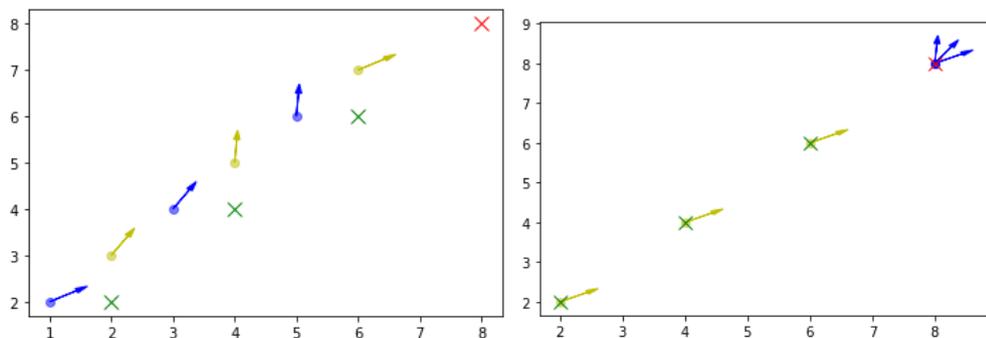


Рисунок 2.25.

Положение и ориентация логистических роботов и роботов для зарядки аккумуляторов до достижения целевых положений и после достижения

Если система управления будет устойчива, и роботы будут сходиться к целевому положению и ориентации как показано на Рисунках выше, значение производной функции Ляпунова для такого упорядоченного движения принимает отрицательное значение, что говорит об управляемости процессов.

2.6. Структура системы управления группой роботов для сбора плодовых культур в условиях сада интенсивного выращивания

С учетом описанных решений по распределению задач и формализации состояний роботов для переключения конфигураций системы управления робота-агента разработаны инструменты, позволяющие определить текущие условия функционирования робота в окружающей среде.

На уровне роботов предполагается «горизонтальная» интеграция информации супервизорной системы для реагирования на изменения окружающей среды в режиме, приближенном к реальному времени. По информации супервизорной системы также происходит включение и выключение контура адаптивного управления или возврат в последнее состояние конечно-автоматного контура системы управления.

С учетом «горизонтальной» интеграции систем управления роботов, во-первых, и наличия супервизорной системы управления, во-вторых, централизованно решающей задачу целеполагания, данная система управления может считаться гибридной. С учетом положений работы [46], в которой предложена структурная схема мобильного РТК, функционирующего в составе мультиагентной системы с гибридной структурой управления, представим доработанную нами систему управления отдельного робота с учетом необходимости решения задач автономного движения – Рисунок 2.26.

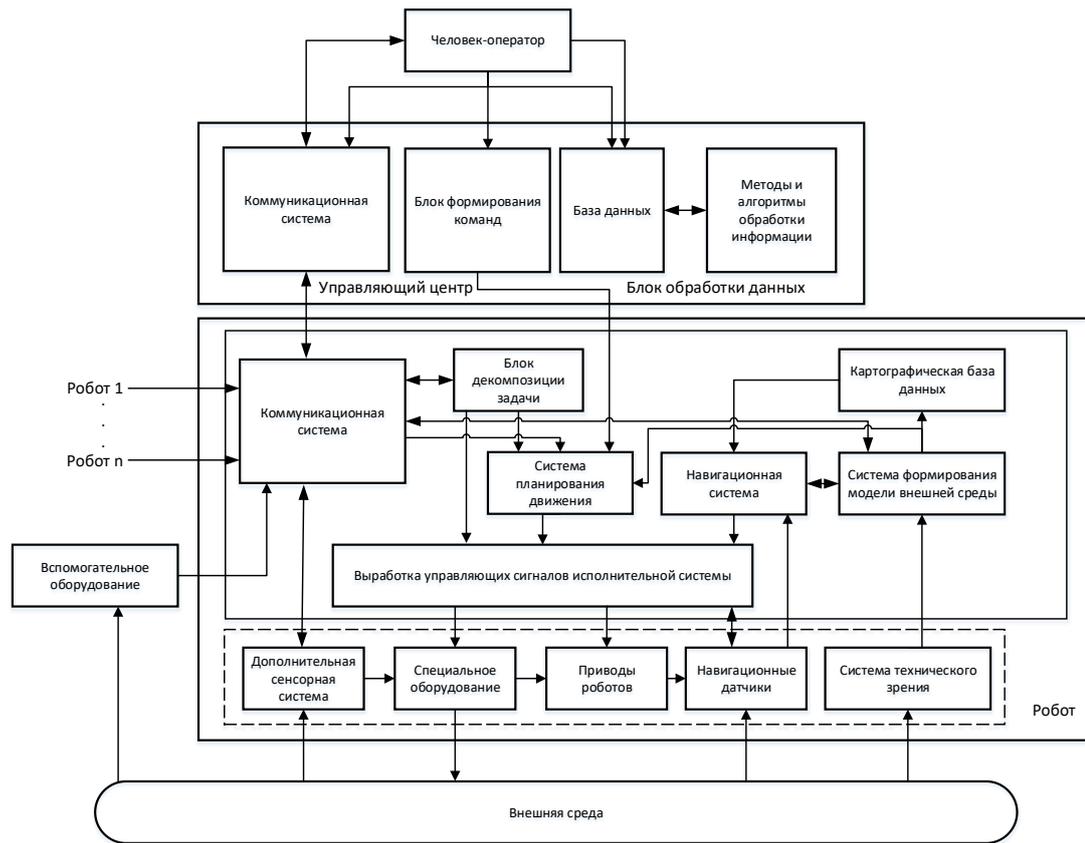


Рисунок 2.26.

Структурная схема взаимодействия элементов МРТС: взаимодействие СУ робота-агента с верхнеуровневым вычислителем

В данной системе человек-оператор определяет обрабатываемую площадь и передает управляющий сигнал о начале обработки ведущему роботу. При условии наличия релевантной информации об обрабатываемой площади в базе данных, управляющий центр заранее планирует траектории глобального перемещения ведущего робота до насаждений и траектории перемещений ведомых роботов до точки распределения. В случае отсутствия релевантной информации об обрабатываемом участке, ведущий робот получает геопозицию предполагаемой точки распределения в междурядье и решает задачу локальной навигации. Построение актуальной карты рабочего пространства происходит с помощью сканирующего лазерного дальномера и телевизионных камер. Не совершая существенного отступления от общности постановки задачи, в рамках

работы предполагается однородность, проходимость и субплоскостность поверхности в месте перемещения РТК.

На следующем шаге работы системы управления ведомые роботы и ведущий робот выходят на точки распределения в междурядьях, автономно распределяются и начинают сбор плодов. По завершению обработки роботами-сборщиками собственных рядов, система управления РТК должна распределить роботов-сборщиков по необработанным рядам. При этом следует предусмотреть возможность обработки ряда несколькими — двумя или больше – роботами.

С учетом вышеперечисленного итоговую архитектуру системы управления группой роботов для сбора плодовых культур в условиях сада интенсивного выращивания представим в виде как на рисунке ниже.

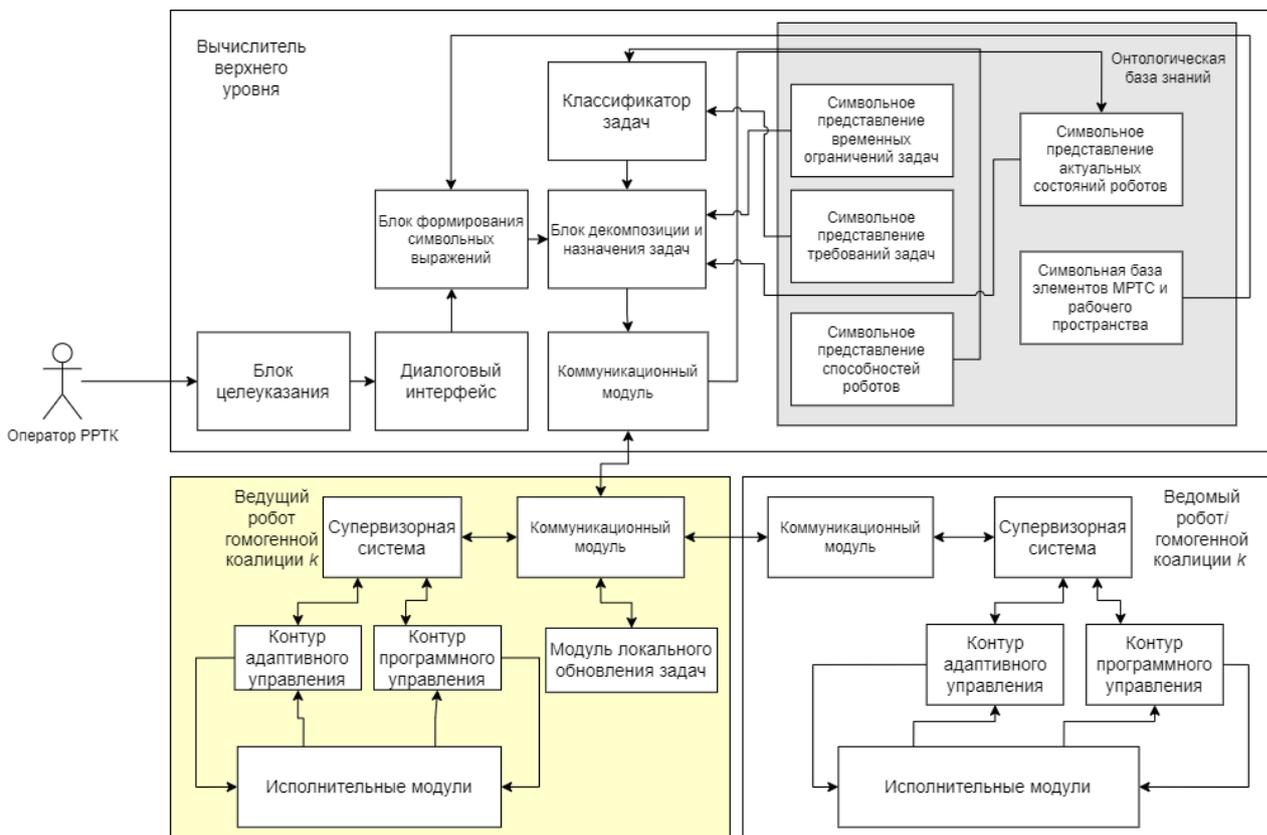


Рисунок 2.27.

Архитектура СУ МРТС для сбора плодовой продукции в условиях сада интенсивного выращивания

Изначальное назначение цели осуществляется оператором распределенного робототехнического комплекса (РРТК). Заметим, что за назначение задач на уровне мультиагентной системы и на уровне гомогенных коалиций в инициальном состоянии системы отвечает блок декомпозиции и назначения задач, работающий с использованием предложенного метода назначения задач. В процессе выполнения за обновление статуса назначенных задач в соответствии с состояниями роботов отвечает ведущий роботов гомогенной коалиции.

Вычислительные эксперименты для анализа параметров работы элементов предложенной архитектуры, в том числе совместной работы онтологии и модуля назначения задач и сравнение предложенного метода назначения задач с методом «аукцион» приведены в соответствующем разделе Главы 4.

2.7. Выводы по Главе 2

В данном разделе определены характеристики МРТС для сборки урожая плодовых культур и определены основные требования к компонентам систем управления роботов-агентов в составе единой мультиагентной системы и формирующие гомогенные подгруппы. Представлен способ описания СХ МРТС, учитывающей состояние отдельно взятого робота-агента.

Показана возможность частичной децентрализации системы управления и реализация гибридной архитектуры системы управления МРТС.

Обоснована целесообразность создания двухконтурной системы управления агентами в составе СХ МРТС с применением гибридных алгоритмов управления формациями гомогенных подгрупп роботов.

Показана целесообразность символьного управления РТК в составе МРТУ на стратегическом уровне и использования онтологии с использующей RDF-триплеты для хранения сущностей.

Продемонстрировано, что онтология системы управления группой роботов тесно связана с распределением задач в системе и проектированием конечных

автоматов для отдельных роботов. Онтология предоставляет необходимые знания и словарный запас для обеспечения эффективной коммуникации и координации между роботами, что необходимо для распределения задач. Онтология также предоставляет информацию, которая может быть использована при проектировании КА для отдельных роботов, что может помочь обеспечить надлежащее поведение роботов в контексте системы. В целом, онтология может способствовать эффективному распределению задач в системе с несколькими роботами, обеспечивая общее понимание задач и роботов, обеспечивая эффективную связь и координацию между роботами и поддерживая интеллектуальное принятие решений.

Реализовано соединение онтологии с алгоритмом распределения задач, что может повысить эффективность и действенность распределения задач в системе с несколькими роботами за счет использования знаний и правил, определенных в онтологии, для облегчения принятия интеллектуальных решений.

Выделены основные классы задач, выполняемых СХ МРТС. Для задач, сводимых к отслеживанию траектории и следованию пути, показана актуальность методов кооперативного управления. Предложены алгоритмы классификации задач назначения классов гомогенным группам, а также оптимальные с точки зрения использования ресурсов алгоритмы распределения задач между роботами внутри гомогенных групп.

Показано, что для оценки динамических характеристик гомогенных групп в составе МРТС как вычислительной сети можно использовать показатель Ляпунова, в том числе для структур с централизованной и федеративной архитектурой. Для оценки динамики самих гомогенных подгрупп роботов, описываемых в виде дифференциальных уравнений использование функции Ляпунова, показывает наличие возможности нахождения решения, поставленной задачи для каждого робота.

В целом, использование онтологии в распределении задач для систем с несколькими роботами может обеспечить несколько преимуществ, включая

лучшую координацию, оптимальное распределение ресурсов и принятие эффективных управленческих решений. Представление знания о предметной области в структурированном и формализованном виде гарантирует, что алгоритм распределения задач учитывает все соответствующие факторы и ограничения и генерирует оптимальные и эффективные решения. Кроме того, обновляя онтологию и матрицу затрат на основе отзывов и опыта, возможно со временем, улучшить производительность и адаптивность системы с несколькими роботами.

ГЛАВА 3. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТА-АГЕНТА НА ПРИМЕРЕ РОБОТА ДЛЯ СБОРА ПЛОДОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Концепция обработки сельскохозяйственного угодья группой роботов подразумевает необходимость формализации состояния внешней среды как в момент работы роботов для навигации и оптимального распределения задач, так и для задачи планирования дальнейших работ [88]. Сады интенсивного производства представляют собой наиболее организованную и структурированную среду относительно угодий плодоовощных культур других типов и, соответственно, воспринимаются, как наиболее подходящими для внедрения технологий безлюдного ухода. Главная отличительная особенность таких садов, обуславливающая их привлекательность в смысле роботизации производственных процессов, заключается в высоком уровне стандартизации структуры основного элемента среды – рядов плодоносящих растений. Соответственно, в случае обработки сада интенсивного выращивания плодов роботами необходимо формализовать положение роботов относительно насаждений в рядах и информацию о задаче, выполняемой каждым роботом.

В рамках данной главы рассмотрено решение задач системой управления конкретного типа робота-агента, функционирование которого предполагается в составе мультиагентной робототехнической системы по сбору плодовых культур. В рамках данной главы и дальнейших разделов рассмотрен частный случай применения средств роботизации плодоовощных культур, а именно РТК для сбора яблок. Совместно с ФГБНУ ФНАЦ ВИМ определены ключевые технико-экономические требования, обеспечивающие рентабельность применения рассматриваемого РТК.

Для автономного управления РТК возникает необходимость восстановления положения каждого отдельного дерева в виртуальной среде-модели сада и, для ряда задач, восстановления положения плодов на деревьях. Данные задачи реализуются отдельными элементами системы технического

зрения с распознаванием ситуации, и требуют разработки специализированных модулей в составе системы управления [88, 89]. В данной главе также предложена реализация отдельных модулей СТЗ для решения задачи автономного управления рассматриваемого РТК.

3.1. Конструкция робота-агента для сбора плодовой продукции

Согласно поставленной задаче роботизации процесса сбора яблок в садах интенсивного производства, предполагается перемещение мобильных роботов на субплоскостной грунтовой твердой поверхности. Учитывая доступные виды шасси и международный и российский опыт реализации РТК для сбора плодоовощных культур, рациональным будет рассмотреть шасси автомобильного типа, как основной тип платформ для мобильных роботов-сборщиков. Предлагаемая схема сбора урожая яблок в интенсивных садах предполагает наличие робота-сборщика, робота для вывоза заполненных контейнеров к месту сортировки/складирования, логистического узла по упаковке и распределению урожая и обслуживающего РТК. Далее рассмотрены основные вопросы реализации системы управления движением робота-сборщика.

Предложенная в главе 1 структура системы управления робота-агента предполагает его реализацию, как устройства, состоящего из мобильной платформы и манипуляционного механизма (манипулятор с захватным устройством). Робот-агент, представленный в виде мобильной-манипуляционной платформы, должен функционировать между рядами насаждений [90].

Основным критерием, определяющим оптимальность функционирования РТК, является минимизация времени сбора плодов, то есть, минимизация длительности цикла «обнаружение плода на посадках - съём плода с посадок – переправка плода в сборочный контейнер – восстановление готовности к

выполнению следующего цикла. Соответственно, ставится задача оптимизации конструктивных решений как с точки зрения обеспечения требуемого экономического эффекта в части стоимости технических решений, так и обеспечения сопоставимых или позволяющих превзойти человека по эффективности технических характеристик.

3.1.1. Требования к конструкции робота-агента для сбора плодов

Архитектура системы управления движением должна формироваться с учетом необходимости нахождения большего количества плодов для заданного положения робота в ряду насаждений в пределах рабочей зоны манипулятора. Таки образом для оптимизации времени работы робота при сборе сбора необходимо решить задачи определения положения ряда и деревьев относительно транспортной платформы и определения расположения плодов на деревьях в ближайшем секторе рабочего пространства. Также управление движением манипулятора определяется допустимым усилием воздействия захватного устройства на плод, способом отделения плода от посадок и отгрузки плода в контейнер.

Основные параметры, формирующие требования к конструкции робота-агента для сбора плодов определяются общими технико-экономическими требованиями к самому процессу. Таким образом основными критериями при проектировании конструкции являются необходимость минимизации времени сбора, упрощение и удешевление конструкции за счет минимизации количества степеней подвижности. При этом необходимо учитывать возможную многофункциональность – предусмотреть возможность выполнения дополнительных технологических операций, например нанесения препаратов или прореживания соцветий. Тип шасси платформы робота-агента также определяется экономической целесообразностью роботизации существующей техники, легкостью ввода в эксплуатацию, сложностью управления и обслуживания.

Рассмотрим задачу управления движением робота-агента для сбора плодов для конкретной конструкции, а именно мобильную манипуляционную платформу реализованную на базе ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ». Функционирование данной мобильной манипуляционной платформы предполагается в саду интенсивного выращивания яблок. Параметры рабочей зоны и ограничений робототехнической платформы, представлены на рисунке ниже (Рисунок 3.1.).

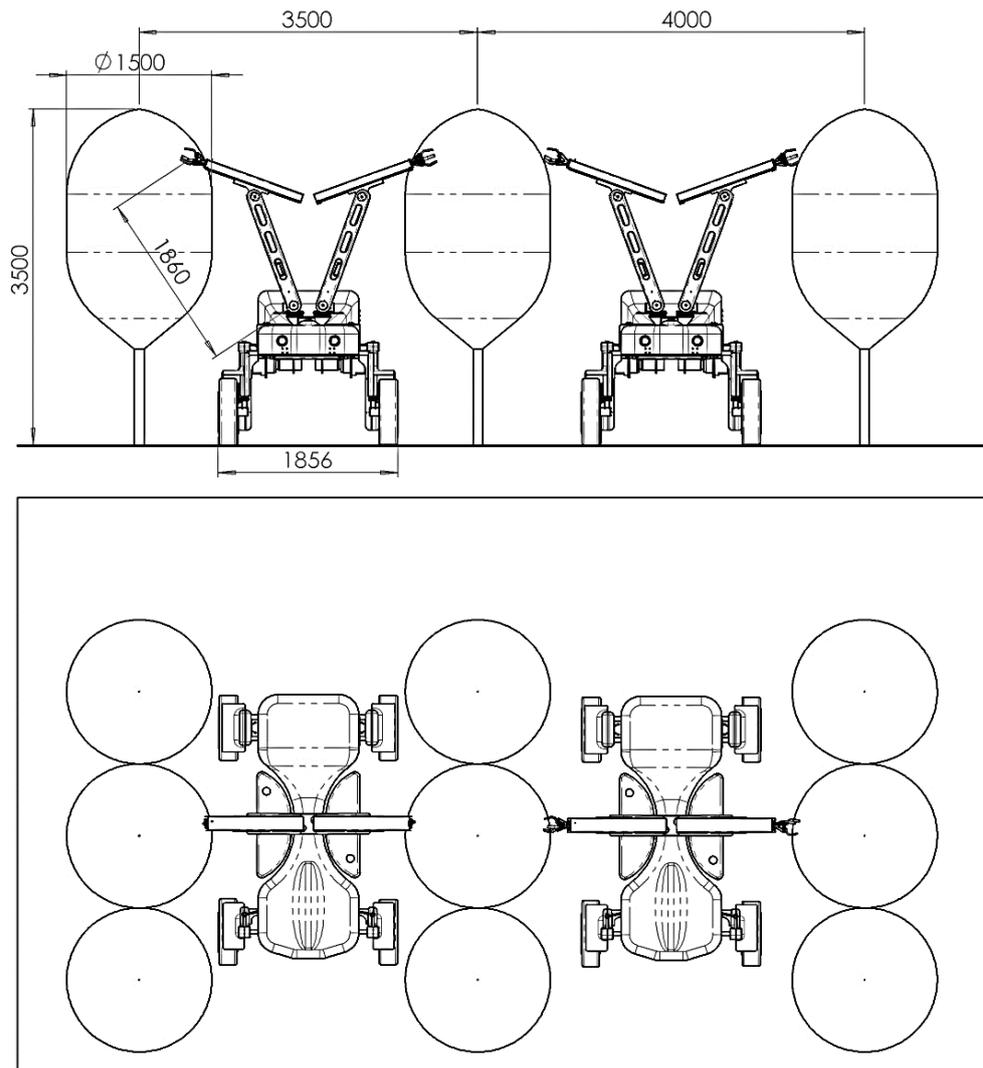


Рисунок 3.1.

Схема работа по сбору яблок, реализованного на базе ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ».

Конструкция данного робота спроектирована с учетом следующих параметров:

- Объем рабочей зоны;
- Форма рабочей зоны;
- Требования к манипулятивности;
- Требования к зонам сервиса;
- Требования к дискретности/непрерывности движения;

Выявлены следующие требования к манипулятивности и зоне сервиса определяемые пространством интенсивного сада для данного работа:

- Манипулятор должен осуществлять захват плода в пределах рабочей зоны (п.1) на поверхности кроны и в глубине кроны не более 0,15 м.
- Точность позиционирования манипулятора относительно плода должна быть 0,01–0,02 м.
- Манипулятор не должен производить обходных и наклонных движений в зависимости от расположения плода или ветвей;
- Манипулятор должен при захвате плода осуществлять поворотные движения схвата манипулятора на 45 градусов.

Параметры рабочей зоны манипулятора определяются необходимостью работы в зоне плоской кроны дерева с размерами:

- по вертикали от почвы от 1 до 3,5 м.
- по горизонту 1,5 м.

Массогабаритные и иные характеристики роботизированного манипулятора и мобильного шасси:

- Общая масса манипулятора - 45 кг.
- Масса поднимаемого груза на полном вылете плеча -2 кг.
- Расстояние полного вылета верхнего плеча – 650 мм.
- Расстояние полного вылета верхнего и нижнего плеч 2100мм.
- Количество степеней подвижности манипулятора – 4;
- Тип шасси – автомобильное;
- Типы сочленений – призматические и шарнирные;

- Скорость перемещения фланца – до 0,4 м/с.

3.2. Управление мобильной платформой робота-агента для сбора плодовой продукции

3.2.1. Конструкция мобильной платформы робота-агента

Конструкция шасси рассматриваемого робота реализована по автомобильной схеме.



Рисунок 3.2.

Внешний вид мобильной платформой

Роботизированный манипулятор устанавливается на мобильную роботизированную платформу с независимой энергоустановкой-бензогенератором мощностью 5 кВт. На платформу установлена сенсорная часть СТЗ для позиционирования шасси в пространстве (сканирующий лазерный дальномер), дополнительно для определения положения деревьев используется телевизионный канал RGBD-камеры, расположенного на захвате роботизированного манипулятора относительно кроны дерева. Движение в междурядьях осуществляется позиционно. Платформа движется с рабочей скоростью 1,5-2 км/ч, затем останавливается напротив яблони, после захвата плода манипулятор должен опустить плод в канал для дальнейшей транспортировки плода в контейнер.

3.2.2. Кинематика мобильного шасси робота-агента

Возьмем структуру шасси автомобильного типа для мобильного робота как основную и составим общую кинематическую модель (Рисунок 3.3).

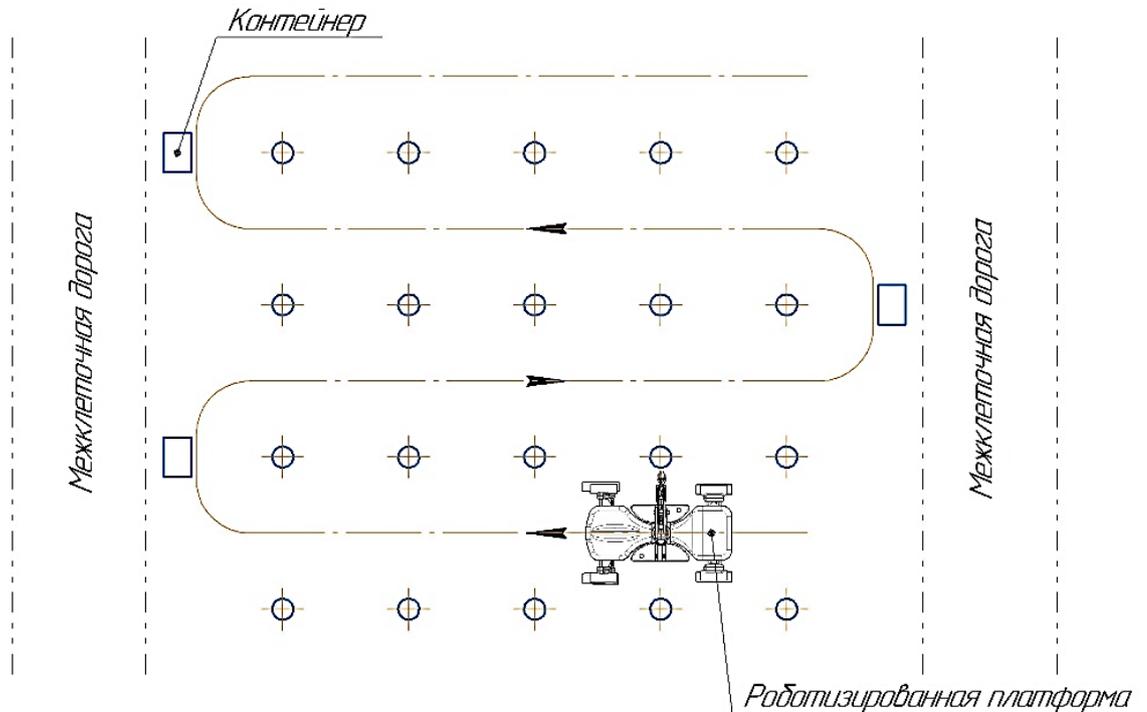


Рисунок 3.3.

Схема движения робота

С целью упрощения будем предполагать, что мобильный робот состоит из не деформируемой платформы и не деформируемых колес (Рисунок 3.4). Предполагается, что колеса находятся в точечном контакте с поверхностью и из-за этого движутся без проскальзывания. Похожий способ движения вдоль траектории рассматривался в работах [91] и [92].

Кинематическую схему шасси ММП будем описывать по четырехколесной схеме с управляемыми передними колесами – Рисунок 4.3.

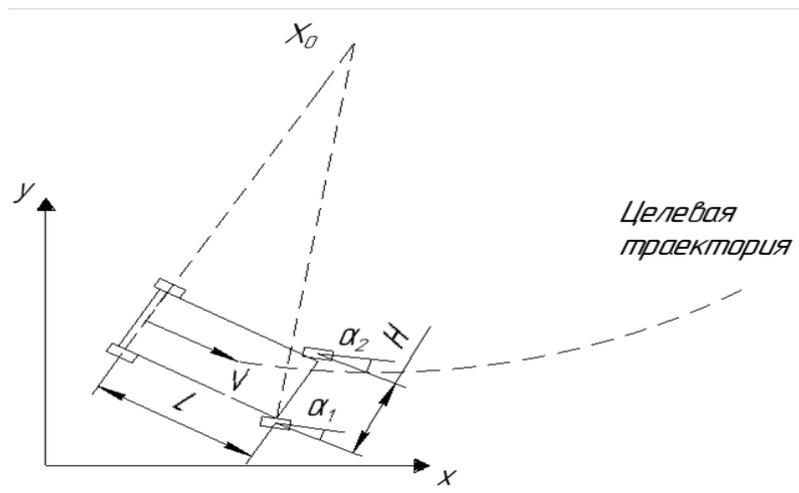


Рисунок 3.4.

Кинематическая схема шасси робота-агента

Решение задачи вывода четырехколесного робота с управляемыми передними колесами на заданную траекторию и стабилизация движения вдоль траектории сведем к стандартной задаче о равновесии нулевой точки (см. Приложение). На основании решения данной задачи выведем закон управления.

3.3. Управление манипулятором робота-агента для сбора плодов

Решения задачи навигации объекта управления в пространстве, требует решения следующих задач: картографирование (построение, обновление, уточнение модели (карты) местности), локализация (привязка объекта управления к имеющейся карте) и планирование траектории.

3.3.1. Конструкция манипулятора в составе робота-агента

Требования к компонентной базе манипулятора:

- для аппаратной реализации системы управления необходимо добиваться быстродействия, необходимого для решения поставленных задач в реальном времени, с одной стороны, и стремиться к надежной, компактной, экономной в потреблении энергии системе, с другой стороны.

- конструкция блока управления и приводов должна соответствовать степени защиты не менее IP65, в системе не должно возникать перегрузок,

вызванных передачей значительного объема данных, устойчивая передача сигналов, электробезопасность и энергоэффективность.

- электропитание системы управления и приводов манипулятора автономное от аккумуляторных батарей;

- эксплуатация системы должна осуществляться автономно после включения;

- все данные при авариях, потере питания должны сохраняться на информационные носители.

- система должна функционировать в условиях воздействия радиопомех, электрических, магнитных и электромагнитных полей.

- с точки зрения воздействия на смежные системы, система не должна шуметь, не излучать и т.д.

Сформированным требованиям удовлетворяет реализованный ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ» манипуляционный механизм (Рисунок 3.5). Задача реализации систему управления данным манипулятором была решена совместно в рамках данной работы.

Манипулятор состоит из 3 подвижных звеньев и поворотного стана. Привод поворотного стана осуществляется через зубчатую передачу и шаговый электродвигатель. Шаговый электродвигатель оснащен датчиком обратной связи - магнитный датчик углового перемещения. Конструкция плеч манипулятора состоит из алюминиевых профилей, сваренных в единые балки.

Наклон и перемещения плеч манипулятора осуществляется посредством актуаторов, с обратной связью от встроенных датчиков линейного перемещения

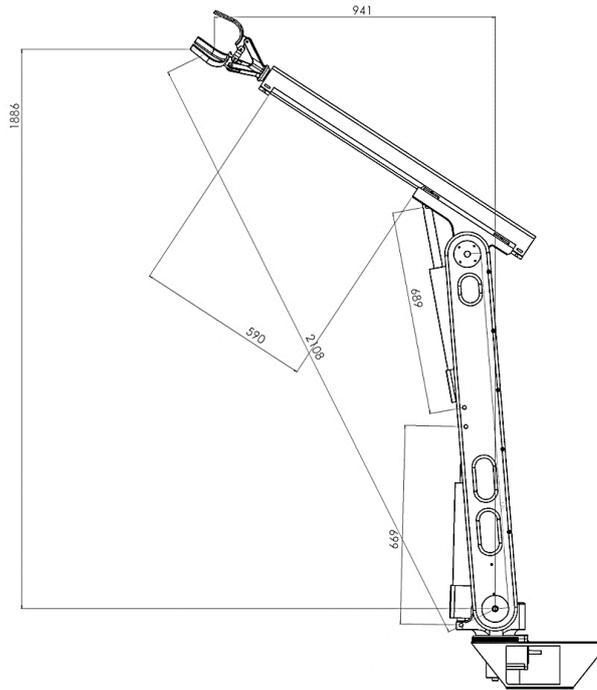


Рисунок 3.5.

Общий вид манипулятора с габаритами

Захватывающее устройство (схват манипулятора) трехпалого типа выполнено из полимерных материалов. Открытие и закрытие схвата происходит с помощью встроенного в его конструкцию актуатора. Там же (внутри устройства) будет установлена камера для точного позиционирования схвата относительно плодов на кроне дерева. После полного закрытия схвата осуществляется поворот схвата вокруг своей оси посредством синхронного двигателя постоянного тока.

Перечень приводов звеньев манипулятора с характеристиками представлен ниже (Рисунок 3.6) и в Приложении в Таблицах 13 и 14.

