

На правах рукописи



ПАВЛЮК
Никита Андреевич

**МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ИНФОРМАЦИОННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
УСТРОЙСТВ МОДУЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) в лаборатории автономных робототехнических систем.

Научный руководитель: **Ронжин Андрей Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, директор СПб ФИЦ РАН.

Официальные оппоненты: **Андреев Виктор Павлович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", профессор кафедры сенсорных и управляющих систем.

Колюбин Сергей Алексеевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», профессор факультета систем управления и робототехники.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА – Российский технологический университет".

Защита диссертации состоится "27" мая 2021 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.199.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, комн. 401. Факс: (812)-328-44-50, тел: (812)-328-34-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-а линия В.О., 39 и на сайте <http://www.spiras.nw.ru/dissovet>

Автореферат разослан «___» апреля 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.199.01
кандидат технических наук



Абрамов Максим Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. С развитием модульной робототехники открываются принципиально новые возможности формирования из отдельных полнофункциональных гомогенных модульных робототехнических единиц пространственной структуры, адаптированной к решению конкретной прикладной задачи в определенном месте и в определенный момент времени. Для реализации функциональной возможности роботов к соединению и реконфигурации сформированной конструкции в ходе передвижения или манипуляций с объектами окружающей среды необходимы новые модельно-алгоритмические и программно-аппаратные средства синхронизированного управления физическим сцеплением модульных роботов, а также их информационного взаимодействия. Таким образом, разработка структурно-функциональных, алгоритмических моделей и программных средств автономного соединения и взаимодействия модульных гомогенных роботов является актуальной научной задачей, решению которой посвящено диссертационное исследование реконфигурируемых модульных робототехнических комплексов.

Степень разработанности темы. В работах Каляева И.А., Лохина В.М. описаны основополагающие концепции сетецентрического и децентрализованного управления роботами и достигнутые на сегодняшний день результаты в области самоорганизующихся распределенных систем управления группами интеллектуальных роботов. Работы Павловского В.Е. посвящены проблемам организации больших групп роботов в динамических средах. Решению проблем управления модульными и многозвенными роботами также посвящен ряд работ российских и зарубежных ученых: Андреева В.П., Горобцова А.С., Манько С.В., Охоцимского Д.Е., Яцуна С.Ф., Ан, В., Asadpour, M., Berns K., Fukuda, T. Проведённые исследования направлены на решения проблем управления соединением гомогенных и гетерогенных роботов, их передвижения в среде с динамическими препятствиями.

Целью диссертационной работы является повышение степени автоматизации процесса реконфигурации модульных робототехнических систем для решения предметно-ориентированных задач путем разработки модельно-алгоритмического и программного обеспечения управления физическим соединением и согласованным движением гомогенных модульных робототехнических устройств в процессе реконфигурации в единой пространственной структуре. Для достижения указанной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ программно-аппаратных средств для соединения модульных робототехнических устройств в единую конфигурацию и обеспечения информационного взаимодействия между ними.

2. Разработка концептуальной и теоретико-множественной модели реконфигурируемой модульной робототехнической системы, обеспечивающей взаимодействие модульных роботов в пространстве.

3. Разработка формата программного описания конфигураций модульных робототехнических систем, обеспечивающего оптимальное описание соединения устройств при построении конфигурации.

4. Разработка алгоритмов передвижения, соединения и информационного взаимодействия гомогенных модульных роботов при построении связанных пространственных структур.

5. Разработка программно-аппаратных средств модульной робототехнической системы, реконфигурируемой в различные пространственные формы.

Объектом исследования являются гомогенные модульные робототехнические устройства и системы.

Предметом исследования являются средства информационного и физического взаимодействия модульных робототехнических устройств и управления реконфигурацией модульной робототехнической системой.

Научная новизна:

1. Предложены концептуальная и теоретико-множественная модели реконфигурируемой модульной робототехнической системы, отличающиеся функциональной возможностью автоматического формирования последовательных и параллельно-последовательных конфигураций и обеспечивающие описание взаимодействия модульных робототехнических устройств в трехмерном пространстве.

2. Разработаны алгоритмы управления физическим соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств при построении связанных пространственных структур, отличающиеся оценением необходимых и доступных ресурсов, синхронизированным управлением отдельными структурными единицами на этапе их передвижения к месту сборки, соединению устройств между собой, а также возможностью реконфигурации в процессе автономного функционирования всей структуры модульной робототехнической системы при решении предметно-ориентированных задач.

3. Разработан формат программного описания конфигураций модульных робототехнических систем, представляющий информацию о целевом положении первого устройства и порядке последующего соединения устройств с указанием параметров соединения, позволяющий представить базовые конфигурации модульных робототехнических систем.

4. Разработан комплекс программных средств управления соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств, отличающийся применением системы компьютерного зрения, использующей маркеры дополненной реальности для осуществления контроля над отдельными устройствами в процессе их движения и пространственной ориентации, позволяющей управлять масштабируемыми модульными робототехническими системами, используя внешние беспроводные средства передачи данных.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В данном исследовании разработаны технологические основы контактного соединения гомогенных модульных робототехнических устройств в единые конструкции в трёхмерном пространстве. Фундаментальная проблема, возникающая при решении данной задачи, связана с ограниченными возможностями отдельных роботов, вследствие малых габаритных размеров, низкими энергетическими запасами, конструктивными особенностями движителей и т.д. При реконфигурации группы роботов необходимы алгоритмы синхронизированного управления попарными соединениями роботов, как в процессе формирования трёхмерной конструкции, так и по завершению для поддержания требуемой конфигурации.

Использование автономных модульных робототехнических комплексов в различных областях человеческой деятельности позволяет повысить производительность труда, снизить влияние человеческого фактора, а также снизить стоимость производственных операций, особенно при использовании таких систем в труднодоступных условиях и условиях повышенной опасности. При этом модульные роботы могут иметь более широкие возможности при передвижении по пересеченной местности по сравнению с гусеничными и колесными платформами за счет

адаптивной пространственной структуры, которая подстраивается под специфику данного окружения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе используются методы теории информации, теории множеств, теории передачи данных, теории распределенных систем, цифровой обработки сигналов. Компьютерная реализация разработанных алгоритмов производилась с использованием методов обработки матричных структур данных. Для компьютерного моделирования робототехнических устройств применялись системы автоматизированного проектирования, такие как Компас-3D, Solidworks пакеты и высокоуровневые языки для технических расчетов, а также среды для анализа данных Gazebo и V-Rep.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концептуальная и теоретико-множественная модели реконфигурируемой модульной робототехнической системы.

2. Алгоритмы управления физическим соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств при построении связанных пространственных структур.

3. Формат программного описания конфигураций модульных робототехнических систем.

4. Комплекс программных средств управления соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается за счёт анализа состояния исследований в данной области, согласованности теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки алгоритмов, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных научных специализированных конференциях.

