

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).

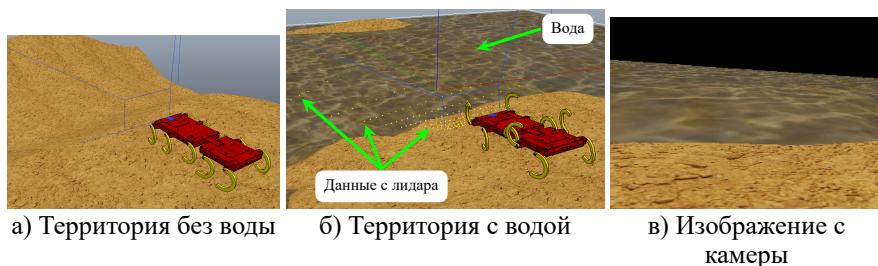


Рис. 2 — Примеры ситуаций, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

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 многоногих 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 сделать 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-мультиплективный критерий оптимизации кинематической 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 очуствления механизмов шагания робота.

Такие роботы могут быть востребованы для исследования естественных пещер, объектов антропогенного происхождения в условиях, когда локализация робота с помошь 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 очувствления мобильного шагающего робота, перемещающемся 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 препятствия (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 частей 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, о возможно реализовать с помощью следующих 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 которой 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.

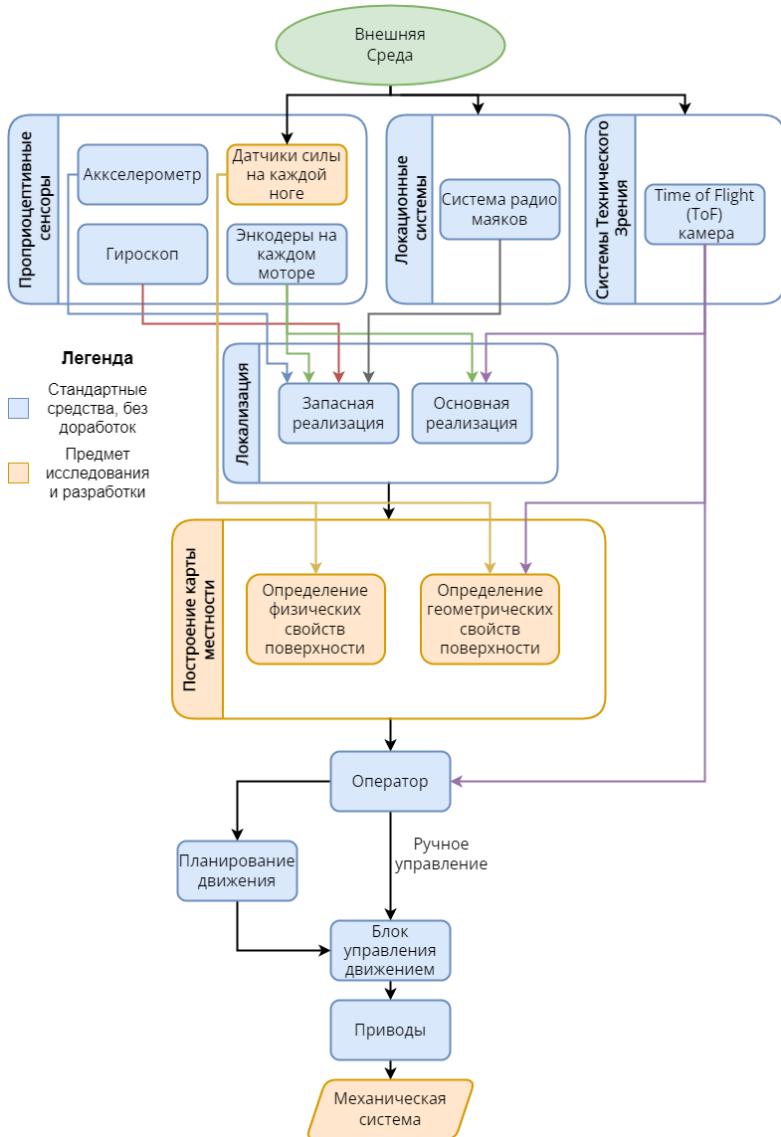


Рис. 4 — Структурная схема разработанной системы

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

Следующая группа представлена «Проприоцептивные сенсоры», то есть внутренними датчиками. Есть группа блоков, посвященная техническому зре-