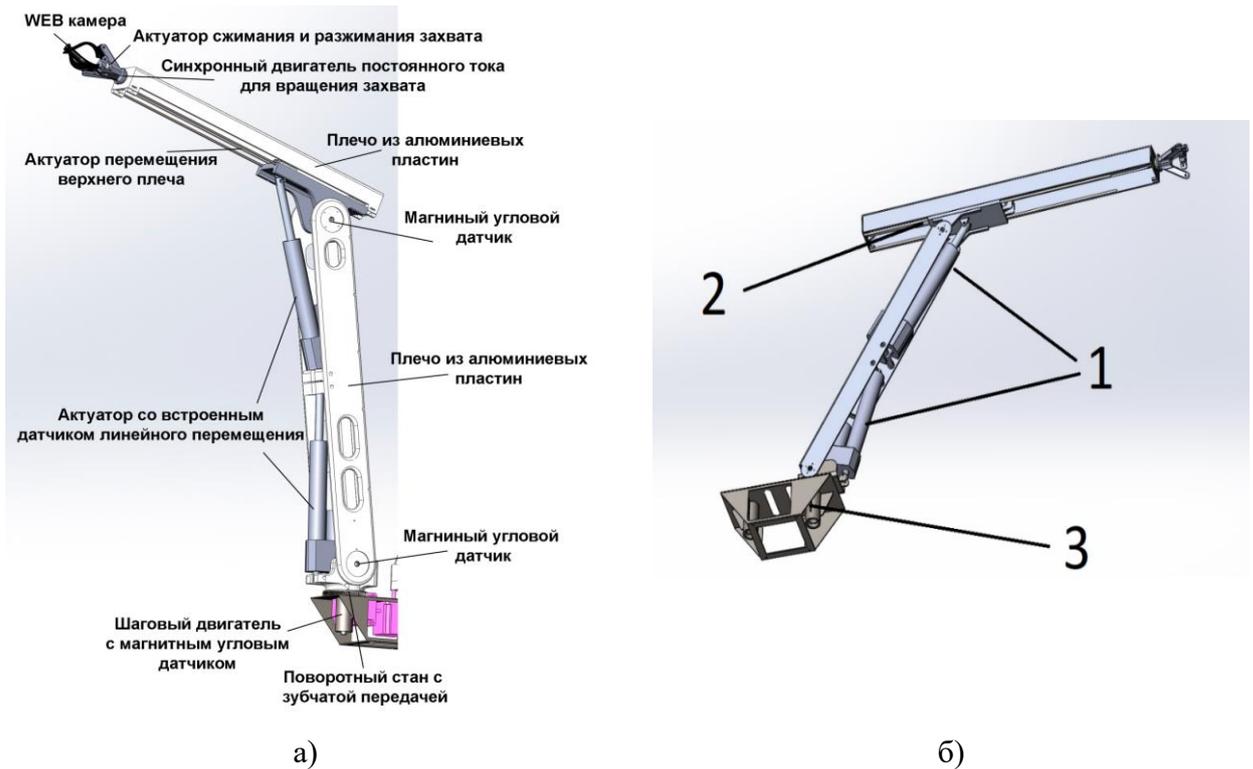


Рисунок 3.6.

а) – компоненты манипулятора для сбора плодов; б) – приводы робота

Все линейные актуаторы имеют влагозащищенный корпус и обратную связь от встроенного линейного потенциометра. Актуаторы приведены коллекторными двигателями постоянного тока. Управление актуаторами осуществляется широтно-импульсной модуляцией с помощью драйвера для двигателей постоянного тока.

3.3.2. Кинематическая схема манипулятора робота-агента

Кинематическая схема манипуляционного механизма в составе РТК, разработанного ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ» представлена на рисунке ниже – Рисунок 4.4.

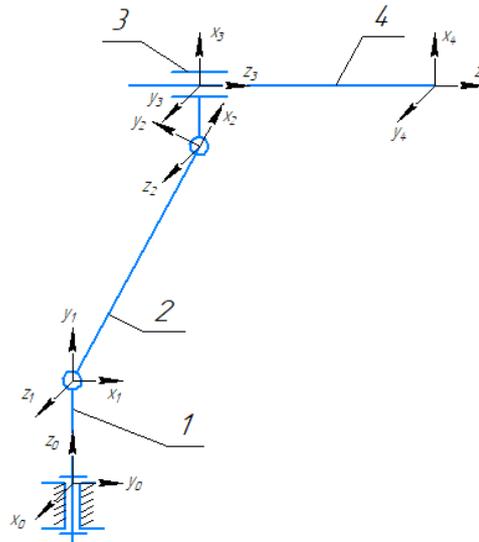


Рисунок 3.7.

Кинематическая схема манипулятора

Границы рабочего пространства манипуляционного механизма, определенные через решение прямой и обратной задачи о позиционировании [93] (см. Приложение) являются критерием для построения траектории движения мобильной платформы.

3.3.3. Разгон и торможение приводов манипулятора робота-агента

В рамках реализации управляющего ПО манипулятора, после решения обратной задачи кинематики, зная текущее и заданное положение манипулятора в виде массивов обобщенных координат $[q_1, \dots, q_4]$ и $[q_1^*, \dots, q_4^*]$ соответственно, рассчитывается законы движения приводов каждой степени подвижности.

Для каждого привода закон движения рассчитывается в виде:

$$q_i(t) = \frac{a_i}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(t \cdot \frac{\pi}{T}\right)\right) \quad (4.1)$$

Где $a_i = q_i^* - q_i$, а T – время движения привода.

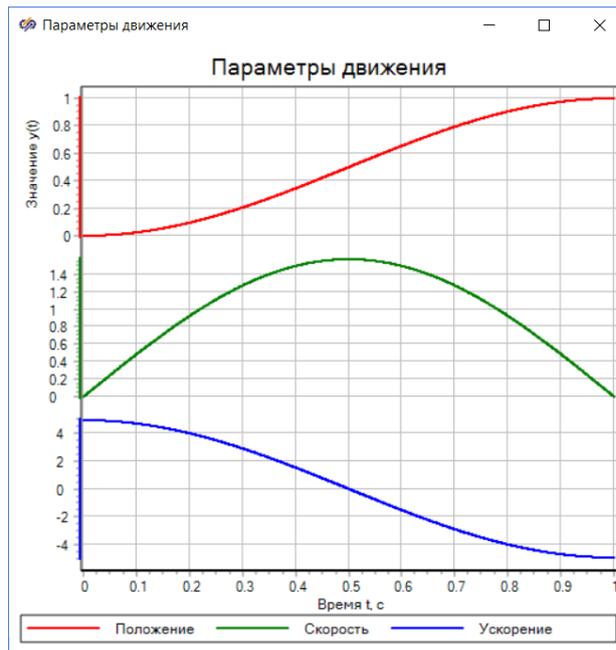


Рисунок 3.8.

Сглаживание движения привода манипулятора

Задача состоит в том, чтобы обеспечить совместное движение всех приводов, то есть, найти такое минимальное время движения, при котором максимальные скорости и ускорения каждого привода будут удовлетворять допустимым значениям.

Максимальная скорость движения:

$$v_{max} = \frac{a_i \cdot \pi}{2 \cdot T} \quad (4.2)$$

Минимальное время движения, при котором скорость движения не будет превышать допустимую:

$$T_v = \frac{a_i \cdot \pi}{2 \cdot v_{доп}} \quad (4.3)$$

Где $v_{доп}$ – максимально допустимая скорость движения привода.

Максимальное ускорение движения:

$$a_{max} = \frac{a_i \cdot \pi^2}{2 \cdot T^2} \quad (4.4)$$

Минимальное время движения, при котором ускорение движения не будет превышать допустимое:

$$T_a = \sqrt{\frac{a_i \cdot \pi^2}{2 \cdot a_{\text{доп}}}} \quad (4.5)$$

Где $a_{\text{доп}}$ – максимально допустимое ускорение движения привода.

Чтобы закон управления приводом одновременно удовлетворял допустимой скорости и ускорению, за допустимое время движения выбирается максимальное из T_v и T_a .

После определения значений допустимого времени движения каждого привода определяется самое большое из них. Оно принимается за время движения всего манипулятора, то есть, время движения всех приводов будет совпадать и равняться наибольшему допустимому времени движения среди них.

3.3.4. Динамика манипуляционного механизма

Чтобы решить задачу планирования траектории с обратной динамикой и адаптивным силовым захватом, необходимо выполнить следующие шаги:

- Задать параметры ДХ для манипулятора;
- Определить начальную и конечную конфигурации манипулятора по желаемым положениям фланца по информации системы технического зрения;
- Вычислить желаемую траекторию, используя алгоритм планирования траектории, такой как кубические сплайны или пятичленные полиномы;
- Вычислить обобщенные крутящие моменты и силы, необходимые для достижения желаемой траектории с помощью обратных уравнений динамики;
- Вычислить силу захвата, необходимую для захвата объекта, используя модель захвата с адаптивной силой;
- Реализовать алгоритм управления в симуляции или на реальной системе;

- Реализовать систему слежения – обратную связь от системы для корректировки параметров управления.
- Оценить производительность системы, сравнив фактическую траекторию и силу захвата с желаемой траекторией и силой захвата.

Для решения обратной задачи динамики мы воспользовались уравнениями Лагранжа 2 рода, записанными в приближении идеальности всех связей, наложенных на движение звеньев механизма. Связи между звеньями приняты голономными, т. е. уравнения связей дифференциальные и интегрируемые. При идеальности связей, что означает пренебрежение люфтами и зазорами в сочленениях подвижных элементов конструкции манипулятора, требование интегрируемости уравнений связей конструкции манипулятора представляется корректным. Также, вполне корректным мы считаем требование ничтожности влияния люфтов и зазоров в сочленениях звеньев манипулятора на кинематические и динамические свойства манипулятора.

При сделанных предположениях можно записать уравнения Лагранжа 2 рода для манипулятора с N степенями подвижности следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_1} = Q_i \quad (4.6)$$

K – кинетическая энергия системы N твердых тел, Q_i – обобщенная сила, приведенная к обобщенной координате q .

Обобщенные силы определяют исходя из того, что элементарную работу всех действующих сил можно представить в виде соотношения:

$$\delta A = \sum_{j=1}^N Q_j \delta q_j \quad (4.7)$$

Кинетическую энергию системы твердых тел определяют, как:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^n \text{tr } m_v v_v v_v^T \quad (4.8)$$

Для вычисления скоростей v_v удобно воспользоваться однородными координатами, тогда:

$$K = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^n \text{tr } m_v \dot{T} \rho_v \rho_v^T \dot{T}^T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \text{tr} (\dot{T}_i H_i \dot{T}_i^T) \quad (4.9)$$

H_i – матрица инерции твердого тела.

Например, для твердого тела относительно системы координат с началом в центре масс $H = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}$

T_i – матрица перехода от системы координат, связанной с i звеном.

$$\dot{T}_i = \sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j \quad (4.10)$$

$$U_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial q_j} \quad (4.11)$$

$$U_{jkm} = \frac{\partial U_{jk}}{\partial q_m} = \frac{\partial^2 T_j}{\partial q_k \partial q_m}, U_{jkm} = U_{jmk} \quad (4.12)$$

После вычисления производных $\frac{\partial K}{\partial q_1}$, $\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_1}$ и преобразований, уравнение динамики манипулятора принимает компактный вид:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (4.13)$$

$M(q)$ – симметрическая матрица $N \times N$, определяющая инерционные свойства манипуляционного механизма. При этом:

$$M_{ij} = \sum_{j=\max(i,k)}^N \text{tr} (U_{jk} H_j U_{ji}^T) \quad (4.14)$$

$C(q, \dot{q})$ – вектор $N \times 1$, характеризующий кориолисовы силы и центробежные силы, действующие на звенья механизма. Каждая компонента этого вектора представляет собой квадратичную форму относительно обобщенных скоростей.

$$c_i = \sum_{j=\max(i,k,m)}^N \sum_{j=\max(i,k,m)}^N c_{ikm} q'_k q'_m \quad (4.15)$$

$$c_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^N \text{tr} (U_{jkm} H_j U_{ji}^T) \quad (4.16)$$

$G(q)$ – вектор $N \times 1$, который учитывает внешние силы и моменты, действующие на механизм. В частности, если на звенья действуют только силы веса, то компоненты этого вектора равны:

$$G_i = - \sum_{j=1}^N m_j g'^T U_{ji} \rho_j \quad (4.17)$$

μ – моменты или силы в приводах.

Таким образом уравнение $M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau$ представляет собой уравнение движения N -звенного манипулятора, на который действуют силы или моменты, приложенные в сочленениях, а также силы веса звеньев.

Обратная динамика манипулятора робота-сборщика яблок включает в себя не только расчет крутящих моментов в шарнирах звеньев манипулятора, необходимых для достижения желаемой траектории рабочего органа (в данном случае схвата, который отделяет плоды от посадок). Динамический аспект проблемы захвата плода включает в себя определение сил, необходимых для удержания плода во время его захвата и требует планирования траектории движения схвата.

Решение задачи планирования траектории движения схвата обеспечивает желаемую динамику значений угла поворота шарнира $q_{des}(t)$, которую можно использовать для вычисления крутящих моментов в шарнирах сочленений звеньев манипулятора, необходимых для достижения желаемой траектории конечного рабочего органа и удерживания плода.

Пусть как указано выше $q(t)$ — вектор углов шарниров в момент времени t , дополнительно укажем что $q_{des}(t)$ — искомое значение углов шарниров, а q_0 — начальные углы шарниров, m — масса рабочего органа, в явном виде выделим $f_{ext}(t)$ — внешнюю силу, действующая на рабочий орган, $J(q(t))$ — матрица

Якоби. С учетом этих обозначений обратная задача динамики, для манипулятора осуществляющего захват яблока может быть записана как:

$$\begin{aligned} \tau(t) = & M(q(t))\ddot{q}(t) + C(q(t), \dot{q}(t))\dot{q}(t) + G(q(t)) \\ & + J^T(q(t))f_{ext}(t) \end{aligned} \quad (4.18)$$

где $\tau(t)$ — вектор обобщённых моментов в шарнирах. Сила $f_{ext}(t)$, приложенная к захвату, необходимая для удержания яблока, может быть вычислена с помощью адаптивного управления силой:

$$f_{ext}(t) = -k_p \Delta x(t) - k_d \dot{\Delta x}(t) + f_0 \quad (4.19)$$

где $\Delta x(t)$ — отклонение рабочего органа от заданного положения, k_p и k_d — пропорциональное и производное усиление соответственно (зависят от массы и момента инерции нагрузки), а f_0 — номинальное усилие захвата (усилие, возникающее из-за собственного веса и момента инерции).

Чтобы решить задачу планирования, необходимо указать желаемое положение рабочего органа и внешние силы. Обобщенные крутящие моменты шарниров и сила захвата могут быть рассчитаны на каждом временном шаге для управления роботом и сбора яблок. Матрица инерций звеньев манипулятора, силы Кориолиса и центробежные силы, а также вектор гравитации могут быть вычислены на основе физических параметров робота и углов суставов. Матрица Якоби связывает скорость конечного рабочего органа со скоростями суставов и может быть рассчитана с использованием кинематики робота. Наконец, обобщённые крутящие моменты, необходимые для достижения желаемой траектории и удержания яблока, могут быть вычислены с использованием уравнения обратной динамики.

Задачу планирования траектории тогда можно сформулировать следующим образом:

$$\min_{q_{des}(t)} \int_0^T |q_{des}(t) - q_0|^2 dt \quad (4.20)$$

Как сказано выше обобщенные крутящие моменты, и сила захвата могут быть рассчитаны на каждом временном шаге для управления роботом и сбора

яблок. Одним из способов расчета крутящих моментов в суставах является использование схемы численного интегрирования, такой как метод Эйлера или метод Рунге-Кутты, для решения обратного уравнения динамики. Усилие захвата может быть обновлено на основе отклонения положения рабочего органа от желаемого положения и текущего усилия захвата.

Подводя итог, объединенную задачу планирования траектории, обратной динамики и адаптивного управления силой для робота-сборщика яблок можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_{q_{des}(t)} \int_0^T |q_{des}(t) - q_0|^2 dt, \quad \text{при условии:} \\ q_{des}''(t) = \frac{1}{m} F_{des}(t) - \frac{1}{m} J^T(q(t)) f_{ext}(t) - D(q(t)) \dot{q}(t) \\ - \Gamma(q(t)) q(t), \\ q(0) = q_0, \\ \dot{q}(0) = 0, \\ q(T) = q_f, \\ \dot{q}(T) = 0, \\ f_{ext}(t) = -k_p \Delta x(t) - k_d \dot{\Delta x}(t) + f_0, \\ \tau(t) = M(q(t)) \ddot{q}(t) + C(q(t), \dot{q}(t)) \dot{q}(t) + G(q(t)) \\ + J^T(q(t)) f_{ext}(t) \end{aligned} \tag{4.21}$$

Где q_f — целевые значения обобщенных координат, $D(q(t))$ — матрица демпфирования, $\Gamma(q(t))$ — матрица компенсации гравитации, $F_{des}(t)$ — желаемое значение усилий на траектории, $\Delta x(t) = x(t) - x_{des}(t)$ — отклонение положения рабочего органа от заданного положения $x(t)$ — текущее положение рабочего органа, и $x_{des}(t)$ — желаемое положение рабочего органа. Эта проблема может быть решена с помощью численных методов оптимизации, таких как градиентный спуск или нелинейное программирование, для получения оптимальной траектории угла соединения и силы захвата для робота-сборщика яблок.

Чтобы манипулятор мог захватывать объекты разных форм и размеров, необходимо использование захват с адаптивной силой. Это означает, что усилие, прилагаемое захватом, регулируется в зависимости от захватываемого объекта. Смоделируем захват с адаптивной силой следующим образом:

$$F_g = k_p(d_{ref} - d) + k_v(\dot{d}_{ref} - \dot{d}) \quad (4.22)$$

где F_g — сила захвата, d_{ref} — желаемое расстояние между пальцами захвата, d — фактическое расстояние между пальцами захвата, \dot{d}_{ref} — желаемая скорость пальцев, \dot{d} — фактическая скорость пальцев, k_p — пропорциональный коэффициент усиления (по положению), а k_v — производный коэффициент усиления (по скорости).

Таким образом, обратную динамику и захват с адаптивной силой можно использовать для решения задач планирования траектории для манипуляторов с несколькими степенями свободы и захватов разных форм и размеров. Параметры ДН можно использовать для описания кинематических свойств манипулятора, а уравнения обратной динамики и модель захвата с адаптивной силой можно использовать для расчета крутящих моментов в суставах и силы захвата, необходимых для достижения желаемой траектории и захвата объекта. В экспериментальной части показан алгоритм управления, реализованный в симуляции и в реальной системе, и оценена производительность путем отслеживания обратной связи от системы.

Для заданной кинематической схемы реализуем модель, для учета динамики движения.

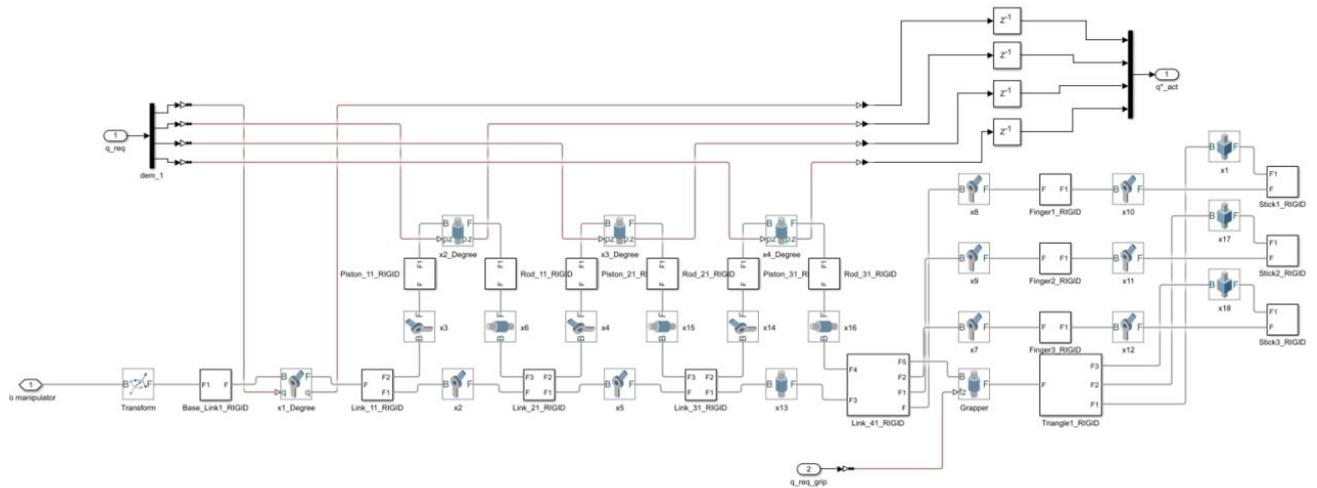


Рисунок 3.9.

Модель манипулятора, реализованная в среде Simulink

В кинематическую модель был добавлен блок JointSpaceMotionModel, выполняющий задачу моделирования динамики манипулятора. В общем виде его структура представлена на рисунке ниже.

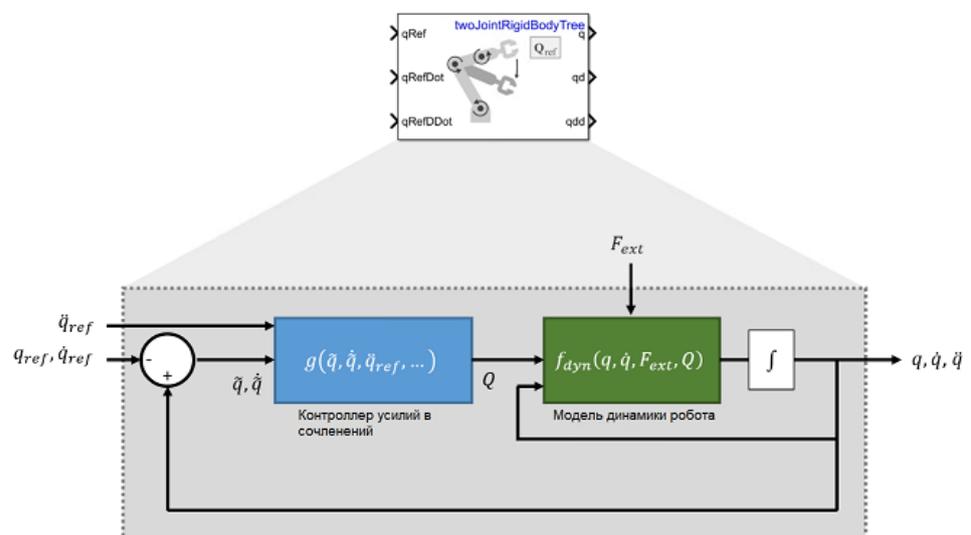


Рисунок 3.10.

Структура блока JointSpaceMotionModel

На вход блока поступают векторы желаемых обобщенных координат робота q_{ref} , а также векторы желаемых скоростей и ускорений по обобщенным координатам \dot{q}_{ref} , \ddot{q}_{ref} . Также опционально задается матрица F_{ext} , которая описывает внешние усилия, действующие на манипулятор. Вектор g , используемый для вычисления влияния сил тяжести, задается как параметр дерева манипулятора, поэтому в матрице F_{ext} они не учитываются. На выходе блока снимаются законы изменения положений, скоростей и ускорений в сочленениях.

В данной работе использовалась модель с ПД – регулятором. Ее модель представлена на рисунке ниже.

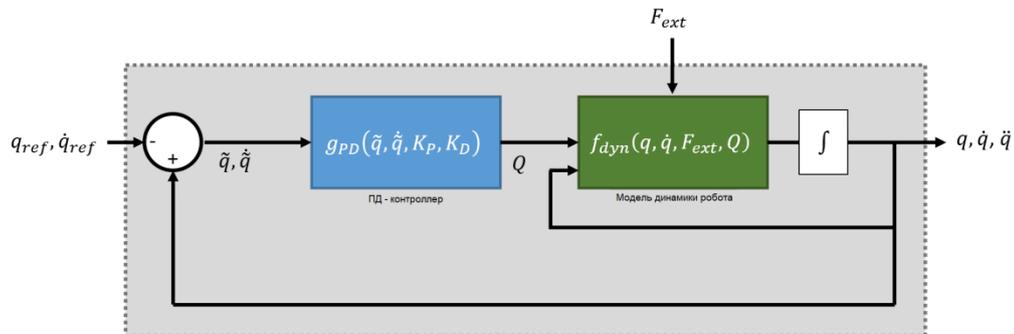


Рисунок 3.11.

Структура блока JointSpaceMotionModel с ПД-контроллером

Схема по сравнению с исходной несколько упрощена, так как учитываются только векторы желаемого положения и скорости. В качестве регулятора усилия используется ПД – регулятор. Вектор усилий Q вычисляется следующим образом:

$$Q = -k_p(q - q_{ref}) - k_d(\dot{q} - \dot{q}_{ref}) + G(q)$$

где k_p – П - коэффициент, k_d – Д - коэффициент, $G(q)$ – вектор усилий, компенсирующих действие сил тяжести.

Далее решается прямая задача динамики, согласно дифференциальным уравнениям представленным выше.

Для решения дифференциального уравнения используется решатель ode15s, основанный на методе Гира. Формула Гира имеет следующий вид:

$$\bar{V}_{k+1} = -\frac{1}{h} \sum_{j=0}^p a_j \bar{V}_{k-j+1}$$

где \bar{V}_{k+1} – вектор фазовых координат ДУ на $k + 1$ шаге, h – шаг интегрирования, a_j – коэффициент, подбираемый из требований точности и устойчивости аппроксимации, p – порядок метода. В решателе используются формулы порядков с 1 по 5.

3.3.5. Планирование срыва плода

Выполняемый роботом-агентом функционал обуславливает геометрические ограничения, накладываемые на управление движением. Рассмотрим ограничения, накладываемые на манипулятора в составе робота-агента при выполнении задачи сбора плодовой продукции. Применение конструкции захватного устройства, предложенного ФНАЦ «ВИМ», обусловлено возможностью гарантировать срыв плода без необходимости управления захватным устройством с использованием прецизионных силомоментных датчиков. Однако конструкция захватного устройства для отрыва плода накладывает ограничение на траекторию движения манипулятора. Для срыва плода захватное устройство с разомкнутыми пальцами необходимо подвести к точке предварительного позиционирования (*далее точка предзахвата*). От точки предзахвата манипулятор должен двигаться линейно в сторону плода пока основание захватного устройства не окажется на достаточном расстоянии для замыкания плода в захвате. Далее захватное устройство должно замкнуться и обратным линейным движением осуществляется отрыв плода от плодовой ветки.



Рисунок 3.12.

Расположение систем координат для планирования траектории движения

Положение захвата зададим точкой $C = (x_c, y_c, z_c)$ в базовой системе координат манипулятора, положение центра яблока зададим точкой $A = (x_a, y_a, z_a)$ в базовой системе координат манипулятора. Линия от C к A задается выражением $L(p): A + t(C - A)$, $0 \leq p \leq 1$. Зададим сферу радиуса r , как геометрическое место точек равноудаленных от центра плода на расстоянии достаточном, чтобы быть точками предзахвата. Тогда линия от C к A пересекает данную сферу, когда $|L(p)| = r$ или когда $D = A - C$. Получим условие принадлежности точки на сфере радиуса r , и точек A и C одной прямой:

$$r^2 = |C + pD|^2 = |C|^2 + 2pC \cdot D + t^2|D|^2 \quad (4.23)$$

или

$$p^2|D|^2 + |C|^2 + 2pC \cdot D - r^2 = 0; \quad (4.24)$$

$$p = \frac{-2C \cdot D \pm \sqrt{d}}{2|D|^2}, \quad (4.25)$$

где

$$\begin{aligned} d &= (2C \cdot D)^2 - 4|D|^2(|C|^2 - r^2) \\ &= 4((C \cdot D)^2 - |D|^2(|C|^2 - r^2)). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Таким образом

$$p = \frac{-C \cdot D \pm \sqrt{((C \cdot D)^2 - |D|^2(|C|^2 - r^2))}}{|D|^2}, \quad (4.27)$$

$$L(p) = C + Dp = C + D^* (-C \cdot D^* \pm \sqrt{(C \cdot D^*)^2 - (|C|^2 - r^2)}), \quad (4.28)$$

$$\text{где } D^* = \frac{D}{|D|}.$$

В трехмерной системе координат

$$L = \left(x_a + r \frac{(x_c - x_a)}{|D|}, y_a + r \frac{(y_c - y_a)}{|D|}, z_a + r \frac{(z_c - z_a)}{|D|} \right) = (x_L, y_L, z_L) \quad (4.29)$$

В точке предзахвата фланец манипулятора должен быть направлен в сторону центра плода, для вычисления необходимого значения положения зададим вектор от точки пред захвата до центра плода:

$$\vec{LC} = \begin{pmatrix} x_a - x_L \\ y_a - y_L \\ z_a - z_L \end{pmatrix}; \quad (4.30)$$

Найдем требуемые углы ориентации схвата манипулятора через направляющие косинусы вектора \vec{LC} :

$$\begin{aligned} \alpha_{LC} &= \arccos \left(\frac{x_a - x_L}{|LC|} \right); \\ \beta_{LC} &= \arccos \left(\frac{y_a - y_L}{|LC|} \right); \\ \gamma_{LC} &= \arccos \left(\frac{z_a - z_L}{|LC|} \right); \end{aligned} \quad (4.31)$$

Аналогичным образом производится расчет требуемого положения и ориентации схвата для точки отгрузки плода $U(x_U, y_U, z_U, \alpha_U, \beta_U, \gamma_U)$.

Таким образом для срыва плода необходимо осуществлять управление манипулятором с прохождением точек $C \rightarrow L \rightarrow A \rightarrow U$.

При перемещении от точки L к точке A до момента срыва плода необходимо сохранение ориентации схвата $(\alpha_{LC}, \beta_{LC}, \gamma_{LC})$.

<i>Алгоритм состояния «Срыв_плода»</i>
<i>Вход: Текущее значение вектора обобщённых координат $\overline{Q^*}$, значение положения плода $A(x_a, y_a, z_a)$, $U(x_u, y_u, z_u)$</i>
<p><i>если Принадлежит_рабочей_зоне (x_a, y_a, z_a) тогда</i></p> <p><i>$(x_L, y_L, z_L, \alpha_{LC}, \beta_{LC}, \gamma_{LC}) = \text{Расчет_точки_предзахвата}(x_a, y_a, z_a, \overline{Q^*})$</i></p> <p><i>Движение_к_точке $(x_L, y_L, z_L, \alpha_{LC}, \beta_{LC}, \gamma_{LC}, V_L = 0)$</i></p> <p><i>Движение_к_точке $(x_A, y_A, z_A, \alpha_{LC}, \beta_{LC}, \gamma_{LC}, V_A = 0)$</i></p> <p><i>Захват_плода()</i></p> <p><i>Движение_к_точке $(x_L, y_L, z_L, \alpha_{LC}, \beta_{LC}, \gamma_{LC}, V_L = 0)$</i></p> <p><i>Движение_к_точке $(x_U, y_U, z_U, \alpha_U, \beta_U, \gamma_U, V_U = 0)$</i></p> <p><i>иначе</i></p> <p><i>Вывод_ошибки()</i></p> <p><i>конец если</i></p>

Рисунок 3.13.

Алгоритм работы манипулятора в состоянии «Срыв плода»

3.4. Проектирование системы технического зрения робота-агента для сбора плодовой продукции

3.4.1. Формализация свойств внешней среды робототехнического комплекса, функционирующего в интенсивном саду

Пусть группа наземных роботов движется в пространстве $OXYZ$. На борту ведущего робота группы установлена система представления геометрической информации о внешней среде в виде облака точек, например, на базе сканирующего лазерного дальномера, система координат которой неподвижна относительно системы координат ведущего робота $O_r X_r Y_r Z_r$. На борту каждого робота расположено средство представления телевизионной информации о внешней среде на базе камеры и возможно комплексирование информации лазерного дальномера и телевизионной камеры [94, 95].

Пусть для каждого робота доступна информация, предоставляемая системой технического зрения обобщённая структурная схема, которой представлена ниже (Рисунок 3.14). В качестве источников данных в составе СТЗ будем использовать сканирующий лазерный дальномер и RGBD-камеру.



Рисунок 3.14.

Схема взаимодействия блоков СТЗ робота-агента.

Определение зоны проходимости робота-агента средствами СТЗ

Определение средствами СТЗ зон проходимости робота-агента связано с формированием геометрической модели внешней среды [96, 97]. В случае сада интенсивного выращивания плодов среда функционирования робота наполнена рядами однотипных насаждений, а зона движения представляет собой непрерывную субплоскостную поверхность. Соответственно, необходимо решить задачу определения возможной зоны проходимости, зоны насаждений и зон, где движение невозможно.



Рисунок 3.15.

Разделение пространства сада интенсивного выращивания плодов на зоны

Воспользуемся тем, что основные структурные элементы сада интенсивного производства обладают достаточной визуальной и геометрической однородностью, позволяющей воспользоваться алгоритмом на базе преобразования Хафа [98] для разделения исходного RGB-изображения на зоны.

Выделенные зоны на RGB-изображении сопоставим с картой глубины от сканирующего лазерного дальномера. После проецирования координат пикселей с RGB-изображения на карту глубины проверим точки, соответствующие областям с выраженной однородностью на растровом изображении на предмет неразрывности согласно уравнению неразрывной поверхности.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.1)$$

где, A, B, C и D – коэффициенты, определяющие положение плоскости в пространстве, x, y, z – координаты искомой точки.

Получим точки, принадлежащие плоскости передвижения (земли) и сохраним в виде облака точек. Остальные облака точек сохраним отдельно, для дальнейшего вычисления расстояния до деревьев.

Наиболее распространённым методом определения соответствия точек заданной плоскости являются методы на основе RANSAC [99, 100]. Реализация алгоритма определения опорной проходимости предложена в работе [136]

Учет информации о положении деревьев

Определение положения насаждений относительно каждого робота-агента и сопоставления обрабатываемого участка с планом работ возможно с дополнением семантической модели местности информацией о расположении деревьев. Для определения области поиска, идентификации дерева и фиксации положения деревьев целесообразно использовать подход, аналогичный подходу, используемому при распознавании плодов. Однако, для определения информации о координатах положения деревьев целесообразно использовать информацию из облака точек. Метод RANSAC может быть использован не только для определения плоскостей, но и для выделения других геометрических примитивов. Характерным примитивом для дерева является ствол, который можно представить, как цилиндр.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - r \tag{3.2}$$

$$= \frac{((x - x_0) + (y - y_0) + (z - z_0))^2}{(l + m + n)}$$

где, x_0, y_0, z_0 – координаты центра круга на поверхности цилиндра, l, m, n – параметры, определяющие положение цилиндра в пространстве, x, y, z – координаты искомой точки.

Для определения опорной проходимости воспользуемся методом извлечения комплексированной информации по видеоканалу и карте глубины через сопоставление информации о положении деревьев на видеоизображении со сканами сканирующего лазерного дальномера.

По положению ствола определим проекцию области распознанного дерева на RGB изображении всему облаку точек. Для распознавания деревьев воспользуемся нейронной сетью, аналогичной использованной для распознавания плодов и обучим на открытых наборах данных.

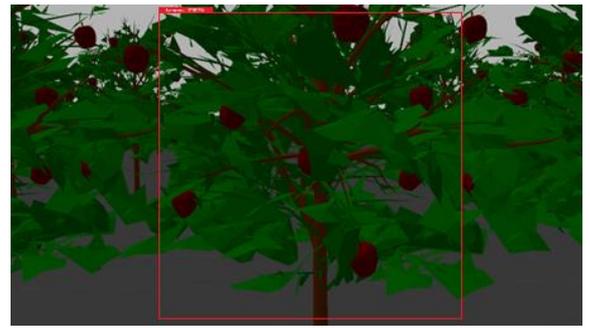


Рисунок 3.16.