Разработанные модели и алгоритмы управления соединениями и взаимодействия гомогенных модульных робототехнических устройств были реализованы в программно-аппаратной системе МАРС и использованы рядом коммерческих и государственных организаций в научно-образовательном процессе. Исследования, отражённые в диссертации, проведены в рамках 4 научно-исследовательских работ: 1) грант РФФИ № 16-19-00044 «Принципы распределения задач между сервисными роботами и средствами киберфизического интеллектуального пространства при многомодальном обслуживании пользователей»; 2) грант РФФИ №16-08-00696 «Моделирование автоматизированных робототехнических средств транспортировки пострадавших»; 3) грант РФФИ №17-58-04110 «Моделирование и разработка энергоэффективных решений задач кинематики и динамики шагающих роботов»; 4) грант РФФИ № 16-29-04101 офи_м «Технологические основы управления попарными соединениями гомогенных роботов при конфигурировании роя в трёхмерные формы». Разработанное модельно-алгоритмическое и программно-аппаратное обеспечение управления модульными роботами было использовано при проведении исследовательских работ СПб ФИЦ РАН, КБНЦ РАН, ООО «Фабрика растений» и в учебном процессе ГУАП, получены соответствующие акты внедрения. На предложенные решения получено 2 патента на изобретение: «Мобильная автономная робототехническая платформа с блочной изменяемой структурой» №2704048 от 23.10.2019г. «Магнитно-механическое устройство соединения модульных конструкций» №2708377 от 23.10.2018 г. и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Система моделирования процесса реконфигурации положения распределенных мобильных киберфизических средств» №2018614015 от 27.03.2018 г.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях в период с 2016 по 2020 г: «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2016, 2017; XXIX международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-29)», Санкт-Петербург, 2016; The 1st International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR-2016), Будапешт, Венгрия, 2016; The 3rd International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR-2018), Лейпциг, Германия, 2018; Zavalishin Readings 2019, Курск, 2019; The 4th International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR-2019), Стамбул, Турция, 2019.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 печатных работ, включая 3 публикации в рецензируемых научных изданиях по специальности 05.13.11 из Перечня ВАК (Мехатроника, автоматизация, управление, Известия ЮФУ. Технические науки, Известия Тульского государственного университета. Технические науки), 12 публикаций в изданиях, индексируемых в WoS/Scopus, 2 патента на изобретения, 1 свидетельство на регистрацию ПрЭВМ. Полный перечень публикаций соискателя по теме исследования представлен в Приложении А диссертационной работы.

Личный вклад автора. Основные научные положения, теоретические выводы и практические решения, результаты тестирования сформулированы и изложены автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 139 машинописных страницы содержит введение, четыре главы и заключение, список литературы (122 наименования), 18 таблиц, 43 рисунка, приложения со списком публикаций соискателя и копиями актов внедрения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована важность и актуальность темы диссертации, сформулированы цели диссертационной работы и решаемые задачи, определена научная новизна работы и ее практическая значимость.

В первой главе выполнен аналитический обзор существующих модульных робототехнических систем и способов управления соединениями и взаимодействия отдельных модульных робототехнических устройств (МРУ). Рассмотрены два основных подхода к передвижению модульной робототехнической системы: на основе периодической реконфигурации с независимым передвижением разделенных модулей или на основе перемещения системы целиком, в том числе путем реализации движения ходьбы или ползания. Рассматриваются различные программные библиотеки для разработки робототехнических систем, обсуждаются недостатки и достоинства этих библиотек. Рассмотрены основные проблемы разработки алгоритмов реконфигурации модульных робототехнических систем, выделены общие функциональные требования к этим алгоритмам. Проанализированы основные характеристики программной операционной системы Robot Operating System (ROS) с целью ее применения в модульных робототехнических комплексах, обусловившие ее выбор в качестве платформы для разработки программного обеспечения. Проведено сравнение существующих типовых структурно-функциональных моделей модульных роботов, приведены способы управления их перемещением и соединением. На рисунке 1 представлена оригинальная классификация модульных робототехнических систем, разработанная на основе анализа ключевых характеристик МРУ, определяющих их функциональные возможности и сценарии применения.

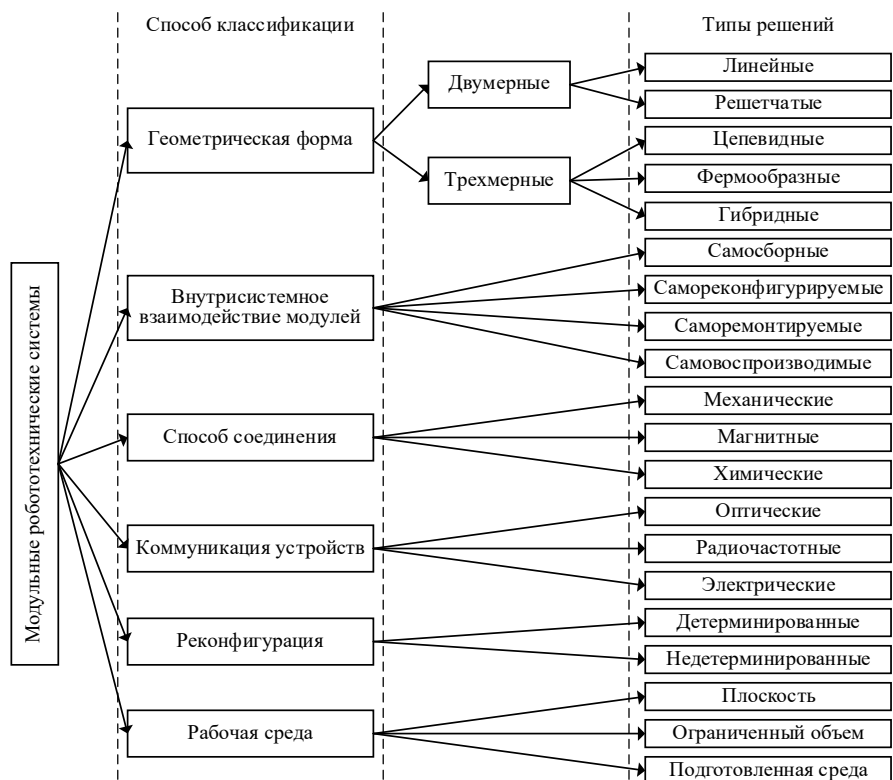


Рисунок 1 – Классификация модульных робототехнических систем

Среди основных проблем проектирования и функционирования модульных робототехнических систем (МРС) следует указать: низкую точность позиционирования устройств друг относительно друга, высокие требования к математическому обеспечению и встроенным вычислительным модулям, а также низкое качество соединения и низкую скорость конфигурирования.

Вторая глава посвящена описанию разработанного модельно-алгоритмического обеспечения модульной робототехнической системы, обеспечивающей формирование змеевидной и решетчатой конфигурации из гомогенных модульных робототехнических устройств. Предложены концептуальная и теоретико-множественная модели управления конфигурированием модульной робототехнической системы. Предложенные модели служат основой для формирования и описания пространственных структур МРС и управления МРУ при реконфигурации МРС. Приведена формальная постановка задачи управления МРУ при формировании конфигураций МРС, рассмотрен комплекс алгоритмов, задействованных при реализации соединения МРУ между собой. Представлен алгоритм построения конфигураций на основе данных о необходимом количестве МРУ, их координатах и ориентации каждого МРУ. Приведены алгоритмы поиска, оценивания состояния, выбора и соединения МРУ в области формирования конфигурации МРС. После завершения соединения МРУ полученная конфигурация МРС начинает работу путем реконфигурации или передвижения.

Для формализации задач соединения и взаимодействия МРУ в процессе функционирования МРС была предложена концептуальная модель (рис. 2), включающая следующие основные сущности: параметры МРУ, используемого для построения МРС и имеющего набор базовых функций перемещения и соединения, параметры самой МРС – системы, образуемой конфигурацией МРУ в структуру в определяемым заранее задачами функционалом, функции системы управления МРС, задачи МРС и устройства обмена данными между МРУ и системой управления МРС.