нию. Последней группой элементов является «Локационные системы», представленные системой радио маяков.

Ниже находится группа блоков «Локализация». В ней 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. Запасная реализация является резервной, когда отказалась основная реализация, или когда та выдает некорректные результаты. Она основана на IMU, датчиках силы и системе маяков.

Блок «Построение карты местности» 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 машину и человеко читабельные виды.

Оператор может управлять роботом, как в ручном режиме, так и задав область, куда роботу 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.

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).

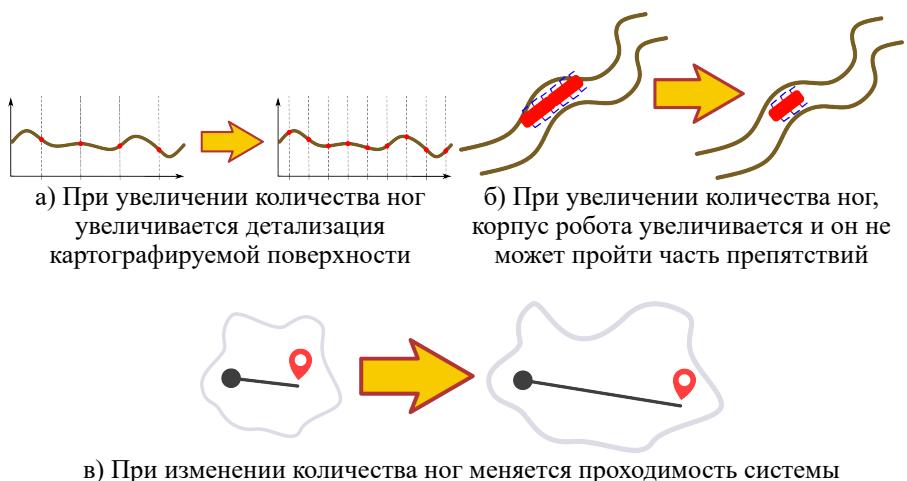


Рис. 5 — Критерии оптимизации конструкции робота

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.

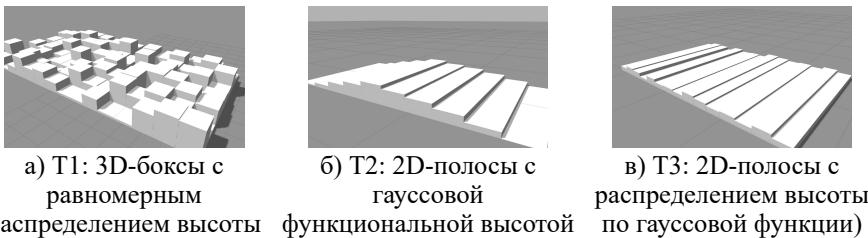


Рис. 6 — Примеры сгенерированных территорий

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

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

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

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

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

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):

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

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

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

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

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 , описывающий 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):

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

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

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

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

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 $\vec{t}_{1,2}$, \vec{n} показаны на рисунке (рис. 7); $f_{1,2}$ — значения сил трения вдоль осей $t_{1,2}$ соответственно.

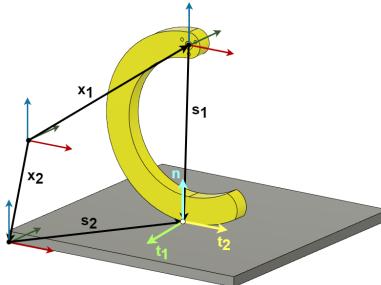


Рис. 7 — Отображение переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

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).