Алгоритм определения положения отдельных деревьев



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.17.

Процесс сегментации изображения с деревом: а) – RGB представление входного RGBD изображения для сегментации; б) – распознавание дерева на кадре; в) – выделение дерева, плодов, и зоны проходимости на изображении; г) – границы выделенных элементов.

В целях упрощения будем считать точки, принадлежащие распознаным областям деревьям. Для всех точек не принадлежащим распознаным областям проверим принадлежность к плоскости. Совокупность точек, принадлежащих к плоскости сопоставим со значениями скана лазерного дальномера для формирования карты местности.

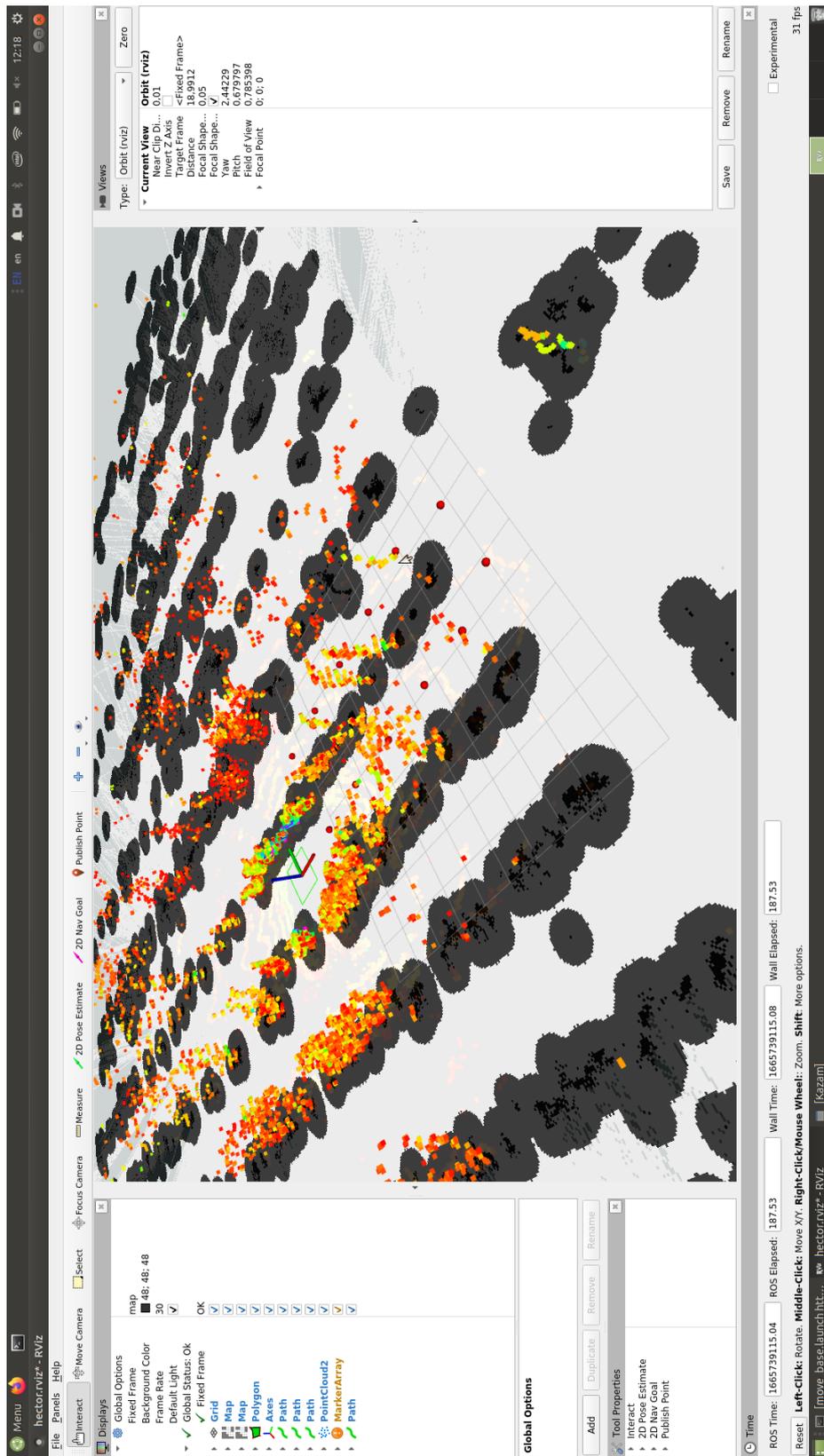


Рисунок 3.18 Результат работы совмещенного алгоритма определения положения деревьев и зоны проходимости по данным лазерного дальномера и RGBD-камеры.

3.4.2. Техническое зрение для распознавания и локализации плодовой продукции

Выбор системы технического зрения

По результатам анализа алгоритмов машинного зрения и способов получения геометрической информации о состоянии среды принято решение использовать систему технического зрения манипулятора на базе камер глубины и определить наиболее подходящий вид датчиков [101, 102, 103, 104]. Камеры глубины позволяют получить расстояние до объекта и воссоздавать трёхмерную карту исходя из изображений камер (при условии, что известно их фиксированное положение) [106, 107, 130, 108, 109].

Определение координат расположения плодов в трехмерном пространстве должно осуществляться в условиях естественной освещенности (от 3000 Лк до 120 000 Лк). Функционирование СТЗ с использованием обычных моделей камер ограничено условиями освещенности. Рассмотрим камеры глубины на базе стереопары, состоящей из двух обычных web-камер и на базе специализированных камер проекта (OpenCV AI OAK-D и Intel RealSense)

Алгоритм работы системы распознавания и локализации плодов

Проведение опытных работ по отладке интегрированного ПО требует воспроизведения сценариев реального применения робототехнического комплекса. Допустим, что функционирование РТК возможно при последовательном дискретном движении мобильной платформы от участка к участку и предполагает возможность позиционирования мобильной платформы так, что все плоды в поле СТЗ достижимы для манипулятора. Тогда алгоритм функционирования РТК с СТЗ на базе стереопары можно представить в виде, показанном на рисунке ниже (Рисунок 3.19).

Для СТЗ на базе RGBD-датчика используется отдельно RGB-камера для распознавания плода и отдельно датчик глубины для построения карты глубины [110].

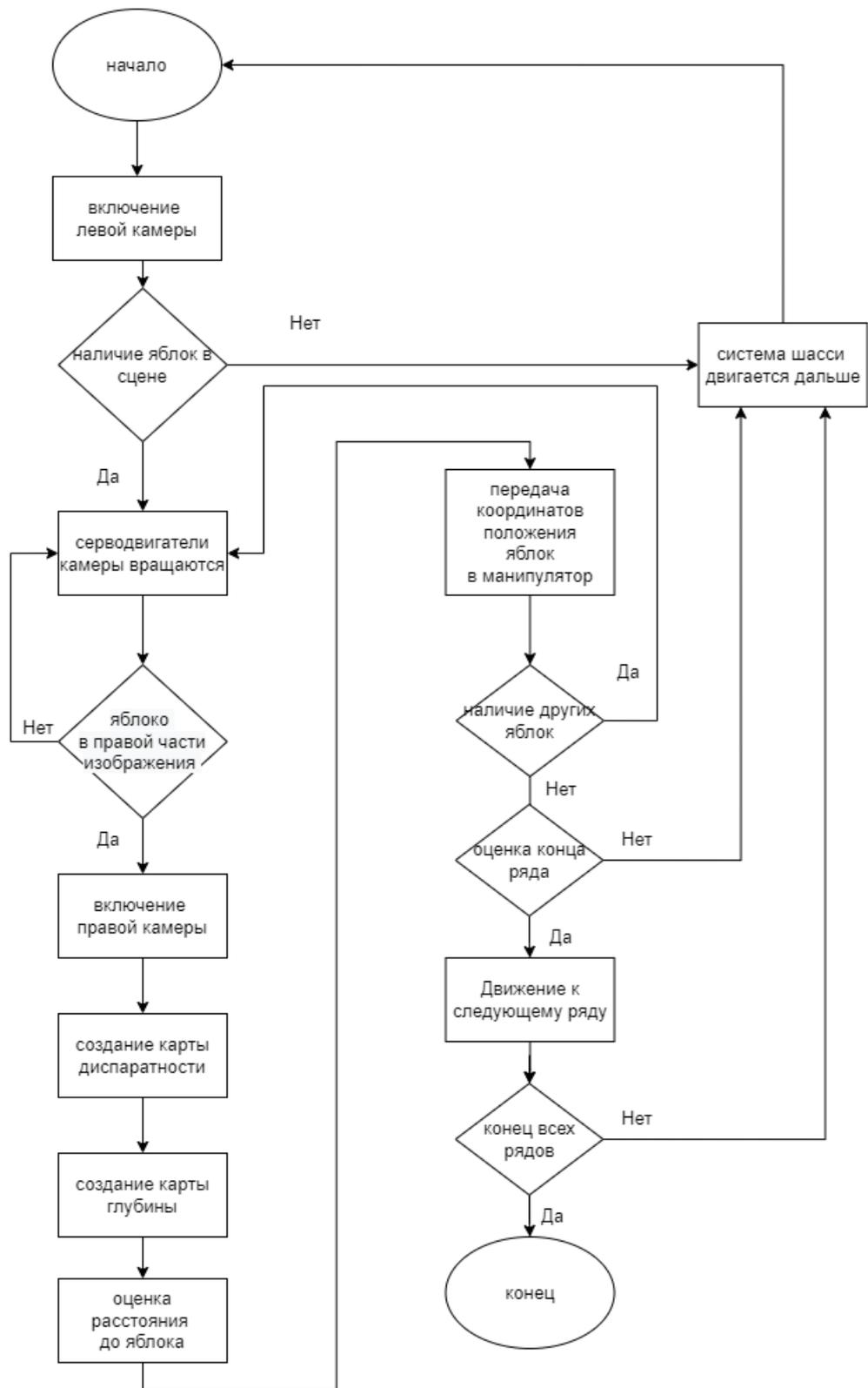


Рисунок 3.19.

Алгоритм работы подсистемы распознавания положения плода

Распознавание образов плодов

Для определения наличия плода в сцене и области расположения плода в кадре необходимо разработать алгоритм распознавания плодов, т. е. нахождения целевого объекта на изображении с выделением области расположения.



Рисунок 3.20.

Алгоритм разработки нейронных сетей для распознавания плодов в составе СТЗ СУ РТК

Т. к. в общем случае яблоки не представляют собой объекты с однородным цветом, приведенный выше алгоритм требует улучшения для корректного определения области нахождения яблок и построения облаков точек, соответствующих области.

Сравнение нейронных сетей для решения задачи распознавания яблок

Название сети	Входное разрешение	Метод обучения	Выход сети	Скорость (FPS)	Точность распознавания
R-CNN	227 x 227	SGD, BP	{c,x,y,h,w}	0.5	79
YOLO	640 x 520	SGD	{c,x,y,h,w}	30	88
SDD	300 x 300	SGD	{c,x,y,h,w}	46	83

где: FPS (Frame Per Second) – число кадров в секунду; SGD (Stochastic gradient descent) - Стохастический градиентный спуск; BP – (Back Error Propagation) – алгоритм обратного распространения ошибки; c – класс объектов; x,y – центр рекомендуемой области; h,w – длина и ширина рекомендуемой области.

Из таблицы очевидно, что YOLO обеспечивает более точное распознавание среди этих нейронных сетей. Более того он позволяет снимать достаточное количество кадров в секунду с хорошим входным разрешением.

Обучение нейронных сетей осуществлялось на основании набора данных «MS COCO dataset». MS COCO dataset — это набор данных для крупномасштабного обнаружения объектов и сегментации, опубликованный корпорацией Microsoft. Данный набор данных содержит миллион изображений, из которых были отобраны 1171 изображений яблок в различных условиях освещения. В набор MS COCO dataset были добавлены изображения различных сортов яблок в количестве 1500 штук, полученные в опытных садах ФНАЦ «ВИМ».

Обучение нейронных сетей осуществлялось в течение 30 эпох. Результаты обучения представлены на рисунке ниже (Рисунок 3.21).

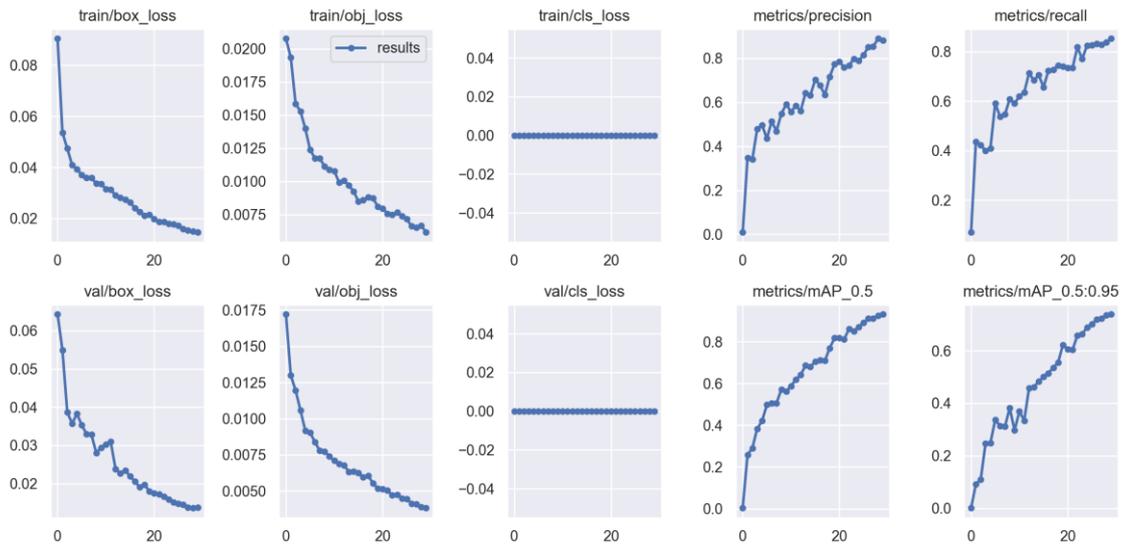


Рисунок 3.21.

Результаты обучения нейронных сетей на распознавание яблок



Рисунок 3.22.

Работа алгоритма распознавания на изображениях из набора данных

Распознанные области в RGB-изображении накладываются на соответствующие пиксели карты глубины, выдаваемой RGB-датчиком – эти данные соответствуют положению объекта и передаются в блок планирования траекторий манипуляционного робота.

Определение расстояния до плода

Для интеграции системы зрения в РТК и обеспечения возможности разработки алгоритмов управления на базе модели робота в специализированной среде необходимо рассмотреть существующие решения для определения расстояния до объектов, определить параметры модели камеры.

Для задач распознавания объектов в условиях постоянного движения опоры камеры как правило используются стереокамеры или RGBD-камеры.

Обзор литературы показал, что на данный момент в доступе имеются бюджетные решения, способные выдавать данные для определения положения плодов с точностью до нескольких миллиметров – Таблица 9.

Таблица 9.

Сравнение современных бюджетных стереокамер и RGBD-камер

Сенсор	Kinect V2	Intel Realsense D435	ASUS Xtion 2	AR StereoV2	Orbec Astra (PRO)
Принципы измерения глубины	Time-of-flight	Time-of-flight	Time-of-flight	Stereo vision	Infrared Coded Structured Light
Угол обзора	60.0° 31	65.5°32	52°	80°	45°
Разрешение	512×424	1280×720 (Очень шумное изображение)	640×480	640×480	640×480
Частота кадров	30	50	30	30	20
Интерфейс	USB 3.0	USB 3.0	USB 3.0	USB 3.0	USB 2.0
Доступность	-	+	+	+	+
Цена	\$360	\$380	\$470	\$900	\$260
Наличие ЭВМ	Требуется	Требуется	Требуется	Не требуется	Требуется
Стоимость ЭВМ	300	300	300	0	300

Сравнение СТЗ на базе стереопары и RGBD-камеры

Тип СТЗ	Преимущества	Недостатки
СТЗ на базе стереопары	<ul style="list-style-type: none"> – Модуль включает в себя ПК для обработки полученных данных; – Есть возможность развертки программного комплекса для мобильного робота; – Открытое ПО; – Достаточный угол обзора. 	<ul style="list-style-type: none"> – Качество карты глубины ниже, чем RGBD-камер.
СТЗ на базе RGBD-камеры	<ul style="list-style-type: none"> – Высокое разрешение и качество карты глубины; – Небольшие размеры устройства; – Есть крепление для штатива; – Техподдержка, быстрые исправления, частые обновления. 	<ul style="list-style-type: none"> – Не стабильная частота кадров; – Качество карты глубины зависит от условий освещения; – Цена.

Настройка системы стереозрения требует определения калибровочных коэффициентов необходимых для компенсации искажений. Для определения калибровочных коэффициентов используем возможности встроенных функций библиотеки OpenCV [111]. Калиброванное изображение, полученное в рамках данной работы представлено на рисунке ниже – Рисунок 3.23.

Модель каждой камеры в составе стереопары в виде камеры-обскура с линзой предполагает наличие радиальных и тангенциальных искажений в камере. Соответственно необходим процесс калибровки, который позволяет сформировать модель геометрии камеры и модель объектива [112].



Рисунок 3.23.

Два изображения для обработки СТЗ на базе стереопары

Данные одной из камер в составе стереопары можно использовать для распознавания яблока в кадре. Таким образом схема взаимодействия стереокамер с системой управления РТК включает блоки устранения искажений камер, блока распознавания, и блок первичной обработки данных для учета параметров взаимной калибровки камер – Рисунок 3.24.

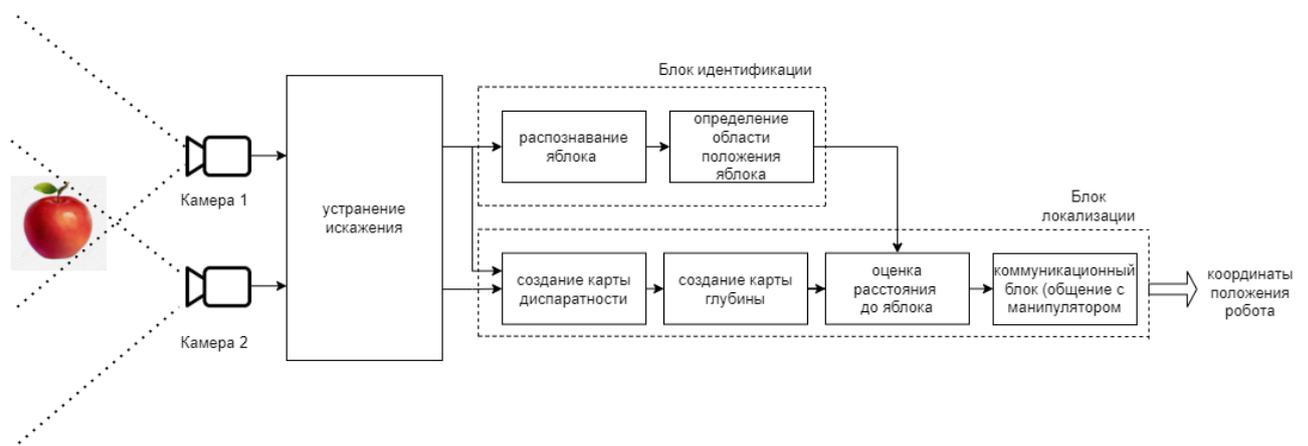


Рисунок 3.24.

Схема взаимодействия системы зрения на базе стереокамеры и элементов РТК для сбора яблок

Современные RGBD-камеры не требуют взаимной калибровки датчиков в своем составе как, например, камера Intel RealSense D455 (Рисунок 3.25).

Для использования RGBD-камеры достаточно воспользоваться штатной библиотекой и функциями библиотеки OpenCV. Цветное изображение, полученное в рамках данной работы с RGBD-камеры Intel RealSense D455 и обработанное ранее представленным алгоритмом распознавания образа представлено на рисунке ниже – Рисунок 3.26.



Рисунок 3.25.

Intel RealSense D455



Рисунок 3.26.

Изображение для обработки с RGBD-камеры

Для получения информации о положении области с распознанным плодом необходимо построение карты глубины. Первым шагом для построения карты глубины в случае использования и стереопары, и RGBD-камеры является построение карты диспаратности.

Построение карты диспаратности состоит из 4 основных этапов:

1. Расчет стоимости соответствия. На первом этапе, определяется значение параллакса каждой точки между левым и правым изображениями;
2. Соответствие суммирования затрат. Цель агрегирования затрат состоит в том, чтобы свести к минимуму соответствующие неопределенности;
3. Вычисление диспаратности;
4. Оптимизации диспаратности. Оптимизация нужна, чтобы минимизировать шум и улучшить качества карты диспаратности.

Для вычисления диспаратности был применен метод суммы квадратов разностей (Sum of Squared Differences or SSD). Он является методом сопоставления блоков, то есть он оценивает диспаратности в одном изображении, сравнив небольшую область вокруг этой точки с областями, извлеченных из другого изображения.

$$SSD(u, v) = \sum_n \sum_m [I_l(u + m, v + n) - I_r(m, n)]^2 \quad (3.3)$$

Где: I_l и I_r - значения серого изображения для левого и правого изображения.



Рисунок 3.27.

Карта диспаратности веб-камер (слева) и камеры Open AI (справа)

На Рисунке 3.24 можно наблюдать, что диспаратности объектов, находящихся ближе к камере, больше (светлее) по сравнению с теми, что находятся на более дальних расстояниях. Следовательно, результаты значений

диспаратности совершенно не соответствуют фактическим глубинам. Маскирование этих значений (путем установки высоких значений диспропорций) дает нам более четкую карту диспропорций и глубины. Карта глубины строится из матрицы диспаратности через применение формулы глубины для каждой диспаратности [113]. Чтобы получить представление о том, как разные объекты выглядят на разной глубине в пространстве после формирования карты глубины сформирована, ее можно отобразить в цвете «jet_r», – Рисунок 3.28. На рисунке карты глубин видно, что при одинаковых условиях освещения стереокамера выдает наиболее однородную картину.

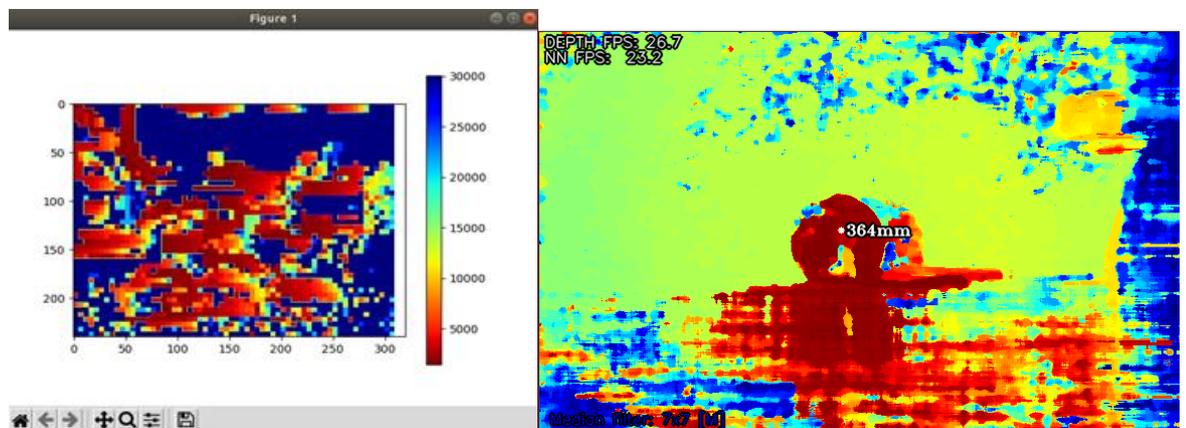


Рисунок 3.28.

Карта глубины в цвете jet_r для изображений со стереопары на базе веб-камер (слева) и специальной RGBD-камеры (справа)

Теперь зная положение яблока на двумерном изображении и имея облако точек достаточно произвести проекцию вписанного круга в область расположения яблока на карту глубин. Однако в случае наличия бликов и отражений карта глубин может быть неоднородной и не соответствовать реальному положению некоторых точек, как и для стереокамеры так и для RGBD-камеры. Ввиду однородности картины для построения облака точек в дальнейшем целесообразно использовать только данные RGBD-камеры. Из карты диспаратности RGBD-после получения карты глубин, преобразуем карту

глубин в облако точек, где к каждой точке с заданными координатами присвоим соответствующее значение цвета с RGB камеры.

Результат применения алгоритма фильтрации, для удаления точек, не соответствующих критериям принадлежности к неразрывной поверхности в области положения яблока по показаниям RGBD-камеры, представлен на рисунке ниже.



Рисунок 3.29.

Результаты облака точек до фильтрации (слева) и после фильтрации (справа)

Далее проведем операцию поиска среднего значения для всех точек, находящихся в области распознанного яблока, и получим целевую точку, которая система будет передавать как положения яблока и цель для манипуляционного механизма.

3.4.3. Общая уточненная структура системы технического зрения робота-агента

Разработанная структура взаимодействия СТЗ с органами управления действиями РТК представлена ниже – Рисунок 3.30.

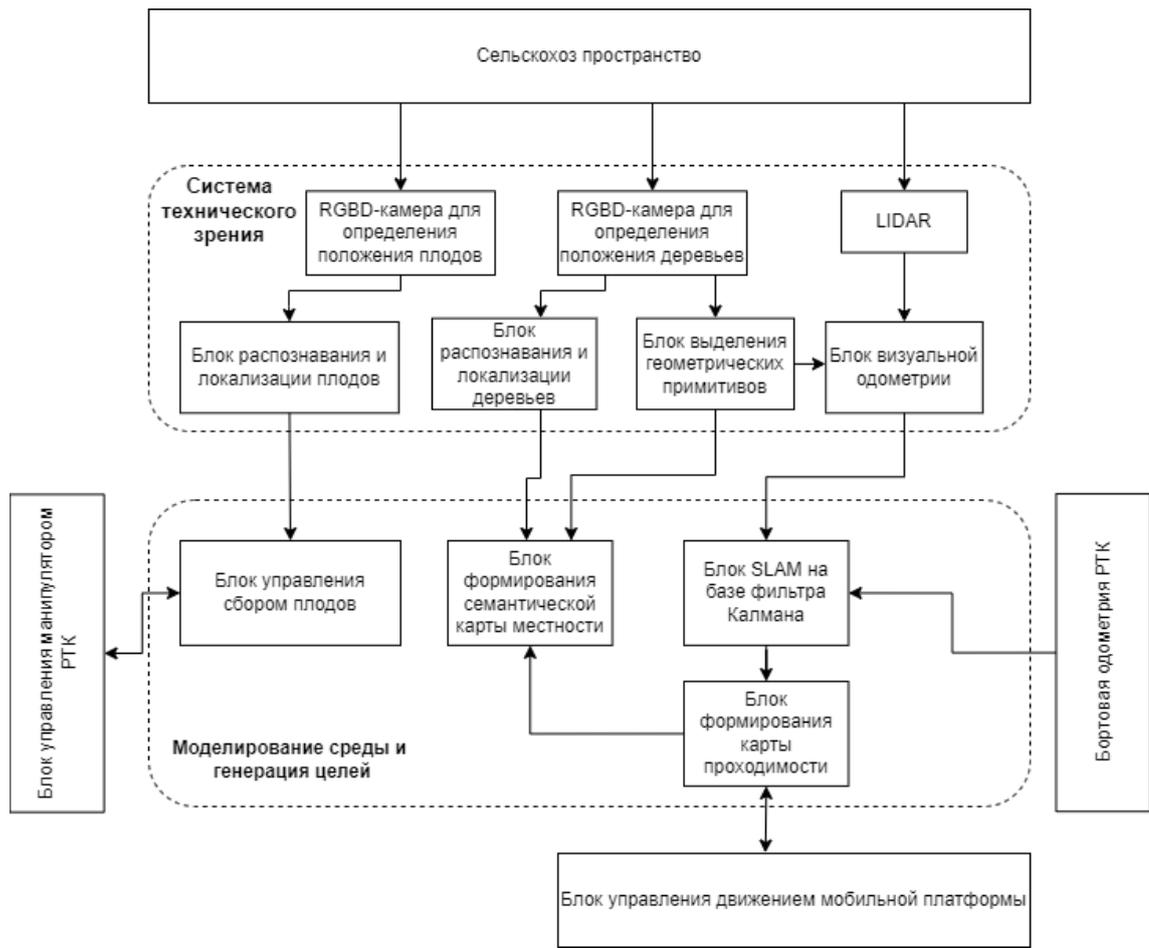


Рисунок 3.30.

Структура взаимодействия элементов СТЗ с элементами системы управления РТК для выполнения задачи позиционирования в интенсивном саду

Данная система в зависимости от требуемого состояния робота-агента для выполнения заданной задачи, может предоставить информацию необходимую для выполнения задач движения по местности, движения вдоль ряда деревьев и между индивидуальными деревьями, а также может предоставить информацию для формирования траектории управления манипулятором в составе робота-агента.

3.5. Локализация и планирования движения робота-агента для сбора плодовой продукции

3.5.1. Локализация робота-агента

При групповом управлении выделяют два способа локализации мобильных роботов в группе: 1- независимое определение своего положения каждым мобильным роботом; 2 - определение положения с использованием информации о местоположении остальных роботов группы. Рассмотрим вариант использования навигационной системы для локализации робота при совершении простых перемещений, например движения по прямолинейной траектории в составе конвоя и рассмотрим случай локализации робота при невозможности или затрудненности использования точной системы глобального и локального позиционирования [114, 117, 118].

Для реализации задачи вывода МРТС из точки базирования в точку распределения между рядами деревьев необходимо знать: точную позицию ведущего робота в глобальных координатах и позицию ведомого робота относительно ведущего.

В случае использования комбинированного способа определения местоположения ведомого робота на ведущем роботе устанавливается высокоточный приемник ГНС системы. На ведомых роботах устанавливаются обычные GPS приемники, с использованием внутренних фильтров. После этого на ведомый робот поступает информация о позиции ведущего робота, которая с данными от GPS и от одометрии колес заводится на обобщенный фильтр (фильтр Калмана) [119]. Решение задачи локализации мобильного робота с использованием средств колесной одометрии и глобальной навигации приведено автором в работе [134].

В рамках данной работы рассмотрим задачу локализации положения робота с использованием дополнительных источников информации об изменении положения робота. Один из доступных подходов использование данных визуальной одометрии, где смещение робота определяется анализом смещения

изображения в датчиках технического зрения. Смещение определяется с использованием стереопары и сканирующего лазерного дальномера, по данным которых регистрируется облако точек. Как показано в работе [120] локализация мобильной платформы с управляемыми передними колесами может быть осуществлена с помощью учета измерений ошибки Аккермана в связанном фильтре Калмана. Структурная схема системы представлена на рисунке ниже.

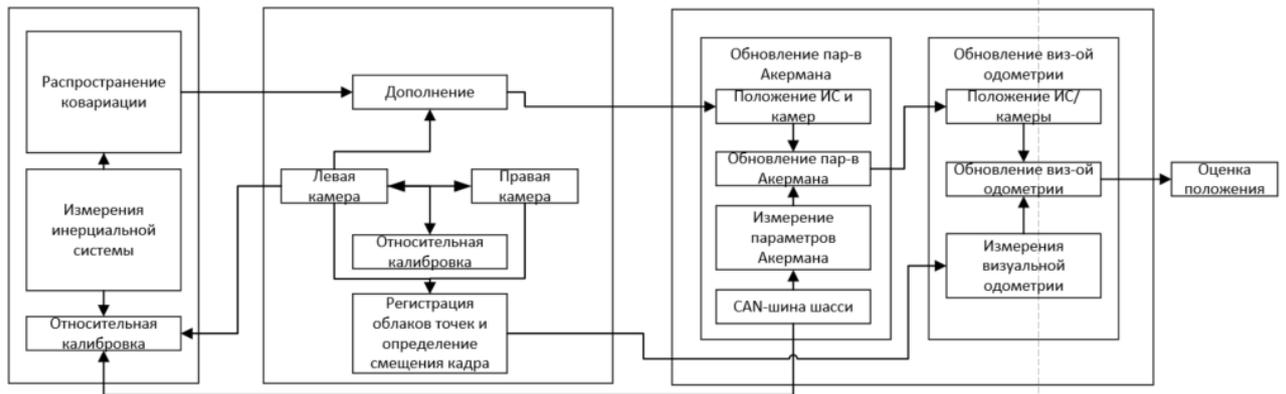


Рисунок 3.31.

Структурная схема системы локализации робота с использованием параметров Аккерманна и связанного фильтра Калмана

Системы координат:

$\{O_R\}$ Система координат робота, зафиксировано на теле робота, на задней оси;

$\{O_W\}$ Мировая система координат, в начальный момент времени совпадает с системой координат робота;

$\{O_I\}$ система координат системы визуальной одометрии, находится в центре СТЗ;

$\{O_G\}$ инерциальная система координат начальная точка совпадает с O_I , ось oZ выровнена по направлению силы тяжести;

$\{O_C\}$ система координат камеры; исходная точка находится в центре левой камеры;

Состояния блока расчета инерциальных параметров системы в дискретный момент времени t_k можно определить, как:

$$\chi_{I_k} = [{}^{O_{I_k}}\mathbf{q}^T \mathbf{b}_{g,k}^T \quad {}^{O_G}\mathbf{v}_{O_{I_k}}^T \mathbf{b}_{a,k}^T \quad {}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{I_k}}^T \quad {}^{O_C}\mathbf{q}^T \quad {}^{O_I}\mathbf{p}_{O_C}^T]^T \quad (4.32)$$

Где ${}^{O_{I_k}}\mathbf{q}$ обозначает кватернион поворота от $\{O_G\}$ к $\{O_{I_k}\}$; ${}^{O_G}\mathbf{v}_{O_{I_k}}$ и ${}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{I_k}}$ скорость и положение $\{O_{I_k}\}$ в $\{O_G\}$; ${}^{O_C}\mathbf{q}$ и ${}^{O_I}\mathbf{p}_{O_C}$ обозначают поворот и перенос между $\{O_{I_k}\}$ и $\{O_C\}$; $\mathbf{b}_{g,k}$ и $\mathbf{b}_{a,k}$ смещения гироскопа и акселерометра соответственно.