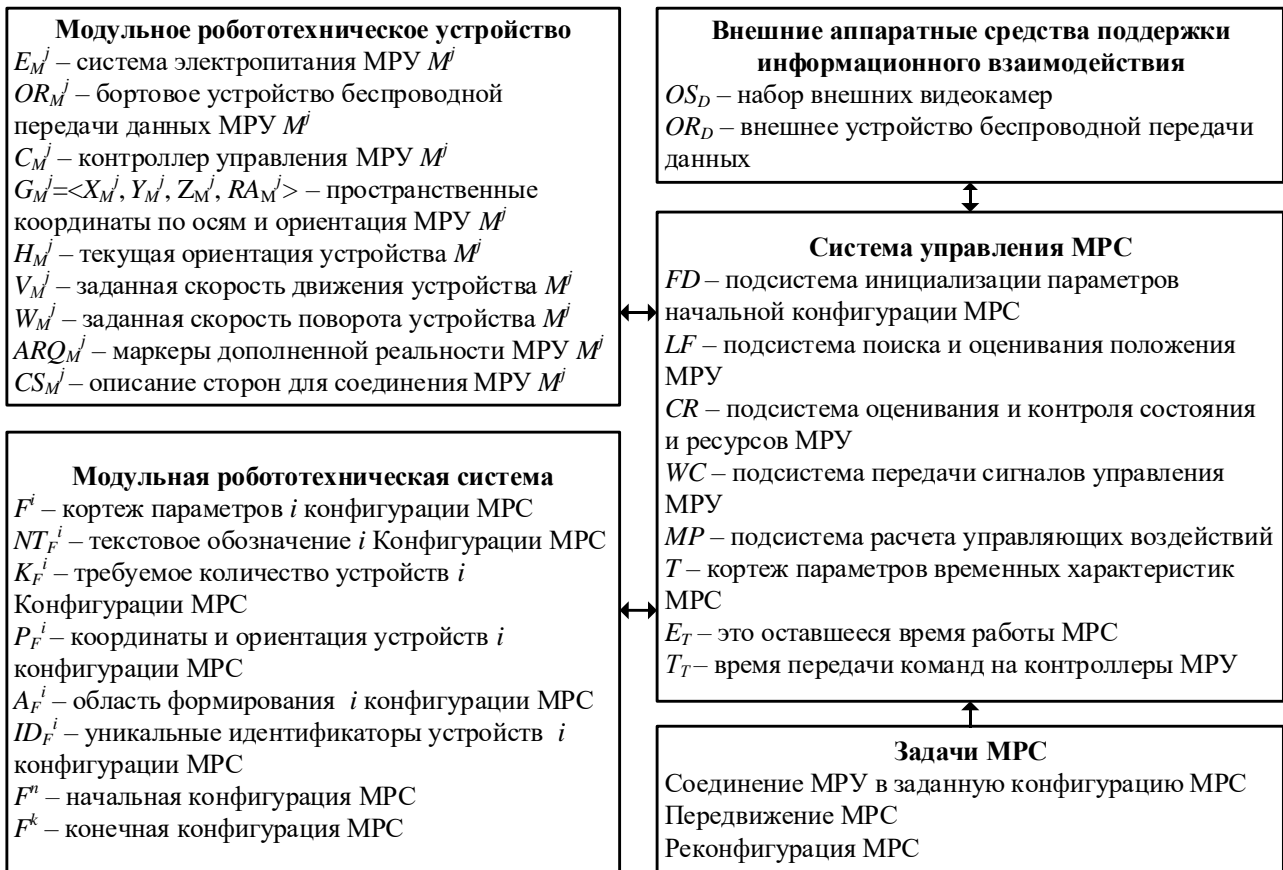


Рисунок 2 – Концептуальная модель управления модульной робототехнической системой

Исходя из предложенной концептуальной модели, сформулируем задачи диссертационного исследования следующим образом. Необходимо выполнить разработку модельно-алгоритмического и программно-аппаратного обеспечения синхронизированного централизованного управления группой модульных робототехнических устройств, находящихся в области формирования конфигурации модульной робототехнической системы, подключенных к сети беспроводной связи и обладающих достаточным зарядом аккумулятора для осуществления последовательного передвижения и соединения в единую пространственную конструкцию согласно формату программного описания конфигурации, а затем выполнения прикладных задач передвижения и реконфигурации модульной робототехнической системы. Централизованное управление группой МРУ осуществляется на основе данных от внешней сенсорной системы набора видеокамер, анализирующей положения и ориентации всех МРУ, путем последовательного передвижения МРУ на этапе соединения в конфигурацию и параллельного синхронного управления МРУ при передвижении и реконфигурации МРС.

На основе предложенной концептуальной модели рассмотрим далее теоретико-множественную модель модульной робототехнической системы, описываемую следующим кортежем параметров:

$$MRS = \langle M, F, D, S, T \rangle,$$

где: M – множество МРУ, F – множество конфигураций МРС, D – внешние аппаратные средства поддержки, S – система управления МРС, T – временные характеристики. Далее рассмотрим введенные параметры более подробно.

$M = \{M^1, M^2, \dots, M^j, \dots, M^J\}$ – множество МРУ, где уникальный номер $j \in [1, J]$, J – количество МРУ, необходимое для реализации всех допустимых конфигураций МРС. Описание каждого МРУ представляет собой кортеж параметров $M^j = \langle$

$W_{Mj}, RB_{Mj}, E_{Mj}, OR_{Mj}, C_{Mj}, G_{Mj}, ARQ_{Mj}, H_{Mj}, V_{Mj}, W_{Mj}, CS_{Mj} >$, характеризующий элементы МРУ, такие как W_{Mj} – колесная база, RB_{Mj} – функциональный осевой поворотный блок, E_{Mj} – система электропитания, OR_{Mj} – бортовое устройство беспроводной передачи данных, C_{Mj} – контроллер управления, пространственные координаты по соответствующим осям и ориентация МРУ $G_{Mj} = < X_{Mj}, Y_{Mj}, Z_{Mj}, RA_{Mj} >$, маркеры дополненной реальности ARQ_{Mj} , расположенные в ключевых точках МРУ, необходимые для локализации и определения ориентации МРУ в пространстве, H_{Mj} – текущая ориентация устройства, V_{Mj} – заданная скорость движения устройства, W_{Mj} – заданная скорость поворота устройства, а также CS_{Mj} – описание сторон МРУ, оснащенных соединительным механизмом, используемым при построении конфигурации, представлено следующим кортежем параметров: $CS_{Mj} = < CS1_{Mj}, CS2_{Mj}, CS3_{Mj}, CS4_{Mj} >$.

$F = \{F^1, F^2, \dots, F^i, \dots, F^I\}$ – множество конфигураций, формируемых данной МРС, $i \in [1, I]$, где I – максимальное количество различных конфигураций для данной МРС. Описание каждой конфигурации представляет собой кортеж параметров $F^i = < NT_{Fi}, K_{Fi}, P_{Fi}, A_{Fi}, ID_{Fi} >$, где NT_{Fi} – текстовое обозначение конфигурации i , K_{Fi} – количество устройств, необходимое для построения конфигурации F^i , P_{Fi} – множество размерностью K_{Fi} , описывающее конечные координаты центров и ориентацию устройств МРУ в области формирования конфигурации A_{Fi} , а также уникальные идентификаторы устройств $ID_{Fi} \in [1, K_{Fi}]$.

$D = < OS_D, OR_D >$ – кортеж параметров, описывающий внешние аппаратные средства поддержки информационного взаимодействия МРУ: OS_D – набор внешних видеокамер, анализирующих область формирования конфигурации МРС, OR_D – внешнее устройство беспроводной передачи данных между МРУ и системой управления МРС.

