

Буличев Олег Викторович

**Разработка метода тактильного ощущения для мобильного
шагающего робота**

Специальность 2.5.4. —
«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Университете Иннополис.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, доцент
Малолетов Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Воротников Сергей Анатольевич**,
кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования «Мос-
ковский государственный технический универси-
тет имени Н. Э. Баумана»,
Доцент

Ящун Сергей Федорович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования «Юго-
Западный государственный университет»,
Заведующий кафедрой

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт робототехни-
ки и процессов управления Южного Федерального
Университета

Защита состоится DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов на заседании диссер-
тационного совета Д 123.456.78 при Название учреждения по адресу: Адрес.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Название библиотеки.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: Адрес, ученому секретарю диссертационного со-
вета Д 123.456.78.

Автореферат разослан DD mmmmmmmm2023 года.
Телефон для справок: +7 (0000) 00-00-00.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 123.456.78,
д-р физ.-мат. наук

Фамилия Имя Отчество

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Возможные направления применения мобильных роботов включают в себя использование их для исследовательских целей в труднодоступных условиях. Мобильные роботы могут проникать в места, недоступные и опасные для людей, например, в пещеры и шахты, перемещаться под завалами или внутри помещений во время стихийных бедствий, аварийных ситуаций и так далее. Одним из наиболее интересных и малоизученных направлений является разработка мобильных роботов, предназначенных для движения в условиях пещер естественного происхождения.

Движение по пещере часто происходит по опасным и труднопроходимым участкам. Наиболее опасными являются сифоны (рис. 1б), сталактиты, сталагмиты, обилие скользких грунтов (рис. 1в, 1г и 1е). В пещерах недостаток света, часто влажно. Встречаются участки, покрытые водой (рис. 1д) и растительностью (рис. 1е).

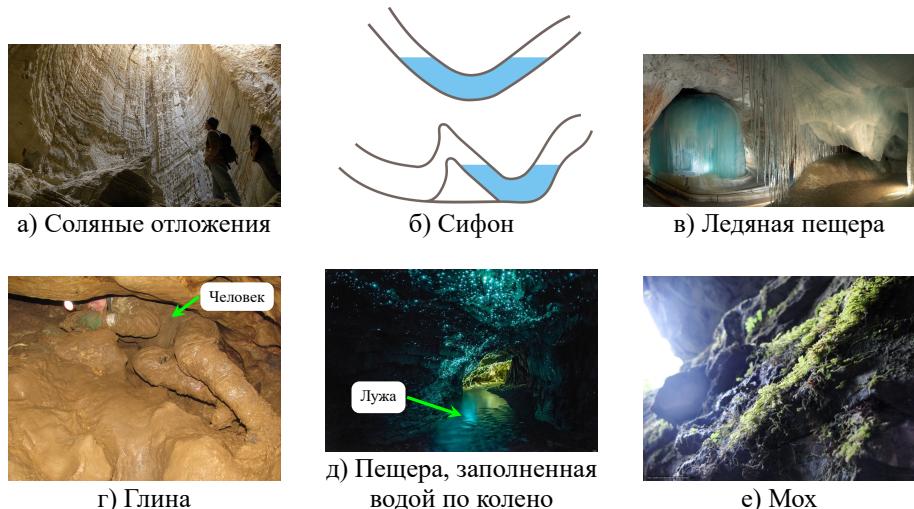


Рис. 1 — Препятствия, встречающиеся в пещерах

Эти препятствия могут встретиться человеком при исследовании или инспекции пещеры. Одно из преимуществ роботов — они могут работать в опасных средах без нахождения рядом человека. Таким образом использование роботов в пещерах нивелирует все опасности для человека.

Существуют различные типы движителей роботов. С препятствиями представленными выше лучше всего справляются многоногие шагающие роботы. Та-

кие роботы могут проходить по сыпучим грунтам, каменистым грядам и преодолевать небольшие водные преграды.

Для полноценного функционирования любого мобильного робота необходимы сенсоры. Сенсоры мобильных роботов можно разделить на внешние и внутренние. Под внешними сенсорами подразумеваются устройства, элементы которых не могут быть защищены от воздействия окружающей среды. Примерами таких сенсоров являются камеры, лидары, сонары и тому подобные устройства.

Внутренние сенсоры включают в себя датчики усилий, акселерометры, магнитометры, амперметры и так далее. Такие устройства предполагают взаимодействие с внешней средой посредством гравитационных или магнитных полей, или механических элементов, и могут быть механически защищены от неблагоприятного воздействия окружающей среды.

Большую опасность для мобильных роботов представляет тот факт, что характерные для пещеры условия могут вывести из строя сенсоры. К примеру грязь (рис. 1г) может закрыть обзор камере или лидару. Или водная гладь (рис. 1д) будет отражать лучи лазера лидара и искажать данные (рис. 2).

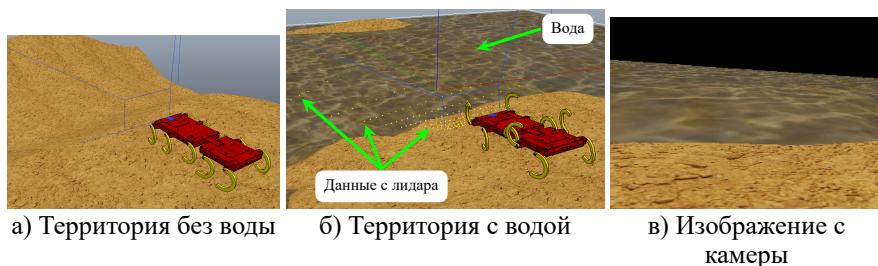


Рис. 2 — Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

Целью диссертационной работы является разработка метода построения карты местности с определением геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности роботом с шагающими движителями снабженными тактильными датчиками.

Предлагаемое решение подходит для первичного исследования замкнутых труднодоступных пространств, где отсутствует освещение, присутствует обилие грязи, пыли, а так же водных препятствий. Алгоритмы и концепты навигации данной системы могут быть использованы как резервная система навигации для других робототехнических систем, когда более точная — оптическая вышла из строя.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Определение профиля опорной поверхности, на основе информации о точках её касания ногами робота и внутренних датчиков, характеризующих механическое состояние аппарата.
2. Определение физико-механических свойств опорной поверхности: жесткости, вязкости и пластичности, и выделение на их основе классов поверхностей на основе информации с датчиков силы, установленных на ногах и внутренних датчиков робота.
3. Исследование влияния на точность измерения усилий площади пятна контакта при нажатии на сенсор.
4. Изучение влияния геометрических параметров робота на точность и полноту физико-механических свойств опорной поверхности и профильную проходимость робота.

Объект исследования. Объектом исследования является класс многоно-гих шагающих роботов с цельным или сочленённым корпусом, и цикловыми движителями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.



Рис. 3 — Прототип, на котором было сделано большинство экспериментов

Экспериментальные исследования были проведены с использованием прототипа (рис. 3), корпус которого состоит из двух сегментов с одной активной степенью свободы в сочленении между ними. Робот обладает 12 независимыми педипальпаторами, 6 ног в первом сегменте и 6 во втором.

Особенность конструкции робота в том, что возможно изменять угол между ногой и корпусом робота. Данное конструктивное изменение позволило сде-

лать перемещение робота всенаправленным, то есть робот может двигаться во все стороны без смены ориентации корпуса робота.

Методологическая основа исследования. За основу были взяты методологии из теории по разработке робототехнических систем, теоретической механики, механизмов и машин, теории оптимизации.

Для экспериментального исследования применялось численное и стендовое моделирования.