Состояние СТЗ в заданный момент времени t_k :

$$\chi_{C_j} = [{}^{O_{C_j}}\mathbf{q}^T \quad {}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{C_j}}^T]^T \quad (4.33)$$

Где ${}^{O_{C_j}}\mathbf{q}$ обозначает поворот от $\{O_G\}$ в $\{O_{C_j}\}$. ${}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{C_j}}$ обозначает перенос из $\{O_{C_j}\}$ в $\{O_G\}$.

В заданный момент времени полный вектор состояний с заданным N-состояние камер за время $t_k \in [t_j, t_{j+1})$ примет вид:

$$\chi_k = [\chi_{I_k} \quad {}^{O_{C_{j-N+1}}}\mathbf{q}^T \quad {}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{C_{j-N+1}}}^T \quad {}^{O_{C_{j-N+2}}}\mathbf{q}^T \quad {}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{C_{j-N+2}}}^T \quad \dots \quad {}^{O_{C_j}}\mathbf{q}^T \quad {}^{O_G}\mathbf{p}_{O_{C_j}}^T]^T \quad (4.34)$$

Ошибка вектора состояний примет вид:

$$\tilde{\chi}_k = [\tilde{\chi}_{I_k} \quad {}^{O_{C_{j-N+1}}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \quad {}^{O_G}\tilde{\mathbf{p}}_{O_{C_{j-N+1}}}^T \quad {}^{O_{C_{j-N+2}}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \quad {}^{O_G}\tilde{\mathbf{p}}_{O_{C_{j-N+2}}}^T \quad \dots \quad {}^{O_{C_j}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \quad {}^{O_G}\tilde{\mathbf{p}}_{O_{C_j}}^T]^T \quad (4.35)$$

$$\text{где, } \tilde{\chi}_{I_k} = [{}^{O_{I_k}}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \quad \tilde{\mathbf{b}}_{g,k}^T \quad {}^{O_G}\tilde{\mathbf{v}}_{O_{I_k}}^T \quad \tilde{\mathbf{b}}_{a,k}^T \quad {}^{O_G}\tilde{\mathbf{p}}_{O_{I_k}}^T \quad {}^{O_C}\tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \quad {}^{O_I}\tilde{\mathbf{p}}_{O_C}^T]^T$$

Модель измерений

Оценка относительного поворота и смещения МП. Поворот и смещения МП оценим через следующую матрицу преобразований:

$${}^{B_{j-1}}T_{B_j} = {}^C T_B^{-1} \quad {}^G T_{C_{j-1}}^{-1} \quad {}^G T_{C_j} \quad {}^C T_B \quad (4.36)$$

Уравнение выше может быть представлено как:

$$\begin{aligned}
C\left(\begin{smallmatrix} B_{j-1} \\ B_j \end{smallmatrix} q\right) &= C\left(\begin{smallmatrix} C \\ B \end{smallmatrix} q\right)^T C\left(\begin{smallmatrix} C_{j-1} \\ G \end{smallmatrix} q\right) C\left(\begin{smallmatrix} C_j \\ G \end{smallmatrix} q\right)^T C\left(\begin{smallmatrix} C \\ B \end{smallmatrix} q\right) \\
{}^{B_{j-1}}_{B_j} p &= C\left(\begin{smallmatrix} C \\ B \end{smallmatrix} q\right)^T \left[C\left(\begin{smallmatrix} C_{j-1} \\ G \end{smallmatrix} q\right) \left[C\left(\begin{smallmatrix} C_j \\ G \end{smallmatrix} q\right)^T {}^C_B p + {}^G_C p - {}^{G_{j-1}}_C p \right] - {}^C_B p \right] \\
C\left(\begin{smallmatrix} C \\ B \end{smallmatrix} q\right)^T &= C\left(\begin{smallmatrix} B \\ I \end{smallmatrix} q\right) C\left(\begin{smallmatrix} C \\ I \end{smallmatrix} q\right)^T \\
{}^C_B p &= {}^C_I p + {}^I_B p
\end{aligned} \tag{4.37}$$

$C(\cdot)$ – обозначает функцию конвертации кватерниона в матрицу поворота;
 $C\left(\begin{smallmatrix} C \\ I \end{smallmatrix} q\right)$, ${}^C_I p$ – внешние параметра вращения между $\{C\}$ и $\{I\}$ соответственно;
 $C\left(\begin{smallmatrix} B_{j-1} \\ B_j \end{smallmatrix} q\right)$, ${}^{B_{j-1}}_{B_j} p$ – оценка относительного вращения и смещения МП между t_i и t_{i-1} .

Измерение ошибки Аккерманна. Оценка измерения r^{B_j} определим следующим образом:

$$r^{B_j} = \begin{pmatrix} r_{\theta_{j-1,j}}^B \\ r_{v_j}^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{\theta_{j-1,j}}^B \cdot C\left(\begin{smallmatrix} B_{j-1} \\ B_j \end{smallmatrix} q\right)^{-1} \\ z_{v_j}^B - {}^{B_{j-1}}_{B_j} p / \Delta t_{j-1,j} \end{pmatrix} \tag{4.38}$$

где $r_{\theta_{j-1,j}}^B$ и $r_{v_j}^B$ оценка параметра рулевого управления Аккерманна между t_{j-1} и t_j и оценка измерения скорости в момент времени t_j соответственно, $z_{\theta_{j-1,j}}^B$ и $z_{v_j}^B$ измерения параметра рулевого управления Аккерманна и измерение скорости соответственно (здесь и далее для уравнений 2.20 – 2.26 нотация приведена в [120]).

При линеаризации уравнения (2.20) получим следующее выражение:

$$r^{B_j} = H^{B_j} \tilde{\chi}_k + n^{B_j} \tag{4.39}$$

H^{B_j} – матрица измерений, связывающая истинный вектор состояния и вектор произведенных измерений в данном случае является матрицей Якоби измерения состояния ошибки Аккермана;

n^{Bj} — белый гауссовский шум измерений с нулевым математическим ожиданием;

$$H^{Bj} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial r_{\theta_{j-1,j}}^B}{\partial \tilde{\theta}^C} & 0 & 0 & \frac{\partial r_{\theta_{j-1,j}}^B}{\partial \tilde{\theta}^G} & 0 \\ 0 & \frac{\partial r_{v_j}^B}{\partial \tilde{\theta}^C} & \frac{\partial r_{v_j}^B}{\partial \tilde{p}_c} & 0 & \frac{\partial r_{v_j}^B}{\partial \tilde{\theta}^G} & \frac{\partial r_{v_j}^B}{\partial \tilde{p}_{c_j}^G} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Оценка матрицы ковариаций шума измерений имеет следующий вид:

$$S^{Bj} = \begin{bmatrix} S_{\theta_{j-1,j}}^B & 0 \\ 0 & S_{v_j}^B \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Примем следующие обозначения $S_k = S^{Bj}$, $H_k = H^{Bj}$, I — единичная матрица

Тогда матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана примет вид:

$$K_k = P_{k|k} H_k^T (H_k P_{k|k} H_k^T + S_k)^{-1} \quad (4.42)$$

Получение оценки вектора состояния системы примет вид:

$$\widehat{\mathcal{X}}_{k+1} = \widehat{\mathcal{X}}_k + K_k r^{Bj} \quad (4.43)$$

Расчет ковариационной матрицы оценки вектора состояния системы примет вид:

$$P_{(k|k+1)} = (I - K_k H_k) P_{k|k} (I - K_k H_k)^T + K S_k K^T \quad (4.44)$$

3.5.2. Планирование траектории робота-агента

С учетом структуры навигационной системы (Рисунок 3.32) планирование траектории разбивается на 3 фазы: прогнозирование, построение плана и мониторинг.

Как показано в ряде работ, например, [121] использование итеративного процесса «прогнозирование — расчет геометрических ограничений — планирование траектории — планирование поведения» позволяет повысить качество решения задачи интеллектуального управления сложными техническими объектами. В качестве модуля прогнозирования будем использовать рассмотренный выше фильтр Калмана, учитывающий

информацию визуальной одометрии и параметры рулевого управления Аккермана.

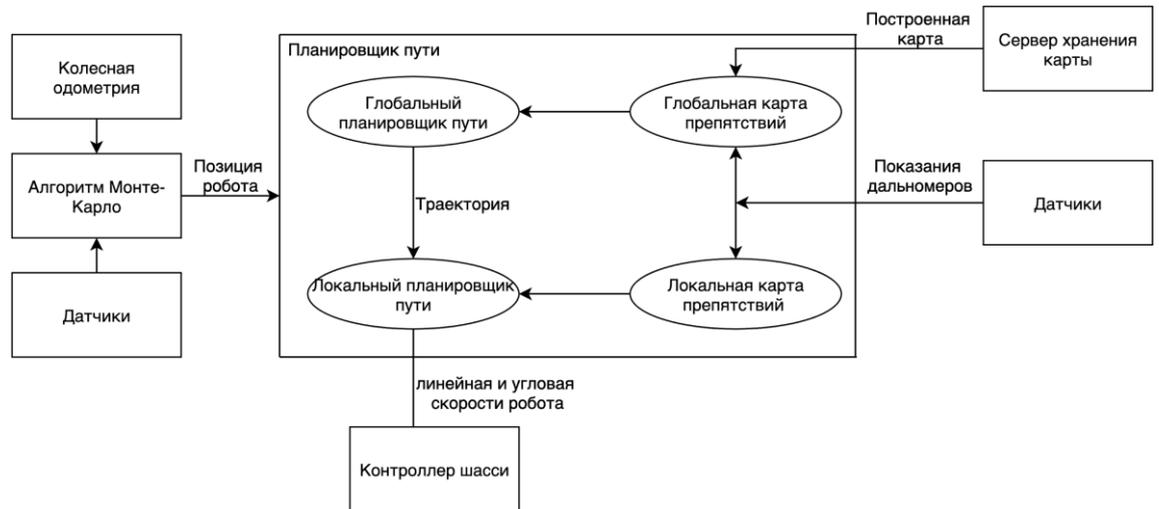


Рисунок 3.32.

Структура навигационной системы робота-сборщика

В модуль прогнозирования поступает информация со верхнего уровня управления о целевой области пространства и временных ограничениях на достижение этой области объектом управления, после чего осуществляется предварительный расчет необходимых параметров движения (например, скорости) для выполнения поставленного задания. Основное отличие методов прогнозирования траектории от методов собственно планирования заключается в том, что первые могут пренебрегать ограничениями на динамику движения объекта управления и другими ограничениями [115, 116]. За счет этого прогнозирование траектории осуществляется с минимальными затратами вычислительных ресурсов.

В рамках реализованной системы рассчитанные модулем прогнозирования параметры движения передаются на нижний (реактивный) уровень управления, на котором осуществляется учет ограничений на динамику движения объекта управления, в результате чего формируются геометрические ограничения на форму траектории, соблюдение которых гарантирует возможность следования по ней при определенных ограничениях на внешние возмущения. Далее

планирование осуществляется с учетом этих геометрических ограничений. Результатом работы модуля планирования является построенная траектория (тогда на верхний уровень передается соответствующее сообщение), либо сигнал о том, что при заданных ограничениях задача планирования траектории невыполнима (за отведенное время). В последнем случае на соответствующий модуль системы управления передается запрос на перепланирование, т.е. на выбор другой целевой области в пространстве и/или других временных ограничений. Таким образом, планирование траектории представляет собой итеративный процесс с обратными связями, как от верхнего, так и от нижнего уровней управления, что является существенным отличием предлагаемой архитектуры от современных аналогов.

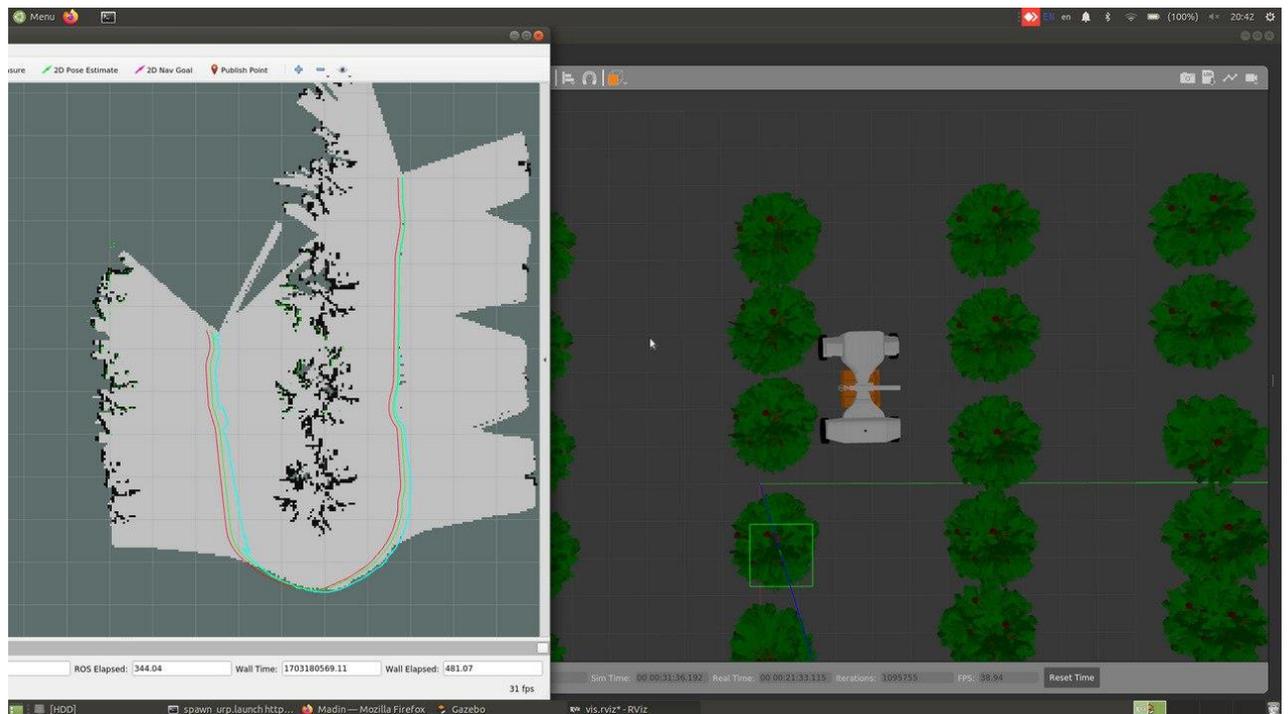


Рисунок 3.33.

Результаты обработки траектории движения: синяя линия – траектория движения согласно колесной одометрии; зеленая линия – траектория движения с применением расширенного фильтра Калмана дополненного работой блоков визуальной одометрии с предложенными алгоритмами; красная линия – реальная траектория движения.

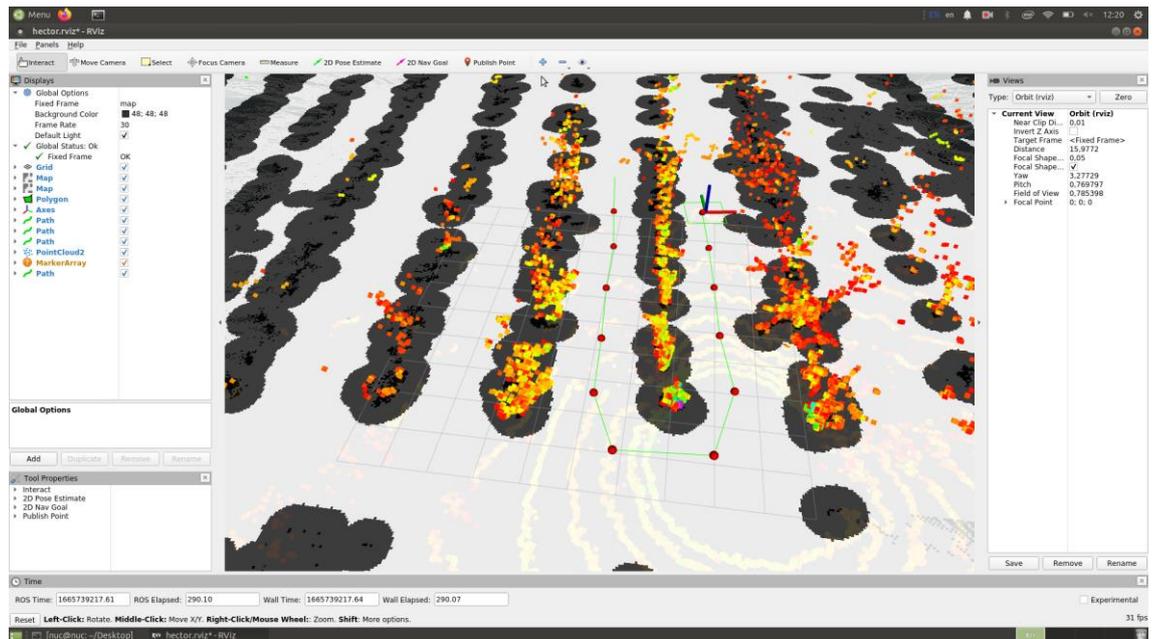


Рисунок 3.34.

Результат работы алгоритма планирования траектории в междурядье

Предложенная структура навигационной системы реализована для моделирования тестовой траектории СХ мобильного робота. На рисунках выше представлен результат применения разработанного алгоритма.

3.6. Выводы по Главе 3

В главе предложено решение ключевой группы задач для реализации конструкции РТК для сбора плодов и элементов системы управления, в том числе реализована система управления мобильной платформой робота-агента, функционирующего в составе МРТС, реализована система управления манипулятором в составе РТК.

Реализованная система управления манипулятором позволяет осуществлять вывод манипулятора к целевой точке (точке включения схвата для срыва плода) за конечное предсказуемое время.

Предложены алгоритмы локализации РТК при движении конвоем для вывода в точку распределения и алгоритм локализации для работы в междурядье с учетом возможных неровностей поверхности движения РТК.

Предложены алгоритмы функционирования СТЗ в составе РТК и предложен состав системы технического зрения РТК, использующей систему распознавания на основе нейронной сети для идентификации наличия плода в кадре и местоположения плода и изображения; стереоизображение для локализации положения плода, реализована нейронная сеть, осуществляющая фильтрацию зашумленных данных стереоизображения для обеспечения повышенной точности локализации плода.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СБОРА ПЛОДОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Моделирование и испытание являются важнейшими этапами создания РТК, поскольку оказывают существенное влияние на качество, сроки создания и стоимость продукции. Для значительного сокращения временных и финансовых издержек на проектирование модельно-ориентированный подход в разработке технических систем фактически является стандартом и позволяет значительно улучшить экономические показатели проекта и снизить цикл его реализации. Применение современных подходов создания изделий позволяет сформировать требования к техническому заданию, реализовать технологию сквозного проектирования, промоделировать основные этапов производства и испытаний интерактивно. На выходе - на стадии подготовки производства изделия, получается проект с верифицированными параметрами. Все это стало возможно благодаря росту возможностей современных компьютерных систем и развитию симуляционного программного обеспечения. На сегодняшний день, компьютерную модель, достаточно точную для верификации систем, входящих в состав изделия и его самого, используемую для имитационного моделирования, обозначают устоявшимся термином «цифровой двойник».

Традиционно испытания робототехнических систем и комплексов, как правило, включают:

испытания работоспособности отдельных компонентов и модулей (стендовые, лабораторные);

испытания РТК в сборе по стандартным методикам (предварительные испытания, тесты программного обеспечения);

испытания РТК с точки зрения оценки их функциональных качеств на полигонах, конфигурация которых максимально приближена к реальным

условиям применения робототехнических систем (полигонные, натурные испытания).

В настоящее время в рамках парадигмы модельно-ориентированного проектирования натурные испытания предваряются виртуальным моделированием. В рамках комплексного виртуального моделирования как правило разрабатывается:

модель исполнительных механизмов РТК (включает механику, электрику, опционально гидравлику и пневматику);

3D модель РТК, используемая для визуализации и расчета инерционных характеристик и иногда кинематических и динамических характеристик (зависит от используемого инструмента, дополняет комплексную модель);

система управления, синтезируемая на базе математической модели;

модель очувствления РТК;

модели приборов в составе человеко-машинного интерфейса.

Испытания разработанных алгоритмов и принципов управления группой будем проводить на базе виртуальной модели МРТС с синхронизацией отдельных роботов в гомогенных коалициях с реальными роботами на испытательном полигоне.

4.1. Общая структура системы управления движением робота-агента для сбора плодов

Распишем более подробно элементы управления движением, предложенной ранее структурной схему робота-агента (Рисунок 2.26), в контексте применения конкретной платформы.

В целях наглядности приведем упрощенное представление логического уровня системы управления робота-агента, обозначив состояния робота согласно выполняемым операциям и опустим обозначения входных и выходных значений состояний (Рисунок 4.1, Рисунок 4.2).

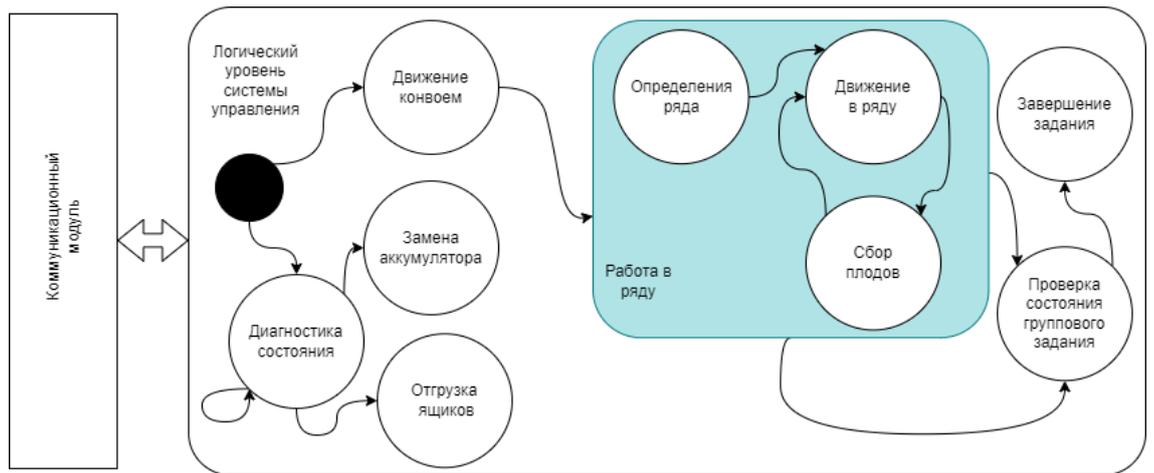


Рисунок 4.1.

Упрощенное представление логического уровня системы управления роботом-агентом для сбора плодов.

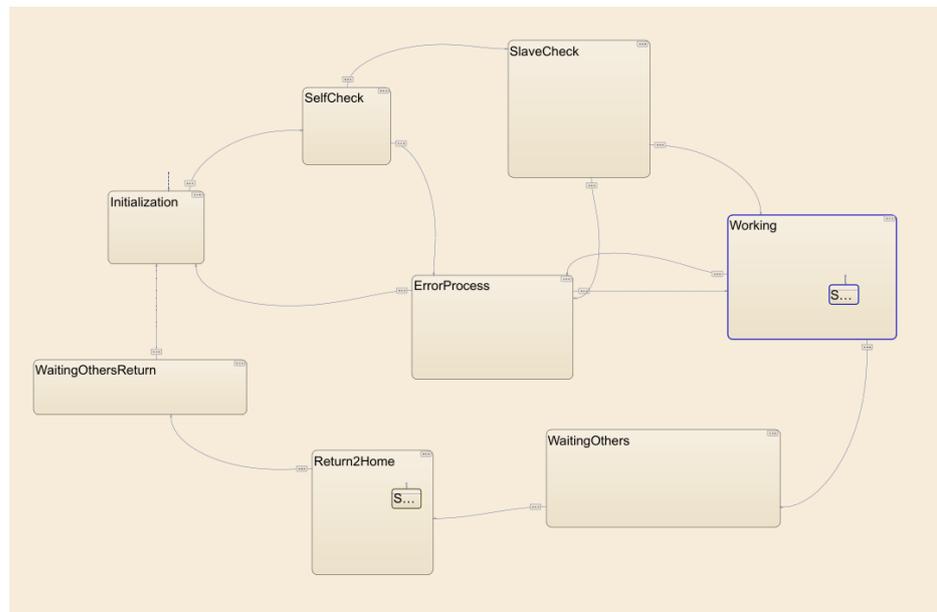


Рисунок 4.2.

Реализация логического уровня с помощью StateFlow в MATLAB Simulink

Переход между состояниями работа означает необходимость движения мобильной платформы и манипулятора к тем типам целей, которые определяются требованиями состояния. Возможные типы целей, определяются с помощью СТЗ.

За реализацию движения отвечает нижний уровень системы управления движением, представляющий собой блок выработки управляющих сигналов для

приводов робота-агента (Рисунок 4.3). Для моделирования работы приводов свяжем механическая модель робота-агента, реализованную в системе Simulink с помощью модуля Simscape Multibody (Рисунок 4.4) и блоки моделирования приводов и их регуляторов.

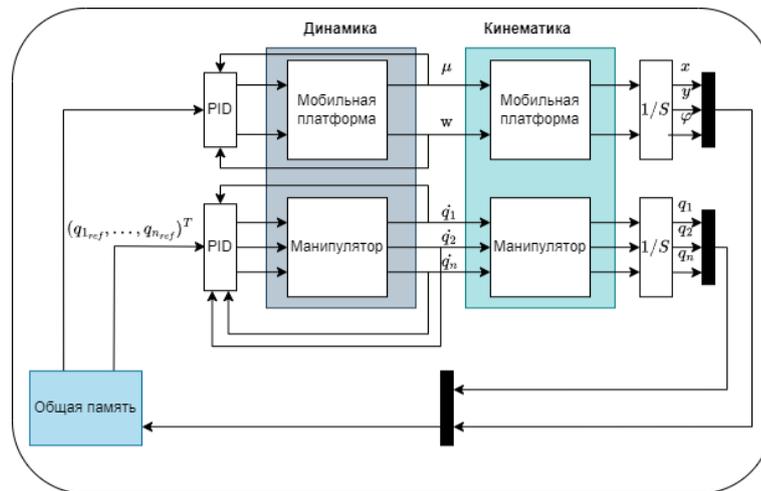


Рисунок 4.3.

Нижний уровень системы управления робота-агента.

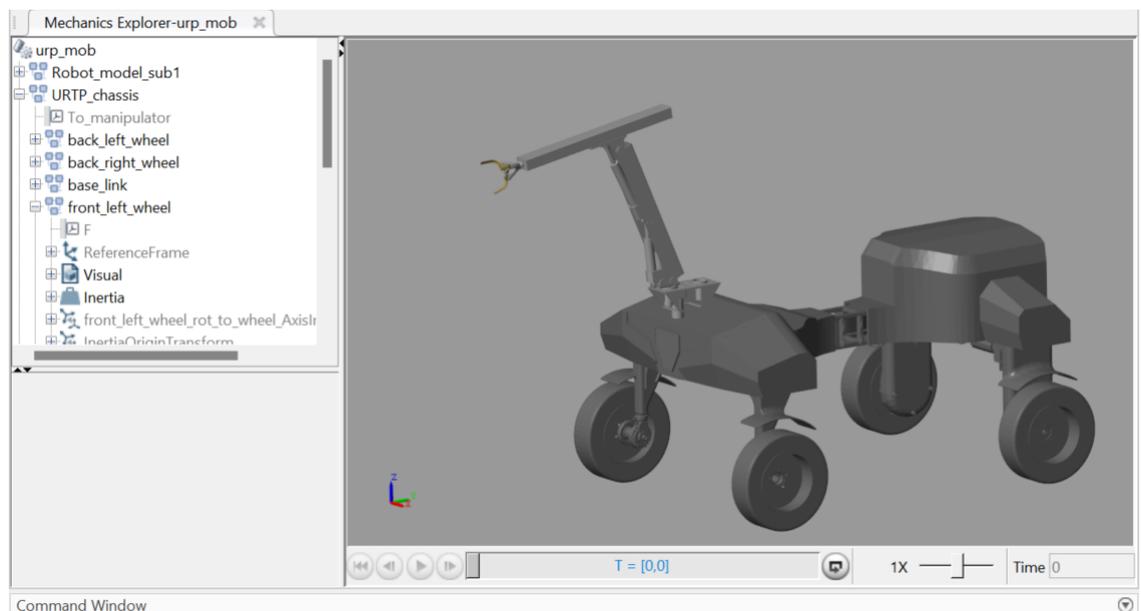


Рисунок 4.4.

Реализованная в MATLAB Simulink динамическая модель робота-агента, представленная в виде мобильной манипуляционной платформы

С учетом предложенных выше элементов системы управления движением манипулятора робота агента и мобильной платформой робота агента, итоговая схема системы управления движением робота-агента, представляет собой объединением подсистем управления каждым исполнительным узлом, получающие через свои логические контроллеры требуемые последовательности состояний для выполнения поставленной задачи (Рисунок 4.5,).

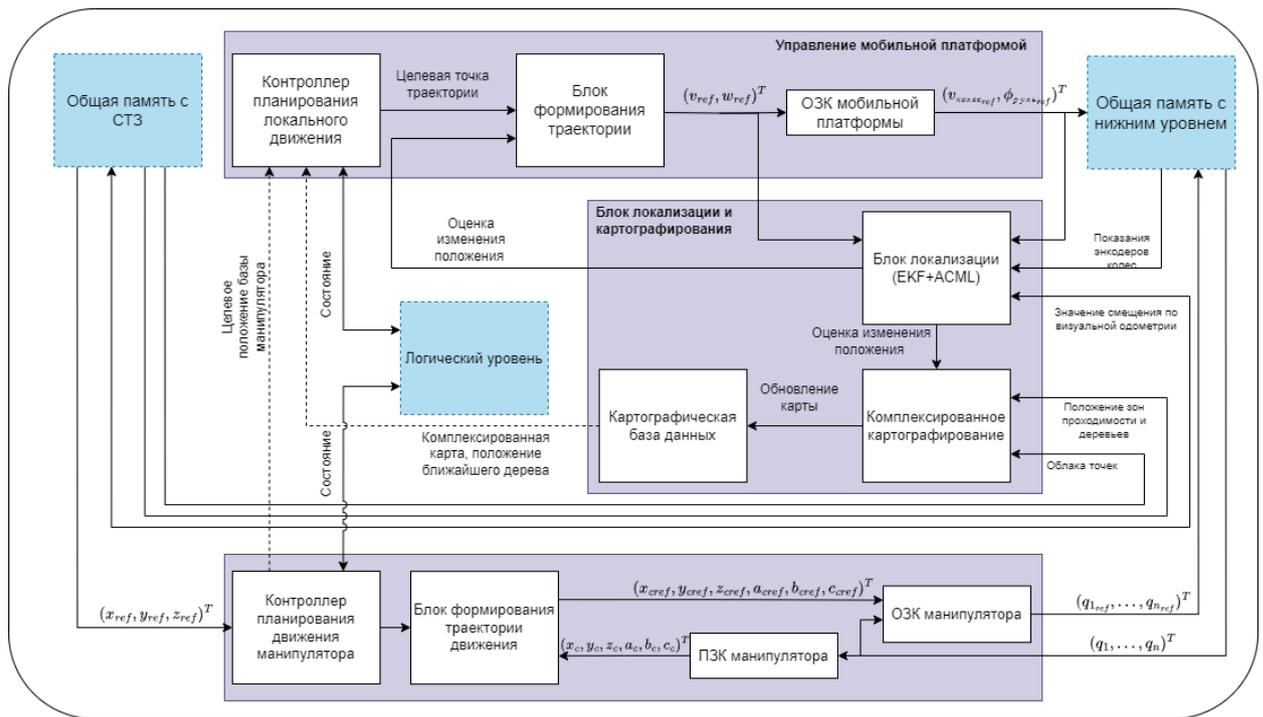


Рисунок 4.5.

Структура системы управления движением робота-агента для сбора плодов.

Реализация данной схемы предполагает наличие в модели системы механической связи между базой манипулятора и мобильной платформой и определение в состоянии «Сбор плодов» (Рисунок 4.1) требуемой позиции мобильной платформы исходя из положения плода на ближайшем дереве. Реализация схемы в системе Simulink представлена на рисунке ниже (Рисунок 4.6).

Система управления движением через узлы общей памяти взаимодействует с системой технического зрения, системой управления нижнего уровня и логическим уровне.

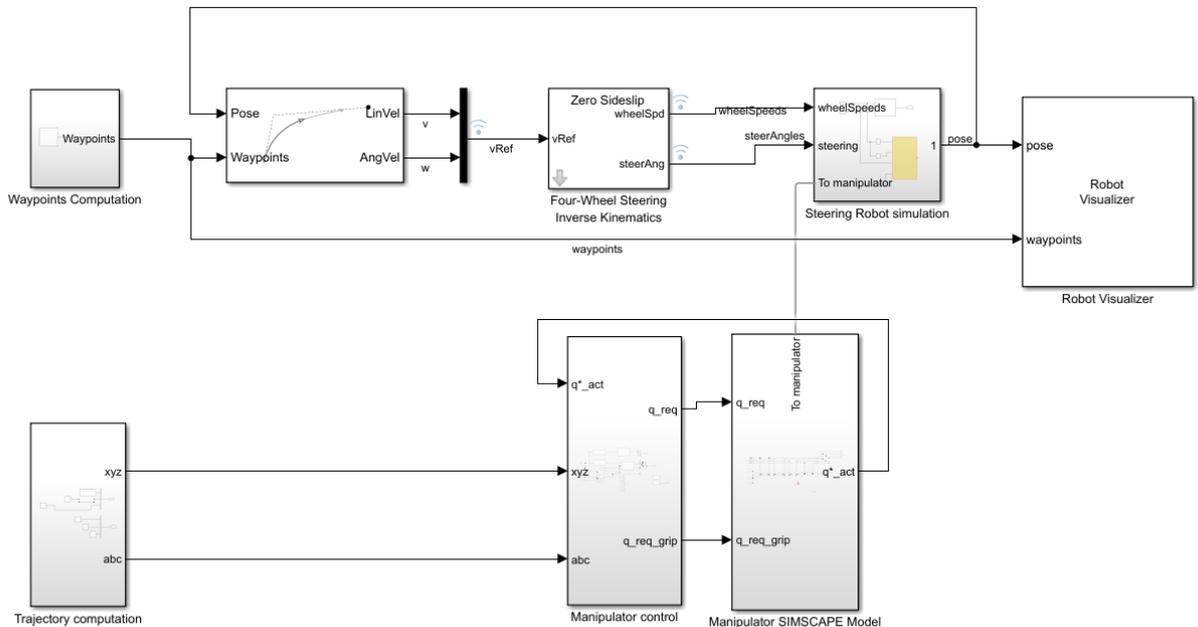


Рисунок 4.6.