Система управления МРС описана следующим кортежем параметров: $S = < FD, LF, CR, WC, MP >$, где FD – алгоритм инициализации параметров начальной конфигурации МРС, LF – алгоритм поиска и оценивания координат и ориентации МРУ M , необходимых для формирования МРС, CR – алгоритм оценивания и контроля состояния и ресурсов МРУ, WC – алгоритм передачи сигналов управления на C_M МРУ и MP – алгоритм расчета управляющих воздействий, необходимых для перемещения и разворота всех МРУ на позиции соединения и движения в процессе реконфигурации или передвижения всей МРС в новую позицию без совершения реконфигурации.

$T = < E_T, T_T, RT_T, MT_T >$ – кортеж параметров, описывающий временные характеристики МРС: E_T – оставшееся время работы МРС при текущем заряде аккумуляторов МРУ, T_T – время, необходимое для передачи на контроллеры C_M всех МРУ информации, содержащей управляющие воздействия по реализации заданной конфигурации или передвижения МРС, RT_T – время, необходимое для выполнения поворота МРУ, MT_T – время, необходимое для выполнения перемещения МРУ из точки в точку.

В рамках представленной модели ее работа может быть описана следующим образом:

$$F^i \xrightarrow{\langle M, F, D, S, T \rangle} F^k,$$

где F^k – конфигурация, которая должна быть получена в результате работы модели.

Далее отношения и функциональные зависимости между введенными параметрами описаны в виде алгоритмических моделей и реализованы в программных средствах по автономному соединению и взаимодействию модульных

робототехнических устройств. Предложенные концептуальная и теоретико-множественная модели служат основой для формирования модельно-алгоритмического обеспечения управления функционированием отдельных модульных робототехнических устройств и образованной ими модульной робототехнической системы. Для апробации способов соединения МРУ и их взаимодействия в процессе реконфигурации в данной работе применяется централизованный подход к управлению.

На рисунке 3 представлен алгоритм формирования конфигураций МРС из отдельных МРУ, включающий в себя следующие этапы: поиск и оценка устройств МРУ, находящихся в зоне взаимодействия друг с другом, получение информации о свободных и задействованных устройствах МРУ, выбор устройств МРУ и их перемещение в заданную позицию, поэтапное соединение устройств МРУ между собой в заданной последовательности.

В таблице 1 приведен пример инициализации параметров системы управления МРС для Н-образной конфигурации. Для ее формирования производится расчет конечных координат и ориентации устройств, необходимых для формирования конфигурации МРС типа NT_{F^k} в области A_{F^k} .

Таблица 1. Расчет параметров для начальной конфигурации МРС типа «НК»

Название конфигурации, NT_{F^k}	Число МРУ в конфигурации, K_{F^k}	Номер МРУ, m	Координаты и ориентация МРУ $P_{F^k}^m$ в области A_{F^k} , $\langle X_{P_{F^k}^m}, Y_{P_{F^k}^m}, Z_{P_{F^k}^m}, RA_{P_{F^k}^m} \rangle$	Номер и сторона МРУ, с которым производится соединение, $\{h, CS1_{M^h}\}$	Номер и сторона МРУ, который соединяется, $\{m, CS1_{M^m}\}$
НК	3	1	600, 600, 0, 0°	-	-
		2	482, 600, 0, 90°	1, $CS4_{M^1}$	2, $CS1_{M^2}$
		3	718, 600, 0, 90°	1, $CS2_{M^1}$	3, $CS3_{M^3}$

При первичной инициализации системы управления МРС задаются параметры формируемой конфигурации F^k , включая: количество K_{F^k} МРУ, необходимых для построения конфигурации, координаты и ориентацию всех устройств $P_{F^i}^m = \langle X_{P_{F^i}^m}, Y_{P_{F^i}^m}, Z_{P_{F^i}^m}, RA_{P_{F^i}^m} \rangle$, где $m \in [1, K_{F^i}]$ в области формирования конфигурации A_{F^k} . При инициализации параметров системы управления МРС производится расчет конечных координат и ориентации устройств $P_{F^k}^m$, необходимых для формирования конфигурации МРС типа NT_{F^k} в области A_{F^k} . Для работы алгоритма соединения МРУ необходимо знать конечную ориентацию и координаты позиции $\langle X_{P_{F^k}^m}, Y_{P_{F^k}^m}, Z_{P_{F^k}^m}, RA_{P_{F^k}^m} \rangle$, в которую следует переместить текущее МРУ с номером m , а также определить номер и сторону МРУ, которой оно присоединяется к смежному МРУ $\{m, CS1_{M^m}\}$, установить номер и сторону $\{h, CS1_{M^h}\}$ МРУ, с которым выполняется соединение. Поскольку формирование конфигурации производится на плоскости, то в данном случае координата $Z_{P_{F^k}^m} = 0$.

На следующем этапе начинает работу алгоритм поиска и оценивания количества МРУ в области формирования конфигурации A_{F^k} (рис. 4), необходимых для построения заданной конфигурации МРС. На первом шаге данного алгоритма для получения данных о местоположении и ориентации МРУ используется модуль ArUco библиотеки OpenCV, реализующий алгоритмы обнаружения маркера дополненной реальности на изображении и для пространственной локализации МРУ.