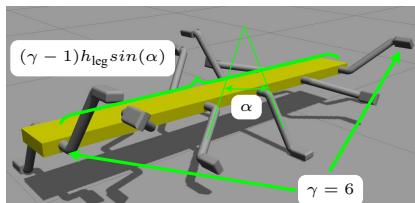


Рис. 8 — Схема модели робота для генетического алгоритма

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 аддитивный параметр, $\omega_{1,2} \in [0..1]$ весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты настраивались в зависимости от выбора приоритета. 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.

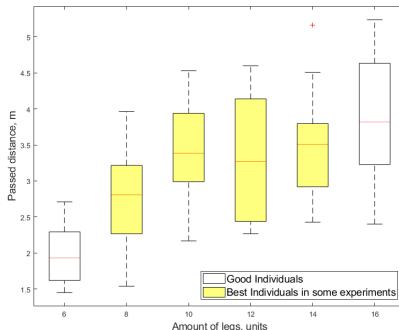


Рис. 9 — Зависимость между количеством ног и пройденной дистанцией

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 направлениям 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 тангуажу; ω_i весовой коэффициент для направления движения, $\omega_{z, roll, pitch}$ весовые коэффициенты.

Решение задачи оптимизации проводилась с помощью метода полного перебора из-за проверки всего 2073600 вариантов.

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

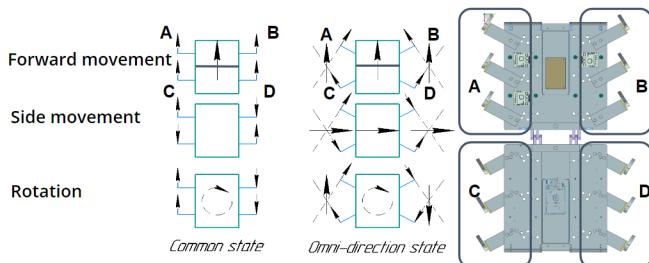


Рис. 10 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

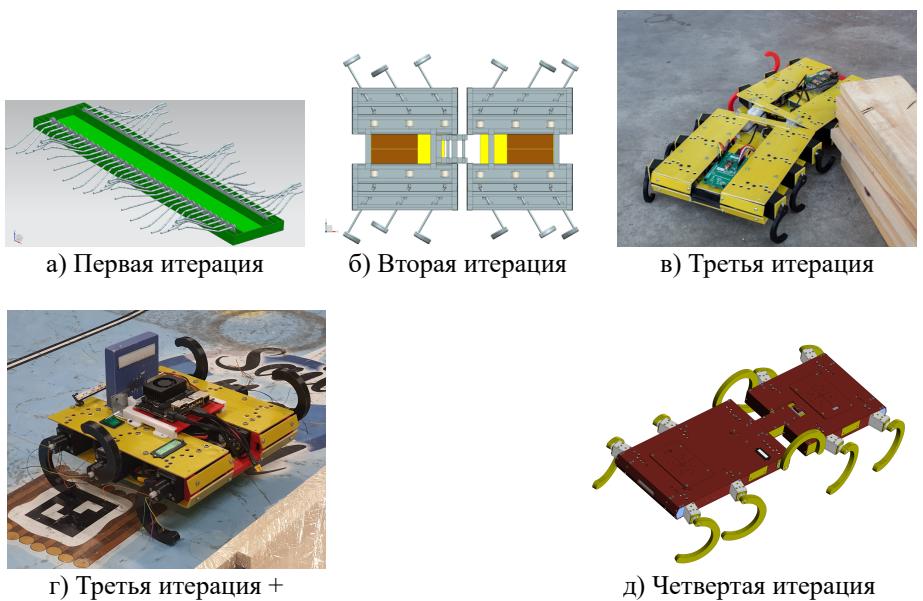


Рис. 11 — Итерации робота СтриРуса

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

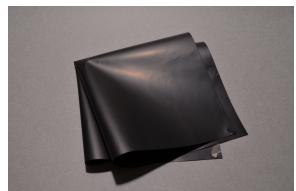
(рис. 11). Видео 4ой итерации



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.

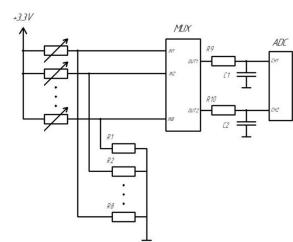
Для определения геометрических и физико-механических свойств поверхности было решено использовать датчик силы на ноге робота. Рассмотрев различные варианты, по причине дешевизны и легкости производства в лабораторных условиях, было решено использовать пьезорезистивный тип датчика, основанный на материале Velostat (рис. 12а). Он является промежуточным слоем (рис. 12б). Электрическая схема (рис. 12в).



а) Материал Velostat



б) Простейший преобразователь силы на основе Velostat



в) Электрическая схема преобразователя силы

Рис. 12 — Примеры использования Velostat

При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия влияет на показания преобразователя.

Задача: охарактеризовать материал для случаев, когда нагрузка меньше, чем размер сенсора.

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.

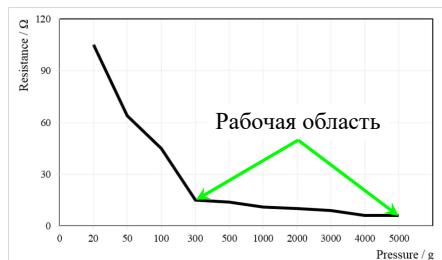


Рис. 13 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

Для исследования сенсора был сделан стенд. Требования: необходимость контролировать силу нажатия и обеспечить повторяемость эксперимента как по величине, так и по расположению площадки контакта инструмента и исследуемого преобразователя силы.

Разработанный стенд, представлен на рисунке 14.

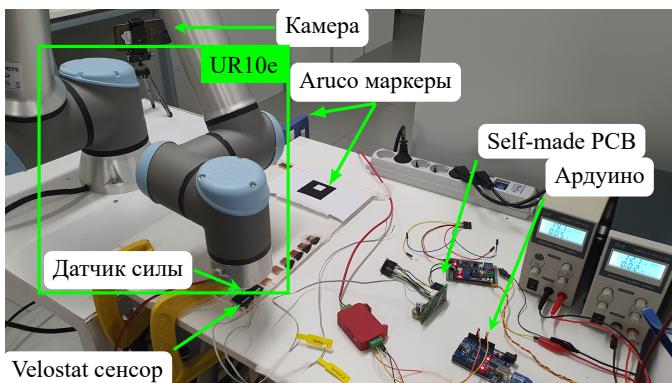
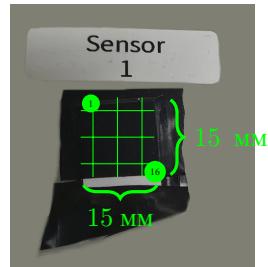


Рис. 14 — Разработанный экспериментальный стенд

Для касания только части объекта исследования были разработаны различные насадки. Минимальный размер препятствия, который может коснуться робота было взято за 2 мм. Длина ребра датчика – 15 мм (рис. 15а).



а) Насадки для нажатия на сенсор



б) Сенсор представлен как 4×4 сетка

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

Для контролирования силы нажатия манипулятором сенсора, было реализовано импедансное управление (рис. 16). Результат работы на частоте $450\ Hz$, необходимая сила нажатия — $17\ N$.

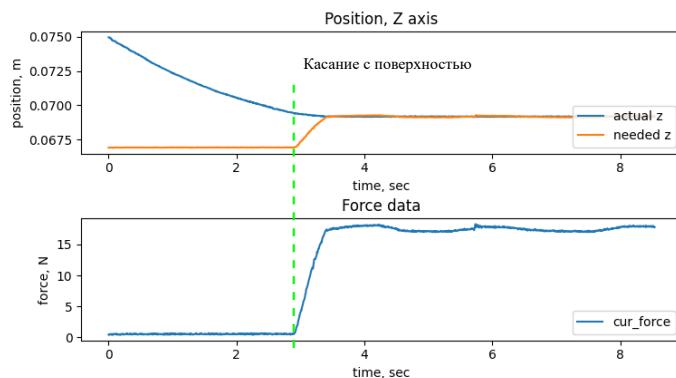


Рис. 16 — Графики зависимости силы и позиции по z от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

Было проведено 2 эксперимента. В **статическом** — задача определить коэффициенты для математической модели преобразователя (калибровка датчика). На сенсор прикладывается известная нагрузка на 60 секунд (за это время можно явно наблюдать гистерезис) и собираются данные с преобразователя.

Для калибровки использовалась формула (15). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект, так как показания сенсора меняются со временем.

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

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

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).

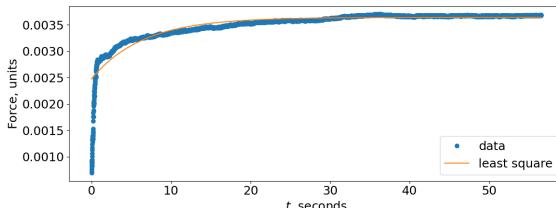
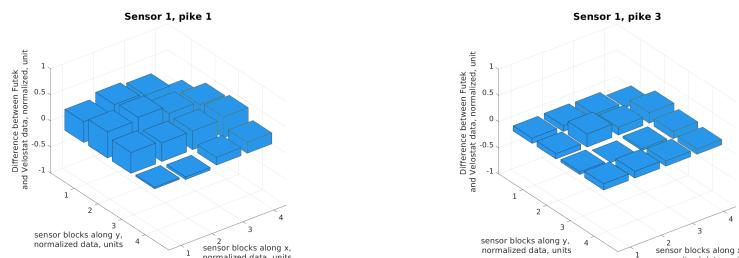


Рис. 17 — Результаты статического эксперимента

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).

Ниже (рис. 18) представлены результаты распределения ошибок по площади сенсора при взаимодействии с насадками разных размеров. Ошибки определялись как разница между показаниями калиброванного сенсора силы Futek и исследуемого преобразователя на базе Velostat. На рисунке 18а показаны ошибки для насадки диаметром 2 мм, а на рисунке 18б — 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 насадки.



а) Диаметр насадки равный 2 мм

б) Диаметр насадки 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-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.

Первая задача: имеется поверхность, которой каждому набору координат x, y соответствует одно и только одно значение координаты z . Необходимо с помощью ощупывания роботом данной поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Сделано предположение, что расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.

Для определения геометрических свойств поверхности необходимо получить облако точек касаний опорных поверхностей. То есть мы должны знать трансформацию систем координат от глобальной (к примеру начало движения робота), до конкретного сенсора на ноге.

Для этого необходимо решить прямую задачу кинематики (рис. 19), (17), а также задачу локализации. Задача локализации в пещере может быть решена с помощью маяков и/или с помощью лидаров/камер. В натурном эксперименте применялись Aruco маркеры.