Реализованная в MATLAB Simulink модель системы управления движением робота-агента, представленной в виде мобильной манипуляционной платформы

4.1.1. Модель движения индивидуального робота

Для проверки возможности осуществления управления роботом для выполнения назначенного задания, путем сочетания адаптивных алгоритмов системы технического зрения, позволяющих определить целевые точки движения мобильной платформы и манипулятора, алгоритмов локализации на базе фильтра Калмана и алгоритмов управления исполнительными системами реализуем модель окружающей среды. Модель окружающей среды представим в виде 2D симуляции для наглядности отображения стадий работы алгоритмов и 3D симуляции для генерации данных для системы технического зрения и определения параметров переключения состояний. Настройка и моделирование с 3D симулятором представлена в Главе 4. В данном разделе рассмотрим

вопросы касающиеся моделирования движения одного робота-агента в 2D симулятора с заранее определённым положением рядов деревьев и известной целевой точкой.

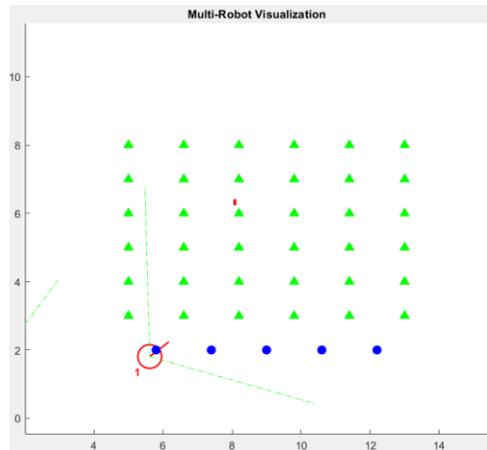


Рисунок 4.7.

2D модель среды функционирования робота-агента. Зеленым обозначены деревья, синий круг – точка начала ряда, окружность с красной дугой - робот-агент, злeный пунктир – модель сканирующего лазерного дальномера робота

Для планирования движения к целевым точкам, определяемым логическим уровнем по данным СТЗ реализуем планировщик траектории на базе алгоритма «PurePursuit» (Рисунок 4.8).

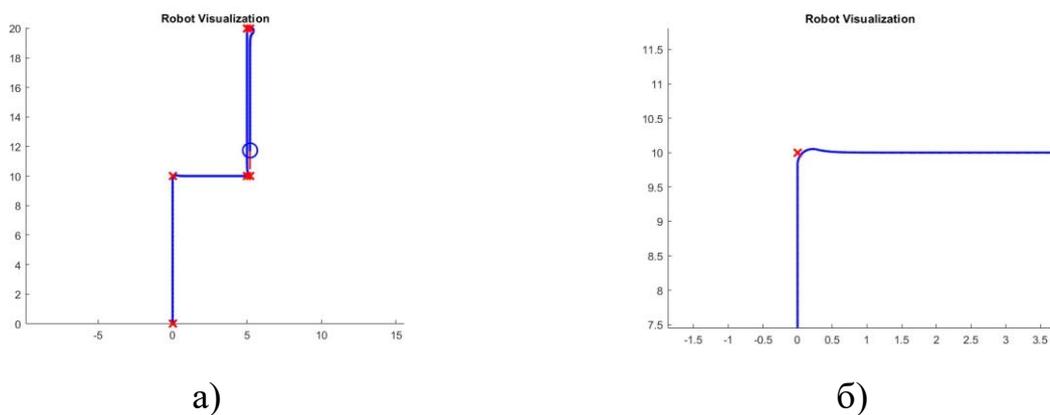


Рисунок 4.8.

Пример обхода запланированной траектории роботом-агентом траектории, а) – заданной массивом точек; б) – траектория поворота робота-агента.

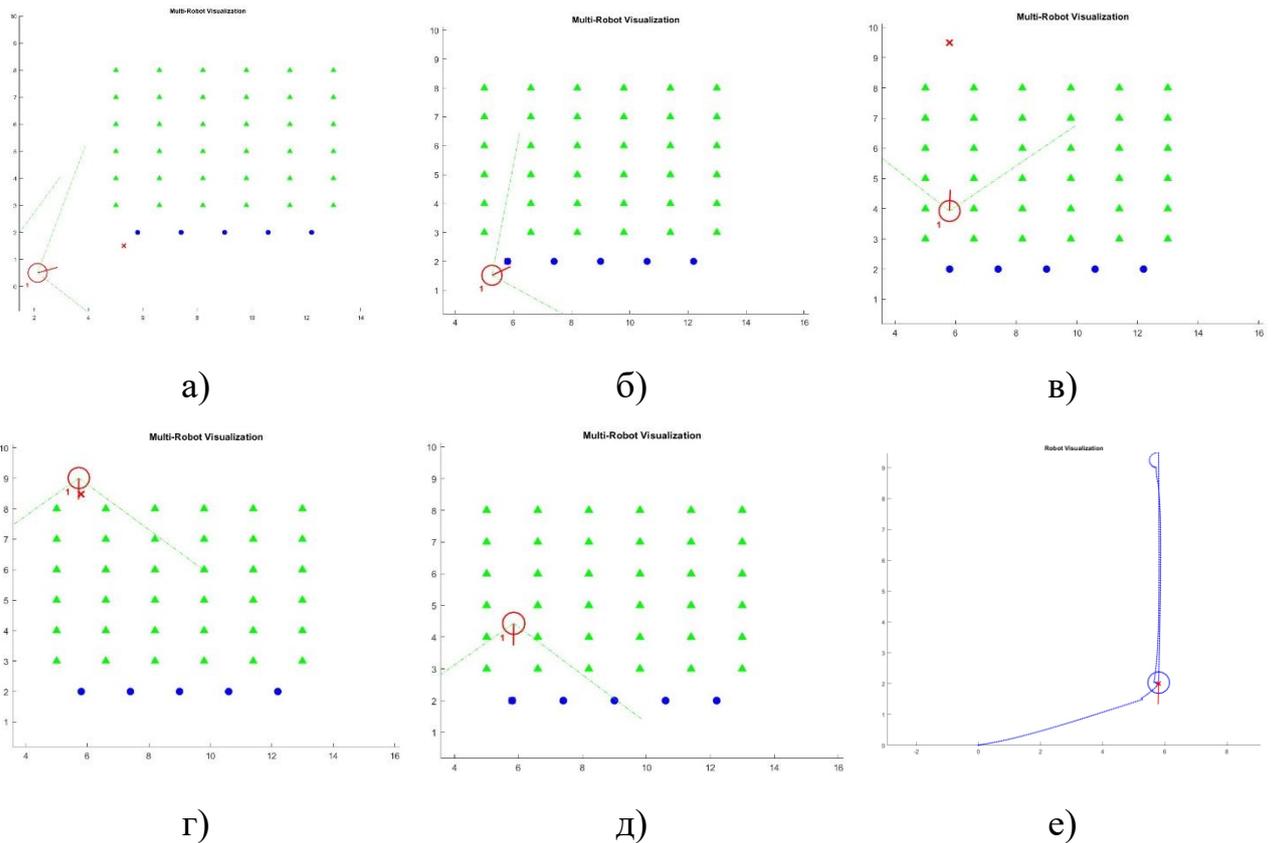


Рисунок 4.9.

Динамическое определение целевой точки роботом-агентом, в зависимости от состояния: а) – движение к началу ряда насаждений; б) – подход к точке, являющейся серединой ряда; в) – движение вдоль ряда; г) – разворот в обратную сторону; д) – движение к началу ряда; е) –общая траектория робота

Давая характеристики элементам системы управления робота-агента, можно сказать, что модуль символического представления знаний и формализации задач вместе с логическим уровнем системы управления определяют стратегию выполнения задач, система управления движением и СТЗ отвечает за тактику выполнения задач, посредством достижения требуемых состояний, нижний уровень отвечает за реактивное поведение.

4.1.2. Модель движения группы роботов

В целях дальнейшего моделирования движения группы роботов реализуем в Matlab логический уровень отдельных роботов.

Модель управления конечным автоматом ведомого робота представлена на рисунке ниже (Рисунок 4.10).

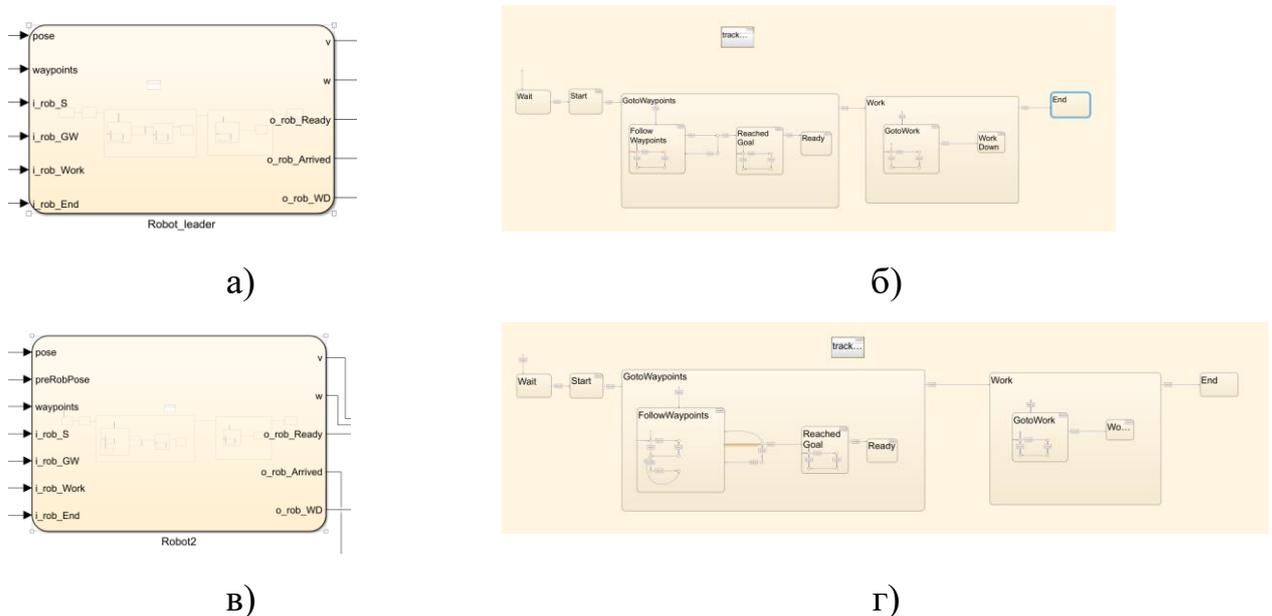


Рисунок 4.10.

Модели конечных автоматов: а) – конечный автомат для ведущего робота; б) – взаимодействие элементов конечного автомата ведущего робота; в) – конечный автомат для ведущего робота; г) – взаимодействие элементов конечного автомата ведомого робота

Для управления движения группой роботов сформируем общую схему логического уровня согласно моделям конечных автоматов роботов, приведенных ранее и модели КА верхнеуровневого вычислителя МРТС. Получим итоговую структуру модели логического уровня (Рисунок 4.11).

Свяжем выходы логического уровня с соответствующими блоками для моделирования движения отдельных роботов и проведем процесс моделирования движения.

Как видно из результатов моделирования, связка предложенной структуры логического уровня и модели управления движением, позволяет осуществить поэтапное выполнение задачи движения вдоль ряда группы роботов (Рисунок 4.12).

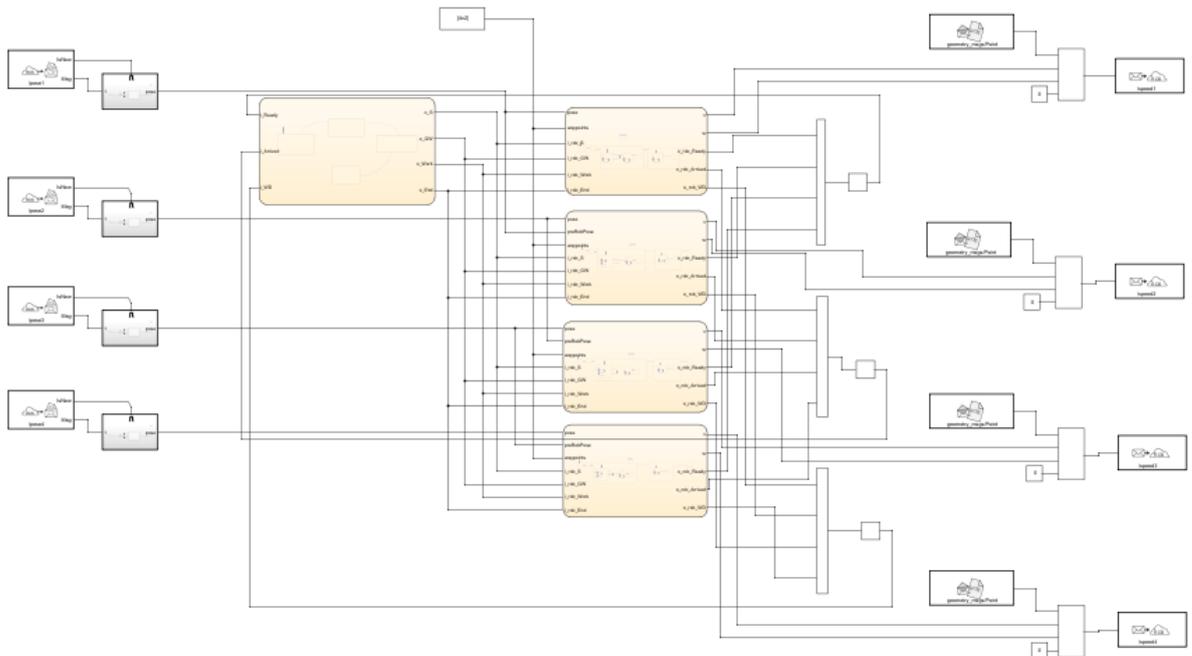
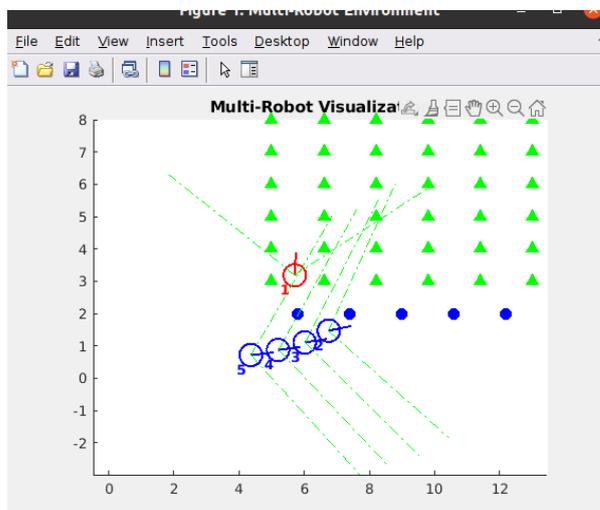
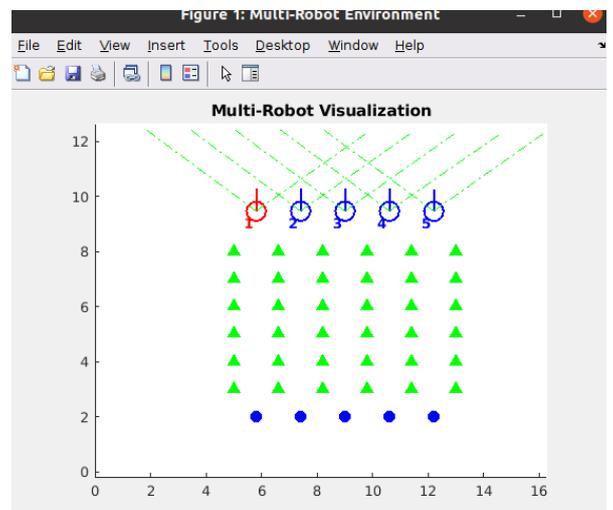


Рисунок 4.11.

Итоговая структура модели логического уровня



а)



б)

Рисунок 4.12.

Моделирование движения группы роботов: а) – состояние начала распределения между рядами; б) – конце движения вдоль ряда

4.2. Моделирование и исследование алгоритмов группового управления

Комплексная виртуальная модель, удовлетворяющая критериям управления, позволяет формировать требования к механическим, электрическим и электронным компонентам РТК от функций управления, а не ограничивать возможности управления возможностями компонентов, входящих в его состав. На практике применяются как правило компромиссные решения исходя из доступности тех или иных компонентов, цены конечного изделия и возможностей разработки системы управления.

Сценарии моделирования функционирования РТК и испытаний зависят от стандартов в сфере применения РТК и тактико-технических требований. Сценарии могут включать в себя как проверку работы единичных роботов, так и РТК, представляющих собой группировки роботов.

Для проведения экспериментальных работ по проверке функционирования алгоритмов распределения задач и управления группой роботов, ввиду финансовых и временных ограничений, связанных с изготовлением нескольких реальных РТК принято решение использовать аппаратные и программные решения, разработанные и использованные в рамках деятельности ФГБНУ ФНАЦ «ВИМ» и реализовать систему группового управления с применением имитационного моделирования.

4.2.1. Аппаратная часть системы управления

Для моделирования работы системы будем руководствоваться характеристиками датчиков в составе системы управления.

Аппаратная реализация системы управления мобильной платформы состоит из следующих компонент:

- блок сопряжения с манипулятором;
- центральный бортовой вычислитель;
- бортовой вычислитель СТЗ;
- камера глубины Intel RealSense D415;

- сканирующий лазерный дальномер Velodyne;
- колесное шасси.

Выбор датчиков в составе системы технического зрения обусловлен необходимостью решения задачи локализации робота и локализацией объектов во внешней среде. Принято решение использовать в качестве датчика для распознавания плодов RGBD-камеру Intel RealSense и LIDAR Velodyne в качестве основного датчика системы локализации и картографирования.

Для обеспечения распределенного управления и модульности компонент в состав РТК использованы контроллеры нижнего и верхнего уровней. Контроллеры нижнего уровня (Рисунок 4.13) предназначены для управления сервоприводами и обработки информации с датчиков и реализованы на базе микроконтроллеров семейства STM32.



Рисунок 4.13.

а) – датчики в составе СТЗ; б) – вычислитель верхнего уровня и контроллер нижнего уровня - OpenCR

Для передачи низкоуровневой информации использован протокол DXL. Для общения с контроллером верхнего уровня протокол UART. Структура аппаратной чатси представлена ниже (Рисунок 4.14).

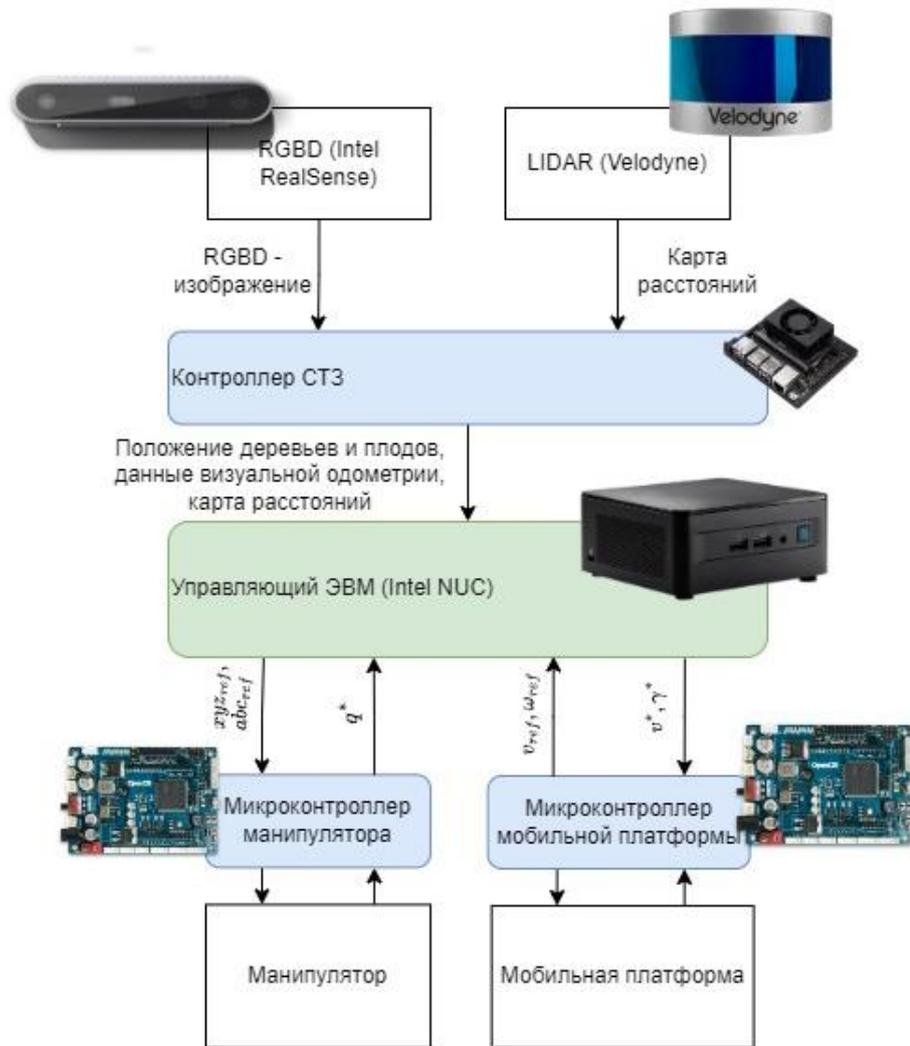


Рисунок 4.14.

Структура аппаратной реализации системы управления робота-агента

4.2.2. Программная реализация системы управления МРТС

Программная часть РТК, входящих в состав испытательного стенда, и вычислителя системы управления МРТС была реализована с использованием пакета ROS, выступающее как промежуточное связующее ПО (middleware) между специальными управляющими программами и операционной системой (Рисунок 4.15).

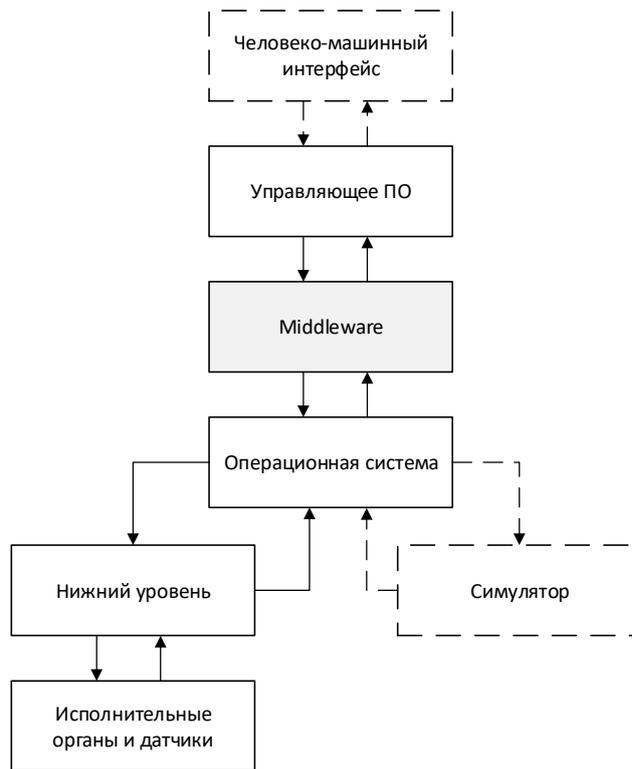


Рисунок 4.15.

Место промежуточного ПО (middleware) в архитектуре ПО робото-агентов и СУ МРТС

Управляющее ПО на уровне отдельных вычислителей всех устройств представлены в виде узлов, обменивающихся между собой сообщениями заранее определенных форматов.

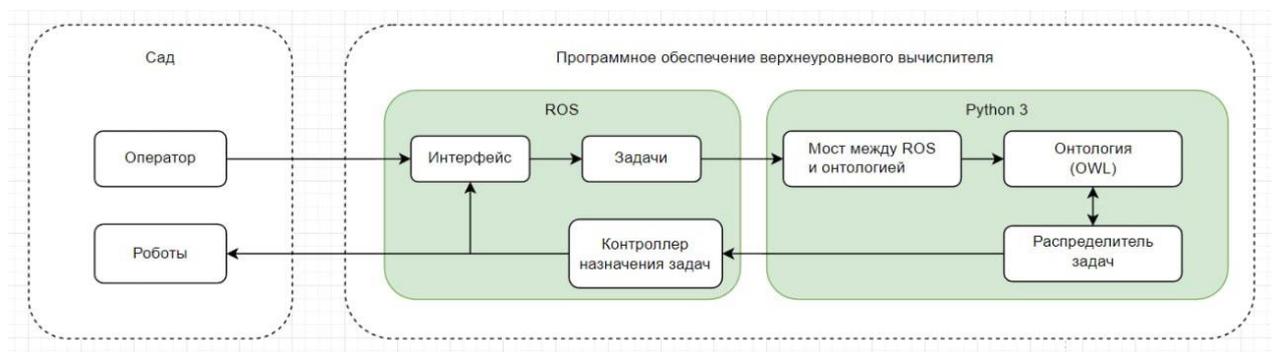


Рисунок 4.16.

Структура программного обеспечения верхнеуровневого вычислителя

В рамках экспериментальной части реализуем интерфейс пользователя в виде web-страницы. Реализован интерфейс с использованием возможностей API сервиса Яндекс.Карты (Рисунок 4.17).

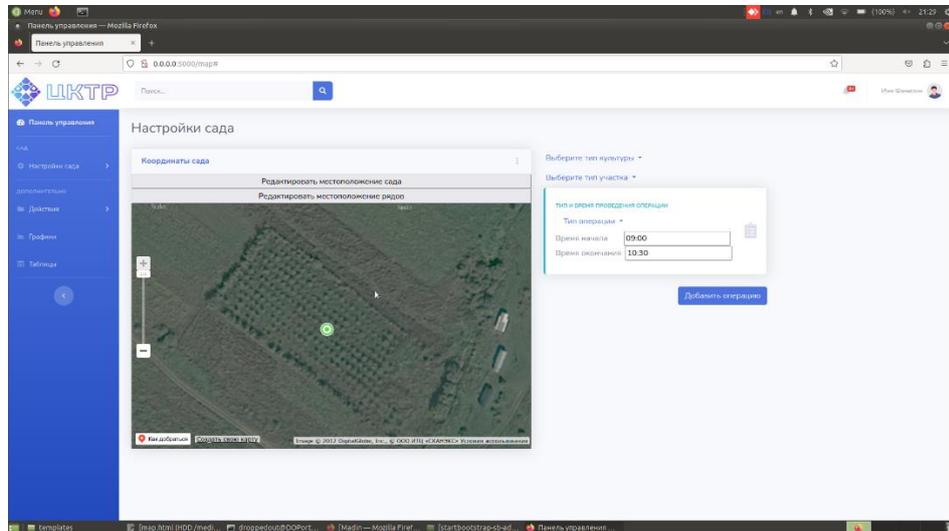


Рисунок 4.17.

Внешний вид интерфейса для формирования задания по обработке сада интенсивного выращивания на базе ГИС

В интерфейсе пользователя предусмотрена возможность определения области расположения сада интенсивного выращивания и реализованы инструменты для определения границ сада и рядов насаждений (Рисунок 4.18). Для определения стоимости назначения задач изначально происходит загрузка изображения карты и создание бинарной карты занятости в интерфейсе пользователя. Определяются значения переменных, связанные с количеством задач и роботов.

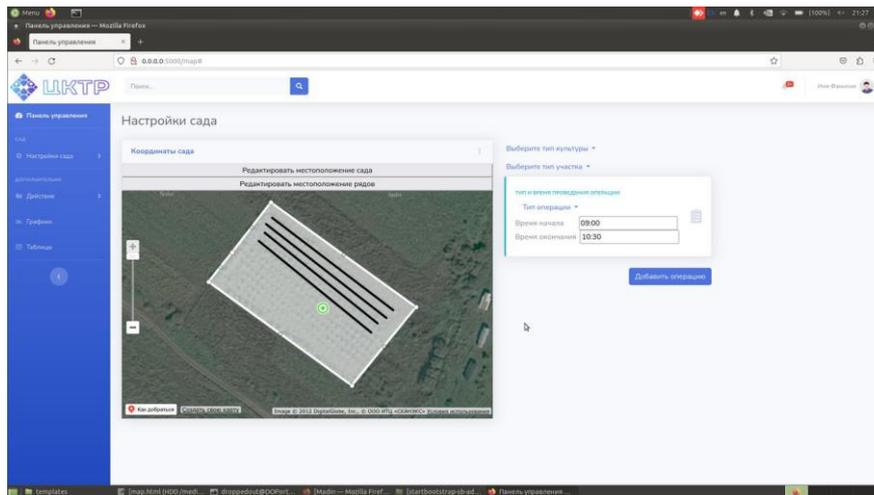


Рисунок 4.18.

Использование инструментов для ограничения границ сада и определения расположения рядов насаждений

Далее задача разбивается на указанное количество подзадач разной стоимости. Стоимость задачи определяется суммой всех подзадач, в неё входящих. Стоимость подзадач определяется по расходу заряда аккумулятора у робота для выполнения подзадачи. Транспортные перемещения до начала ряда требуют меньше всего заряда. Движение вдоль ряда требует большего расхода заряда, так как робот не только движется, но и собирает плоды, следовательно стоимость подзадачи больше.

Исходя из значений параметров состояния роботов, сохраненных в онтологии, выбираются роботы, которым возможно присвоение задач, определенных пользователем. Затем используется алгоритм A^* для планирования путей от каждого робота к каждой задаче, начальное положение отдельных роботов, также определяются из онтологии. Результаты сохраняются в матрицу путей, а стоимость каждой задачи сохраняется в матрицу стоимости.

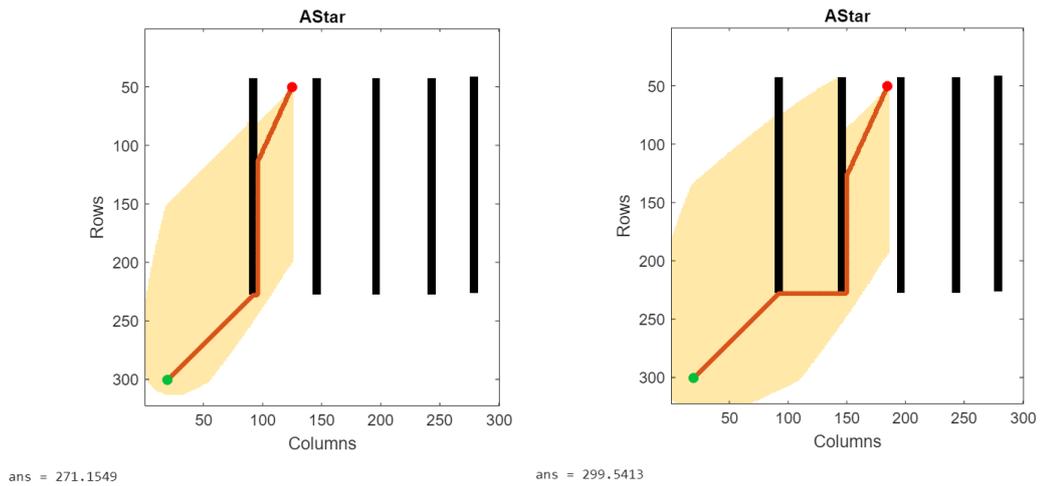


Рисунок 4.19.

Визуализация расчета стоимости выполнения задания, представленного точкой, на карте алгоритмом А*

После этого происходит распределение задач между роботами с использованием венгерского алгоритма и вывод результатов.

В таблицах (Таблица 11 – Таблица 14) представлены матрицы стоимости, где номера столбцов соответствуют номерам роботов, а номера строк номерам задач. На зелёном фоне оптимальное распределение задач по роботам.

Таблица 11.

Матрица стоимости и оптимальное распределение для 4 роботов и 4 задач

№ зад.\№ роб.	1	2	3	4
1	268	73	153	280
2	95	252	110	105
3	219	139	87	229
4	315	92	216	327

Таблица 12.

Матрица стоимости и оптимальное распределение для 5 роботов и 5 задач

№ зад.\№ роб.	1	2	3	4	5
1	27	233	272	182	371
2	132	262	301	211	252
3	270	328	289	331	184
4	200	36	75	125	181
5	247	200	151	286	141

Матрица стоимости и оптимальное распределение для 6 роботов и 6 задач

№ зад.\№ роб.	1	2	3	4	5	6
1	230	146	183	226	257	157
2	235	145	188	225	256	156
3	130	261	148	107	73	178
4	322	38	275	156	187	61
5	15	345	34	195	209	290
6	259	158	277	98	58	75

Предлагаемая программная реализация венгерского алгоритма, используемого для оптимального распределения задач между роботами в соответствии с матрицей стоимости, следующее:

1. Вычисляются минимальные значения по строкам и столбцам матрицы стоимости и их вычитаются из соответствующих строк и столбцов.
2. Инициализируются переменные и массив присвоений для отслеживания распределения задач.
3. Поочередно находятся нули в матрице стоимости, которые еще не были покрыты, и не использовались для распределения задач.
4. Запускается цикл, который будет идти, пока есть непокрытые строки. Если не удастся найти ноль в текущей строке, то уменьшаются все непокрытые значения матрицы на минимальное непокрытое значение, и процесс повторяется.
5. По завершению цикла возвращается оптимальное распределение задач в виде матрицы присвоений.

Оптимальное распределение задач:

```

1    2
2    1
3    4
4    5
5    3

```

Рисунок 4.20.

Вывод результата работы венгерского алгоритма

4.2.3. Программная реализация системы управления робота-агента

Программная интерпретация разработанных в Главе 2 и 3 алгоритмов функционирования элементов системы управления робота-сборщика требовало реализации программных модулей, которые взаимодействуют как отдельные узлы ROS (Рисунок 4.21).



Рисунок 4.21.

Структура программного обеспечения робота-агента

Как видно из рисунка выше основные исполнительные и сенсорные узлы, сконфигурированные в рамках функционирования мобильных платформ и манипуляционных систем, управляются логическим уровнем, представленным в виде конечного автомата.

Программная реализация логического уровня системы управления робота-агента

Для осуществления эксперимента и проверки функционирования программных модулей в составе системы управления роботами логический уровень системы управления каждого робота, представленный в виде конечного автомата реализована с помощью библиотеки SMACH. Конечный автомат осуществляет логическое управление исполнительными элементами, входящими в состав манипулятора в том числе распознавания плодов, мобильной платформы и стека навигации – Рисунок 4.22.