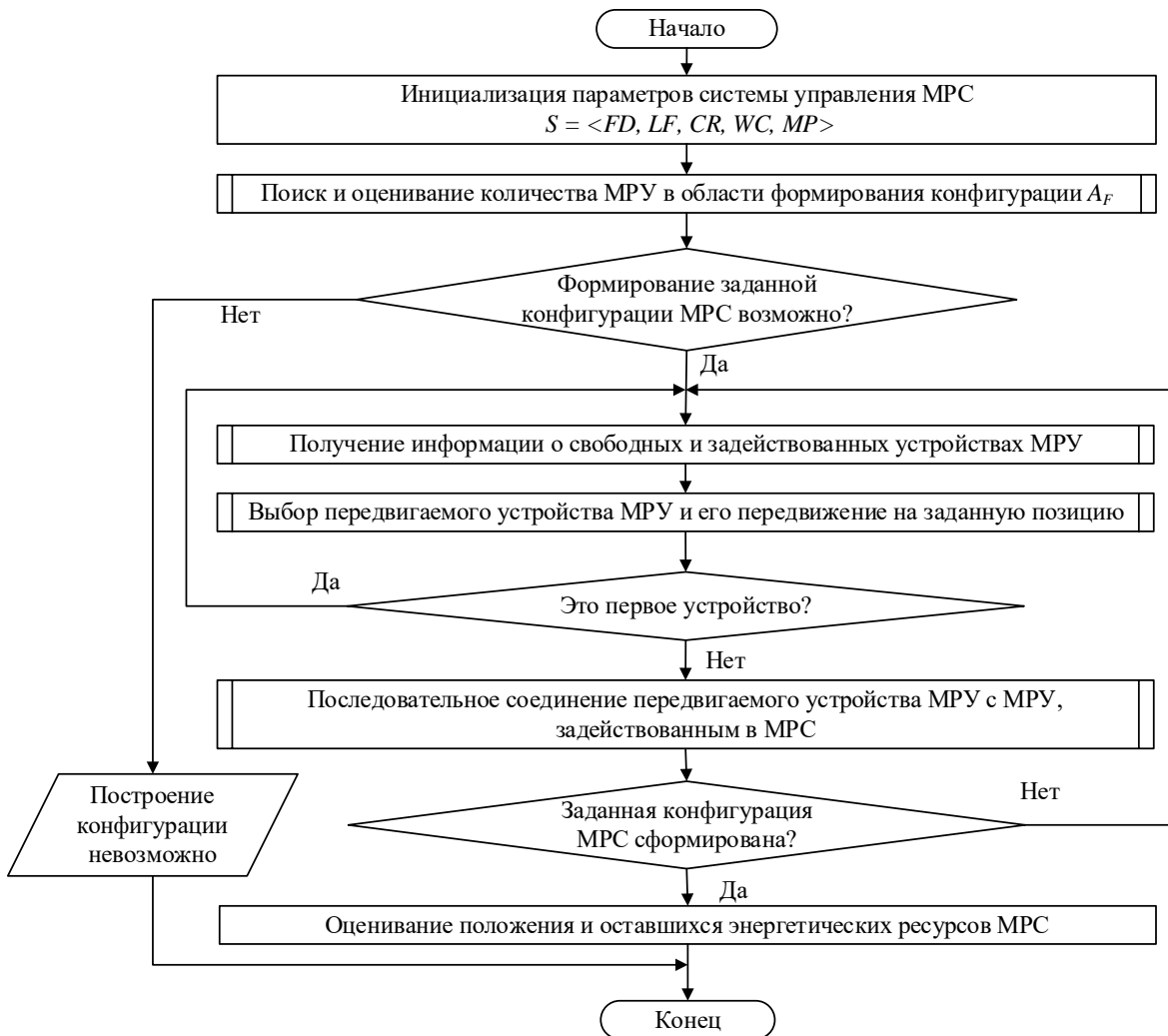


Рисунок 3 – Алгоритм управления последовательным формированием конфигурации MPC

Семейство маркеров-меток $ArUco$ было выбрано исходя из наличия в библиотеке OpenCV модуля для работы с ним. По маркерам определяется положение и ориентация МПУ в системе координат изображения, получаемого с камеры, установленной над областью построения конфигурации. Далее осуществляется опрос состояния устройств МПУ для получения информации о заряде аккумуляторов МПУ и о готовности бортовых программно-аппаратных средств МПУ к построению конфигурации MPC. Если количество удовлетворяющих всем условиям МПУ достаточно для формирования заданной конфигурации, то алгоритм завершает работу с положительным ответом. Затем осуществляется получение изображений с камер, после чего производится поиск ARQ_M – $ArUco$ -маркеров на изображении, на заключительном шаге алгоритма выполняется оценка положений тех МПУ, на которых закреплены соответствующие маркеры. Затем происходит расчет пути для каждого МПУ от текущей позиции до заданной позиции МПУ, с которыми производится соединение в конфигурации MPC. В начале работы алгоритм последовательного соединения МПУ (рис. 5) получает значения параметров: $T1$ – начальная точка текущего отрезка пути (координаты центра МПУ), $T2$ – конечная точка текущего отрезка пути, dx – допустимая погрешность по расстоянию, da – допустимая погрешность по углу. Допустимые погрешности dx и da обусловлены точностью оборудования, используемого для отслеживания положения МПУ. В процессе работы производится расчет расстояния D между текущей позицией МПУ $T1$ и $T2$, имеющими координаты x_1, y_1 и x_2, y_2 .

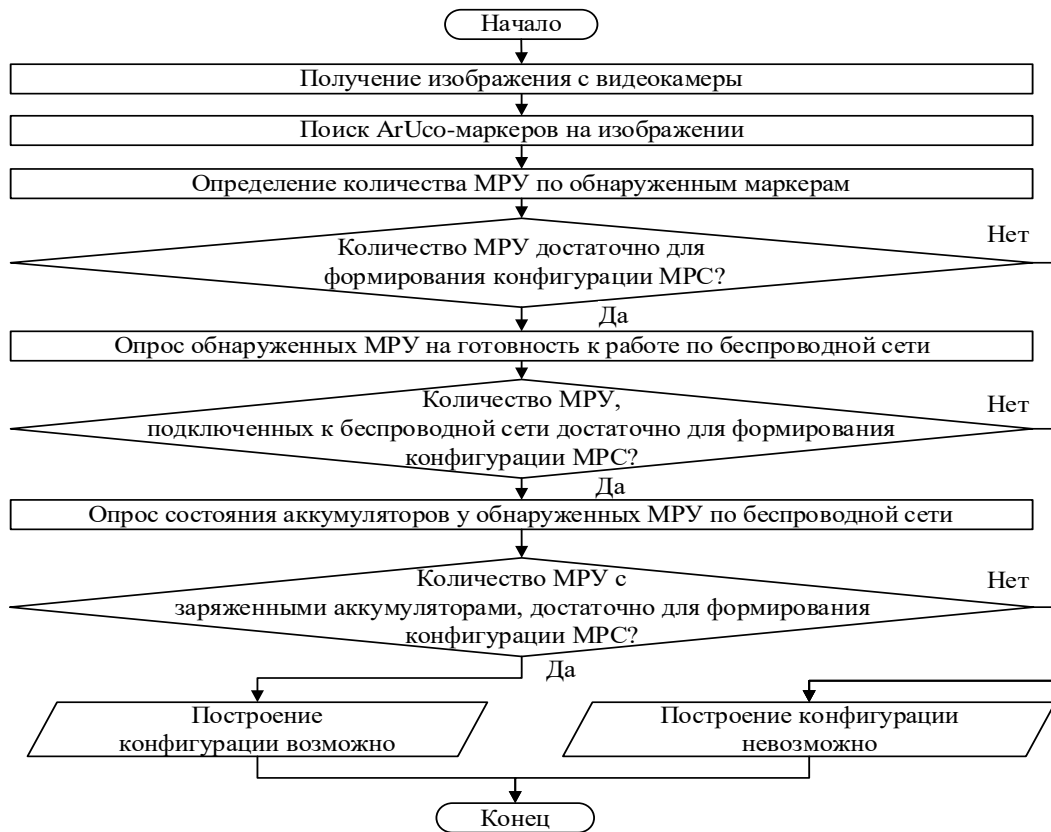


Рисунок 4 – Алгоритм поиска и оценивания количества МРУ в области формирования МРС

Если $D \leq dx$, то устройство находится в точке назначения, и алгоритм прекращает работу. В противном случае, рассчитывается угол A между ориентацией устройства и прямой $(T1, T2)$. Если $A > da$, устройству подается команда выполнить поворот на угол A . Вводятся данные RA_M, H_M, W_M , где RA_M – заданная ориентация устройства, H_M – текущая ориентация устройства, W_M – заданная скорость поворота устройства. Затем производится расчет разности dH между RA_M и H_M . По значениям dH и W_M производится расчет времени RT_T , необходимого для выполнения поворота устройства на угол dH . После этого планируется и передается на МРУ команда вида: $\langle rotation_direction, rotation_time \rangle$, где $rotation_direction$ – направление поворота, $rotation_time$ – время выполнения команды устройством. Если $A \leq da$, производится расчет расстояния l между координатами устройства и прямой $(T1, T2)$. Если $l > dx$, устройству подается команда на прямолинейное движение в сторону прямой $(T1, T2)$.