Достоверность и обоснованность результатов. Правдивость результатов обеспечивается согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов, подтверждаются результатами компьютерного моделирования, натурными испытаниями. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях, и получили положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна:

1. Реализован метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного чувствования, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой. **Доказана** возможность построения карты местности с помощью тактильного чувствования, как в робототехническом симуляторе, так и с помощью натурного эксперимента.

2. Реализован метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного чувствования. **Показана** возможность различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.

3. **Установлено** то, что датчик силы, на основе полимерного материала, обеспечивает погрешность определения силы не более 10% при условии площади пятна контакта не менее 25% от размера датчика, что позволяет применять датчик такого типа для тактильного чувствования мобильного робота. **Предложена** методика роботизированного исследования датчика силы.

4. Предложен аддитивно-мультиплекативный критерий оптимизации kinематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными движителями, включающий в себя показатели проходимости и покрытия опорной поверхности. На основании которого определено оптимальное количество ног для циклового движителя с одной степенью свободы.

Сделан вывод об эффективности предложенных методов и методик, на основе результатов натурных испытаний.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного чувствования, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой.

2. Метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного чувствования, позволяющий различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.

3. Зависимость погрешности датчика силы на основе полимерного материала от площади пятна контакта относительно размеров датчика, применяемого для тактильного чувствования мобильного робота. Методика роботизированного исследования датчика силы.

4. Критерий оптимизации кинематической схемы многоногих шагающих роботов с цикловыми одностепенными движителями, включающий в себя показатели проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации. Определение на его основе габаритов и количества движителей шагающего робота.

Значимость работы. Реализация полученных результатов позволит разрабатывать мобильных шагающих роботов, способных перемещаться без использования оптических сенсоров или в условиях невозможности их использования, обеспечивая построение карты местности с определением типа и свойств опорной поверхности за счёт чувствования механизмов шагания робота.

Такие роботы могут быть востребованы для исследования естественных пещер, объектов антропогенного происхождения в условиях, когда локализация робота с помощью камер или лидаров невозможна из-за отсутствия света, наличия пыли, дыма или иных факторов делающих невозможным применение оптических сенсорных систем.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на конференциях:

- ICINCO 2017 — 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Мадрид, Испания, 26-28 июля 2017);
- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017 (Макао, Китай, 5-8 декабря 2017);
- Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- 23rd IEEE FRUCT Conference (Болонья, Италия, 13-16 ноября 2018);
- XXXI международная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2019 (Москва, 4-6 декабря 2019 г.);
- Международная конференция «Зимняя Школа Робототехники в Сириусе — 2022» (Адлер, Россия, 25 января - 6 февраля 2022).

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты, получены автором лично. Автор самостоятельно проводил анализ литературы по теме, участвовал в обсуждении постановки цели диссертации, лично планировал и проводил компьютерные эксперименты и физические эксперименты, спроектировал и собрал экспериментальные установки. Автор лично получил все представленные в работе численные данные.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных

ВАК, 3 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Зарегистрированы 8 программ для ЭВМ.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов:

– НТИ по поддержке Центра «Технологий Компонентов Робототехники и Мехатроники» на базе Университета Иннополис по теме «Разработка роботизированных платформ для автономной подземной и наземной инспекции местности в условиях трудной проходимости и плохой видимости».

– РФФИ № 20-38-90265 по теме «Разработка метода очуствления мобильного шагающего робота, перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения».

Содержание работы

В первой главе представлены обзоры и анализы областей, которые необходимы для решения поставленных научных задач.

Была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Это необходимо для понимания места объекта исследования среди других роботов, а также понимания типичных ошибок, которые возможно совершить при разработке. По результатам классификации объектом исследования является многоногая шагающая машина с движителями циклического действия.

Рассмотренные роботы этого класса были изучены и их ключевые особенности внесены в таблицу, что позволило понять структурные и габаритные особенности данного класса роботов. К примеру, длина таких роботов обычно не превышает 1 метр, а количество ног может варьироваться от 4-ех до 32-ух.

Так как основным местом применения разработанных методов предполагается исследование пещер роботами, то были рассмотрены типы роботов и робототехнических систем, которые могут использоваться для изучения поверхности пещер. Изучение данных роботов позволило понять какой функционал и какие габаритные ограничения закладывались их разработчиками.

Таким образом были найдены причины, к примеру типы опорных поверхностей, которые влияют на подбор сенсоров и алгоритмов, а также сделаны выводы о том как это влияет на робототехническую систему.

На основе опыта, собранного исследователями со всего мира, были выбраны технические решения, связанные с навигацией, выбором сенсоров и архитектурными решениями, представленные далее

Для решения задачи определения геометрических и физико-механических свойств пройденной поверхности необходимо понимать в каких условиях будет использоваться робот. В пещерах встречаются следующие типы поверхностей: твердые породы, прочные (мрамор), мягкие (мел, известняк); сыпучие грунты (песок); водные преграды (лужи, бассейны); скользкие и упругие поверхности (мох, плесень); пластинчатые (земля). Было решено сделать упор на твердые, упругие и пластинчатые поверхности.

Так же были рассмотрены размеры пещер, чтобы понимать необходимый запас хода, размеры робототехнического комплекса, также чтобы понимать минимальную достаточную точность построения карты. Длины многих пещер измеряются километрами, а их габариты очень сильно варьируются от нескольких сантиметров, до многих километров в ширину.

В основе автономной навигации роботов лежат Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) методы. Так как задача определения геометрических свойства объекта является одной из частью данного метода (Mapping), то были рассмотрены алгоритмы, основанные на использовании камеры, стереопары, с использованием лидара, GPS, IMU а также их различные комбинации. Было решено решать задачу локализации с помощью маяков или ToF камеры, а для построения карты разработать свой метод.

Так как предполагался метод построения карты с помощью ощупывания поверхности, то был произведен поиск подобных алгоритмов. Были найдены способы получения облака точек объекта с помощью касания манипулятором данного объекта. Примерное местоположение объекта определялось камерой.

Проведен обзор алгоритмов триангуляции, так как данный метод лёг в основу определения геометрических свойств объекта. Было решено модифицировать 2D триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек.

Рассматривались различные алгоритмы и средства определения физико-механических свойств поверхности. Этому возможно реализовать с помощью следующих сенсоров сенсоров: камеры, с помощью инерциального измерительного устройства (IMU), снятия тока с моторов, момента с вала мотора, с помощью датчиков силы, установленных на конечность робота. Было решено выбрать главным сенсором — датчик силы, установленный на ногу робота, но также собирать дополнительные данные с инерциального измерительного устройства и драйвера мотора: скорость, потребляемый ток.

Для решения задачи структурного синтеза на основе критериев проходимости, детализации и пройденного пути (оптимизация количества ног у робота), необходимо генерировать семейства поверхностей с одинаковой сложностью. Поиск различных вариантов привел к выбору подхода «Получение искусственных поверхностей на основе параметров генерации», который был модифицирован автором.

Для определения геометрических свойств поверхности были выделены следующие решения:

- Построение карты с помощью лидаров и камер;
- Получение облака точек с помощью тактильного чувствования манипулятором.

Метод построения карты с помощью тактильного чувствования шагающим роботом отличается от представленных выше решений.

Для определения физико-механических свойств был переосмыслен алгоритм классификации типа поверхности пройденной конечностью робота, на ко-

торой установлены датчики силы и IMU. Задача классификация решается с помощью алгоритмов машинного обучения.

На основе литературного обзора было решено, что предложенные решения для определения геометрических и физико-механических свойств не встречается в научных публикациях российских и зарубежных авторов.

Итогом первой главы является обзор разработанной системы (рис. 4).

Оранжевым цветом выделены те компоненты системы, которые представляют собой предмет исследования в рамках диссертационной работы. Их разработка и научная новизна описаны в последующих главах диссертации. Голубым цветом выделены блоки, соответствующие которым элементы в разработанную систему были интегрированы как стандартные средства, без каких-либо существенных доработок.