Реализованы состояния для приема задач, поиска и движения к началу ряда, поиска дерева и плодов и движения мобильной платформы и манипулятора внутри ряда, состояния диагностики заряда батарей и емкостей с собранными плодами.

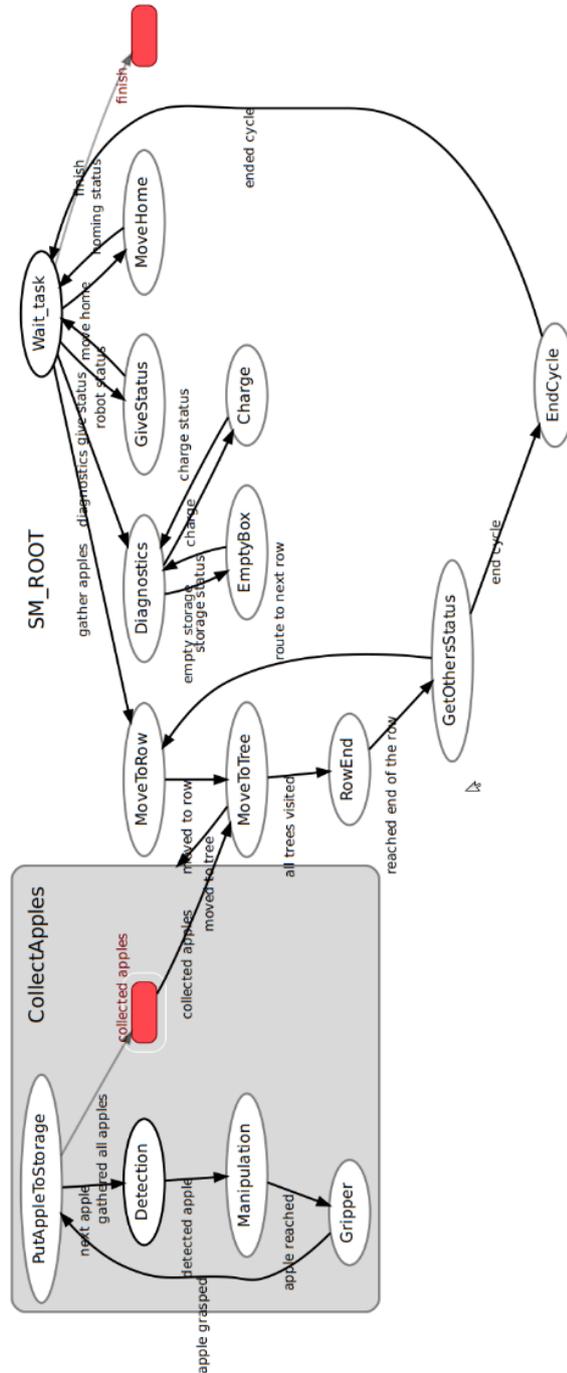


Рисунок 4.22.

Программная реализация конечного автомата управления движением робота-агента для сбора плодов

Программная реализация управления движением

Навигационные системы мобильных платформ сформированы по классической архитектуре [124] и как было показано в Главе 3 включает в себя блоки обработки данных колесной одометрии, блок визуальной одометрии, картографическую базу данных, локальный и глобальный планировщики пути.

Согласно структурной схеме программной реализации системы управления роботом-агентом (Рисунок 4.21) блок картографирования и картографическая база данных реализована с помощью модуля *map-merger* (Рисунок 4.23).

Навигация и SLAM мобильных платформ обеспечены с помощью интерпретации, описанного в Главе 3 расширенного фильтра Калмана для колесной платформы со схемой Акермана. Реализован модуль глобального планирования движения и локальный планировщик, исходя из особенностей планирования траектории для робота со схемой Акермана (Рисунок 4.24).

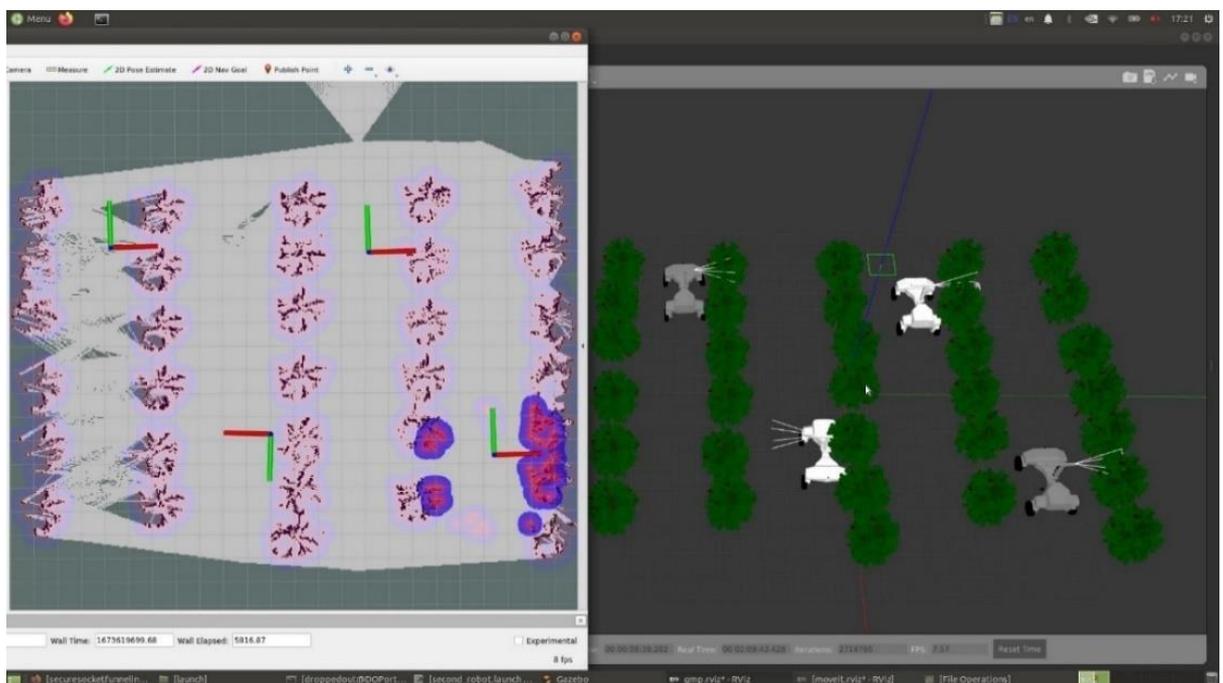


Рисунок 4.23.

ММР на испытательном полигоне (слева), визуализация карты местности и локализации робота (справа)

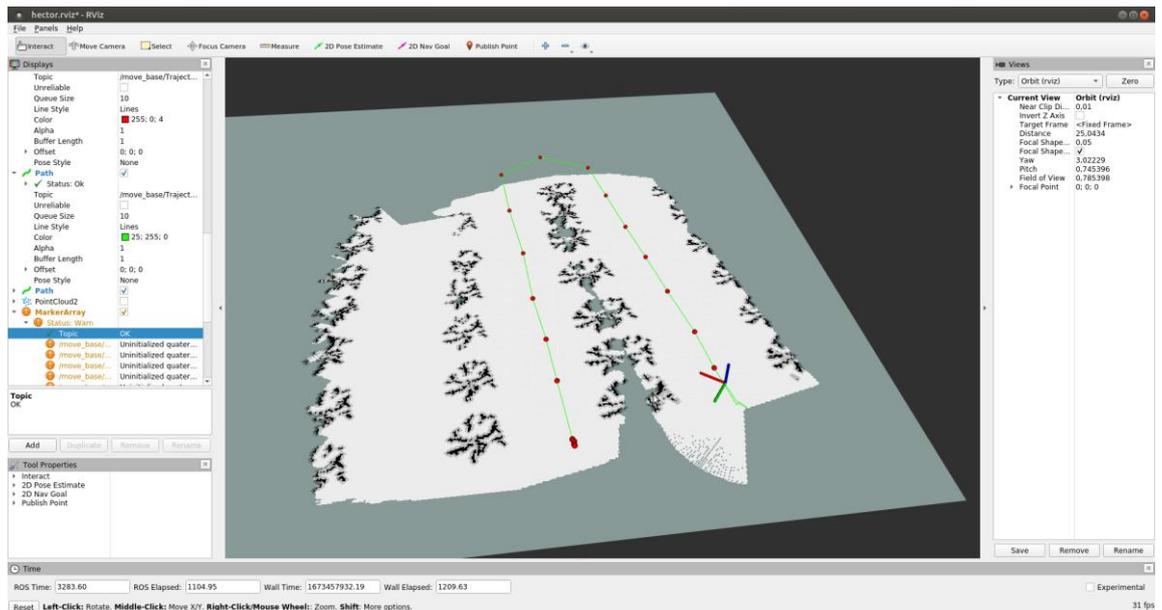


Рисунок 4.24.

Визуализация карты местности, локализации робота и плана траектории движения

4.3. Эксперимент по проверке работы системы распознавания положения плодовой продукции и управления манипулятором

Эксперимент направлен на определение возможности осуществления сбора яблок с дерева с помощью роботизированного манипуляционного механизма, разработанного на базе ФНАЦ «ВИМ», оснащенного системой управления и системой технического зрения, разработанными в рамках данной диссертационной работы.

Эксперимент проводился в условиях совмещенного искусственного и дневного освещения. В качестве объекта для распознавания и манипулирования были выбраны муляжи яблок, расположенные на муляже яблони.





Рисунок 4.25.

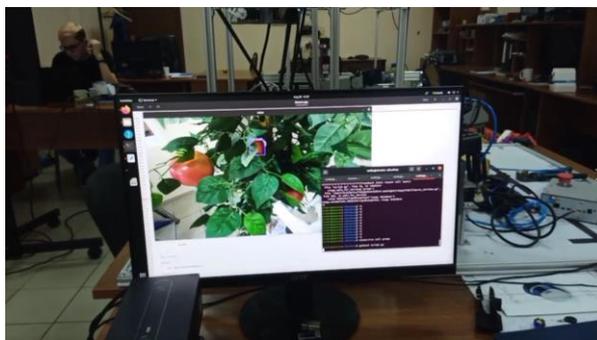
Движение манипуляционного робота при проведении эксперимента; а) – начальное положение манипулятора; б) – манипулятор в точке предзахвата; в) – захват объекта; г) – манипулятор в зоне отгрузки яблока

Управление манипуляционным роботом осуществляется с помощью разработанного программного обеспечения, реализующего траекторное управление манипулятором. Программное обеспечение функционирует как узел в составе системы управления на базе ROS, где генерируемые значения положения и скоростей звеньев передаются по последовательному порту на контроллер нижнего уровня, управляющего манипулятором (Рисунок 4.26).

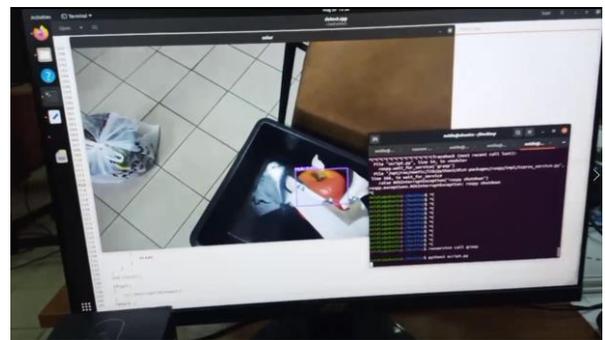
Из представленных результатов можно сделать вывод о том, что после появления плода в кадре генерация управляющих сигналов происходит за 1.15 с (Таблица 14). Скорость выполнения операции зависит уже от положения конкретного плода. Средняя скорость сбора 1 яблока в объеме на 1 куб метра при неизменяющемся стационарном положении экспериментального образца манипулятора в составе РТК 28 секунд, что означает что для промышленного использования подобного решения потребуются более быстродейственные привода и захватное устройство иного типа.

Обобщенные результаты эксперимента

Параметр	Распознавание яблока при появлении в кадре на расстоянии менее 1 м	Определение точки вывода манипулятора	Формирование управляющих сигналов	Суммарное время
Время	0.15с	0.5с	0.5с	1.15с
Точность	98%	75%	± 0.1 мм	-



а)



б)

Рисунок 4.27 Работа СТЗ при выполнении эксперимента; а) – распознавание плода перед срывом; б) – распознанный плод в зоне отгрузки

Результаты эксперимента по сбору отдельных плодов

Номер плода	Время обнаружения после появления в кадре	Время получения управляющего сигнала для сбора плода после обнаружения	Время захвата плода	Время отгрузки плода в контейнер
Плод №1	0.15с	1.11 с	17 с	7 с
Плод №2	0.19с	1.22 с	19 с	8 с
Плод №3	0.16с	1.25 с	22 с	9 с
Плод №4	0.17с	1.31 с	23 с	8 с

4.4. Эксперимент по управлению гомогенной группой роботов-сборщиков

Используя программную реализацию алгоритмов СУ МРТС и СУ роботов-агентов, проведем испытания работы модели системы управления гомогенной группы роботов при выполнении задачи сбора плодовой продукции в саду интенсивного выращивания.

4.4.1. Разработка и конфигурирование модели робота-агента для сбора плодовой продукции

Подтверждение работоспособности предложенных алгоритмов управления сельскохозяйственными роботами возможно с помощью инструментов виртуального моделирования [122, 123]. Для моделирования сельскохозяйственных робототехнических систем с учетом возможности интеграции Middleware ПО ROS был проведен анализ средств моделирования РТК и выбран программный пакет Gazebo.

Gazebo 3D, разрабатываемый некоммерческой организацией OSRF (Open-Source Robotics Foundation), имеет ряд преимуществ по сравнению с другими робототехническими симуляторами. Gazebo это бесплатный и имеет открытый код. Gazebo популярен среди мирового робототехнического сообщества и является официальным симулятором соревнований DARPA. Gazebo отлично интегрируется с программной платформой ROS (Robot Operating System), а значит разработанную программу управления виртуальным роботом в Gazebo и ROS будет относительно несложно перенести на реального робота.

Симулятор Gazebo имеет свой собственный редактор, позволяющий без программирования создавать трехмерные сцены и включающий огромную библиотеку моделей, однако параметры функционирования большого шасси на omni-колесах создавалось заново в рамках этой работы (Рисунок 4.28, а).

Сконфигурированы модели манипуляторов (Рисунок 4.28,, б) с захватными устройствами.

Созданы модели датчиков входящих в состав мобильных платформ испытательного стенда (Рисунок 4.29).

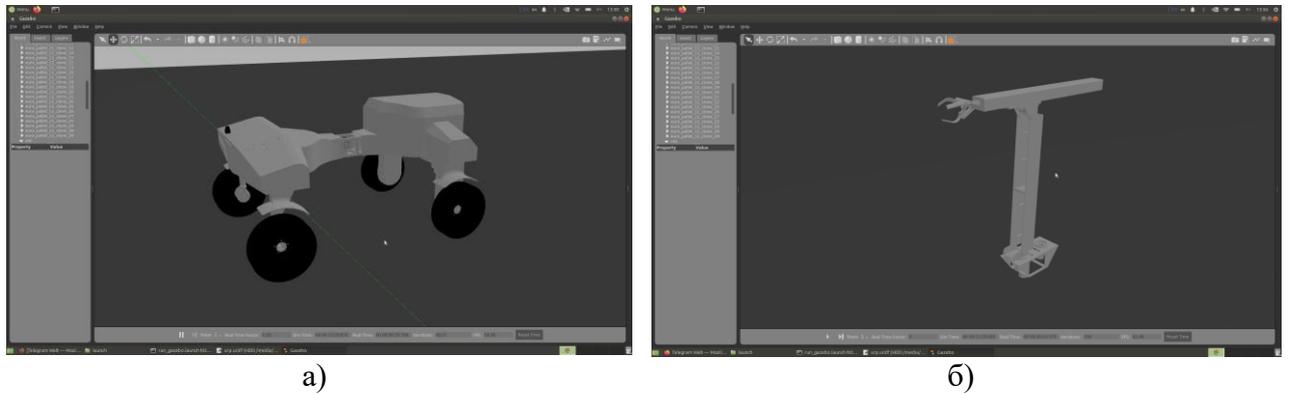


Рисунок 4.28.

Разработанная модели элементов робота-агента в среде Gazebo: а) – мобильная платформа; б) – манипулятор

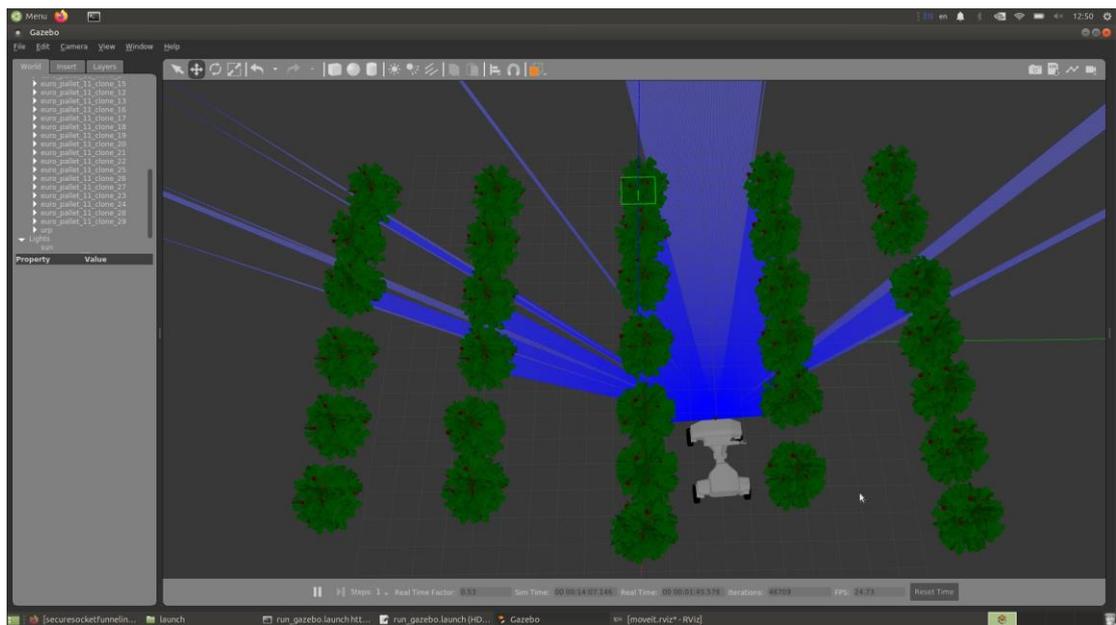


Рисунок 4.29.

Моделирование мобильной платформы со сканирующим лазерным дальномером в среде Gazebo

Показана возможность моделирования процессов распознавания образов (Рисунок 4.30). Для решения задачи захвата манипулятором объектов необходимо предварительно распознать и локализовать объект, для этого

использовалась система, разработанная в Главе 3, адаптированная для работы с моделью RGBD-камеры в симуляторе Gazebo.

Разработанная виртуальная модель интегрируема с программным пакетом для осуществления логического управления и средствами ROS синхронизируема с реальными платформами.

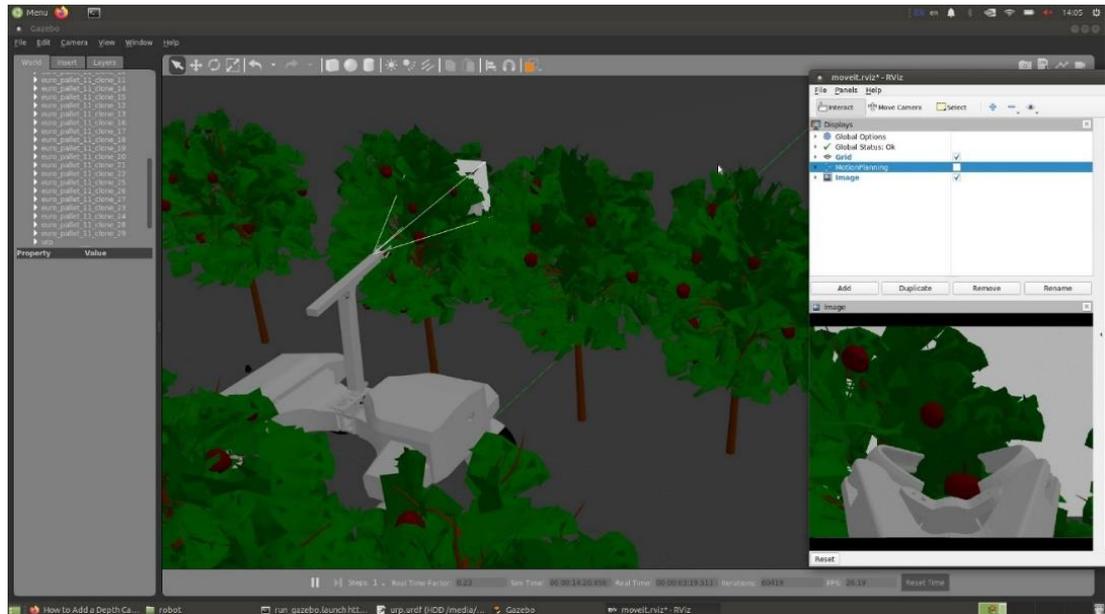


Рисунок 4.30.

Моделирование работы системы технического зрения и процесса захвата плода



Рисунок 4.31.

Моделирование работы системы технического зрения – сегментация изображения

Общая конфигурация программного обеспечения для моделирования с интеграцией программных модулей для управления манипуляционным механизмом и транспортной платформой двух роботов представлено на рисунке ниже (Рисунок 4.32).

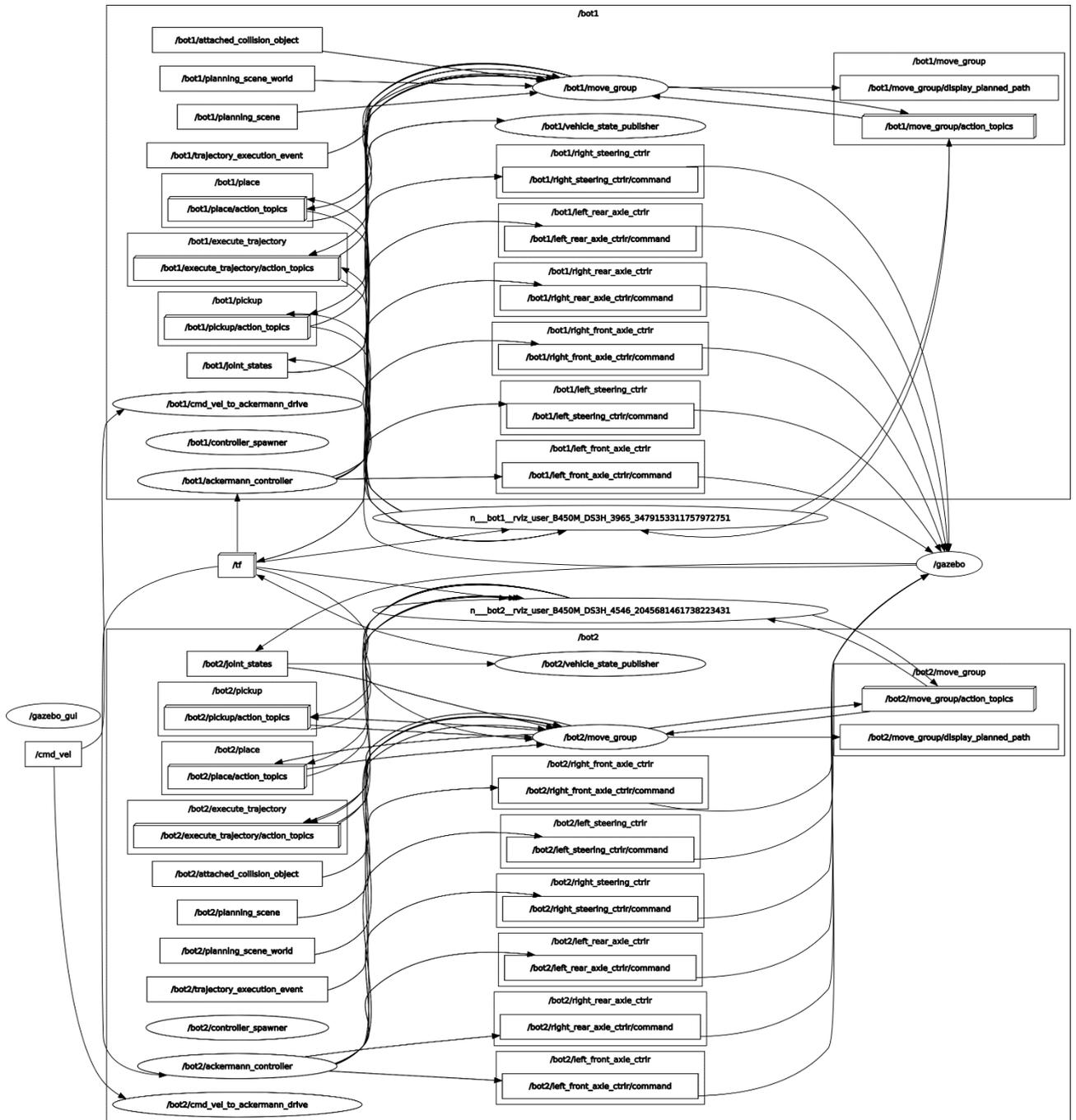


Рисунок 4.32.

Граф взаимосвязей программных узлов для моделирования группового управления роботами для сбора плодов с использование пакета ROS и среды Gazebo

4.4.2. Программа-методика проведения испытаний моделированием работы МРТС для сбора плодовой продукции

Объект и объем испытаний:

Объектом испытаний является блок распределения задач на базе онтологии системы управления МРТС для сбора плодов.

Цель испытаний:

Убедиться в корректности работы системы и правильности генерируемых рекомендаций по распределению задач.

Порядок и особые условия проведения испытаний:

Для проведения испытания блока распределения задач на базе онтологии необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) Установить программное обеспечение
- 2) Запустить блок распределения задач на базе онтологии
- 3) На вход модуля подать список задач и описание рабочей области
- 4) Подключить систему моделирования движения
- 5) Дождаться окончания обработки данных системой
- 6) Проанализировать результат генерации распределения задач
- 7) Проанализировать результат выполнения присвоенных задач

Метрологическое и материально-техническое обеспечение:

Испытания требуют наличия отологической базы данных, блока интерпретации описания ограничений рабочей зоны, блока оптимального распределения задач на базе венгерского алгоритма, а также вычислительных ресурсов для вычисления и отображения результатов.

Для проведения испытаний требуется наличие следующего аппаратного обеспечения:

1. Вычислитель с аппаратным ускорителем параллельных вычислений.

Оцениваемые характеристики:

Фактический статус выполнения задач.

Способы анализа, оценки и обработки результатов испытаний:

Создается список задач для МРТС, преобразованный в символьный вид, и данные по описанию рабочей зоны (координаты, ограничивающие площадь местности и координаты положения рядов на местности). Список подается на вход рекомендательной системы, происходит обработка и подбор распределения задач, присвоение задач, отработка задач. Производится оценка результатов.

Порядок и условия проведения испытаний:

Испытания разработанного программного обеспечения производится в рамках функционирования ПО, как составной части сервиса, развернутого на вычислительном компьютере, выполняющим функции верхнеуровневого вычислителя МРТС. Испытания проводятся с использованием данных из свободно распространяемых источников, самостоятельно полученных данных и данных, предоставленных организациями, на базе, которых проводится апробация результатов работ.

Используемые приборы для контроля, измерения и проведения испытания:

Оценка результатов производится автором на основании контроля данных, выводимых в пользовательский интерфейс и интерфейс системы моделирования.

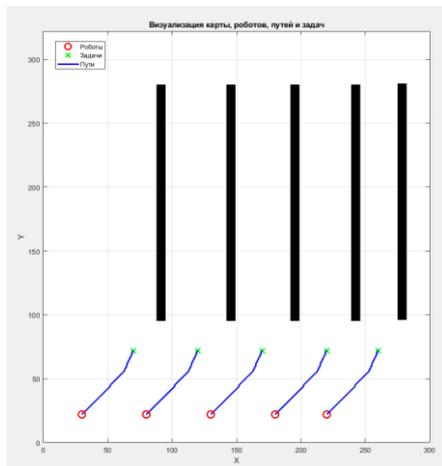
4.4.3. Ожидаемый результат испытаний блока онтологии

После обработки каждого пункта списка система должна вернуть символьные рекомендации по назначению задач. Рекомендация по назначению задачи должна соответствовать специфике работа и возможностям по выполнению задания исходя из актуального состояния. Посторонние данные должны быть отсеяны системой.

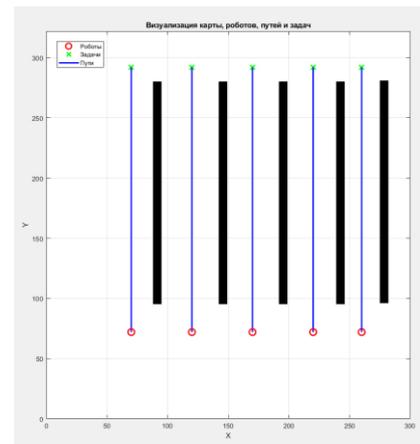
4.4.4. Результат проведения испытаний

1. Объекты испытания: Модуль назначения задач на базе онтологии
2. Цель испытания: установления соответствие между ожидаемым результатом работы и реальным.
3. Результаты испытания:

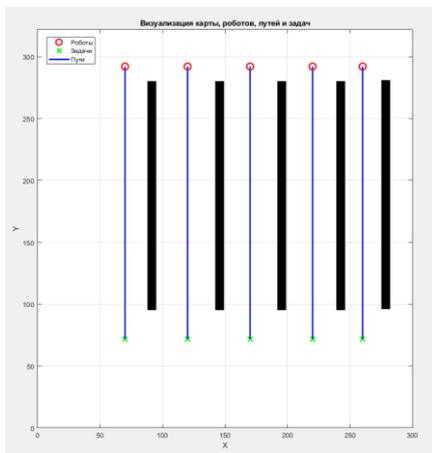
Загружается список из задач для каждого типа роботов и параметры рабочей зоны, преобразованные в символьный вид. Стоимость выполнения каждой задачи считается как стоимость прохождения пути согласно координатам задачи на упрощенной карте местности (в эксперименте использовался алгоритм A^*). На рисунках ниже (Рисунок 4.33) представлен результат оптимального распределения задач между роботами и траекторий движения для их достижения.



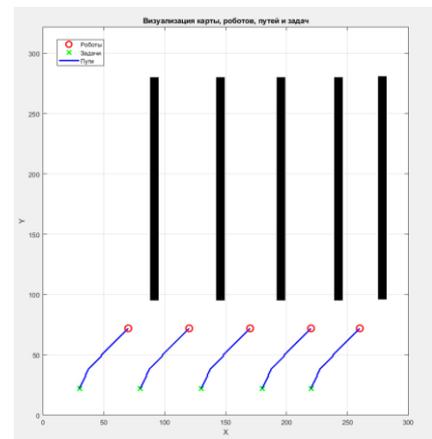
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.33.

Визуализация расчета стоимости выполнения задания: а) – движение на исходные позиции для работы; б) – движение вдоль рядов; в) – обратное движение вдоль рядов; г) – возвращение на исходную точку

После обработки каждого пункта списка система возвращает символьные рекомендации по распределению задач, отдельным типам роботов и задания роботам в гомогенных коалициях. Рекомендации по распределению задач соответствуют специфике роботов. Каждый робот выполняет движение по точкам, определяющим условия выполнения задач (Рисунок 4.34).

Роботы, которым присвоены задачи начинают движение конвоем, выходят в пространство между рядами деревьев и совершают операцию по сбору плодов (Рисунок 4.35).

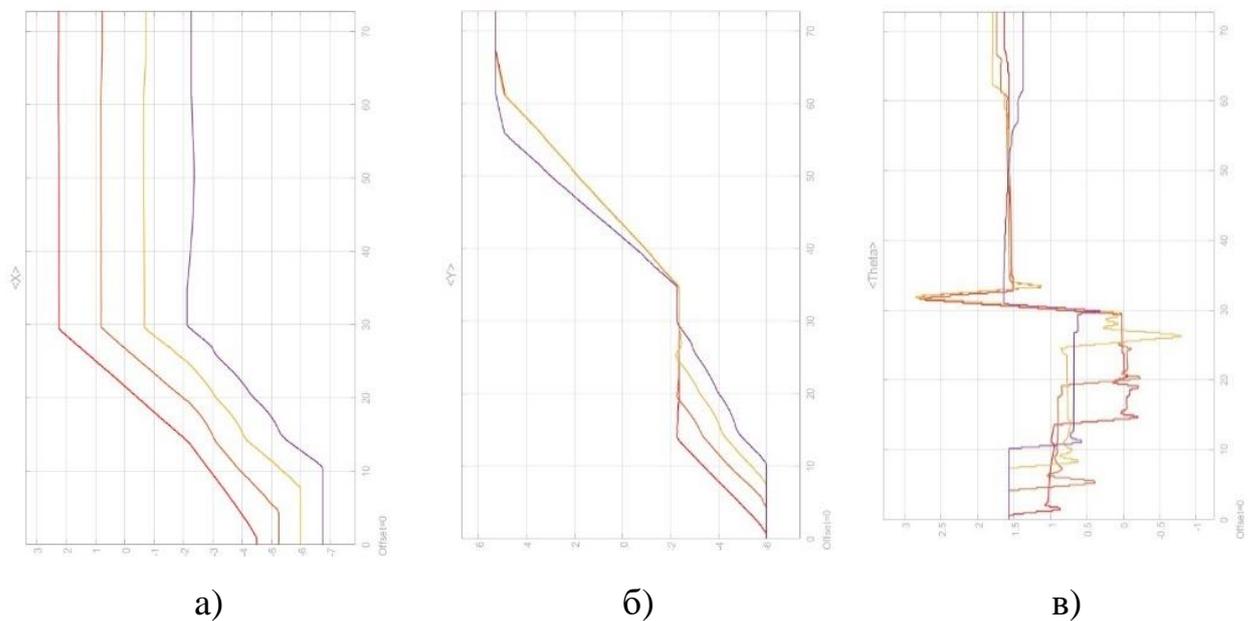


Рисунок 4.34.

Изменение координат роботов при моделировании процесса сбора яблок: а) – изменение координаты X; б) – изменение координаты Y; в) – изменение координаты Y; красным показано движение ведущего робота

Для определения покрытия все заданной траектории построим общую карту местности по индивидуальным картам каждого робота (Рисунок 4.36).