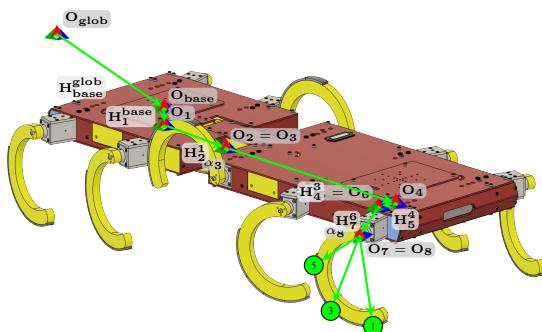


Рис. 19 — Кинематическая схема для определения точки касания опорной поверхности роботом

$$H_{leg}^{glob} = H(x_{glob}, y_{glob}, z_{glob}, \alpha_{glob}, \beta_{glob}, \gamma_{glob}) T_z(l_1) \\ T_x(l_2) R_y(\alpha_3) T_x(l_4) T_y(l_5) R_z(-15^\circ) T_y(l_7) R_y(\alpha_8) \quad (17)$$

Где каждая матрица представлены в виде однородной матрицы преобразования

$H = \begin{bmatrix} R & T \\ 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 0 & 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{bmatrix}$, где R_i — матрица поворота, относительно одной из осей, T_i — вектор сдвига.

Алгоритм получения плотного облака точек следующий. 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. 20) (вогнутая оболочка (рис. 21)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (рис. 23б).

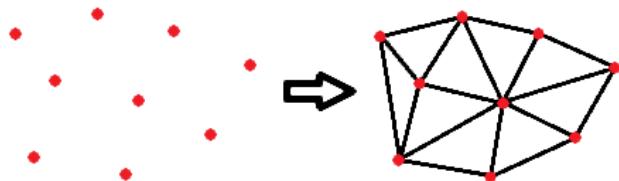


Рис. 20 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

На рисунке 21 проиллюстрирована важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (рис. 21б) алгоритм построил карту местности там, где робот не ходил и стоит стена. При использовании вогнутой оболочки (рис. 21в) данная проблема не наблюдается.

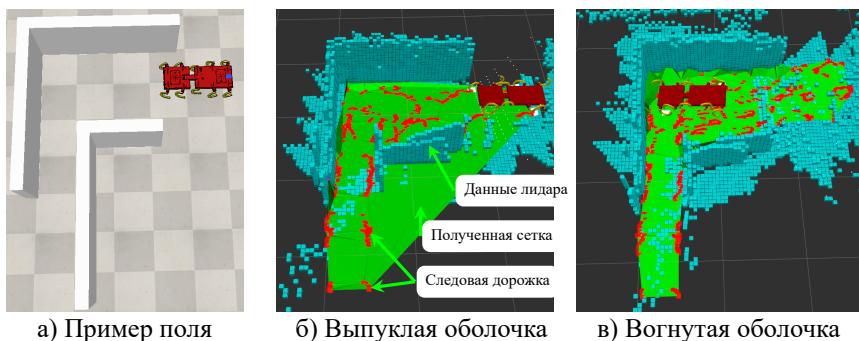
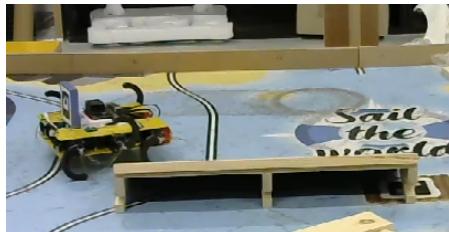
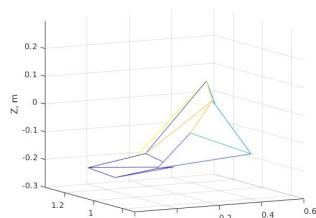


Рис. 21 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 2), так и на реальном роботе (рис. 22).



а) Робот проходит препятствие



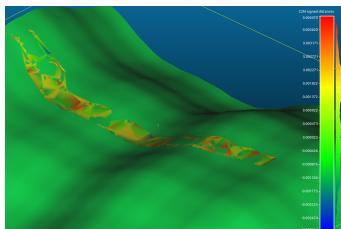
б) Полученная полигональная сетка

Рис. 22 — Пример натурного эксперимента

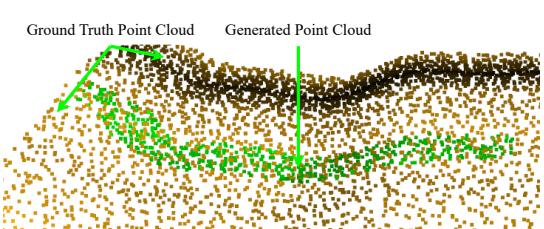
Ниже представлены полученные результаты (рис. 23). Для оценки точности полученных данных использовались метрики C2C (18) и C2M (рис. 24).

$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ | \text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m) | \} \quad (18)$$

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 .



а) Наложенные полигональные сетки

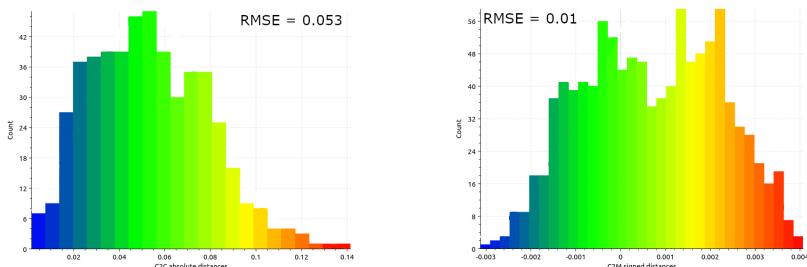


б) Наложенные облака точек

Рис. 23 — Результат эксперимента

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.

Вторая задача это определение физико-механических свойств опорной поверхности. Данна опорная поверхность. Необходимо за минимальное время оценить процентное соотношение твердости, упругости и пластиичности данной поверхности.



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

Рис. 24 — Метрики оценки точности полученной карты

Так как нет абсолютно твердых, упругих и пластичных тел, то было решено, что будут выбраны поверхности в которых каждое из свойств доминирует: камень, резина и земля соответственно.

Задачу можно решить следующим образом. Робот идет по поверхности, и собирает данные с датчиков силы и с мотора. На основе предварительного обучения, данные обрабатываются и классифицируются.

Метод опорных векторов (SVM) был выбран для задачи классификации благодаря ее эффективности и устойчивости при работе с высоко размерными данными.

Вектор с входными данными представлен следующим образом:

- Элемент(1) — Частота движения ног
- (2) — Пиковая амплитуда давления с датчика силы
- (3) — Ширина давления с датчика силы. Это расстояние между началом и концом акта движения. Такие отрезки складываются и получается ширина.
- (4) — Площадь под кривой силы датчика
- (5) — Пиковая амплитуда крутящего момента двигателя
- (6) — Пиковый крутящий момент двигателя
- (7) — Среднее давление на сенсорах
- (8) — Средняя амплитуда крутящего момента
- (9) — Средний крутящий момент двигателя
- (10) — Ширина крутящего момента двигателя
- (11) — Площадь под кривой крутящего момента двигателя
- (12-16) — Индивидуальная пиковая амплитуда силы такселя

Такой выбор возник благодаря экспериментам и изучению чужих работ. Здесь представлена запись касания ногой на разных поверхностях (рис. 25). Видно различное поведение сенсоров в зависимости от типа поверхности.

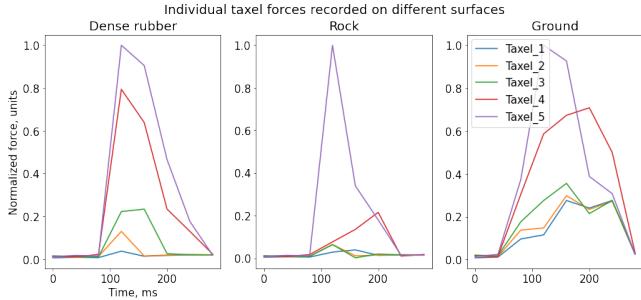


Рис. 25 — Запись активных такселей на разных поверхностях

Здесь представлены замеры средней линейной скорости движения ноги на разных поверхностях при различных угловых скоростях (рис. 26). Возможно заметить нелинейную зависимость, что так же может указывать косвенно на тип поверхности.

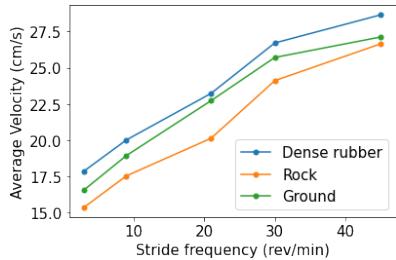


Рис. 26 — Средняя линейная скорость робота

В процессе обучения собранные данные были разделены на обучающее (80% данных) и тестовое множества (20%). Модель была обучена с использованием ядра на основе функции Пирсона VII (PUK).

Для оценки эффективности модели использовался тестовый набор. Производительность измерялась с точки зрения точности классификации и F1-score.

Функция принятия решения для SVM-модели (19):

$$f(x) = w^T x + b \quad (19)$$

где x — входной вектор, w является весовым вектором, и b — смещение. Универсальное ядро на основе функции Пирсона VII (20):

$$K(x, y) = (1 + ((||x - y||^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (20)$$

Где x, y — векторы во входном пространстве, $\|x - y\|$ обозначает евклидово расстояние между x и y , σ — масштабный параметр, определяющий "разброс" ядра, ω — это параметр формы, который влияет на форму границы принятия решения.

Данные собирались с установки, которая разрабатывалась так, чтобы было возможно быстро сменить тип поверхности, нога робота бесконечно могла совершать движения и узел с ногой был таким же как на реальном роботе (рис. 27).

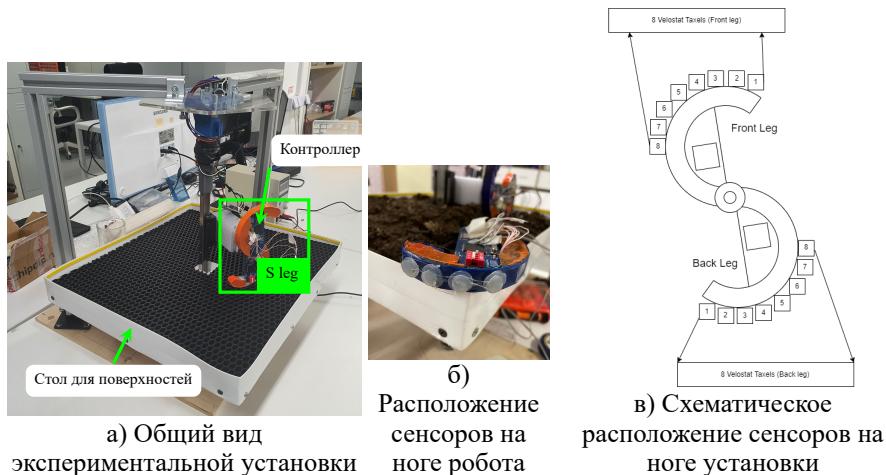


Рис. 27 — Экспериментальная установка

Результат обучения представлен в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1 — Вероятность определения типа поверхности

Истинный класс	Предсказанный класс		
	Камень	Резина	Земля
Камень	84.0%	2.56%	13.44%
Резина	20.1%	67.8%	12.1%
Земля	1.0%	18.9%	80.1%

Она интерпретируется следующим образом. В камне 84% упругих свойств, 2.56% упругих и 13.44% пластичных.

Заключение

Основной научный результат диссертации — методы построения определения геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности на

базе многоногого шагающего аппарата с тактильным ощущением 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 особенности.

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 ме-

ста 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 Триангulationи 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 реализовано 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 многоногого 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 очуствления [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» (РУ). — 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 многоугольного 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 многоугольного 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 ощущения 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 _____