Верхний блок — внешняя среда, то есть вся информация о внешнем мире, с которой работает робот.

Следующая группа блоков связана с сенсорами. Здесь представлены «Проприоцептивные сенсоры», то есть внутренние датчики, такие как гироскоп, акселерометр, энкодеры и датчики силы. Также есть группа блоков, посвященная техническому зрению. Последней группой элементов является «Локационные системы», представленные системой радио маяков.

Ниже находится следующая группа блоков «Локализация». Она основана на данных, полученных с сенсоров. В данной группе расположены два блока «Основная реализация» и «Запасная реализация». Первая является более точной. Она может быть реализована на основе системы радио маяков или с помощью системы технического зрения. Но самый точный результат может быть получен при объединении двух систем. Запасная реализация является резервной, когда отказалась основная реализация, или когда та выдает некорректные результаты. Она основана на IMU, датчиках силы и системе маяков.

В рамках диссертационного исследования были разработаны следующая группа блоков «Построение модели местности» был реализован и разработан автором диссертации. Она состоит из трех блоков: «Определение физических свойств поверхности», «Построение карты местности», «Определение геометрических свойств поверхности». Первый блок позволяет параллельно с исследованием геометрических свойств поверхности, посредством ее ощупывания, определять физико-механические свойства поверхности по которой ходит робот. Построение карты местности объединяет данные с других двух блоков и выводит результат в машино и человеко читабельные виды.

Полученные данные попадают оператору, и оператор может управлять роботом, как в ручном режиме, так и просто задав область, куда работу нужно пройти. Эта высокоуровневая команда передается в блок управления движением, которая в последствии преобразуется в низкоуровневые команды для приводов робота. С помощью данных команд, механическая система, представленная разработанным роботом приводится в движение и выполняется поставленная оператором задача.

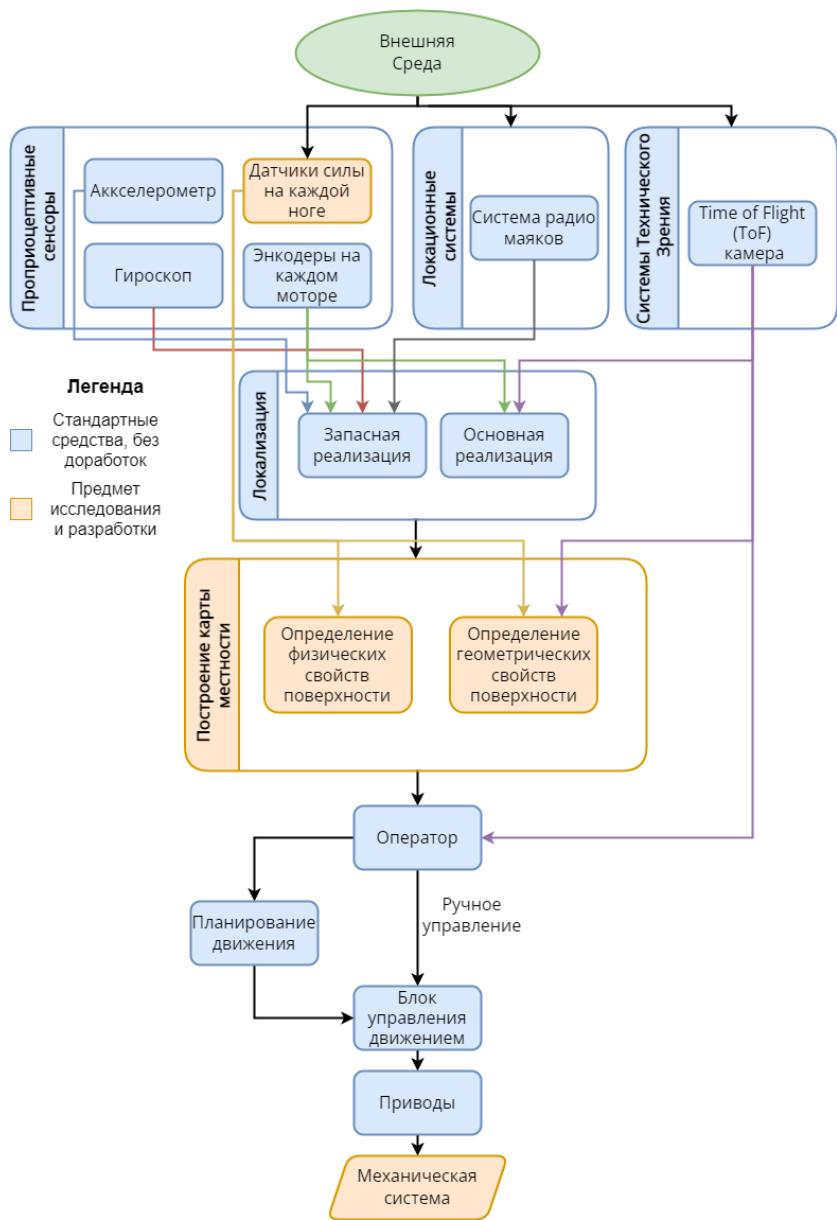


Рис. 4 — Структурная схема разработанной системы

Вторая глава раскрывает решения трех оптимизационных задач, связанных с оптимизацией конструкции робота.

Первая задача: оптимизировать количество ног у объекта исследования на основе критериев, представленных ниже (рис. 5).

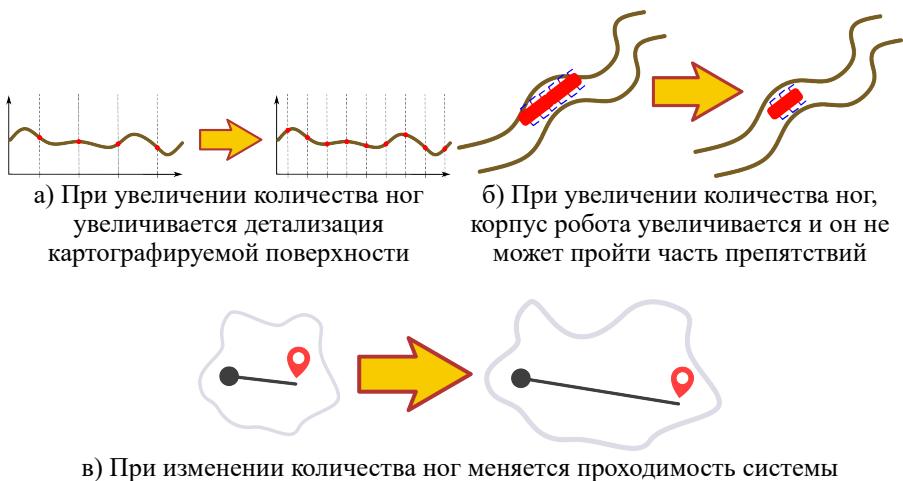


Рис. 5 — Критерии оптимизации конструкции робота

Чем больше количество полученных точек на пройденной поверхности, тем выше будет детализация карты. Одним из способов увеличения детализации это увеличение количества ног у робота (рис. 5а). С другой стороны, это увеличивает длину робота, а следовательно робот хуже сможет проходить узкие участки с обилием поворотов (рис. 5б). Чем большее расстояние робот сможет пройти за одно и то же время, тем быстрее будет построена карта и робот меньше повлияет на окружающую среду при прочих равных условиях (рис. 5в).

Для цикловых движителей с одной степенью свободы в ноге вопрос о количестве ног не имеет однозначного решения. Поэтому необходимо провести структурный синтез, чтобы определить их количество. Данная задача решалась с помощью генетического алгоритма.

Идея решения следующая. Генерируется семейства территорий (делается предположение, что территория, сгенерированная на основе одинаковых параметров является одинаково сложной (рис. 6)). Индивид запускается на фиксированное время на данную территорию, на моторы подается константная угловая скорость. Результаты пройденной дистанции и параметры робота записываются и участвуют в функции оптимизации.

Для начала требуется описать математическую модель системы. Исследуется механическая система, состоящая из твёрдых тел (1), движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

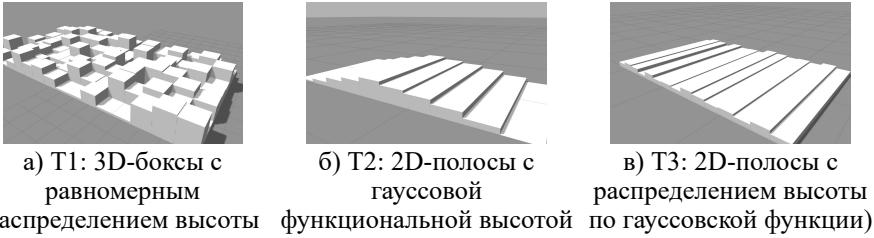


Рис. 6 — Примеры сгенерированных территорий

$$M \dot{\vec{u}} = \vec{g} \quad (1)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{u}_i^T = [\vec{v}_i^T \quad \vec{\omega}_i^T] \quad (3)$$

$$\vec{g}^T = [\dots \vec{F}_i^T, (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \dots] \quad (4)$$

где, M_i — матрицы, содержащие массово-инерционные характеристики; m_i масса тела; I_i тензор инерции; \vec{u}_i вектор обобщённых скоростей; E — единичная матрица; \vec{g} вектор обобщённых сил; \vec{v}_i вектор линейной скорости; $\vec{\omega}_i$ — вектор угловой скорости; \vec{F}_i , $\vec{\tau}_i$ силы и моменты сил взаимодействия.

Тела, входящие в систему соединены между собой цилиндрическими шарнирами, которые описываются следующими связями и динамическими ограничениями (5):

$$\phi(q_{j_1}, u_{j_1}, \dots, q_{j_k}, u_{j_k}, t) \geq 0 \quad (5)$$

$$\vec{q}_i^T = [\vec{x}_i^T \quad \vec{Q}_i^T] \quad (6)$$

$$\dot{\vec{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{q}_i) \end{bmatrix} \vec{u}_i \quad (7)$$

$$\vec{g}_i = \tau_i^T \vec{z}_{i-1} - k_i \dot{\vec{q}}_i \quad (8)$$

где через ϕ обозначена функция связи; t время; q_j — вектор обобщенных координат, включающий в себя координаты центра масс \vec{x}_i и кватернион \vec{Q}_i , описывает ориентацию тела в пространстве; через $G(\vec{q}_i)$ обозначена матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат и способа задания ориентации тела; k — коэффициент вязкого трения в шарнире.

Контакт ног робота с опорной поверхностью (рис. 7) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями (9):

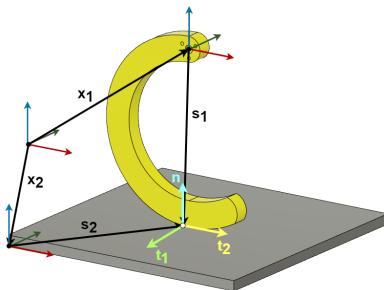


Рис. 7 — Отображение переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (9)$$

$$\phi_u(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \frac{\vec{f}_t}{\|\vec{f}_t\|} = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (12)$$

где, $\phi_u(\vec{q})$ — функция связи; μ — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; $\vec{x}_{1,2}, \vec{s}_{1,2}$ — радиус-векторы и орты координатных осей $t_{1,2}$, \vec{n} показаны на рисунке (рис. 7); $f_{1,2}$ — значения сил трения вдоль осей $t_{1,2}$ соответственно.

Геометрическая модель робота представлена в виде трехмерного параллелепипеда. Количество движителей по каждому из бортов обозначается через γ . Разность фаз между соседними движителями обозначается через α (рис. 8).

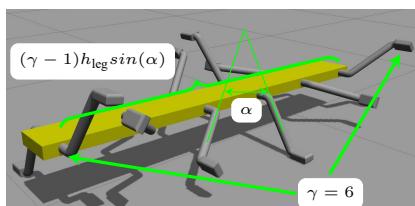


Рис. 8 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Для решения задачи оптимизации нужно разработать целевую функцию. Так как количество ног и длина корпуса имеют прямую зависимость, то было решено решить мультикритериальную задачу оптимизации, где необходимо было максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (13). Параметрами индивида являлись γ и α . Свертка осуществлялась с помощью мультипликативно-аддитивной свертки.

$$F \rightarrow \max = \beta \left(\omega_1 \cdot \overbrace{\delta}^{\text{Дистанция}} + \omega_2 \cdot \underbrace{\frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}} \sin(\alpha)}}_{\text{Упр. длина тела}} \right) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} \left(\frac{1}{(\gamma - 1)h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \right)^{\omega_2} \quad (13)$$

где δ дистанция, β адаптивный параметр, $\omega_{1,2} \in [0..1]$ весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты настраивались в зависимости от выбора приори-

тета. Видео прохождения препятствия лучшим индивидом



Одним из основных результатов исследования, полученных при варьировании значений весовых коэффициентов ω является зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией (рис. 9), которая показала наличие локального оптимума при количестве ног у робота в диапазоне от 8 до 14.

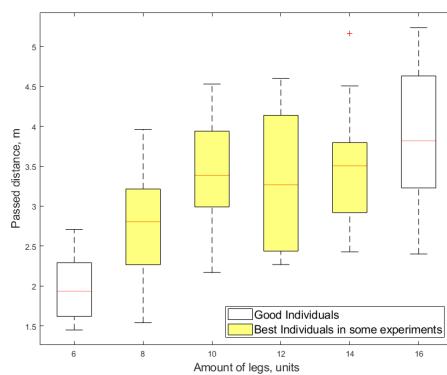


Рис. 9 — Зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией

Этот факт может быть объяснён следующими соображениями. С одной стороны, слишком много ног значительно удлиняет корпус робота, что снижает его профильную проходимость за счёт того, что робот с большей вероятностью

может задеть выступы при движении. С другой стороны при слишком малом количестве ног происходит потеря статической устойчивости робота. Поскольку для гарантированного обеспечения статической устойчивости необходимо обеспечить контакт не менее, чем 4 ног с опорной поверхностью в каждый момент времени, то естественным ограничением является 8 ног у робота.

Вторая задача: найти оптимальный угол между соседними ногами робота при прямолинейном движении, чтобы средний клиренс был максимально возможным, а колебания корпуса робота — минимальны.

Задача целевой функции — максимизировать положение Z и минимизировать STD . Одновременно необходимо сделать минимальным среднеквадратичное значение (RMS) и среднее стандартное отклонение (STD) углов по направлению тангажа и крена. Целевая функция учитывает направление движения.

Целевая функция выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^4 \omega_i \cdot \left(\frac{1}{\omega_{z1} Z_{rms}^i - \omega_{z2} Z_{std}^i} + (\omega_{p1} \alpha_{rms}^i + \omega_{p2} \alpha_{std}^i) + (\omega_{r1} \beta_{rms}^i + \omega_{r2} \beta_{std}^i) \right) \rightarrow \min \quad (14)$$

где $i = \{1,2,3,4\}$ индекс, который определяет направление движения: 1 — вперед, 2 — влево, 3 — вправо, 4 — вращение; Z координата по оси Z ; α, β значения ориентации по крену и тангажу; ω_i весовой коэффициент для направления движения, $\omega_{z,roll,pitch}$ весовые коэффициенты.

Решение задачи оптимизации проводилась с помощью метода полного перебора, так как надо было проверить 36 углов · 4 направления · 100 экспериментов для каждого направления · 144 шага в каждом. То есть всего 2073600 вариантов.

Третья задача: разработать концепт корпуса робота для максимизации курсовой проходимости, без изменения длины ног робота.

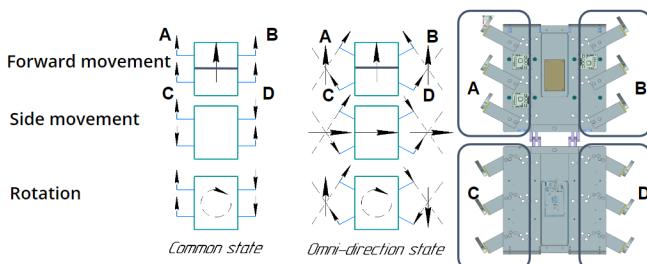


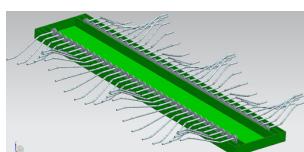
Рис. 10 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

На рисунке 10 представлена иллюстрация данной концепции: для того, чтобы робот двигался во всех направлениях, необходимо разбить ноги на группы,

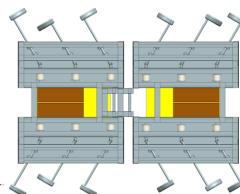
чтобы получилось 4 группы А-Д и сделать так, чтобы угол между корпусом робота и осью вала привода ноги не было равен 90 градусам. Стрелка в центре робота — суперпозиция всех сил. Если изменить угол оси привода ноги в соответствии с предлагаемой концепцией, то возможно получить значения суперпозиции сил, представленные на рис. 10 в центре. То есть, чтобы переместить корпус робота направо, группы А и Д должны вращать ноги в одну сторону, а группы С и В — в противоположную. Правая часть рисунка иллюстрирует расположение групп ног на исследуемом роботе.

В рамках работы было разработано четыре концепции робота СтриРус

(рис. 11). Видео 4ой итерации



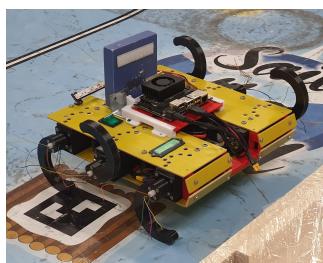
а) Первая итерация



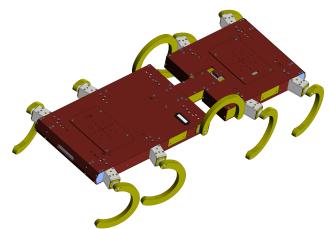
б) Вторая итерация



в) Третья итерация



г) Третья итерация,
улучшенная



д) Четвертая итерация

Рис. 11 — Итерации робота СтриРуса

Как итог, был разработан десятиногий двух сегментный робот СтриРус. 10 ног было выбрано на основе результатов, полученных во время решения мультикритериальной задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Третья глава посвящена разработке и исследованию самодельного преобразователя силы на основе Velostat

Существует несколько типов датчиков, которые могут измерять контактные силы и распределение давления. Это могут быть оптические, пьезорезистивные, пьезоэлектрические, магнитные, емкостные, на основе оптических волокон. Промышленные датчики силы и момента (F/T) широко распространены на гуманоидах (Atlas, Fedor) или четвероногих (Spot, AnyMal). Однако они слишком велики для небольших роботов, таких как RHEX, WHEGS или StriRus.

Оптические и магнитные датчики обладают теми же недостатками. Емкостные датчики требуют высокой точности изготовления. Кроме того, датчики перечисленных типов довольно дороги, что делает их использование нецелесообразным в исследовательских роботах, которые работают в опасных условиях и могут быть потеряны в процессе исследования пещеры. Недорогой альтернативой являются тензометрические датчики.

Самый популярный тип тензометрического датчика – тензорезистивный датчик. Другой тип – пьезорезистивные датчики на основе проводящих волокон или полимеров. Они недорогие, очень гибкие и компактные. Одним из основных недостатков является значительный гистерезис.

В представленной работе используется материал Velostat (Linqstat) (рис. 12а) в качестве промежуточного слоя для датчика (рис. 12б).



а) Материал Velostat



б) Простейший преобразователь
силы на основе Velostat

Рис. 12 — Примеры использования Velostat

При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия влияет на показания преобразователя. Поэтому было решено характеризовать материал для случаев, когда нагрузка меньше, чем размер сенсора.

Созданный преобразователь состоит из двух медных оболочек, разделенных слоем Velostat. Давление на датчик приводит к изменению его сопротивления: чем выше давление, тем ниже сопротивление. На (рис. 13) показана рабочая область сенсора, основанная на весе, который может быть приложен на одну ногу робота.

Исследования преобразователя Velostat, для случаев которых площадь нагрузки меньше, чем размер преобразователя, были проведены с помощью разработанного для этой цели исследовательского стенда. Среди требований к стенду можно отметить: необходимость контролировать силу нажатия и повторяемость

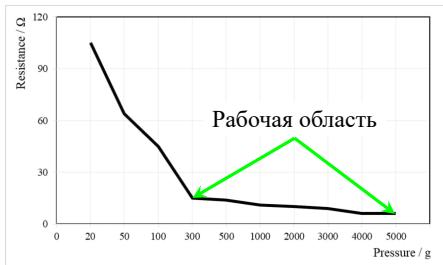


Рис. 13 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

эксперимента как по величине, так и по расположению площадки контакта инструмента и исследуемого преобразователя силы. Указанным требованиям возможно удовлетворить, используя коллаборативный робот-манипулятор, который будет управляться с помощью импедансного управления.

Использование коллаборативного робота позволяет также удовлетворить требованиям безопасности и допустить работу робота в непосредственно близости от экспериментатора. Разработанный стенд, представлен на рисунке 14а.



Видео работы стенда

Для касания только части объекта исследования были разработаны различные концевые инструменты. Такие размеры были выбраны из-за размеров преобразователя. Минимальный размер препятствия, которое может коснуться было взято за 2 мм. А длина ребра датчика – 15 мм. Поэтому 15 мм концевой инструмент является максимальным (рис. 15а).

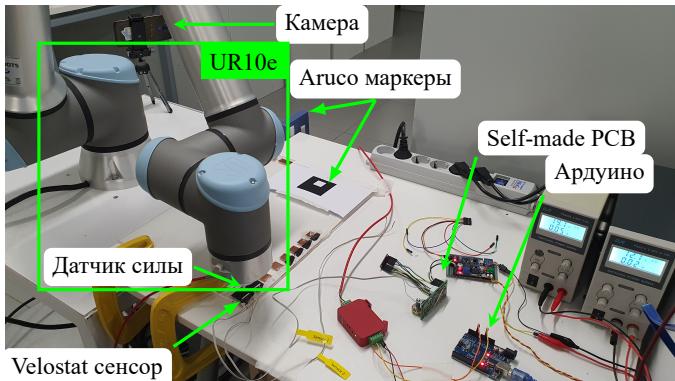
На рисунке ниже (рис. 16) представлен результат работы импедансного управления на частоте 450 Hz. Необходимая сила нажатия — 17 N.

В исследовании были проведены:

1. **статический эксперимент.** Цель — определить коэффициенты для математической модели преобразователя. Для этого на сенсор кладется известная нагрузка на 60 секунд (за это время можно явно наблюдать гистерезис) и собираются данные с преобразователя;

2. **динамический эксперимент.** Цель — определить влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта. Для этого преобразователь представлен в виде матрицы 4 × 4. Размер преобразователя в эксперименте 15 на 15 мм. Манипулятор нажимает на преобразователь с одинаковым давлением на протяжении всех экспериментов в различные позиции на преобразователе, используя пять различных концевых эффекторов (диаметр окружности от 2 мм до 15 мм) (рис. 15б).