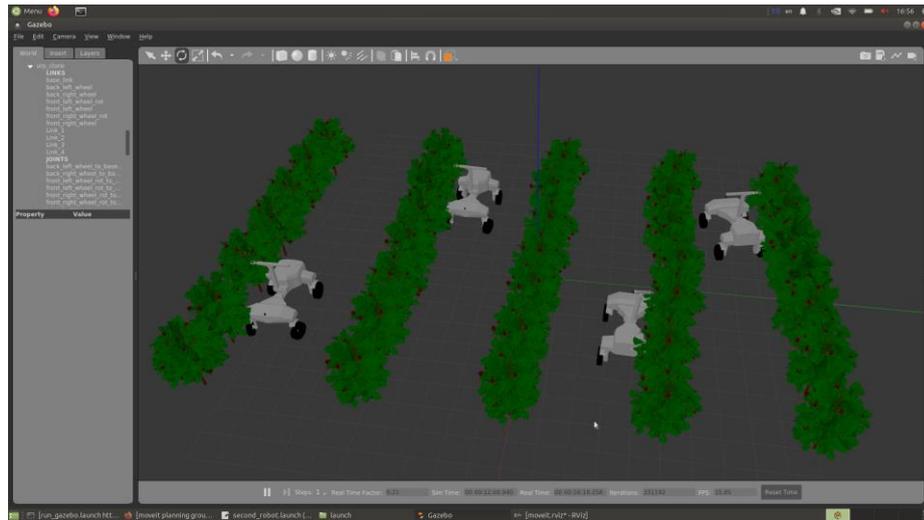


Рисунок 4.35.

Моделирование процесса сбора плодовой культуры группой роботов

Функционирование системы с локализацией положения плодовых деревьев и взаимного положения роботов приведено на рисунке ниже (Рисунок 4.36).

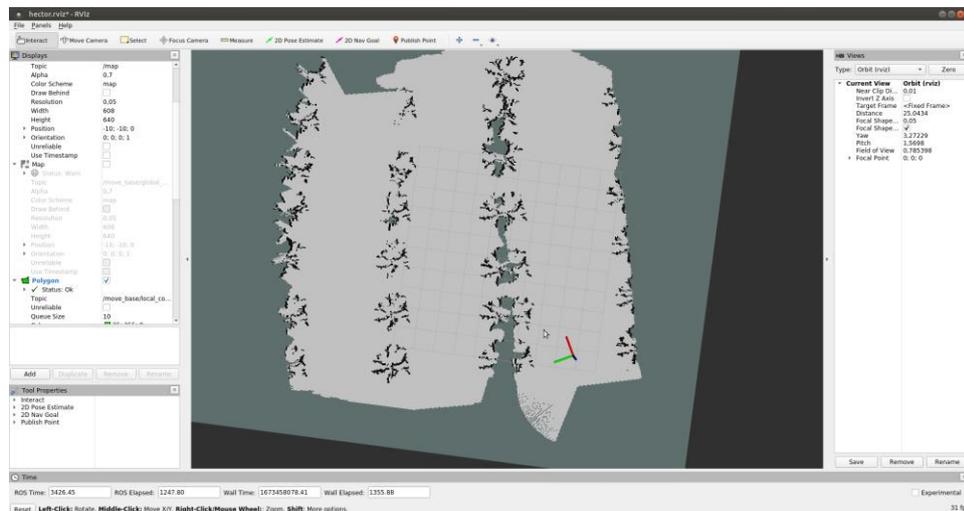


Рисунок 4.36.

Визуализация общей карты, положения роботов и деревьев в среде моделирования

Виртуальный эксперимент показал возможность назначения задач, распределения группы роботов-агентов в пространстве согласно назначенным задачам и возможность сбора плодов отдельно взятым роботом, что позволяет говорить об успешной реализации предложенных компонент в составе системы

управления коалицией сельскохозяйственных роботов в составе МРТС для сбора яблок.

4.4.5. Выводы по результатам эксперимента

Результаты испытания показывают соответствие между ожидаемым результатом работы системы и смоделированной работой системы.

4.5. Выводы по Главе 4

Реализован виртуальный полигон и имитационный стенд для испытания алгоритмов управления СХ МРТС. Проверены функциональность алгоритмов распределения задач. Показана возможность автономного осуществления сбора плодов МРТС, в состав которого входят основные роботы-сборщики, обслуживающие роботы и пункт упаковки и сортировки.

Дальнейшая разработка предполагает выполнение следующего этапа натуральных экспериментальных работ, совершенствование реализованных алгоритмов и обеспечение группового автономного сбора плодов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена структура системы управления распределенной робототехнической системы в виде мультиагентной системы с гомогенными коалициями, позволяющая осуществлять управления роботами-агентами, осуществляющими различные операции в пространстве сада интенсивного выращивания.

Предложен метод распределения задач мультиагентной робототехнической системы для сбора плодов, на уровне назначения задач отдельным видам роботов по классам выполняемых операций и на уровне распределения задач в гомогенных коалициях роботов. Для формализации задач и возможностей роботов разработана онтология для МРТС для сбора плодов в условиях интенсивного сада.

Реализован конечно-автоматный контур управления роботом для выполнения операций в рамках рассматриваемых технологических процессов и реализованы отдельные программные модули системы управления для выполнения операций сбора плодов, в том числе для управления СТЗ, манипуляционным механизмом и автономным движением мобильной платформы робота-агента.

Разработана структура системы технического зрения робота-агента для решения задачи сбора плодов в интенсивном саду, функционирующего в составе мультиагентной системы и алгоритмы функционирования элементов системы технического зрения.

Разработана структура системы управления движением робота-агента для решения задачи сбора плодов в интенсивном саду, функционирующего в составе мультиагентной системы и алгоритмы функционирования элементов системы технического зрения.

Разработаны программные решения для управления элементами робота-агента и сконфигурирована программная среда для моделирования процессов

распределения задач и выполнения задач МРТС в саду интенсивного выращивания. Совместно с ФНАЦ ВИМ и КБНЦ РАН разработана материально-техническая база для проведения испытаний манипулятора и мобильной платформы робота-агента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новая модель экономического развития России: концепция формирования и реализации/ под. ред. А.Г. Аксакова. М.: Издание Государственной Думы, 2016. 320 с.
2. Шмарин Н. В., Карелина А. А. Роботы фермеры – будущее сельского хозяйства // Развитие и актуальные вопросы современной науки. 2018. № 10 (17). С. 33.
3. Штогрин Я. В. Роботизация сельского хозяйства России по примеру других стран // Велес. 2017. № 1-2 (43). С. 110-113.
4. Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Скворцов Е.А., Набоков В.И., Некрасов К.В. [и др.]// АБУ. 2019. №8 (187). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta-v-selskom-hozyaystve> (дата обращения: 01.10.2021).
5. Загазежева О.З., Край К.Ф. Проблемы и перспективы внедрения роботизированных и интеллектуальных технологий в растениеводство // Известия КБНЦ РАН. 2021. №6 (104). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemny-i-perspektivy-vnedreniya-robotizirovannyh-i-intellektualnyh-tehnologiy-v-rastenievodstvo> (дата обращения: 01.02.2022).
6. Авдоница И.А. Точное земледелие – стратегия эффективного развития сельского хозяйства // Научный вестник Технологического института – филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. 2015. № 14. С. 5-10.

7. Якушев В. П. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета "умное сельское хозяйство" России // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 11-15.
8. Измайлов А. Ю., Личман Г. И., Марченко Н. М. Точное земледелие: проблемы и пути решения // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 5. С. 9-14.
9. Кафиев И. Р., Романов П. С., Романова И. П. Методический аппарат выбора информационной технологии для управления сельскохозяйственными роботами // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (44). С. 62-68.
10. Измайлов А. Ю., Ахалая Б. Х., Шогенов Ю. Х. Новые универсальные технические средства для уборки плодов фруктовых насаждений // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 3(45). С. 72-76.
11. Борзых А.А. Проблемы применения роботов в сельскохозяйственном производстве // В сборнике: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК Сборник материалов Международной научно- практической конференции. Под общей редакцией В.А. Солопова. 2018. С. 239-241.
12. Ву Д.К., Нгуен В.В., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Обзор задач точного земледелия и аграрных роботизированных средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2017. № 3 (77). С. 13-19.
13. Нагоев З.В., Шуганов В.М., Бжихатлов К.Ч., Заммиев А.У., Иванов З.З. перспективы повышения производительности и эффективности сельскохозяйственного производства с применением интеллектуальной интегрированной среды // Известия КБНЦ РАН. 2021. №6 (104). URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-povysheniya-proizvoditelnosti-i-](https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-povysheniya-proizvoditelnosti-i)

effektivnosti-selskohozyaystvennogo-proizvodstva-s-primeneniem-intellektualnoy (дата обращения: 20.01.2022).

14. Robot-as-a-Service: From Cloud to Peering Technologies / Kapitonov A. и др. // *Frontiers in Robotics and AI*. 2021. № 8. DOI 10.3389/frobt.2021.560829.
15. Анчёков М.И., Кильчукова А.Л., Шалова С.Х. Решение проблем автоматизации процесса сбора плодоовощной продукции // *Инженерный вестник Дона*. 2016. № 4 (43). С. 73.
16. Скворцов Е. А., Скворцова Е. Г., Санду И. С., Иовлев Г. А. Переход сельского хозяйства к цифровым, интеллектуальным и роботизированным технологиям // *Экономика региона*. 2018. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perehod-selskogo-hozyaystva-k-tsifrovym-intellektualnym-i-robotizirovannym-tehnologiyam> (дата обращения: 01.02.2020).
17. Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Шогенов Ю. Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных групп сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2018. Т. 7. С. 2-7.
18. Baeten J, Donn'e K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester // *Springer Tracts Adv Robot*. 2008. № 42. С. 531–539.
19. Jia W., Zhang Y., Lian J., Zheng Y., Zhao D., Li C. Apple harvesting robot under information technology: A review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020 – № 17. С. 400 – 454. 172988142092531. 10.1177/1729881420925310.
20. Zhao DA, Lv JD, Ji W, et al. Design and control of an apple harvesting robot // *Biosyst Eng*. 2011. № 110(2) С. 112–122.

21. D'Esnon, A. Grand. Robotic Harvesting of Apples // ASAE Publication. 1985. С. 210-214.
22. Salah Kh., Chen X., Neshatian K., Pretty C. A hybrid controls multi-agent cooperative system for autonomous bin transport during apple harvest // 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2018. С. 644. DOI 649. 10.1109/ICIEA.2018.8397794.
23. Хорт Д. О., Филиппов Р. А., Кутырёв А. И. Разработка универсального робототехнического средства сельскохозяйственного назначения // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 13. С. 69-73.
24. Хорт Д. О., Терешин А. Н. Анализ конструктивных параметров и классификация рабочих органов для машинной уборки ягодных культур // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. Т. 2. № 31. С. 62-69.
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662034 Российская Федерация. Система управления роботизированной платформы и рабочего органа для обработки сорной растительности: № 2020619844: заявл. 02.09.2020: опубл. 07.10.2020 / А. И. Дышеков, М. А. Мирзаев, И. Г. Смирнов; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".
26. Робот для промышленных теплиц / Королев В. А., Воротников С. А., Польский В. А. [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 6(21). С. 73-80.
27. Мобильный робот для цветочных теплиц / Королев В. А., Мордвинов И. В., Воротников С. А., Польский В. А. // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции, Мичуринск, 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Общество с ограниченной ответственностью "БИС", 2014. С. 195-200.

28. Башилов А. М. Робототехническая система для теплиц / А. М. Башилов, В. А. Королев, С. А. Воротников // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 2(54). С. 57-63.
29. Комплекс оперативного анализа состояния возделываемых угодий / Королев В. А., Башилов А. М., Кожемякин С. А. [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 7(129). С. 99-106.
30. Сити-фермерство: как в Москве используют биотехнологии для выращивания овощей // Газета «Ведомости» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/gorod/smartcity/articles/siti-fermerstvo-kak-v-moskve-ispolzuyut-biotehnologii-dlya-viraschivaniya-ovoschei> (дата обращения 19.09.2022)
31. Kolbeinsson A., Lagerstedt E., Lindblom J. Classification of Collaboration Levels for Human-Robot Cooperation in Manufacturing // Advances in Manufacturing Technology. 2018. № XXXII.
32. Edan Y., Han S., Kondo N., Automation in Agriculture [Глава] // Springer Handbook of Automation. - Berlin: Springer. 2009. С. 583 – 599.
33. Ронжин А. Л., Бизин М. М., Соленный С. В. Математические модели и средства много-модального взаимодействия с робототехническими и киберфизическими системами // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. Т. 8. № 90. С. 107-111.
34. Стребков Д. С., Королев В. А., Воротников С. А., Польский В. А. Робототехнические системы в агропроизводстве // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (31). С. 68-71.
35. Зобнин А. Н. Агророботы в сельском хозяйстве // Академическая публицистика. 2018. Т. 5. С. 85-87.

36. Интенсивные яблоневые сады [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nayablone.ru/vybor-sorta/intensivnye-yablonevye-sady>, свободный. – (дата обращения: 21.08.2020)
37. Краснодарский край лидирует в России по производству тепличных овощей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.agbz.ru/news/krasnodarskiy-kray-lidiruet-v-rossii-po-proizvodstvu-teplichnyih-ovoschey/> – (дата обращения: 21.08.2020)
38. Годжаев З.А., Гришин А.П., Пехальский И.А., Гришин А.А., Гришин В.А. Развитие работ по созданию робототехники сельхозназначения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 119. С. 488-502.
39. Parker, L. E. Multiple mobile robot systems // Springer Handbook of Robotics, 2008. 2227с. С. 921-941.
40. An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture / Lytridis C. и др. // Agronomy. 2021. №11, 1818. DOI 10.3390/agronomy11091818
41. Иванов Д.Я. Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово-применяемых микророботов в экстремальных условиях // Известия вузов. Машиностроение. 2011. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-printsipov-roevogo-intellekta-dlya-upravleniya-tselenapravlenным-povedeniem-massovo-primenyaemyh-mikrorobotov-v> (дата обращения: 09.05.2021)
42. Nazarova A.V. Zhai M. Distributed solution of problems in multi agent robotic systems. .2019. С. 107-124.
43. Минин А.А. Распределение задач в децентрализованной робототехнической системе / А. А. Минин, А. В. Назарова, Т. П. Рыжова. - (К 100-летию со дня рождения академика Е. П. Попова) // Мехатроника,

- автоматизация, управление. - 2014. - № 11 (164). - С. 16-20: ил. - Библиогр.: с. 20
44. Зенкевич С.Л. и Галустян Н.К. Децентрализованное управление группой квадрокоптеров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 774-782.
45. Martinelli S., Giordani M., Lujak F. A Distributed Algorithm for the Multi-Robot Task Allocation Problem // IEA/AIE 2010: Trends in Applied Intelligent Systems. - Cordoba, Spain: Springer, 2010.
46. Назарова А. В. Рыжова Т. П. Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. 6: Робототехнические системы. 2012. С. 93-105.
47. Назарова А. В. Рыжова Т. П. Система управления коллективом мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Новые технологии, 2014 г. № 4: Т. 18. С. 45 - 50.
48. Назарова А. В., Мэйсинь Чжай Проблемы использования робототехнических систем в операциях спасения при землетрясениях // Робототехника и Техническая Кибернетика. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2018. Т. 20, № 3. С. 31–38.
49. Рыжова Т. П. Система управления коллективом мобильных роботов: автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук.: 05.02.05. М. 2013. 16 с.
50. Машков К. Ю., Рубцов В. И., Рубцов И. В. Состав и характеристики мобильных роботов: учеб. пособие по курсу «Управление роботами и робототехническими комплексами» / Машков К. Ю., Рубцов В. И., Рубцов И. В.; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 73 с.: ил. - Библиогр.: с. 73. - ISBN 978-5-7038-3866-2.

51. Yang, S. H., & Lai, W. H. Multi-robot task allocation with fuzzy constraint satisfaction // International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012. – № 9 (3). С.107-116.
52. Julian, B. J., Gerkey, B. P. Scalable multirobot task allocation for complex missions. Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007 – С. 2730-2736.
53. Design and Field Evaluation of a Robotic Apple Harvesting System with a 3D-Printed Soft-Robotic End-Effector/ Hohimer С. и др. // Transactions of the ASABE. 2019. № 62. С. 405-414. DOI 10.13031/trans.12986.
54. Lacroix S., Nourbakhsh I. R., Tomatis N. Multi-robot task allocation in uncertain environments using negotiation // Robotics and Autonomous Systems. 2001. № 37 (2-3). С. 163-179.
55. Shi, Z., Yu, H., Zhang, Q., Cheng, Y. A hybrid algorithm for task allocation in multi-robot systems based on improved Hungarian algorithm and particle swarm optimization // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2015. № 12 (8)/ С. 1-13.
56. Zhu, X., Wang, Y., & Yuan, J. Task allocation for multiple robots based on improved ant colony optimization // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2014. 11(3). С. 3-10.
57. Liu H., Zhang J., Guo Y. A Cooperative ant colony optimization algorithm for task allocation in multi-robot systems // IEEE Access. 2019. № 7. С. 163039-163050.
58. Recent Advances in Intelligent Automated Fruit Harvesting Robots/ Hua Y. и др. // The Open Agriculture Journal. 2019. № 13. С. 101-106. DOI 10.2174/1874331501913010101
59. Wageningen University on a quest to develop the best robotic grippers [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

- <https://www.futurefarming.com/crop-solutions/wageningen-university-on-a-quest-to-develop-the-best-robotic-grippers/> – (дата обращения: 30.09.2022)
60. Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. Т. 4. С. 63-68.
61. Измайлов А. Ю., Смирнов И. Г., Хорт Д. О., Филиппов Р. А. Робототехнические средства для современного садоводства // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2016. Т. 2. С. 131-138.
62. Weifang best wheeled 2wd 4wd farm 25hp 20hp 15hp mini tractor price with CE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.alibaba.com/product-detail/Weifang-best-wheeled-2wd-4wd-farm_62006525437.html (дата обращения: 25.05.2020)
63. Вилочные погрузчики 1000 кг Вилочные погрузчики 1000 кг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kfork.ru/vilochnyepogruzchiki/1000-kg/> (дата обращения: 25.05.2020)
64. Apple harvesting robot plucks a piece of fruit every 7 seconds [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://newatlas.com/robotics/apple-harvesting-robot-fresh-seven-seconds/> (дата обращения: 30.09.2022)
65. This robot can pick tomatoes without bruising them and detect ripeness better than humans [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cnbc.com/2019/05/11/root-ai-unveils-its-tomato-picking-robot-virgo.html> (дата обращения: 25.05.2020)
66. Small Four-wheel Tractor Hot Sell Type Farmland Homework Machinery Plough Machine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://aliexpress.ru/item/1005004196302904.html?sku_id=12000028347740886 (дата обращения: 25.05.2020)

67. Harvester makes sort work in the orchard [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.goodfruit.com/harvester-makes-sort-work-in-the-orchard/> (дата обращения: 25.05.2020)
68. Системы параллельного вождения CLAAS // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.claas.ru/blueprint/servlet/blob/1658240/c9ddb5dc584fa59262d7316717700691/321631-23-dataRaw.pdf> (дата обращения 10.03.2021)
69. Нагоев З. В., Нагоева О. В. Извлечение знаний из многомодальных потоков неструктурированных данных на основе самоорганизации мультиагентной когнитивной архитектуры мобильного робота // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2015. Т. 62. № 68. С. 145-152.
70. Zenkevich S.L., Nazarova A.V. and Huo Jianwen. Dynamic Switching of Multi-Agent Formation in Unknown Obstacle Environment // Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Vol. 261. P.73-87.
71. Nazarova A.V. Huo J., Zenkevich S.L. Dynamic switching of multi-agent fromation in unknown obstacle environment // Studies in systems, decision and control. - [б.м.]: Springer Nature Switzerland. 2020. № 261. С. 73-87.
72. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Хо Цзяньвень. Движение группы мобильных роботов в строю типа «конвой» – теория, моделирование и эксперимент // Четвертый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ2017, 5-6 октября 2017 г., г. Казань, Республика Татарстан, Россия): тр. семинара. / под ред. Е. А. Магида, В. Е. Павловского, К. С. Яковлева. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. 240 с. С. 136-147.

73. Woolridge M., Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence // Massachusetts Institute of Technology, Ch. Intelligent Agents. 1999. С.27–78.
74. Зенкевич С. Л., Назарова А. В., Хо Цзяньвень. Управление группой мобильных роботов с помощью сопровождающего дрона // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. №3. С. 208-214.
75. Stuart R., Peter N. Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd. ed.). Prentice Hall Press, USA., 2009. 1132 с. С. 694 – 732.
76. Gerkey, B. P., Vaughan, R. T., Howard, A. The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems // Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics. 2003. С. 317-323.
77. Lerman, K., Galstyan, A. A distributed market-based approach to multirobot coordination // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. № 18 (5). С. 758-768.
78. Kluge-Wilkes, Aline Ontology-based task allocation for heterogeneous resources in Line-less Mobile Assembly Systems. TechRxiv. Preprint. 2022 DOI 10.36227/techrxiv.19773352.v1
79. Zenkevich S.L., Nazarova A.V., Zhu Hua. Logical Control a Group of Mobile Robots // Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol.174. p.31-43.
80. Lemaignan S., Warnier M., E. AkinSis bot, Aurélie Clodic, Rachid Alami Artificial cognition for social human–robot interaction: An implementation// Artificial Intelligence. 2016. № 247 (2017) С. 45–69
81. Alili S., Alami R., Montreuil V. Task Planner for an Autonomous Social Robot // Distributed Autonomous Robotic Systems 8. Springer, Berlin, Heidelberg. 2009. С. 177.

82. Чжу Хуа. Управление движением группы мобильных роботов в строю типа «конвой»: дис. Канд. Тех. Наук. Москва. 2018. 107с.
83. Зенкевич С. Л., Чжу Хуа, Хо Цзяньвень. Экспериментальное исследование движения группы мобильных роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 5. С.331–335
84. Olfati-Saber R. and Murray R. M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Т.49. №9. С.1520-1533.
85. N. E. Leonard and E. Fiorelli. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups // Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, FL, USA. 2001. С. 2968-2973.
86. Nishikawa, Takashi & Sun, Jie & Motter, Adilson Sensitive Dependence of Optimal Network Dynamics on Network Structure // Physical Review X. 2016. Т. 7. DOI 10.1103/PhysRevX.7.041044.
87. Semantic Sensor Network Ontology [Электронный ресурс] // World Wide Web Consortium. URL: <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/> (дата обращения: 11.12.2021)
88. Программно-аппаратные средства управления в агросистемах / Королев В. А., Суляев С. А., Кожемякин С. А. [и др.] // Сборник научных докладов ВИМ. 2012. Т. 2. С. 273-279.
89. Milella, Annalisa & Reina, Giulio & Foglia, Mario. Computer vision technology for agricultural robotics // Sensor Review. 2006. № 26. С. 290-300. DOI 10.1108/02602280610692006.
90. Королев В.А., Воротников С.А., Польский В. А., Лучин А. Н. Управление движением агроробота между рядами растений // Труды международной

научно-технической конференции Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2012. Т. 5. С. 83-87.

91. Thuilot B., Cariou C., Martinet P., Berducat M. Automatic Guidance of a Farm Tractor Relying on a Single CP-DGPS // *Autonomous Robots*. 2002. V. 13.
92. Крушиневский Е.А., Попов Д.А., Матлаш А.Н., Блохина М.Ю. Проектирование и разработка многоагентных систем // *Наука, образование и культура*. 2016. №8 (11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-i-razrabotka-mnogoagentnyh-sistem> (дата обращения: 19.09.2021).
93. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов // М.: МГТУ им. Баумана. Золотая коллекция, 2004. 400 с.
94. Носков А. В. Рубцов И. В., Романов А. Ю. Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2007. № 8. С. 2-5.
95. Носков В. П., Рубцов В. И., Рубцов И. В. Математические модели движения и системы технического зрения мобильных робототехнических комплексов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 94 с.
96. Машков К. Ю. Рубцов В. И., Штифанов Н. В. Автоматическая система обеспечения опорной проходимости мобильного робота // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2012. № 11 (11) С. 95-106.
97. Носков В. П. Рубцов И. В., Вазаев А. В. Об эффективности моделирования внешней среды по данным комплексированной СТЗ // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2015. № 2 (7). С. 51-55.

98. Rocha R. A., Gaspar P. Algorithm for Path Recognition In-between Tree Rows for Agricultural Wheeled-Mobile Robots. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*. 2019 – № 13. С. 34-37.
99. Казьмин В. Н., Носков В. П. Объемное зрение в системе навигационного обеспечения беспилотного летательного аппарата // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. №11 (11). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obemnoe-zrenie-v-sisteme-navigatsionnogo-obespecheniya-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata> (дата обращения: 14.02.2021).
100. Казьмин В. Н., Носков В. П. Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №10 (171). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-geometricheskih-i-semanticheskikh-obektov-v-dalnometricheskih-izobrazheniyah-dlya-navigatsii-robotov-i-rekonstruktsii> (дата обращения: 02.08.2022).
101. Муратов, Е. Р. Сенсоры технического зрения: учебное пособие для вузов / Муратов Е. Р., Юкин С. А., Ефимов А. И., Никифоров М. Б. - М.: Горячая линия - Телеком, 2019. 72 с. С. 71-72.
102. Rovira-Más, Francisco & Han, Shuxia & Wei, J. & Reid, John. Autonomous Guidance of a Corn Harvester using Stereo Vision. *Agric. Eng. Int. CIGR Ejournal*. 2007. № 9. С. 89 – 95.
103. Reid J. F., Stephen W. S. “Automatic Tractor Guidance with Computer Vision.” *SAE Transactions*, vol. 96, SAE International, 1987, pp. 673–93, <http://www.jstor.org/stable/44472830>.
104. Reina G., Milella A. Towards Autonomous Agriculture: Automatic Ground Detection Using Trinocular Stereovision. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2012 – № 12. С.511 – 554 12405-23. 10.3390/s120912405.

105. Устройства обработки видеoinформации и управления в агросистемах / Королев В. А., Суляев С. А., Кожемякин С. А. [и др.] // Сборник научных докладов ВИМ. 2012. Т. 2. С. 378-380.
106. Arellano M. V. Crop plant reconstruction and feature extraction based on 3-D vision // Faculty of Agricultural Sciences at University of Hohenheim. 2019. № 16 (5). С. 618
107. Åstrand B., Baerveldt A. An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control // Autonomous Robots. 2002. №13. С.21–35. DOI 10.1023/A:1015674004201
108. Хорт Д. О., Кутырев А. И., Смирнов И. Г., Филиппов Р. А. Вершинин Р. В. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 1 (38). С. 133-141.
109. Хорт Д. О., Кутырёв А. И., Терешин А. Н., Вершинин Р. В. Обоснование параметров роботизированной платформы для уборки земляники садовой // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 2(39). С. 99- 106.
110. Tang Yunchao Chen Mingyou, Wang Chenglin, Luo Lufeng, Li Jinhui, Lian Guoping, Zou Xiangjun Recognition and Localization Methods for Vision-Based Fruit Picking Robots: A Review // Frontiers in Plant Science. 2020. № 11. С. 510.
111. Qiao Y., Liu Z., Hu D., Xu J. Camera Calibration Method Based on OpenCV // Applied Mechanics and Materials. 2013. № 330. С. 517-520. 10.4028/www.scientific.net/AMM.330.517.
112. Sturm P. Pinhole Camera Model // Computer Vision, A Reference Guide. 2014. DOI 10.1007/978-0-387-31439-6_472.

113. Zhang, H. & Zhang, L. Binocular stereo matching algorithm for 3-D point cloud acquisition // J. Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut. 2009. №41. С. 588-594.
114. Герасимов В. Н. Система навигации сервисного робота в среде с динамическими препятствиями: дис. Канд. Тех. Наук. Москва. 2015. 182с.
115. Jianwen H., Stanislav L. Zenkevich, Anaid V. Nazarova A., Meixin Z. Path Planning Based on Map Matching in UAV/UGV collaboration system // International Journal of Intelligent Unmanned Systems. 2019. Т. 9 № 2. С. 81-95
116. Jimenez P. A., Shirinzadeh B., Nicholson A., Alici G. Optimal area covering using genetic algorithms // Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Zurich. Switzerland. 2007. С. 1–5.
117. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Оценка параметра по информации от нескольких датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 9. С.71-73.
118. Климов, М. А. Способ калибровки систем локальной навигации мобильных роботов / М. А. Климов, С. А. Воротников, Н. А. Выборнов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 1(37). С. 106-115.
119. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного колесного робота // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2006. № 3. С.31-51.
120. Ma F., Shi J., Yang Y., Li J., Dai K. ACK-MSCKF: Tightly-Coupled Ackermann Multi-State Constraint Kalman Filter for Autonomous Vehicle Localization // Sensors. 2019. №19(21). 4816. DOI 10.3390/s19214816.

121. Ayanian, N., Kallem V., Kumar, V., Synthesis of feedback controllers for multiple aerial robots with geometric constraints // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011. № 2 (1), С. 3126-3131.
122. Галин Р.Р. Виртуальный полигон для эффективного взаимодействия роботов в многоагентной робототехнической системе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2 (86). С. 108-113.
123. Shamshiri RR, Hameed IA, Karkee M, Weltzien C. Robotic Harvesting of Fruiting Vegetables: A Simulation Approach in V-REP, ROS and MATLAB // Automation in Agriculture - Securing Food Supplies for Future Generations. 2018. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73861> (дата обращения: 15.08.2019)
124. Носков В. П. Рубцов И. В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. М.: Новые технологии, 2005. № 12. С. 21-24.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в базу RSCI

125. Серебряный В. В. Метасов И. Е., Шереужев М. А. Структура и алгоритмы функционирования систем управления мобильных роботов сельскохозяйственного назначения // Известия КБНЦ РАН. 2017. № 6-2(80). С. 210-220.
126. Шереужев М. А., Девяткин Ф. В., Арабаджиев Д. И., Шереужев М. А. Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 247–263. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-247-263

127. Шереужев М.А., Пак Л.А., Карасев П.Д., Винокуров А.О. Формализация рабочего пространства и онтология технологического процесса для выполнения технологических работ коллаборативной робототехнической ячейкой // Известия КБНЦ РАН. 2022. № 6 (100). С. 134-143.
128. Шереужев М.А., Шереужев М.А., Кишев А.Ю. Вопросы выбора системы технического зрения сельскохозяйственных робототехнических комплексов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 4 (108) С. 84-95. (1,27 п.л./0,45 п.л.)
129. Шереужева М.А., Шереужев М.А. Разработка экспертных систем для повышения эффективности выращивания растений в сельском хозяйстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6 (109) С. 93-104. (1,27 п.л./0,64 п.л.)
130. Дышеков А. И., Личман Г. И., Смирнов И. Г., Шереужев М. А. Разработка алгоритма и технического устройства для распознавания сорняков // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3(28). С. 288-294.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science

131. Serebrenny V. Shereuzhev M. Dependence of dynamics of multi-robot system on control architecture // Springer Nature Switzerland, 2020 г. Т. 272. С. 125-132.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

132. Serebrenny V., Shereuzhev M., Metasov I. Approaches to the robotization of agricultural mobile machines // MATEC Web of Conferences. 2018. № 161: 03014. DOI 10.1051/matecconf/201816103014.
133. Shereuzhev M., Serebrenny V., Industrial collaborative multi-agent systems: main challenges // Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings», Springer. 2019. С.411 – 474.

134. Shereuzhev M., Mostakov N., Vorotnikov S.; Development of the elements of a control system for a mobile agricultural robot operating in a group // AIP Conf. Proc. 2023 №2833 (1): 030007. DOI <https://doi.org/10.1063/5.0152501>
135. Dyshekov A., Smirnov I., Mirzaev, M., Shereuzhev M. Principles of functioning of the autonomous device for weed control for precision agriculture // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 747. DOI 012108. [10.1088/1757-899X/747/1/012108](https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012108).

В сборниках трудов конференций

136. Носков В.П. Метасов И.Е., Шереужев М.А. Построение карты проходимости внешней среды по данным системы технического зрения мобильного робота // Сборник докладов по итогам конференции «Будущее машиностроения». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Т. 9. С. 680-684.
137. Разананирина Ж.К., Шереужев М.А., Серебрянный В.В. 3D-зрение на основе стереопары // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 195-203.

ПРИЛОЖЕНИЕ

П.1. Расчет кинематики мобильной роботизированной платформы.

Положение робота на плоскости определяется двумя линейными координатами x_0 и y_0 и углом между вектором линейной скорости и осью X , определяющей ориентацию оси робота.

$$u = 1/R = 1/||X_c - X_0|| \quad (\text{П.1})$$

где u — кривизна пути робота

Зададим L — как расстояние между задними и передними колесами; H — расстояние между передними колесами. Рассмотрим задачу управления шасси отдельно взятого мобильного робота.

Кривизна траектории в зависимости от угла поворота передних колес задается выражениями:

$$\begin{aligned} \frac{uL}{1 + uH/2} &= \tan(\alpha_1) \\ \frac{uL}{1 - uH/2} &= \tan(\alpha_2) \end{aligned} \quad (\text{П.2})$$

Вместо двух углов α_1 и α_2 один «средний» угол:

$$\tan(\alpha) = uL \quad (\text{П.3})$$

Так как передние колеса не могут поворачиваться мгновенно, то к кинематической модели добавим уравнение $\dot{\alpha} = V$, где V — угловая скорость вращения привода руля. Тогда кинематическое уравнение движения робота имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= v \cos(\theta) \\ \dot{y}_c &= v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= vu(\alpha) \\ \dot{\alpha} &= V \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

где v — скалярная линейная скорость робота.

На угол поворота привода руля, как и на угол поворота передних колес наложены ограничения.

$$-\bar{u} \leq u \leq \bar{u} (-\alpha_{max} \leq \alpha \leq \alpha_{max}) \quad (\text{П.5})$$

где \bar{u} - максимально возможная кривизна траектории. При достижении α верхней или нижней границы управление должно обратиться в ноль. Из-за наличия в системе фазовых ограничений система является нелинейной и гибридной. На различных стадиях своего движения она задается разными системами дифференциальных уравнений, что усложняет анализ системы и синтез закона управления. Так же система нелинейна из-за присутствия тригонометрических функций. От этой нелинейности можно избавиться с помощью метода линеаризации обратной связью. Для этого необходимо провести замену переменных.

Возьмем длину пройденного роботом пути до текущего момента времени (ξ) за новую независимую переменную. Далее по тексту штрих обозначает дифференцирование по ξ .