Если же $l \leq dx$, то устройству подается команда на прямолинейное движение в сторону $T2$. Алгоритм получает данные $T1, T2, V_M, H_M$, где $T1$ – координаты устройства, $T2$ – точка назначения, V_M – заданная скорость движения устройства, H_M – текущая ориентация устройства. Затем производится расчет расстояния между текущим положением устройства и точкой назначения. По найденному расстоянию и заданной скорости прямолинейного движения выполняется расчет времени MT_T , необходимого для выполнения перемещения от $T1$ до $T2$. После этого осуществляется расчет направления, в котором устройство должно совершить прямолинейное движение относительно собственной системы координат, и формируется и отправляется на устройство команда вида: $\langle movement_direction, movement_time \rangle$, где $movement_direction$ – направление движения устройства, $movement_time$ – время выполнения команды устройством. Согласно предложенной модели, после того как некоторое МРУ достигает точки назначения, инициируется выход на целевую позицию и последующее соединение МРУ.

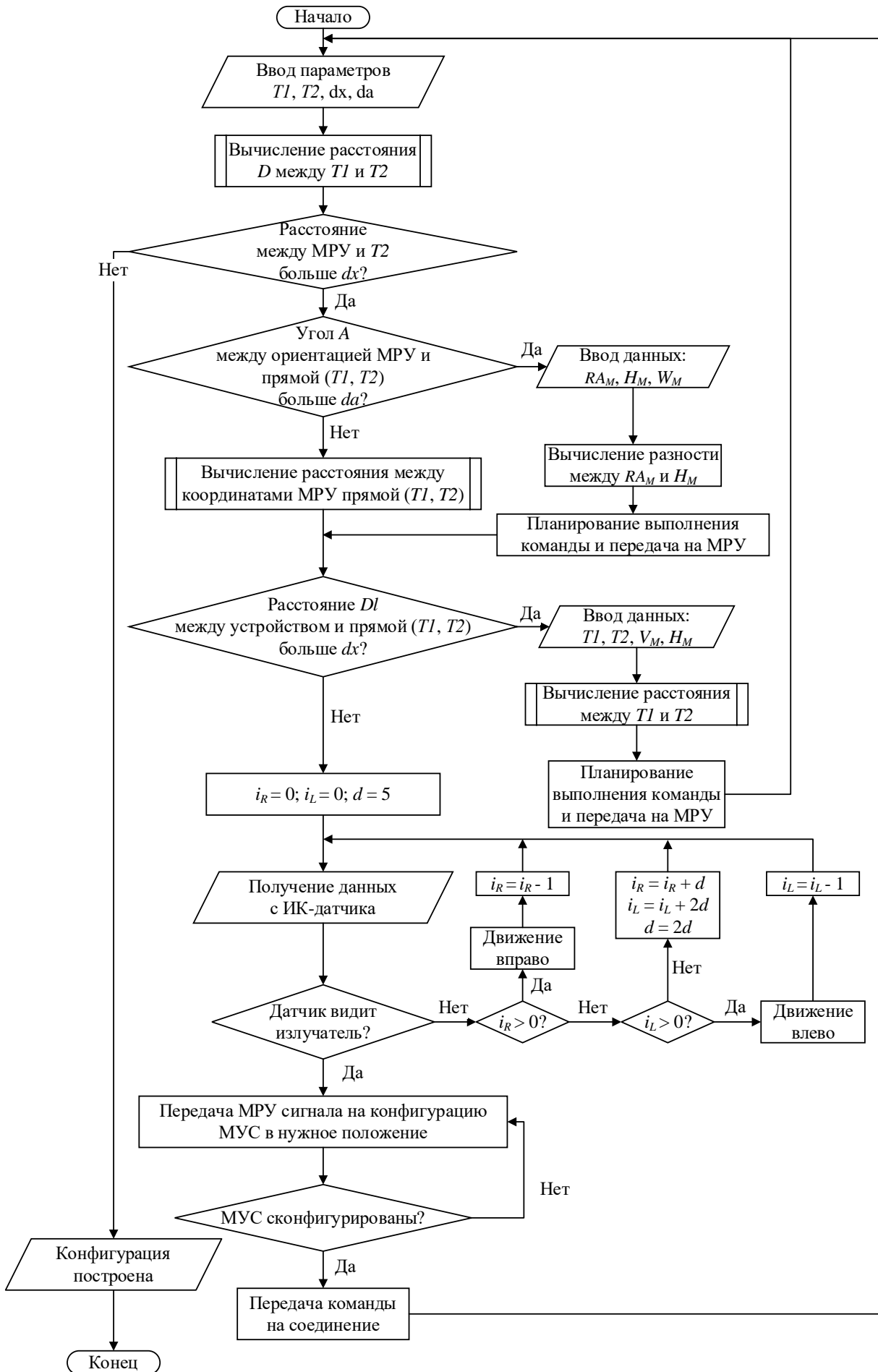


Рисунок 5 – Алгоритм последовательного соединения МРУ в МРС

На первом этапе выхода на позицию соединения задаются параметры i_R, i_L, d , где i_R – количество движений вправо, i_L – количество движений влево, d – коэффициент, определяющий количество движений в ту или иную сторону. После определения параметров i_R, i_L, d производится считывание данных с инфракрасного (ИК) датчика. Если сигнал ИК-излучателя обнаружен, то устройства находятся друг напротив друга и можно осуществить их соединение. В противном случае оценивается количество произведенных вправо и влево движений. Если i_R и i_L равны нулю, i_R принимается равным d , то $i_L \leftarrow d \cdot 2, d \leftarrow d \cdot 2$. Если i_R больше нуля, производится движение вправо, после чего $i_R = 1$. Если i_L больше нуля, производится движение влево, после чего $i_L = 1$. Таким образом, осуществляются поступательные движения устройства вправо и влево для поиска позиции для соединения, обусловленной наличием ИК-сигнала. После перемещения выбранного МРУ на рассчитанную позицию, его разворота в рассчитанную ориентацию и выхода на позицию соединения, подается команда о конфигурации коннекторов и производится соединение устройств.

Таким образом, по результатам выполнения представленных выше алгоритмов, формируется двумерное представление целевой конфигурации, состоящее из множества соединенных МРУ.



Рисунок 6 – Архитектура комплекса программно-аппаратных средств управления МРС

Для управления процессом перемещения, соединения и движения МРУ и конфигурации МРС (рис. 6) был разработан комплекс программно-аппаратных средств, архитектура которого включает в себя: модуль чтения данных с камер, модуль детектирования ArUco-маркеров, модуль преобразования данных, модуль управления конфигурацией, модуль приема-передачи данных. Тестирование разработанного алгоритмического и программного обеспечения проводилось в симуляционной среде моделирования Gazebo.

В третьей главе приводится модельное описание трех базовых конфигураций МРС: Н-образная конфигурация (НК), последовательная конфигурация (ПК), Н-образно-последовательная конфигурация (НПК), совмещающая в себе параметры первых двух конфигураций. Выбранные конфигурации обеспечивают масштабируемость МРС, добавление дополнительных МРУ к конфигурации увеличивает функциональность и грузоподъемность полученной структуры. Конфигурация НПК формируется при наличии в системе 10 и более МРУ. Устройства соединяются таким образом, чтобы сначала создать структуру достаточно большой массы с целью снижения вероятности возникновения коллизий и ошибок центрирования осей МРУ друг относительно друга при соединении. Для замкнутой структуры двухосевые актуаторы центральных устройств конфигурации блокируются, и конфигурация начинает переход в положение, из которого возможен переход образованной конфигурации к движению, как шагающей конструкции.

По сравнению с аналогами, разработанная модель МРУ обладает большими возможностями перемещения и устойчивостью, когда используется как автономное устройство. Данное МРУ может самостоятельно выстраивать нужную конфигурацию, не зависит от расположения устройств на поле к моменту начала процесса конфигурирования, а также может перемещаться в составе конфигурации. На рисунке 7 представлены трехмерные модели одного МРУ и МРС НК.