Статическим экспериментом проверялась формула (15). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект. При прикладывании на сенсор



а) Общий вид экспериментального стенда



б) Способ нивелировать ошибку по углу с помощью Агуко маркеров

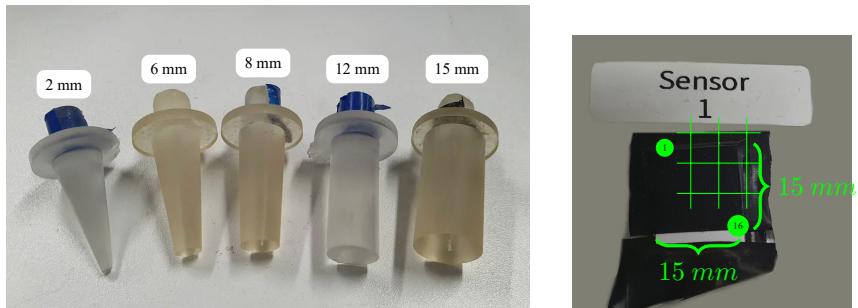
Рис. 14 — Разработанный экспериментальный стенд

константной нагрузки показания сенсора будут меняться.

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (15)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (16)$$

где, V_0 - начальное напряжение, p , A_i , B_i , τ_{res} , k_i - настраиваемые константы, t - текущее время, t_0 - время начала нажатия. Для решения задачи регрессии использовался робастный нелинейный алгоритм наименьших квадратов. Результат представлен ниже (рис. 17).



а) Инструмент (концевой эффектор) для нажатия объект исследования с диаметром нажатия меньше, чем сам объект

б) Сенсор представлен как 4×4 сетка

Рис. 15 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

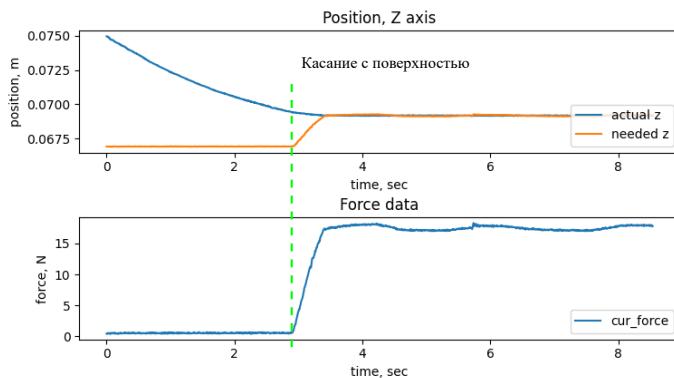


Рис. 16 — Графики зависимости силы и позиции по z от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

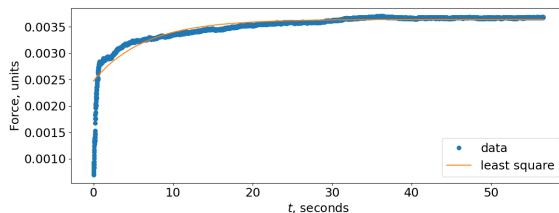
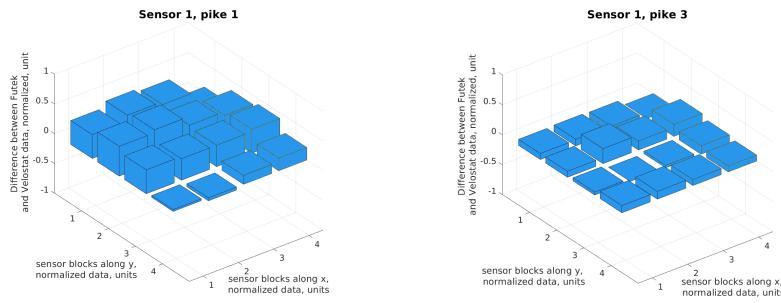


Рис. 17 — Результаты статического эксперимента

Ниже (рис. 18) представлены некоторые результаты распределения ошибок по площади сенсора при взаимодействии с концевыми эффекторами разных раз-

меров. Ошибки определялись как разница между показаниями калиброванного сенсора силы Futek и исследуемого преобразователя на базе Velostat. На рисунке 18а показаны ошибки для концевого эффектора диаметром 2 мм, а на рисунке 18б — для концевого эффектора диаметром 8 мм.

Можно заметить, что в 18б максимальная разница между Futek и Velostat не более 0.2 единиц в одном месте. Остальные элементы сетки не превышают 10%. Такая же тенденция продолжается как и при увеличении размера концевого эффектора, так и на других сенсорах.



а) диаметр концевого эффектора равный 2 мм

б) Диаметр концевого эффектора равный 8 мм

Рис. 18 — Динамический эксперимент

По результатам исследований показано, что характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота, когда ожидаемый размер площади контакта превышает 25 процентов площади преобразователя.

Четвертая глава раскрывает детали определения профиля опорной поверхности, на основе информации о точках её касания ногами робота и внутренних датчиков, характеризующих механическое состояние аппарата. Вторая часть главы показывает определение физико-математических свойств опорной поверхности: жесткости, вязкости и пластичности, и выделение на их основе классов поверхностей на основе информации с датчиков силы, установленных на ногах и внутренних датчиков робота.

Традиционно, карта для навигации представляется в виде облака точек. Тогда, без предложенного алгоритма, будут получено очень разреженное облако точек, где точки будут являться точками касания лапок робота с поверхностью.

Сделав предположение, что расстояние между ногами робота мало относительно целой пещеры, мы можем предположить, что поверхность между ногами является плоскостью.

В рамках исследования предполагается, что робот движется по поверхности, у которой каждому набору координат x, y соответствует одно и только одно значение координаты z .

Был реализован следующий алгоритм. Вначале необходимо очистить оригинальное облако точек от шумов и усреднить близлежащие точки с помощью Voxel grid. Потом из него генерируется полигональная сетка с помощью 2D Триангуляции Делоне (рис. 19) (вогнутая оболочка (рис. 22)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (рис. 21в).

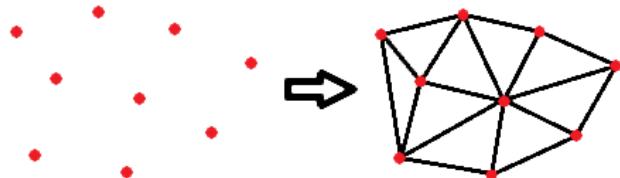
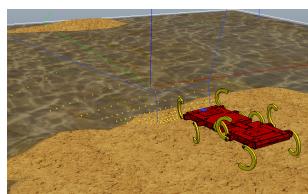


Рис. 19 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 2, 20), так и на реальном роботе (рис. 24). Видео



а) Начало движения



б) Конец движения

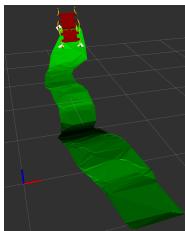
Рис. 20 — Эксперимент в симуляторе

Ниже представлены полученные результаты (рис. 21). Для оценки точности полученных данных использовались метрики C2C (17) и C2M (рис. 23).

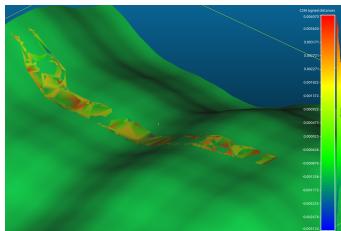
$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ | \text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m) | \} \quad (17)$$

Где X, Y непустые подмножества метрического пространства M ; $\text{dist}_X : M \rightarrow \mathbb{R}$ $\text{dist}_X : M \rightarrow \mathbb{R}$ обозначает функцию расстояния до множества X .