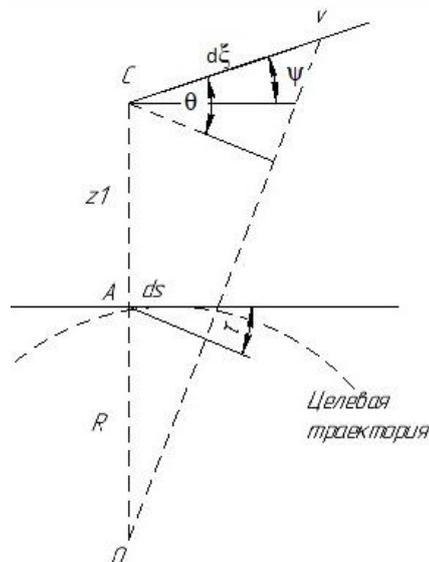


Рисунок П.1.

Пояснение замены переменных

На рисунке выше изображены пояснения к замене переменных, С — текущая позиция робота, А — ближайшая к ней точка на целевой траектории, О — мгновенный центр кривизны целевой траектории в точке А, $OA = R(s) = 1/k(s)$,

где $k(s)$ значение кривизны траекторий, τ — угол между касательной к траектории и осью x и $\psi = \theta - \tau$.

Первой фазовой переменной примем расстояние от целевой точки до целевой траектории (СА). На рисунке видно, что $\dot{z} = v \sin(\psi)$, заменяя производную по времени производной ξ имеем:

$$z'_1 = \frac{\dot{z}_1}{\dot{\xi}} = \sin(\psi) \quad (\text{П.6})$$

В качестве второй фазовой переменной возьмем $z_2 = \sin(\theta - \tau)$. Продифференцировав обе части уравнения по ξ имеем:

$$\begin{aligned} z'_2 &= \cos\psi(\theta' - \tau') \\ \theta' &= \dot{\theta}/\dot{\xi} = u \\ \tau' &= k(s)s' \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

Можно вывести s' :

$$s' = \frac{\cos(\psi)}{1 + kz_1} \quad (\text{П.8})$$

Подставляя (7) в (6) приходи к данному уравнению:

$$z'_2 = \cos\psi \left(u - \frac{k \cos(\psi)}{1 + kz_1} \right) \quad (\text{П.9})$$

Выразим третью фазовую переменную:

$$z_3 = \cos\psi \left(u - \frac{k \cos(\psi)}{1 + kz_1} \right) \quad (\text{П.10})$$

Продифференцировав обе части уравнения по ξ имеем:

$$z'_3 = \beta V - f(z) \quad (\text{П.11})$$

Где

$$f(z) = \frac{z_2 z_3^2}{1 - z_2^2} - \frac{k z_2 z_3}{1 + kz_1} - \frac{k^2 z_2 (1 - z_2^2)}{(1 + kz_1)^2} \pm \frac{k' (1 - z_2^2)^{(3/2)}}{(1 + kz_1)^3} \quad (\text{П.12})$$

$$\beta = \frac{\cos(\psi)(Lu^2 + 1/L)}{v} \quad (\text{П.13})$$

где k' - производная функции кривизны $k(s)$ по s .

Подводя итог начальные уравнения можно записать в виде:

$$\begin{aligned} z'_1 &= z_2 \\ z'_2 &= z_3 \\ z'_3 &= \beta V - f(z) \end{aligned} \quad (\text{П.14})$$

Из выражения (13) выразим закон управления V в виде:

$$V = \frac{f(z) - \sigma(z)}{\beta} \quad (\text{П.15})$$

Где

$$\sigma(z) = \lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \lambda_3 z_3 \quad (\text{П.16})$$

Необходимо учитывать ограничение, которое накладывается на закон управления:

$$V = \begin{cases} -\bar{V}, & \text{при } V < -\bar{V} \\ V, & \text{при } |V| \leq \bar{V} \\ \bar{V}, & \text{при } V > \bar{V} \end{cases} \quad (\text{П.17})$$

Задание пути

Для задания пути мобильного робота, функционирующего в интенсивном саду или в теплице можно использовать два способа. Первый способ состоит в задании пути в виде прямых, а угол между двумя прямыми сглаживается. Данный не требует серьезных вычислительных ресурсов и пригоден для прямолинейных участков в пространстве функционирования (Рис. 15.)

При планировании траектории таким способом от оператора требуется определить координаты точки начала траектории, указать границы обрабатываемого участка. Когда целевая траектория задается прямой, то в этом случае

$k(s) = k'(s) = 0$, $f(z)$ будет равна:

$$f(z) = \frac{z_2 z_3^2}{1 - z_2^2} \quad (\text{П.18})$$

При повороте целевая траектория описывается полу окружностью с известным радиусом R , в следствии чего можно найти $k(s)$:

$$k(s) = \frac{1}{R} \quad (\text{П.19})$$

Задача нахождения расстояния от точки до заданной кривой может решаться различными способами в зависимости от типа кривой.

Расстояние от точки для прямой решается следующим простым способом. Прямая задается уравнением:

$$Ax + By + C = 0 \quad (\text{П.20})$$

Где А, В, С – коэффициенты прямой до которой нужно найти расстояние. Тогда расстояние от точки О до прямой будет равно:

$$|OM| = \left| \frac{Ax_0 + By_0 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| \quad (\text{П.21})$$

Где ОМ – расстояние от точки до прямой.

Для нахождения расстояния от точки до дуги окружности можно найти, вычтя из расстояния от точки до центра окружности радиус окружности.

Второй способ задания целевой траектории представляет собой задание пути с помощью кубических сплайнов, которые проходят через контрольные точки на плоскости в порядке их следования.

$$E = \{r_1, \dots, r_n\} \quad r \in R^2 \quad (\text{П.22})$$

Где, E – набор контрольных точек на плоскости, r_i – координаты каждой точки.

Интерполяция с помощью кубических сплайнов помогает нам вычислить промежуточные значения величины по имеющемуся дискретному набору данных. Существует огромный набор функций, с помощью которых можно соединить контрольные точки на плоскости, но в самом распространенном случае в качестве интерполяционной кривой берут полином:

$$S_n(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_1 x + a_0 \quad (\text{П.23})$$

Где n – степень полинома. Степень полином зависит от количества условий, накладываемых на полином. В случае интерполяции кубическим сплайном кривая F(x) состоит из набора кусков, а точнее, на каждом отрезке $[x_{n-1}; x_n]$ функция F(x) является кубическим полиномом:

$$S_n(x) = a_n + b_n(x - x_n) + c_n(x - x_n)^2 + d_n(x - x_n)^3 \quad (\text{П.24})$$

Где a_n, b_n, c_n, d_n – коэффициенты полинома, которые меняются на каждом отрезке.

Для того чтобы узнать эти коэффициенты на полиномы накладывают дополнительные условия:

- Условие непрерывности функции $F(x)$
- Условие непрерывности первой производной функции $F(x)$
- Условие непрерывности второй производной функции $F(x)$
- Равенство вторых производных функции $F(x)$ в контрольных точках

Первую и вторую производную можно найти используя следующие формулы:

$$F'_n(x) = b_n + 2c_n(x - x_n) + 3d_n(x - x_n)^2 \quad (\text{П.25})$$

$$F''_n(x) = 2c_n + 6d_n(x - x_n)$$

Подставив условия уравнения (3.29) в условия непрерывности получим следующую систему:

$$a_1 - b_1 h + c_1 h_1^2 - d_1 h_1^3 = y_0$$

$$a_n = y_n$$

$$a_{(n-1)} = a_n - b_n h_n + c_n h_n^2 - d_n h_n^3 \quad (\text{П.26})$$

$$b_{(n-1)} = b_n - 2c_n h_n + 3d_n h_n^2$$

$$c_{(n-1)} = c_n - 3d_n h_n$$

$$c_1 - 3d_1 h_1 = 0$$

где

$$h_n = x_n - x_{(n-1)} \quad (\text{П.27})$$

Для решения данной системы используется метод прогонки, вводятся прогоночные коэффициенты:

$$\delta_1 = -h_2 / (2(h_1 + h_2))$$

$$\lambda_1 = 3(l_2 - l_1) / (2(h_1 + h_2)) \quad (\text{П.28})$$

$$\delta_{(n-1)} = -h_n / (2h_{(n-1)} + 2h_n + h_{(n-1)}\delta_{(n-2)})$$

$$\lambda_{(n-1)} = (3l_n - 3l_{(n-1)})$$

$$- h_{(n-1)} \lambda_{(k-2)} / (2h_{(n-1)} + 2h_n + h_{(n-1)}\delta_{(n-2)})$$

где

$$l_n = (y_n - y_{(n-1)}) / h_n \quad (\text{П.29})$$

После нахождения прогоночных коэффициентов можно найти c_n , b_n , d_n :

$$c_{(n-1)} = \delta_{(n-1)}c_n + \lambda_{(n-1)}$$

$$b_n = l_n + (2c_n h_n + h_n c_{(n-1)}) / 3$$

$$d_n = (c_n - c_{(n-1)}) / (3h_n)$$

(П.30)

Результаты работы реализующей обход точек представлены на Рисунках П.2 – П.3.

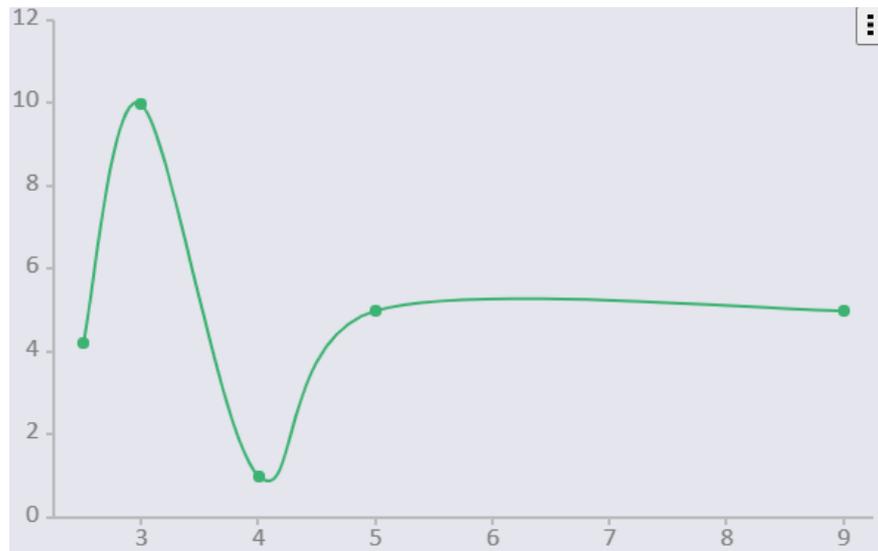


Рисунок П.2.

Пример построения траектории по контрольным точкам

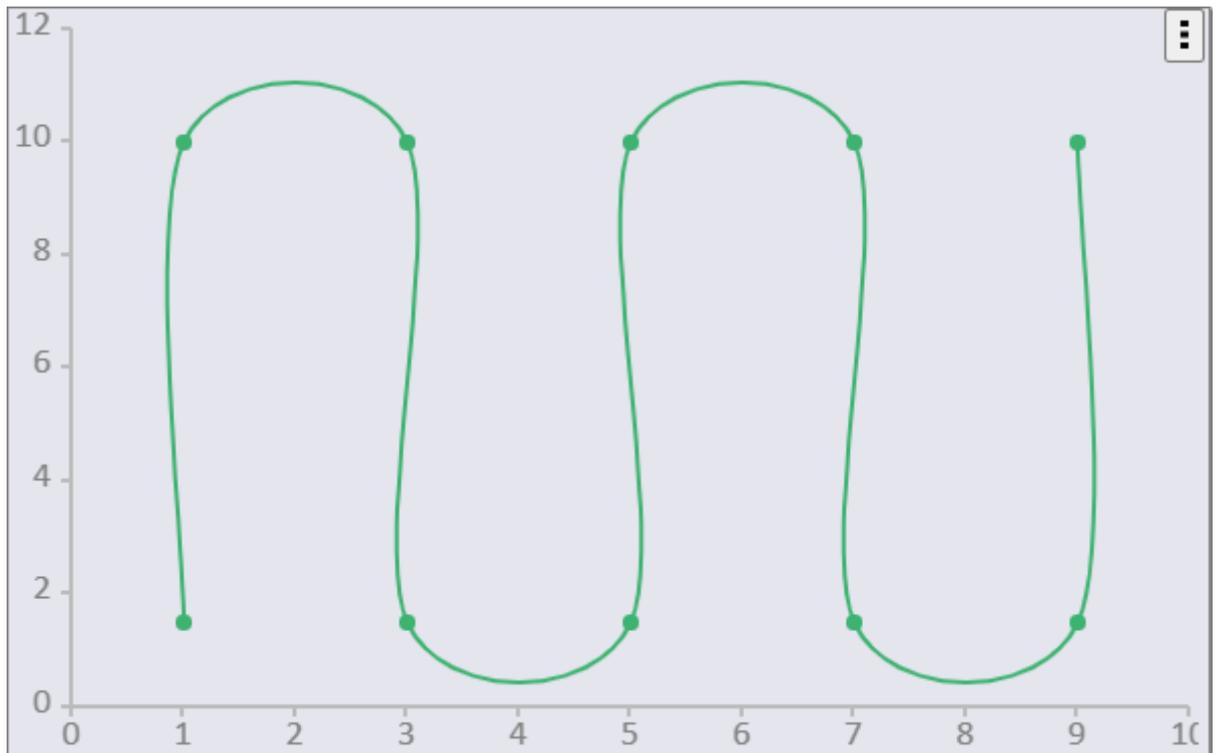


Рисунок П.3.

Пример траектории для работы в теплице

При задании траектории таким способом используется производная от кривизны траектории, которая будет не линейна при задании траектории данным способом. Для того чтобы сгладить производную кривизны, ее необходимо задать с помощью сплайна. Кривизна пути в контрольных точках находится по формуле (29) и далее аппроксимируется сплайном, а производную кривизны, можно получить дифференцируя полученный сплайн.

Данный способ используется для построения пути до обрабатываемого поля или для ручного построения траектории в сложной среде.

II. 2 Расчет кинематики манипулятора в составе робототехнического комплекса для сбора плодов.

Все линейные актуаторы имеют влагозащищенный корпус, встроенную обратную связь (внутри корпуса стоит линейный потенциометр). Двигатель актуаторов коллекторный постоянного напряжения. Управление осуществляется с помощью драйвера для DC двигателей посредством PWM.

Таблица 16.

Параметры линейных актуаторов

Наименование	Сила	Рабочий цикл	Скорость выдвигания, втягивания	Напряжение питания	Управление
Линейный актуатор САНВ-22Е	2300 Н	20%	42 мм/с	24 В	Контроллер DC двигателями PLN 40
Линейный актуатор САЛА36А	600 Н	5%	25 мм/с	24 В	Контроллер DC двигателями PLN 20

Таблица 17.

Параметры шагового двигателя

Наименование	Момент при 200 об/мин	Напряжение питания	Управление
PL86HD113-D12.7	15 кг•см	90 В	Биполярный драйвер шагового двигателя SL-DM860D

Прямая задача кинематики.

q_1, q_2, q_3 – обобщенные координаты, определяющие положение вращательных степеней подвижности.

q_4 – обобщенная координата поступательной степени подвижности.

Длины звеньев: $L_1 = 0.22, L_2 = 1.05, L_3 = 0.13$.

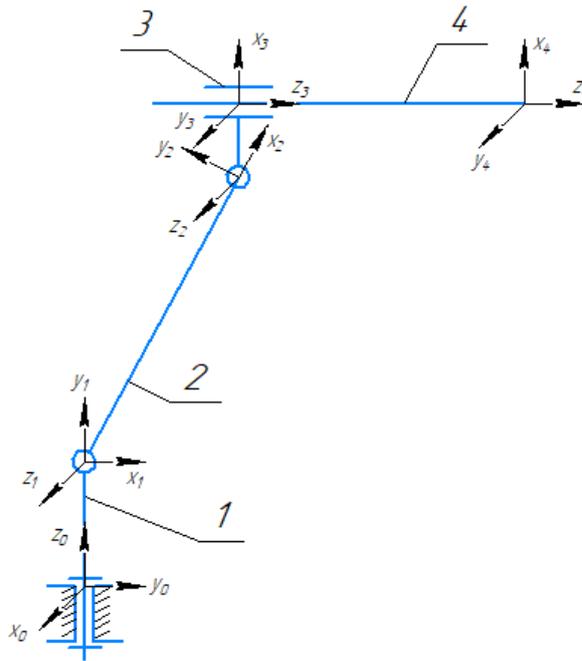


Рисунок П.4

Кинематическая схема заданного манипулятора. Системы координат, привязанны к сочленениям степеней подвижности манипулятора

Таблица 18.

Параметры Денавита-Хартенберга для манипуляционного робота

№ звена	a	d	q	α
1	0	L1	q1	$\pi/2$
2	L2	0	q2	0
3	L3	0	q3	$\pi/2$
4	0	q4	0	0

Матрица преобразования между двумя степенями подвижности в общем виде в координатах Денавита-Хартенберга:

Прямая позиционная задача состоит в том, чтобы по заданному вектору обобщенных координат $q = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$ найти положение и ориентацию его схвата $s = f(q)$. Положение и ориентацию схвата найдём в форме матрицы однородного преобразования:

$$T = \begin{pmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{П.31})$$

Пусть $A_i, i = 1, 2, \dots, N$ – однородные матрицы, задающие переход от системы координат i – го звена к системе координат $(i - 1)$ – го звена. Тогда $T_N = A_1 A_2 \dots A_N$ – решение поставленной задачи. Также введем $T_i = T_{i-1} A_i$ для $i = 1, 2, \dots, N$, при этом $T_0 = E$.

Представив каждое из преобразований для совмещения систем координат в виде соответствующей матрицы, получим:

$$A_i(d_i, a_i, q_i, \alpha_i) = \begin{pmatrix} c_i & -c_{\alpha i} s_i & s_{\alpha i} s_i & a_i c_i \\ s_i & c_{\alpha i} c_i & -s_{\alpha i} c_i & a_i s_i \\ 0 & s_{\alpha i} & c_{\alpha i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{П.32})$$

Здесь: $c_i = \cos q_i$, $s_i = \sin q_i$, $c_{ij} = \cos(q_i + q_j)$, $s_{ij} = \sin(q_i + q_j)$.

Подставим в матрицы преобразования параметры, найденные ранее.

Тогда:

$$T_1 = A_1 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{П.33})$$

$$\begin{aligned} T_2 = A_1 * A_2 &= \begin{pmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & l_1 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & -c_1 & l_1 s_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{П.34})$$

$$\begin{aligned} T_3 = T_2 * A_3 &= \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & l_1 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & -c_1 & l_1 s_1 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_1 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \\ & \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_2 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \end{aligned} \quad (\text{П.35})$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{pmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & -c_1 c_2 s_3 - c_1 s_2 c_3 & s_1 & c_1 c_2 l_2 c_3 - c_1 s_2 l_2 s_3 + l_1 c_1 c_2 \\ s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_2 s_3 - s_1 s_2 c_3 & -c_1 & s_1 c_2 l_2 c_3 - s_1 s_2 l_2 s_3 + l_1 s_1 c_2 \\ & s_2 c_3 + c_2 s_3 & -s_2 s_3 + c_2 c_3 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
&= \\
&= \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 & c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 & s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) \\ & s_{23} & c_{23} & 0 \\ & & & l_2 s_{23} + l_1 s_2 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

Координаты центра схвата:

$$x = c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2);$$

$$y = s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2);$$

$$z = l_2 s_{23} + l_1 s_2.$$

(П.36)

Решение обратной задачи кинематики.

При заданном положении и ориентации схвата $s = s^*$ или $T_N = T_N^*$ можно найти обобщенные координаты $q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_N^*)'$.

Задаются они соотношением $q^* = f_T^{-1}(T_N^*)$. Таким образом, необходимо найти обратную матрицу для T_3 .

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} * A^T, \quad (\text{П.37})$$

здесь A^T – транспонированная матрица алгебраических дополнений соответствующих элементов матрицы A ,

$|A|$ – определитель матрицы A .

$$\begin{aligned}
|T| &= -c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) \begin{pmatrix} s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 \\ s_{23} & c_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
&\quad + s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 \\ s_{23} & c_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \\
&\quad - (l_2 s_{23} + l_1 s_2) * \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & -c_1 s_{23} & s_1 \\ s_1 c_{23} & -s_1 s_{23} & -c_1 \\ s_{23} & c_{23} & 0 \end{pmatrix} = \\
&= (c_1^2 + s_1^2)(c_{23}^2 + s_{23}^2)
\end{aligned} \quad (\text{П.38})$$

Найдём матрицу миноров:

$$M = \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_1 c_{23} + s_1 s_{23}^2 & c_{23}^2 s_1 + s_{23}^2 s_1 & 0 \\ -s_1 c_{23} & c_1 s_{23} & c_1 (c_{23}^2 + s_{23}^2) & 0 \\ c_1^2 s_{23} + s_1^2 s_{23} & -c_1^2 c_{23} - s_1^2 c_{23} & 0 & 0 \\ m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \end{pmatrix} \quad (\text{П.39})$$

$$\begin{aligned} m_1 &= (c_1^2 + s_1^2)(s_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2) - c_{23}(l_2 c_{23} + l_1 c_2)) \\ m_2 &= (c_1^2 + s_1^2)(s_{23}(l_2 c_{23} + l_1 c_2) - c_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2)) \\ m_3 &= c_1 c_{23}(-s_1 s_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2) - c_{23}(s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2))) - \\ &- s_1 c_{23}(-c_1 s_{23} s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) - c_{23} c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2) + \\ &+ s_{23}(-c_1 s_{23}(l_2 s_{23} + l_1 s_2) + s_1 s_{23} c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2)) \\ m_4 &= c_{23}^2(c_1^2 - s_1^2) + s_{23}^2(c_1^2 + s_1^2) \end{aligned} \quad (\text{П.40})$$

Отсюда матрица алгебраических дополнений находится исходя из того, что $A_{ij} = (-1)^{i+j} * M_{ij}$:

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} * M \quad (\text{П.41})$$

$$\begin{aligned} A^T &= \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_{23} & s_{23}(c_1^2 + s_1^2) & -m_1 \\ -s_1(c_1 c_{23} + s_{23}^2) & c_1 s_{23} & c_{23}(c_1^2 + s_1^2) & m_2 \\ s_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & -c_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{П.42})$$

$$T^{-1} = \frac{1}{|T|} * T^T = \frac{1}{(c_1^2 + s_1^2)(c_{23}^2 + s_{23}^2)} * \quad (\text{П.43})$$

$$* \begin{pmatrix} c_1 c_{23} & s_1 c_{23} & s_{23}(c_1^2 + s_1^2) & -m_1 \\ -s_1(c_1 c_{23} + s_{23}^2) & c_1 s_{23} & c_{23}(c_1^2 + s_1^2) & m_2 \\ s_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & -c_1(c_{23}^2 + s_{23}^2) & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{pmatrix}$$

Границы рабочего пространства.

Решение прямой позиционной задачи позволяет определить положение и ориентацию схвата манипулятора при условии, что известны значения обобщенных координат манипулятора $q_i, i = 1, 2 \dots N$.

Обобщенные координаты могут изменяться в пределах, обусловленных конструкцией механизма: в нашем случае $|q_1| \leq 90^\circ, 5^\circ \leq q_2 \leq 65^\circ, 45^\circ \leq q_3 \leq 156^\circ$. Эти условия определяют область изменения обобщенных координат – рабочее пространство манипулятора.

Из решения прямой позиционной задачи получим уравнения координаты центра схвата:

$$\begin{aligned} x &= c_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2); \\ y &= s_1(l_2 c_{23} + l_1 c_2); \\ z &= l_2 s_{23} + l_1 s_2. \end{aligned} \quad (\text{П.44})$$

Используем их для построения графиков рабочего пространства для заданных изменений координат.

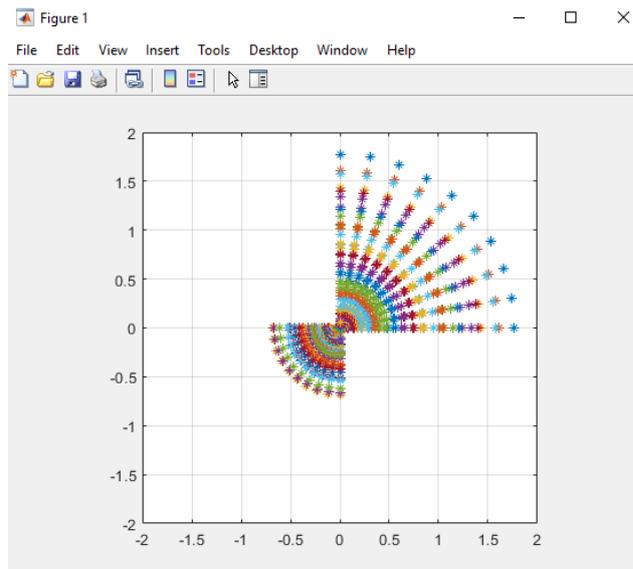


Рисунок П.5

График рабочей зоны в осях Ox, Oy

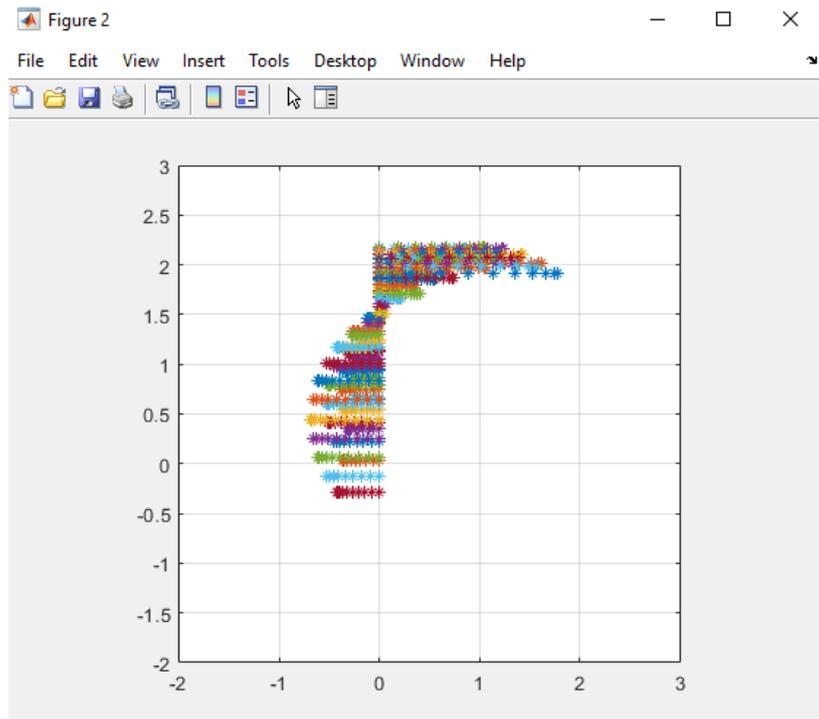


Рисунок П.6

График рабочей зоны в осях O_x , O_z

Моделирование позиционного управления с учетом динамики в Matlab.

На Рисунке П.7 показана структурная схема модели системы управления манипулятором, реализованной в пакете математического моделирования. Рисунок П.8 показывает движение робота в соответствии с вычислениями функции до заданного конечного положения и работу захватного устройства.

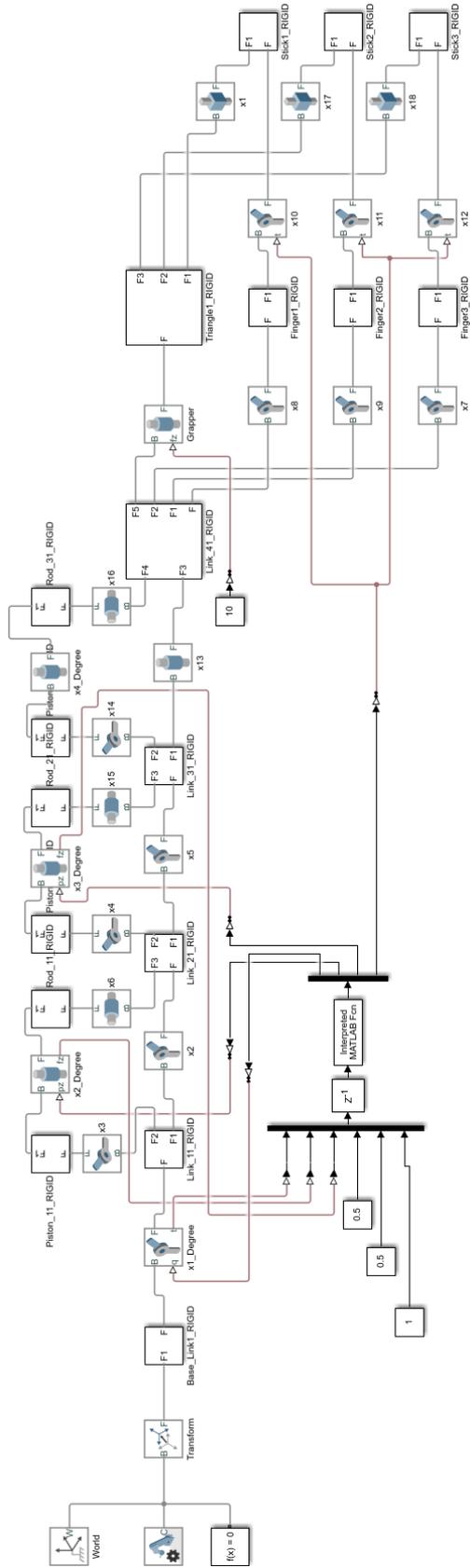


Рисунок П.7

Модель с подключенной функцией обратной кинематики

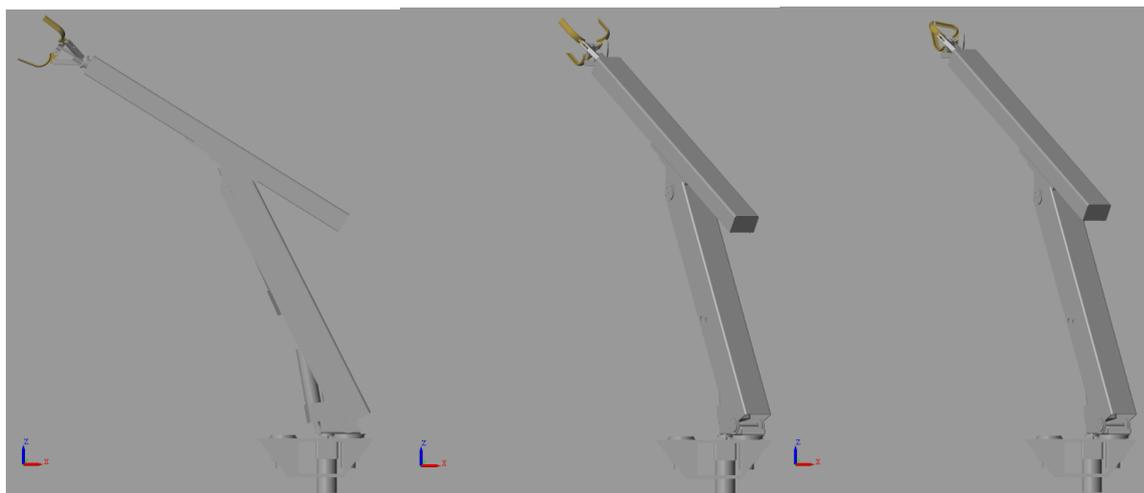


Рисунок П.8

Результат моделирования движения

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы Шереужева Мадина Артуровича по теме: «Разработка распределенных робототехнических комплексов для сельскохозяйственных производств»

Настоящим актом подтверждаем, что следующие результаты диссертационной работы Шереужева М.А., а именно:

Метод управления компонентами сельскохозяйственного робота для работы в садах плодовых культур;

Алгоритмы управления автономным движением группой сельскохозяйственных роботов;

Алгоритмы распределения задач в распределенных робототехнических системах сельскохозяйственного назначения;

Метод моделирования функционирования группы сельскохозяйственных роботов при решении задач сбора плодовых культур,

приняты к внедрению и будут использованы при реализации автономной робототехнической платформы для ухода за садами и сбора плодов, разрабатываемой в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Разработанная робототехническая система успешно выполнила задачу сбора урожая плодовых культур путем распознавания плодов с использованием системы технического зрения на базе стереокамеры. Успешно выполнены задачи отрыва и перемещения плодов в место сбора с помощью манипуляционного робота, смонтированного на самоходной роботизированной платформе в условиях помещения и открытой местности.

Ответственное лицо
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Заведующий отделом технологий и
машин для садоводства,
виноградарства
и питомниководства, д.т.н.



Смирнов И.Г.

16 сентября 2022 г.

Подпись Смирнова И.Г. заверяю:

Учёный секретарь ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, к.т.н.



А.В. Соколов

ООО «Прикладная робототехника»

ИНН/КПП: 7730697556 / 773001001
 Email: support@robotgeek.ru
 URL: www.robotgeek.ru
 Телефон: +7 (495) 142 02 35

**АКТ**

О внедрении результатов диссертационной работы
 Шереужева Мадина Артуровича по теме: «разработка распределенных
 робототехнических комплексов для сельскохозяйственных производств»

Мы нижеподписавшиеся, настоящим актом подтверждаем что следующие результаты диссертационной работы Шереужева М.А., а именно:

Метод управления компонентами сельскохозяйственного робота для работы в садах плодовых культур;

Алгоритмы управления автономным движением группой сельскохозяйственных роботов;

Алгоритмы распределения задач в распределенных робототехнических системах сельскохозяйственного назначения;

Метод моделирования функционирования группы сельскохозяйственных роботов при решении задач сбора плодовых культур,

Приняты к внедрению в ООО «Прикладная робототехника» и будут использованы при реализации систем группового управления автономных мобильных роботов с манипуляционными механизмами.

Разработанные алгоритмы нашли применение для осуществления управления движением и выполнением технологических задач гетерогенной группой роботов с гомогенными коалициями и имеют потенциал промышленного внедрения.

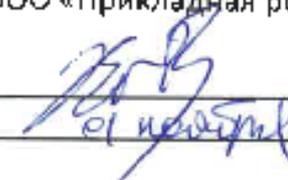
Ответственное лицо
 Генеральный директор
 ООО «Прикладная робототехника»



 Пакилов А.О.
 01.10.2022 г.



Ответственное лицо
 Руководитель проектов
 ООО «Прикладная робототехника»



 Ермишин К.В.
 01.10.2022 г.