Рисунок 7 – Трехмерные модели одного МРУ и конфигурации МРС НК

Каждая модель подразумевает наличие собственного источника питания для обеспечения независимости от внешнего источника энергии. Соединительное устройство МРУ обеспечивает самоцентрирование устройств во время соединения. Разработанный прототип МРУ с двухосевым актуатором, оснащенный шасси для самостоятельного передвижения и соединительным устройством, обеспечивает самостоятельное соединение каждого МРУ с другими МРУ. Конфигурация НК строится из трех МРУ, где два из них перпендикулярно соединяются с первым в H-образную структуру. Это позволяет получить модульную робототехническую платформу, которая может быть использована как средство транспортировки грузов, а также как основа для перехода в более сложную конфигурацию с большим количеством устройств и более широкой функциональностью. Для компьютерного представления конфигураций МРС был разработан формат программного описания в виде информации о целевом положении первого устройства и порядке последующего соединения устройств с указанием параметров соединения.

Набор возможных параметров и допустимых значений приведен в таблице 2.

Таблица 2. Параметры полей соединяемых МРУ

Параметры		Допустимые значения
start_node		ID_F
position		$X_M \in [0,1200], Y_M \in [0,1200]$
heading		ID_F
nodes		$ID_F, connection_to, connection_from$
nodes	connection_to	$ID_F, front_side$
		$ID_F, left_side$
		$ID_F, right_side$
		$ID_F, back_side$
	connection_from	front_side
		left_side
		right_side
		back_side

Описание конфигурации НК взято для примера и имеет вид:

```
"start_node": {
  "ID_F": {
    "position": {"x":  $X_M$ , "y":  $Y_M$ },
    "heading":  $ID_F$ 
  },
  "nodes": {
    "ID_F": {
      "connection_to": " $ID_F, left\_side$ ",
      "connection_from": "front_side"
    }
  },
}
```

```

  "IDF": {
    "connection_to": "IDF, right_side",
    "connection_from": "back_side"
  }
}

```

В структуре "start_node" описываются уникальный идентификатор устройства в конфигурации и координаты точки "position", где $X_M \in [0,1200]$ и $Y_M \in [0,1200]$, в которую должен переместиться первый МРУ, согласно описанию конфигурации НК в таблице 1. В структуре "heading" описываются параметры уникального идентификатора ведущего устройства в формации, присоединением к которому начинает строиться конфигурация. В структуре "nodes" задаются уникальный идентификатор устройства в конфигурации, а также точки назначения для соединения через механическое устройство соединения (МУС). В переменных "connection_to" и "connection_from" задаются значения сторон соединяемых МРУ. В "connection_to" задаются параметры уникального идентификатора и стороны для соединения МРУ, уже включенного в конфигурацию. В "connection_from" задаются параметры стороны соединяемого устройства. При необходимости добавления новых параметров соединения устройств формат программного описания может быть расширен без изменения структуры, таким образом, предложенный формат программного описания является универсальным. Компьютерное моделирование МРС производилось в программных средах Gazebo и ROS с помощью инструментария rviz, предназначенного для 3D визуализации.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной апробации разработанного модельно-алгоритмического и программного обеспечения. Приведены результаты симуляционного моделирования по построению конфигураций НК, ПК и НПК. Описаны характеристики модели опытного прототипа МРУ, превосходящего аналоги по ряду характеристик: функциональность единичного робота, грузоподъемность, автономность и скорость передвижения. Также представлены результаты серии экспериментов с несколькими опытными прототипами МРУ по построению Н-образной конфигурации МРС НК.

По результатам 7 экспериментов среднее время перпендикулярного соединения двух МРУ составило 96 секунд, время передвижения МРУ на позицию соединения в среднем составило 56 секунд. Процесс калибровки соосности, а также соединения портов перпендикулярного и центрального МРУ составляет не более 10 секунд. По результатам 33 экспериментов построения трех случайно расположенных на поле МРУ в конфигурацию НК среднее время работы системы составило 169 с, среднее время перемещения МРУ на позицию соединения составило 134 с. Также была повышена точность позиционирования МРУ друг относительно друга во время их соединения путем уменьшения расстояния, на которое итеративно сдвигается устройство при поиске сигнала ИК-излучателя механического соединения, с 15 до 10 мм.

На рисунке 9 представлен процесс проведения экспериментальной апробации МРУ в конфигурации НК.



а)



б)

Рисунок 9 – Иллюстрация процесса формирования конфигурации НК:
 а) начальное положение конфигурации; б) конечное положение конфигурации

Таким образом, разработанные программные средства позволяют повысить степень автоматизации процесса реконфигурации модульных робототехнических систем за счет исключения необходимости участия пользователя на этапах сближения и соединения модульных робототехнических устройств в связанную пространственную структуру и последующего перемещения как единой системы.

Разработанные структурно-функциональные модели МРУ и программно-аппаратное обеспечение МРС позволяют сформировать масштабируемые транспортные средства большей грузоподъемности, способные производить реконфигурацию в три варианта базовых конфигураций, обеспечивающих передвижение на опорных колесах МРУ, манипулирование внешними объектами и шагающую походку, что повышает функциональность, геометрическую и опорную проходимость модульной робототехнической системы при реализации задач перемещения грузов в динамически изменяющейся внешней среде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность предложенных моделей, алгоритмов и программных средств управления физическим соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств, а также их практическая реализация вместе обеспечивают решение актуальной научно-технической задачи повышения степени автоматизации процесса реконфигурации модульных робототехнических систем, имеющей важное значение для развития модульной робототехники, в том числе были получены следующие научные результаты:

1. Предложены концептуальная и теоретико-множественная модели реконфигурируемой модульной робототехнической системы, отличающиеся функциональной возможностью автоматического формирования последовательных и параллельно-последовательных конфигураций и обеспечивающие описание взаимодействия модульных робототехнических устройств в трехмерном пространстве.

2. Разработаны алгоритмы управления физическим соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств при построении связанных пространственных структур, отличающиеся оценением необходимых и доступных ресурсов, синхронизированным управлением отдельными структурными единицами на этапе их передвижения к месту сборки, соединению устройств между собой, а также возможностью реконфигурации в процессе автономного функционирования всей структуры модульной робототехнической системы при решении предметно-ориентированных задач.

3. Разработан формат программного описания конфигураций модульных робототехнических систем, представляющий информацию о целевом положении первого устройства и порядке последующего соединения устройств с указанием параметров соединения, позволяющий представить базовые конфигурации модульных робототехнических систем.

4. Разработан комплекс программных средств управления соединением и информационным взаимодействием гомогенных модульных робототехнических устройств, отличающийся применением системы компьютерного зрения, использующей маркеры дополненной реальности для осуществления контроля над отдельными устройствами в процессе их движения и пространственной ориентации, позволяющие управлять масштабируемыми модульными робототехническими системами, используя внешние беспроводные средства передачи данных.

5. Модельное описание механического устройства соединения на основе ирисовой диафрагмы, предотвращающей обратный ход и произвольное разъединение

устройств, а также магнитно-механического соединения, характеризующегося управлением полярностью магнитного контура на основе кратковременных импульсов на этапах соединения и разъединения частей коннектора, что позволяет увеличить время автономной работы устройства за счет отсутствия необходимости постоянного электропитания устройства для поддержания соединения.