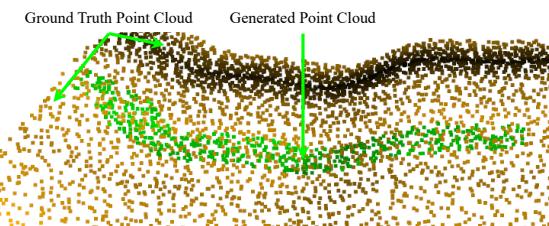
На рисунке 22 проиллюстрирована важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (рис. 22б) алгоритм построил карту местности там,



а) Полигональная сетка, созданная 2D Триангуляцией Делоне (вогнутая оболочка)



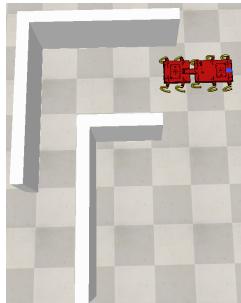
б) Наложенные полигональные сетки



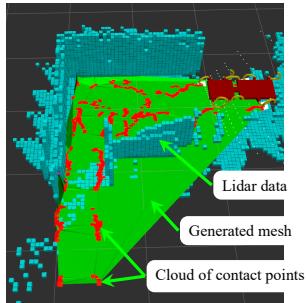
в) Наложенные облака точек

Рис. 21 — Результат эксперимента

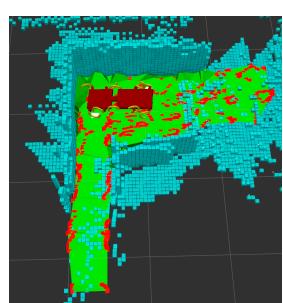
где робот не ходил и стоит стена. При использовании вогнутой оболочки (рис. 22в) данная проблема не наблюдается.



а) Пример поля



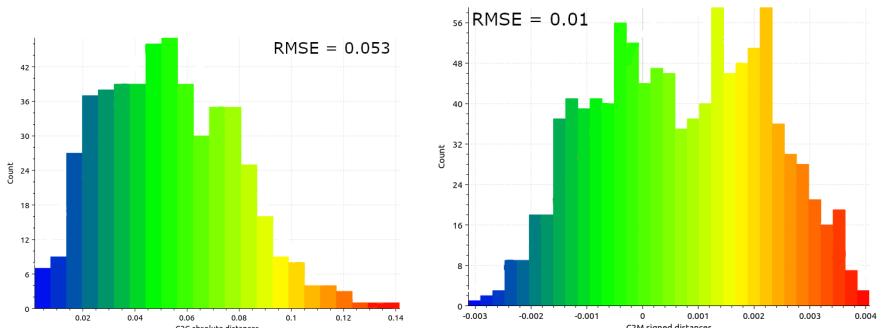
б) Выпуклая оболочка



в) Вогнутая оболочка

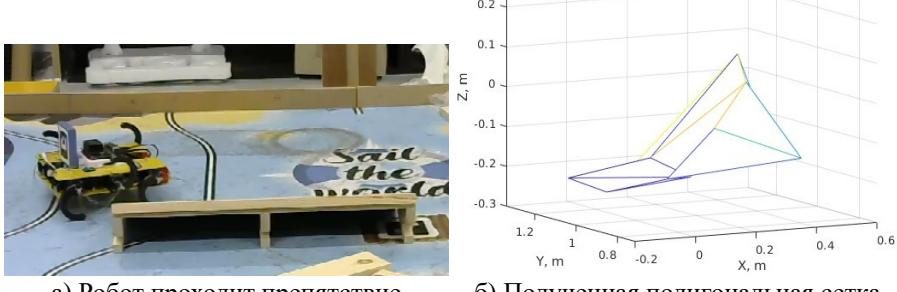
Рис. 22 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

Как итог, среднеквадратичная ошибка для С2С метрики была в среднем равна 5 см. А для С2М 1 см. В натурном эксперименте среднеквадратичная ошибка по метрике С2С получился 8 см.



а) Метрика C2C: гистограмма ошибок (абсолютное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки) б) Метрика C2M: Гистограмма ошибок (относительное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

Рис. 23 — Метрики оценки точности полученной карты



а) Робот проходит препятствие

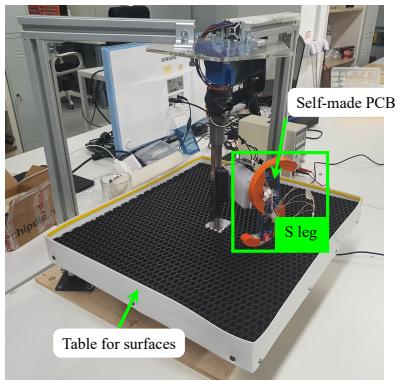
б) Полученная полигональная сетка

Рис. 24 — Пример натурного эксперимента

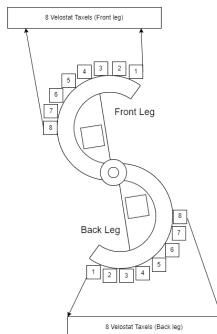
Задачу определения типа поверхности можно определить следующим образом. Робот идет по поверхности, и собирает данные с датчиков силы, с момента на моторе и IMU. На основе предварительного обучения, данные обрабатываются и кластеризуются, на основе предварительно определенной базе знаний территорий.

Задачу обучения удобнее всего проводить в лабораторных условиях. Экспериментальная установка соответствует следующим требованиям: возможность установить новые поверхности и сменять их быстро. Это нужно для легкого создания базы знаний поверхностей. Бесконечное движение, для скорости обучения. Узел с ногой должен быть взят с робота, чтобы не пришлось решать похожую задачу на роботе.

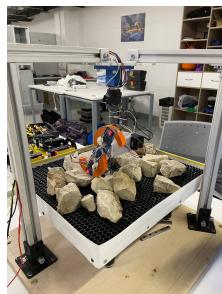
Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и 2ух степенному механизму, который ходит по окружности (рис. 25а). Для бесконечного движения пришлось соединить две ноги робота в одну. На рисунке ниже (рис. 25б) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.



а) Общий вид экспериментальной установки



б) Пояснение по расположению сенсоров на ноге робота



в) Каменистая поверхность

Рис. 25 — Экспериментальная установка для определения типа поверхности

Были взяты 2 сильно разных поверхности и изучены сырье данные. Резина

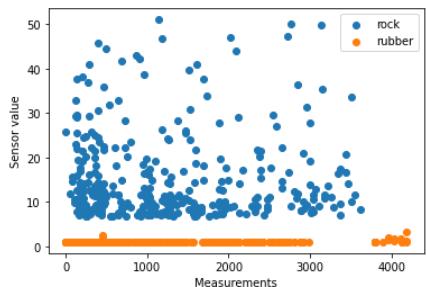
(рис. 25а)



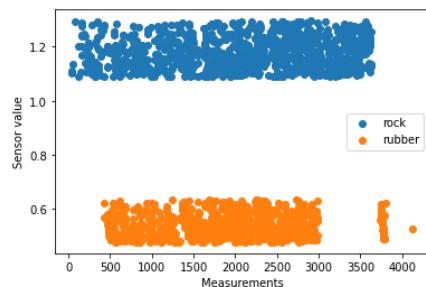
, камень (рис. 25в)



Ниже (рис. 26) представлены сырье данные с лапок робота. Сыре данные легко различить, но можно заметить, что абсолютные значения у разных сегментов различно. Поэтому при обучении необходимо их нормализовать.



а) Передняя часть ноги, 8ой сегмент



б) Передняя часть ноги, бой сегмент

Рис. 26 — Сравнение сырых данных после эксперимента с разных сегментов ноги

Карта местности может быть построена с помощью 2D триангуляции Делоне (вогнутая оболочка). Входными данными для алгоритма является разреженное облако точек касаний робота поверхности. Они получены с помощью преобразователя силы на основе Velostat.

Точность, полученная в симуляторе равна примерно 5 см, а во время натурного эксперимента – 8 см, что является адекватным результатом для поставленной задачи.

С помощью разработанного преобразователя силы возможно различать 2 типа поверхности: резину и каменистую грязь.

Заключение

Основной научный результат диссертации — методы построения определения геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности на базе многоугольного шагающего аппарата с тактильным чувствованием без использования оптических сенсоров.

Данное решение подходит для первичного исследования замкнутых труднодоступных пространств, где отсутствует освещение, обилие грязи, пыли, а также водных препятствий. Алгоритмы и концепты навигации данной системы могут быть использованы как резервная система навигации для других робототехнических систем, когда главная система, которая является более точной, из-за природы использованных датчиков, вышла из строя.

При проведении исследований и разработок в диссертационной работе получены следующие результаты.

1. Был проведен обзор и анализ робототехнических систем и условия их применения. Обобщая, была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Наиболее полно были рассмотрены машины с циклическими движителями. В литературный обзор вошли роботы, которые могут

быть использованы для исследования пещер. Была предложена их классификация.

Более того, для понимания условий применений разрабатываемой робототехнической системы, было описаны параметры исследуемых пещер и их особенностей.

Для разработки системы, важной частью которой является сенсорные устройства, был проведен глубокий их обзор и классификация. Так же был проведен литературный обзор алгоритмической части работы с сенсорами, к примеру обзор алгоритмов по триангуляции.

Выводом обзора является описание разработанной системы.

2. Разработан метод оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы по критериям проходимости (длина робота), детализации (количества ног), пройденного пути.

Данный метод основан на применении генетического алгоритма OpenAI-Es, где были разработаны и реализованы операции скрещивания и мутации. Была разработана математическая модель робота, которая была реализована в GazeboSim. Для генерации семейства роботов было предложено геометрическое представление объекта. Так же пришлось разработать способ для генерирования местности, которую будет проходить экземпляр робота.

Помимо оптимизации конструкции по предложенным выше критериям, был разработан метод оптимизации конструкции робота для прохождения узких участков. Это важный концепт, так как по обзору пещер стало ясно, что пещеры имеют очень большую девиацию в ширину.

3. Изучив существующие тактильные сенсоры было решено разработать и исследовать преобразователь силы на основе Velostat. Для этого пришлось физические создать преобразователь, адаптировать его под конкретное применение. В течение разработки сенсора были найдены особенности, что при одинаковой силе нажатия на сенсор, возникают различные результаты, в зависимости от места нажатия и площади нажатия. Для исследования данного феномена был разработан автоматизированный экспериментальный стенд.

По результатам поставленных экспериментов, характеристики преобразователя удовлетворяют требованиям к системе тактильного восприятия шагающего робота, когда ожидаемый размер площади контакта превышает 25 процентов площади преобразователя.

4. Был разработан метод определения геометрических свойств поверхности с помощью ощупывания. Он основан на алгоритме вогнутой Триангуляции Делоне с использованием альфа формы. Для первичной проверки гипотез была разработана сцена в симуляторе CoppeliaSim.

Так же результат интеллектуальной деятельности проверялся на в натурном эксперименте и была получена точность в 8 см, что является приемлемой для данной задачи.

5. Для получения максимально полной информации о проходимой поверхности, необходимо знать еще ее физико-механические свойства. Это было реа-

лизовано с помощью алгоритмов машинного обучения, а все данные были получены из натурных экспериментов. Как результат, стало возможно определять процентное соотношение твердых, упругих и пластинчатых свойств пройденной поверхности.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ

1. *Буличев О. В., Малолетов А. В.* Метод оптимизации количества ног шагающего робота на основе эволюционного алгоритма [Текст] // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2022. — № 9. — С. 12—19.
2. *Буличев О. В., Полёткин К. В., Малолетов А. В.* Исследование характеристик датчика силы на основе материала "Velostat" для мобильного шагающего робота [Текст] // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2022. — № 4. — С. 6—12.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

3. *Bulichev O., Klimchik A.* Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus [Text] // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). — Bologna, 2018. — Nov. — P. 85—90.
4. *Bulichev O., Klimchik A., Mavridis N.* Optimization of Centipede Robot Body Designs through Evolutionary Algorithms and Multiple Rough Terrains Simulation [Text] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). — Macau, 2017. — Dec. — P. 290—295.
5. *Sokolov M., Bulichev O., Afanasyev I.* Analysis of ROS-based Visual and Li-dar Odometry for a Teleoperated Crawler-type Robot in Indoor Environment: [Text] // Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. — Madrid, Spain, 2017. — P. 316—321.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

6. Программа планирования траектории движения ног двенадцатиногого робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.11.2020, 2020664605 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020665488.
7. Программа позиционирования и стабилизации камеры для шагающего робота Стрирус [Текст] : пат. / О. В. Буличев, Д. В. Бураков. — Заявл. 22.11.2019, 2019664222 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019665435.

8. Программа построения 3D - карты местности с помощью многоугольного биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.12.2021, 2021681297 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021681862.
9. Программа управления звеньями шагающего двенадцатиногого робота с помощью геймпада в робототехническом симуляторе Ignition [Текст] : пат. / О. В. Буличев, А. А. Ахметшин. — Заявл. 27.11.2020, 2020664563 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020665643.
10. Программа управления экспериментальным стендом для автоматизации проверки датчиков чувствования [Текст] : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 27.12.2021, 2021681288 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021681924.
11. Программа Обучения Робота Шаговым Движениям [Текст] : пат. / О. В. Буличев ; А. некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 28.08.2019, 2019618755 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019661399.
12. Программа Ориентации Шагающего Робота Стрирус в Условиях Плохой Видимости [Текст] : пат. / О. В. Буличев, Д. В. Бураков. — Заявл. 21.11.2019, 2019664225 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019665262.
13. Программа Подбора Кинематических Параметров у Шагающих Роботов [Текст] : пат. / О. В. Буличев. — Заявл. 07.08.2019, 2019618753 (Российская Федерация). — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019660557.

В прочих изданиях

14. *Буличев О. В.* Использование Robot Operating System (ROS) для планирования автономного перемещения мобильного робототехнического комплекса [Текст] // Молодежный научно-технический вестник. — 2016. — № 10. — С. 7.
15. *Буличев О. В.* Обучение прямолинейному движению многоугольного робота на основе эволюционного алгоритма [Текст] // В сборнике: Перспективное развитие науки, техники и технологий. Сборник научных статей 9-ой Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор А.А. Горохов. — 2019. — С. 35–39.

16. *Буличев О. В.* Построение 3Д карты местности с помощью многоногого биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS [Текст] // Актуальные научные исследования в современном мире. — 2021. — № 11. — С. 374—377.
17. *Буличев О. В., Ахметшин А. А.* Прямолинейное движение всенаправленного многоногого шагающего робота Стрирус [Текст] // В сборнике: XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019). Сборник трудов конференции. — 2020. — С. 449—452.
18. *Буличев О. В., Климчик А. С.* Стрирус: высокомобильный робот, вдохновленный насекомым мухоловкой [Текст] // В книге: Прогресс транспортных средств и систем - 2018. Материалы международной научно-практической конференции. Под редакцией И.А. Каляева, Ф.Л. Черноусько, В.М. Приходько. — 2018. — С. 136—138.

Буличев Олег Викторович

Разработка метода тактильного очуствления для мобильного шагающего робота

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____