Предложенные модели, алгоритмы и программные средства могут быть использованы в перспективных модульных робототехнических системах. В качестве **рекомендаций** для дальнейшей разработки темы можно выделить исследования, направленные на переход от централизованного к децентрализованному способу управления группы модульных робототехнических устройств на основе принципов самоорганизации, а также биоинспирированных методов информационного и физического взаимодействия в больших группах роботов.

Положения, выносимые на защиту, соотнесены с пунктами паспорта специальности 05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»: п. 3. «Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем», п. 8. «Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из «Перечня ВАК»:

1. Павлюк, Н.А. Конструктивные и архитектурные решения для сервисной мобильной платформы со сменными компонентами / Н.А. Павлюк., П.А. Смирнов, А.Д. Ковалев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 10. – С. 181-193. **(05.13.11)**
2. Павлюк, Н.А. Разработка конструкции узла ноги антропоморфного робота Антарес на основе двухмоторного колена / Н.А. Павлюк, В.Ю. Будков, М.М. Бизин, А.Л. Ронжин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174). – С. 227-239. **(05.13.11)**
3. Павлюк, Н.А. Исследование устойчивости конструкции антропоморфного робота Антарес при воздействии внешней нагрузки / А.С. Кодяков, Н.А. Павлюк, В.Ю. Будков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18. – № 5. – С. 321-327. **(05.13.11)**

В зарубежных изданиях, индексируемых в WoS/Scopus:

4. Павлюк, Н.А., Мобильная автономная реконфигурируемая система / Н.А. Павлюк, К.Д. Крестовников, Д.Э. Пыхов // Проблемы региональной энергетики. – 2018. – 1(36). – С. 125-135.
5. Ronzhin, A. Automatic control of robotic swarm during convex shape generation / A. Ronzhin, I. Vatamaniuk, N. Pavluk // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. – 2016. – P. 675-680.
6. Pavluk, N. Mechanical leg design of the anthropomorphic robot Antares / N. Pavluk, A. Ivin, V. Budkov, A. Kodyakov, A. Ronzhin // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – 2016. – P. 113-123.
7. Pavlyuk, N.A. Stability study of anthropomorphic robot Antares under external load action / A.S. Kodyakov, N.A. Pavlyuk, V.Y. Budkov, R.A. Prakupovich // IOP Conf. Ser. J. Phys. – 2017. – Vol. 803. – P. 012074.
8. Pavliuk, N. Analysis of balance control methods based on inverted pendulum for legged robots / A. Denisov, R. Iakovlev, I. Mamaev, N. Pavliuk // MATEC Web of Conferences. – 2017.
9. Saveliev, A. Proactive localization system concept for users of cyber-physical space / A. Saveliev, D. Malov, A. Edemskii, N. Pavliuk // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – 2018. – P. 233-238.
10. Pavliuk, N.A. Design and Operation Principles of the Magnetomechanical Connector of the Module of the Mobile Autonomous Reconfigurable System / N.A. Pavliuk, K.D. Krestovnikov, D.E. Pykhov, V.U. Budkov // Proceedings of Interactive Collaborative Robotics. – 2018. – P. 202-212.

11. Krestovnikov, K. Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system / K. Krestovnikov, E. Cherskikh, N. Pavliuk // IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies. – 2019. – 5 p.
12. Pavliuk, N.A. Connecting Gripping Mechanism Based on Iris Diaphragm for Modular Autonomous Robots / N.A. Pavliuk, P.A. Smirnov, A.V. Kondratkov, A.L. Ronzhin // ICR 2019: Interactive Collaborative Robotics. – 2019. – P. 260–269.
13. Pavliuk, N. Generation of walking patterns for biped robots based on dynamics of 3d linear inverted pendulum / A. Kovalev, N. Pavliuk, K. Krestovnikov, A. Saveliev // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11659. – P. 170-181.
14. Pavliuk, N. Formation of modular structures with mobile autonomous reconfigurable system / N. Pavliuk, D. Pykhov, A. Saveliev, E. Cherskikh // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2020. Vol. 154. P. 383-395.
15. Pavliuk N. Development of multipurpose mobile platform with a modular structure / N. Pavliuk, I. Kharkov, E. Zimuldinov, V. Saprychev // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – P. 137-147.

В других изданиях:

16. Павлюк, Н.А. Педипуляторы антропоморфного робота Антарес с двухмоторной сборкой колена и двухсегментной стопой / М.М. Бизин, А.В. Денисов, А.С. Кодяков, Н.А. Павлюк, Л.А. Станкевич // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. – Т. 13. – № 4. – С. 71-78.
17. Павлюк, Н. Конструктивные решения нижних конечностей для антропоморфного робота Антарес / Н. Павлюк, А. Ронжин // Экстремальная робототехника. – 2016. – Т.1. – № 1. – С.422-427.
18. Павлюк, Н.А., Конструктивные решения для антропоморфного робота Антарес // Н.А. Павлюк, М.М. Бизин // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2016. – № 9 (91). – С. 138-141.
19. Павлюк Н.А. Моделирование опорной конструкции тазового механизма антропоморфного робота Антарес / Н.А. Павлюк // Экстремальная робототехника. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 155-160.
20. Павлюк, Н.А. Моделирование и оптимизация каркасных элементов торса и тазового механизма антропоморфного робота "АНТАРЕС" / Н.А. Павлюк, П.А. Смирнов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2017. – Т. 7. – № 3 (24). – С. 58-65.
21. Павлюк, Н.А. Тазовый механизм антропоморфного робота Антарес на фланцевой опоре с упругой муфтой / Н.А. Павлюк, П.А. Смирнов, М.Ю. Кузов // В книге: Десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017). – 2017. – С. 42-44.
22. Павлюк, Н.А. Разработка модели манипулятора с изменяемой кинематической цепью / П.А. Смирнов, М.Ю. Кузов, Н.А. Павлюк // Завалишинские чтения'17. – 2017. – С. 232-235.
23. Павлюк, Н.А. Конструкция и принципы функционирования магнитно-механических коннекторов модульного робота / А.Л. Ронжин, Н.А. Павлюк, Д.И. Михальченко // В книге: Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов. – 2018. – С. 9-11.
24. Павлюк Н.А. Формирование функциональных структур на основе гомогенных единиц модульной автономной реконфигурируемой системы / Н.А. Павлюк, П.А. Смирнов, А.Д. Ковалев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – Т. 17. – № 5. – С. 14-20.
25. Павлюк Н.А. Классификация реконфигурируемых модульных робототехнических систем // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 30-37.

Регистрация результатов интеллектуальной деятельности:

26. Павлюк Н.А. Система моделирования процесса реконфигурации положения распределенных мобильных киберфизических средств / И.В. Ватаманюк, Н.А. Павлюк // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018614015 от 27.03.2018.
27. Павлюк, Н.А. Магнитно-механическое устройство соединения модульных конструкций / А.И. Савельев, К.Д. Крестовников, Н.А. Павлюк // Патент на изобретение RU 2708377 С1 от 06.12.2019.
28. Павлюк, Н.А. Мобильная автономная робототехническая платформа с блочной изменяемой структурой / А.И. Савельев, И.Ю. Харьков, Н.А. Павлюк, А.А. Карпов // Патент на изобретение RU 2704048 С1 от 23.10.2019.

Автореферат диссертации

ПАВЛЮК
Никита Андреевич

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОГО И
ФИЗИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВ МОДУЛЬНОЙ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Текст автореферата размещен на сайтах:
Высшей аттестационной комиссии Министерства образования
и науки Российской Федерации
<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)
<http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/>

Подписано в печать
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ №