

Буличев Олег Викторович

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

Специальность 2.5.4 —
«Разработка метода тактильного очуствления для мобильного
шагающего робота»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в **университете Иннополис**.

Научный руководитель: **Доктор наук, профессор
Малолетов Александр Васильевич**

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,
доктор физико-математических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник**

**Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным длин-
ным длинным названием,
старший научный сотрудник**

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего профессиональ-
ного образования с длинным длинным длинным
длинным названием**

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 mmmmmmmm2022 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. Движение по пещере часто происходит по опасными и труднопроходимыми 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. Такие роботы могут проходить по сыпучим грунтам, каменистым грядам и преодолевать небольшие водные преграды.

Для полноценного функционирования в пещере необходимы сенсоры. Внешними сенсорами являются камера и лидар.

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).

Целью диссертационной работы работы является разработка и исследование робототехнической системы построения карты местности и определения

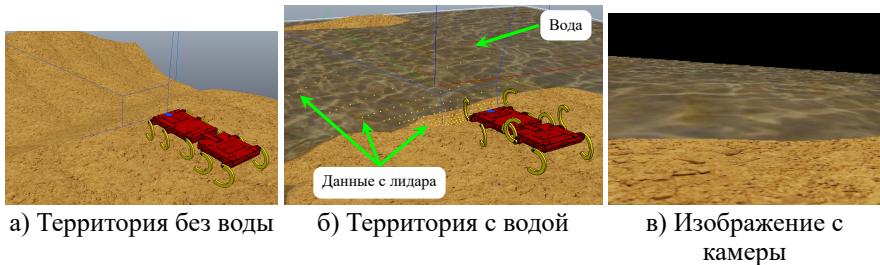


Рис. 2 — Пример ситуации, где навигация, основанная на камере или лидаре построит неправильную карту

геометрических и физических свойств опорной поверхности на базе многоногого шагающего аппарата с тактильным чувствованием без использования оптических сенсоров.

Данное решение отлично 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. разработка метода оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы по критериям проходимости (длина робота), детализации (количества ног), пройденного пути;
2. создание метода исследования датчика силы, когда площадь контакта нажатия на сенсор меньше чувствительной области самого сенсора;
3. проектирование метода построения карты местности и определения поверхности с помощью тактильного чувствования;
4. реализация алгоритма, позволяющего определять геометрические и физические свойства опорной поверхности.

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

Основная часть экспериментальных исследований проведена с прототипом (рис. 3), корпус которого состоит из двух сегментов с одной активной степенью свободы. Робот обладает 12 независимыми педипуляторами, 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 докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях, и получили положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна: Сформулирована и решена задача построения карты местности с помощью тактильного чувствования шагающего робота с цикловыми движителями и датчиками силы, установленными на опорных поверхностях движителей. Разработан метод оптимизации конструкции многоногого шагаю-

щего робота с цикловыми движителями. Представлен метод автоматизированного исследования датчика силы.

Доказана возможность построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного ощущения как в робототехническом симуляторе, так с помощью натурного эксперимента.

Показано, что оптимальное количество ног для циклового движителя с одной степенью свободы в ноге находится в диапазоне от 8 до 14 ног.

Предложено использовать преобразователь силы на основе полимерного материала Velostat. **Установлено**, что данный преобразователь можно использовать для изначальной задачи, то есть при площади контакта с поверхностью большей, чем 25% площади сенсора.

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

Основные положения, выносимые на защиту:

1. метод оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми движителями с одной степенью свободы по критериям проходимости (длина робота), детализации (количество ног), пройденного пути;
2. метод исследования датчика силы, когда площадь соприкосновения меньше площади сенсора;
3. алгоритм, позволяющий определять тип поверхности;
4. метод построения карты местности с помощью датчиков силы, установленных на ногах робота.

Значимость работы. Реализация полученных результатов в виде продукта (реализованное на промышленном оборудовании со всеми практиками, связанными с промышленной разработкой) позволит получать информацию о типе пройденной поверхности, а так же строить карту поверхности под небольшим слоем воды (лужа), там где лидар и камера не смогут выдать адекватный результат.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- ICINCO 2017 — 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (Madrid, Spain, 26-28 july 2017);
- IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2017 (Macau, China, 5-8 december 2017);
- международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем» (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.);
- 23rd IEEE FRUCT Conference (Bologna, Italy, 13-16 november 2018).
- XXXI международной конференции молодых ученых и студентов МИКМУС-2019 (г. Москва, 4-6 декабря 2019 г.);
- Международная конференция «Зимняя Школа Робототехники в Сириусе — 2022» (г. Adler, Россия, 25 января - 6 февраля 2022)

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертации, выдвигаемые для защиты, получены автором лично.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 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, перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения».

Содержание работы

Во первой главе показан обзор существующих решений. Рассмотрены 3 глобальные темы: типы препятствий, которые могут встретиться; роботы, которые используются в исследованиях пещер; а так же методы построения карты местности.

Была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя. Подводя итог, можно сказать, что классификация следующая. Важно отметить, что в одном экземпляре может сочетаться несколько типов движителей.

1. Псевдо-шагание
2. Шагающие машины с дополнительными опорными механизмами
3. Шагающие машины с движителями циклического действия
4. Ходьба с импровизированным следом
 - а) Ходьба - колесная
 - б) Прыжки и бег
 - в) Ползание
 - г) Лазание

В диссертации рассматривались роботы которые создавались специально для исследований пещер, в том числе и на Марсе. А так же те, которые потенциально могут быть использованы в условиях, определенных выше.

Как итог, их можно классифицировать следующим образом. Наземные роботы это шагающие, колесные, трековые и необычные. К необычным включены змеевидные, шарообразные и другие. К летающим были отнесены защищенные дроны и дирижабли.

Полноценной робототехнической системой является система, включающая в себя несколько роботов одного типа или комбинацию наземного и летающего роботов.

Для решения поставленной цели необходимо понимать в каких условиях будет использоваться робот. Основные структуры поверхностей следующие (рис. 1):

- твердые породы, прочные – мрамор, кварц, базальт (магма);
- твердые породы, мягкие – мел, гипс, соль, известняк;
- сыпучие грунты – песок, глина, снег;
- водные преграды – как и лужи (малый слой воды), так и целы залы, погруженные под воду. Часто встречаются сифоны;
- скользкие поверхности – отложения мха и плесени, лед ;
- разрушаемые поверхности – каменная грязь, паутина.

Так же были рассмотрены размеры пещер, чтобы понимать необходимый запас хода, размеры робототехнического комплекса.

Были рассмотрены классические SLAM алгоритмы, основанные на использовании камеры, стереопары, с использованием лидара, GPS, IMU а так же их различные комбинации.

Проведен обзор триангуляций, так как данный метод лежит в основе определения геометрических свойств объекта.

Были найдены способы получения облака точек объекта с помощью касания манипулятором данного объекта. Примерное местоположение объекта определялось камерой.

Определить тип поверхности можно так же с помощью различных сенсоров: визуально, IMU, с помощью снятия тока с моторов, момента с вала мотора, с помощью датчиков силы, установленных на конечность робота.

Были найдены следующие предложенные решения:

- робототехнические системы для исследования свободных пещер;
- Построение карты с помощью лидаров и камер;
- Получение конечно элементной сетки с помощью тактильного чувствования манипулятором.

Поставленная задача является новой и не встречается в научных публикациях российских и зарубежных авторов.

Вторая глава покрывает разработку объекта исследования, а именно решение задачи структурного синтеза и инженерную разработку прототипа.

Зная область применения робототехнической системы возможно оптимизировать ее механическую часть. Были выставлены следующие требования.

1. иметь малые габариты, чтобы иметь возможность пролезать через щели в скальной породе и не застревать среди камней;
2. обладать достаточной проходимостью по сыпучим грунтам;
3. иметь возможность преодолевать малые водные преграды;
4. мог взбираться на большие каменные уступы.

Изучая данные требования возможно заметить, что часть из них коррелируют друг с другом, а часть – антагонируют. Чем больше количество полученных точек на пройденной поверхности, тем выше будет детализация карты. Одним из способов увеличения детализации это увеличение количества ног у робота. С

другой стороны, это увеличивает длину робота, а следовательно робот хуже сможет проходить узкие участки с обилием поворотов. Чем большее расстояние робот сможет пройти за одно и то же время, тем быстрее будет построена карта и робот меньше влияет на окружающую среду при прочих равных условиях.

Как итог возникает задача, которая не имеет одного лучшего решения. Следовательно, это мультикритериальная задача оптимизации.

Было решено, что цикловый движитель с одной степенью свободы в ноге лучше всего подходит для решения подобных задач.

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.

Генетический алгоритм это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Для решения задачи использовалась библиотека Deep.

Математическая модель робота представлена следующим образом. Исследуется механическая система, состоящая из твёрдых тел (1), движение которых описывается дифференциальными уравнениями вида:

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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. 4) описывается на базе модели сухого трения и выражается следующими уравнениями:

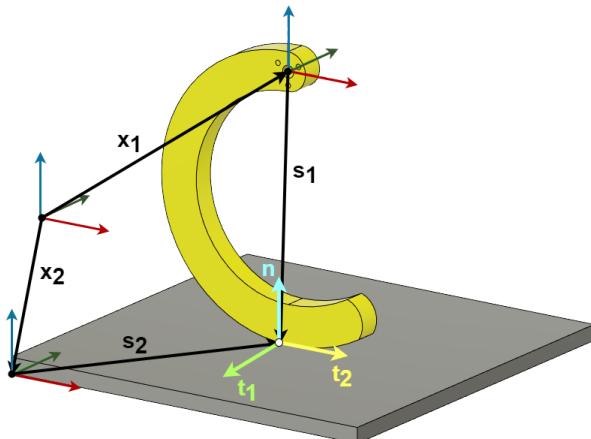


Рис. 4 — Описание переменных для модели взаимодействия опорной поверхности и ноги робота

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

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

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

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

где, $\phi_u(\vec{q})$ — функция связи; μ — коэффициент трения между ногой и опорной поверхностью; радиус-векторы $\vec{x}_{1,2}$, $\vec{s}_{1,2}$ и орты координатных осей $\vec{t}_{1,2}$, \vec{n} показаны на рисунке (рис. 4); $f_{1,2}$ — 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. 5).

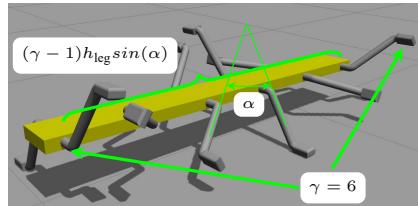


Рис. 5 — Схема модели робота для генетического алгоритма

Эту задачу можно сформулировать как мультикритериальную задачу оптимизации, где необходимо максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (13). Параметрами индивида являлись γ и α .

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

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

Весовые коэффициенты настраивались в зависимости от выбора приоритета. Невзирая на выбранные коэффициенты, оптимальным набор ног начинался с 8 и заканчивался 14. Это объясняется критерием статического равновесия, который, как оказалось, увеличивает проходимость механизма. В данном случае 4 ноги всегда будут касаться пола.

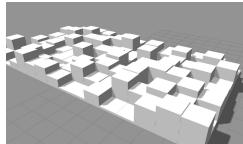
Было проведено два испытания. На первом испытании мы стремились найти только одного лучшего робота, только для местности T1 (рис. 6а). На втором этапе мы хотели видеть зависимость от разных типов ландшафтов при меньшем количестве индивидуальностей.

Первый этап: каждый робот проходил 10 разных ландшафтов по 9 секунд каждую. Вторая фаза: она имеет те же параметры, что и первая фаза, но с измененным размером популяции.

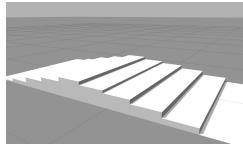
В соответствии с таблицей 1 (весовые коэффициенты равны 0.6 и 0.4 соответственно) видно, что мы имеем сходимость в параметрах. Видео прохождения



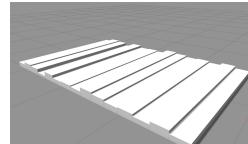
препятствия лучшим индивидом



a) T1: 3D-боксы с
равномерным
распределением высоты



б) T2: 2D-полосы с
гауссовой
функциональной высотой



в) T3: 2D-полосы с
распределением высоты
по гауссовой функции

Рис. 6 — Примеры сгенерированных территорий

Таблица 1 — Зависимость между статистикой значения пригодности и типами ландшафта

Территория, популяция	Параметры	Среднее значение	Std целевая функция
T1 (рис. 6а), 110	(6, 72)	2.38	0.34
T2 (рис. 6б), 55	(5, 68)	1.95	0.35
T3 (рис. 6в), 55	(6, 77)	2.08	0.33

В первом пункте требований к движителю (начало главы) стоит требование, чтобы робот не застревал при поворотах. Проблема застревания решается с помощью изменения угла между ногой и корпусом робота.

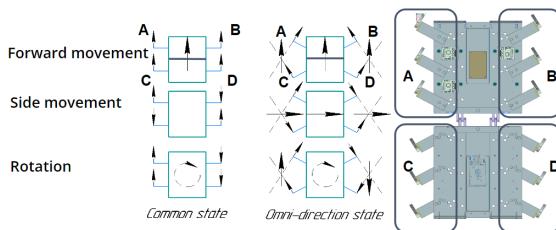


Рис. 7 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоянии

На рисунке 7 представлена иллюстрация данной концепции: для того, чтобы робот двигался во всех направлениях, необходимо разбить ноги на группы, чтобы получилось 4 группы А-Д.

Если сравнивать с классической компоновкой роботов (угол между корпусом робота и осью вала привода ноги равен 90 градусов), то вектор внешних сил будет таким, как на левой части рис. 7. 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. 7 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 исследования было разработано четыре концепции робота СтриРус. В таблице 2 в строке недостатки объясняются основные причины перехода из одной итерации к другой. Концептуально было замечено, что высота ноги и

наличие сегмента разительно влияет на проходимость конструкции.

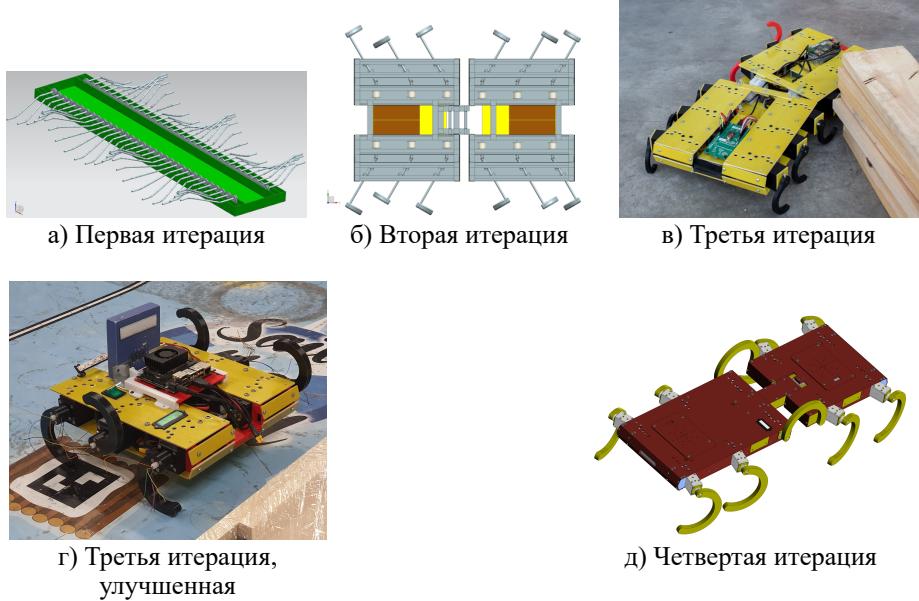


Рис. 8 — Итерации робота СтриРуса

Таблица 2 — Сравнение итераций робота

Итерация	1 (рис. 8а)	2 (рис. 8б)	3 (рис. 8в)	3+ (рис. 8г)	4 (рис. 8д)
Кол-во ног	54	12	12	6	10
Кол-во сегментов	1	2	2	1	2
Тип соединения	—	Тангаж	Тангаж, рыскание	—	Тангаж
Отн. угол телом – нога, градусы	0	0–45	0, 15, 30, 45	0	0, 15
Высота ноги, мм	54	60	60	90	170
Особенности	Волноход	Механизм, который позволяет непрерывно изменять отн. угол	Двухстепенный узел, соединяющий сегменты	Большие ноги	Гигантские ноги
Недостатки	Невозможно установить сенсоры на ноги. Много подвижных частей	Слишком сложный механизм, изменяющий отн. угол	Мал. ноги. Избыточная вторая степень свободы в соединительном узле	1 сегмент. Маленькие ноги	—

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

Конструкция робота соответствует всем требованиям, поставленным вначале. А именно, возможность проходить сквозь узкие пространства, иметь возможность преодолевать большие каменные гряды и возможность эффективно перемещаться по сыпучим грунтам.

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. 9а) в качестве промежуточного слоя для датчика (рис. 9б).



а) Материал Velostat

б) Простейший преобразователь силы на основе Velostat

Рис. 9 — 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. 10) показана рабочая область сенсора, основанная на весе, который может быть приложен на одну ногу робота.

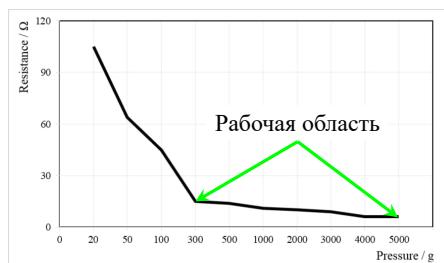


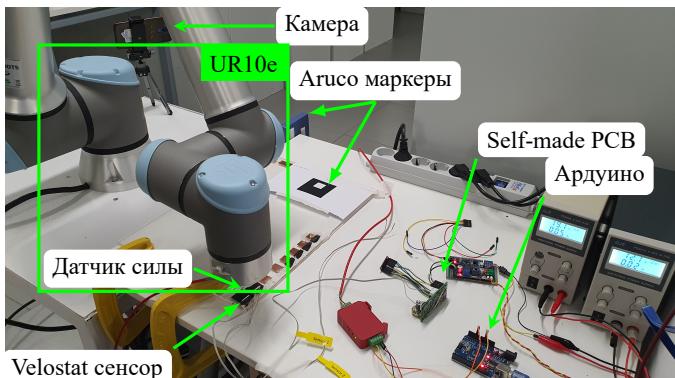
Рис. 10 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

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

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 11а.

Видео работы стенда



а) Общий вид экспериментального стенда



б) Способ нивелировать ошибку по углу с помощью Агуко маркеров

Рис. 11 — Разработанный экспериментальный стенд

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. 12а).

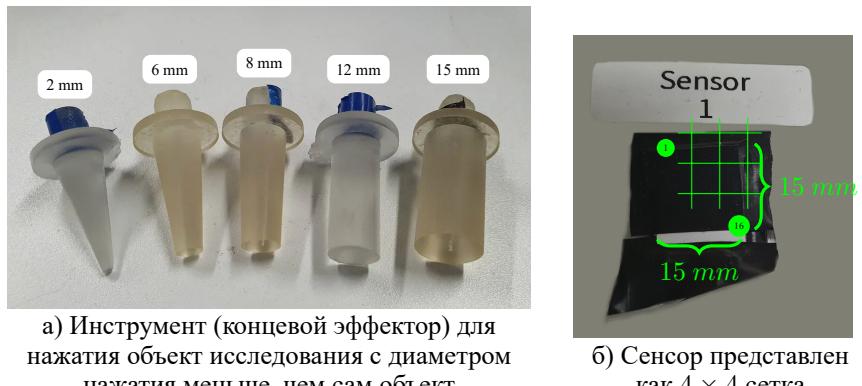


Рис. 12 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

На рисунке ниже (рис. 13) представлен результат работы импедансного управления на частоте 450 Hz. Необходимая сила нажатия — 17 N.

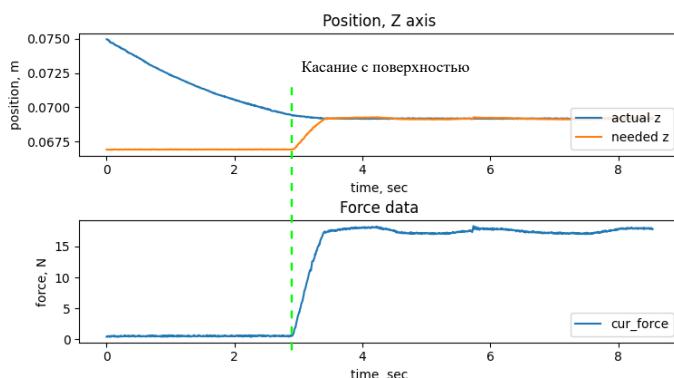


Рис. 13 — Графики зависимости силы и позиции по z от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

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. 126).

Статическим экспериментом проверялась формула (14). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект. При прикладывании на сенсор константной нагрузки показания сенсора будут меняться.

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (14)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (15)$$

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. 14).

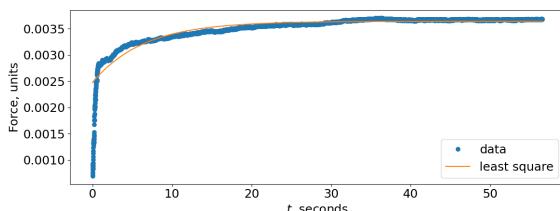
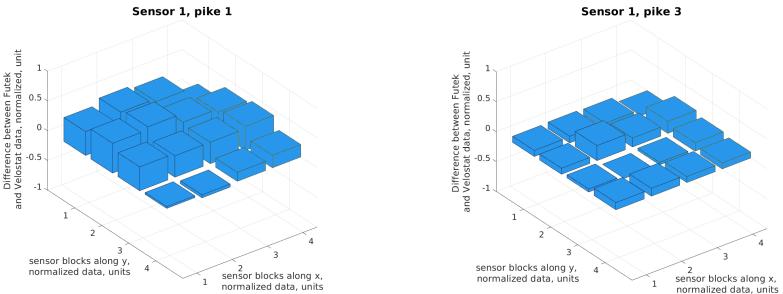


Рис. 14 — Результаты статического эксперимента

Ниже (рис. 15) представлены некоторые результаты распределения ошибок по площади сенсора при взаимодействии с концевыми эффекторами разных размеров. Ошибки определялись как разница между показаниями калиброванного сенсора силы Futek и исследуемого преобразователя на базе Velostat. На рисунке 15а показаны ошибки для концевого эффектора диаметром 2 мм, а на рисунке 15б — для концевого эффектора диаметром 8 мм.

Можно заметить, что в 15б 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. 15 — 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 создания алгоритма построения карты с помощью тактильного чувствования, определения типа поверхности.

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. 16) (вогнутая оболочка (рис. 19)). На ее основе получается необходимое плотное облако точек (рис. 18в).

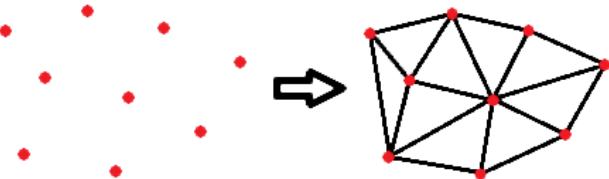


Рис. 16 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 2, 17), так и на реальном роботе (рис. 21). Видео



а) Начало движения



б) Конец движения

Рис. 17 — Эксперимент в симуляторе

Ниже представлены полученные результаты (рис. 18). Для оценки точности полученных данных использовались метрики C2C (16) и C2M (рис. 20).

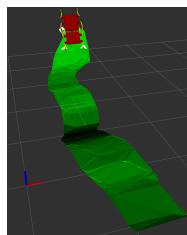
$$d_H(X, Y) = \sup_{m \in M} \{ |\text{dist}_X(m) - \text{dist}_Y(m)| \} \quad (16)$$

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 .

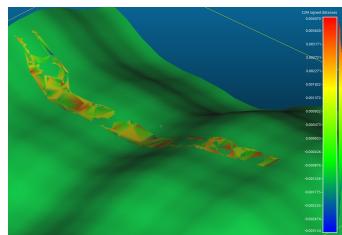
На рисунке 19 проиллюстрирована важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (рис. 19б) алгоритм построил карту местности там, где робот не ходил и стоит стена. При использовании вогнутой оболочки (рис. 19в) данная проблема не наблюдается.

Как итог, среднеквадратичная ошибка для C2C метрики была в среднем равна 5 см. А для C2M 1 см. В натурном эксперименте среднеквадратичная ошибка по метрике C2C получился 8 см.

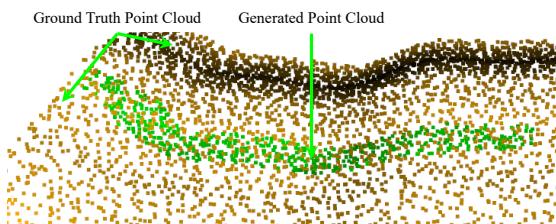
Задачу определения типа поверхности можно определить следующим образом. Робот идет по поверхности, и собирает данные с датчиков силы, с момента на моторе и IMU. На основе предварительного обучения, данные обрабатывают-



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

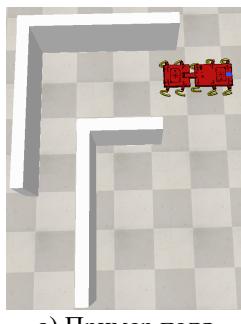


б) Наложенные полигональные сетки

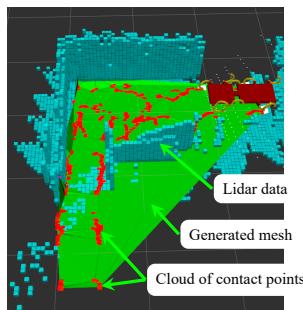


в) Наложенные облака точек

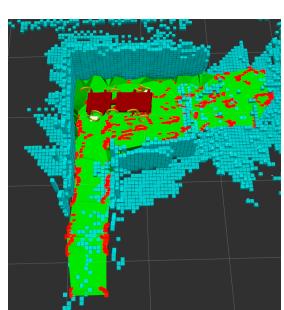
Рис. 18 — Результат эксперимента



а) Пример поля



б) Выпуклая оболочка

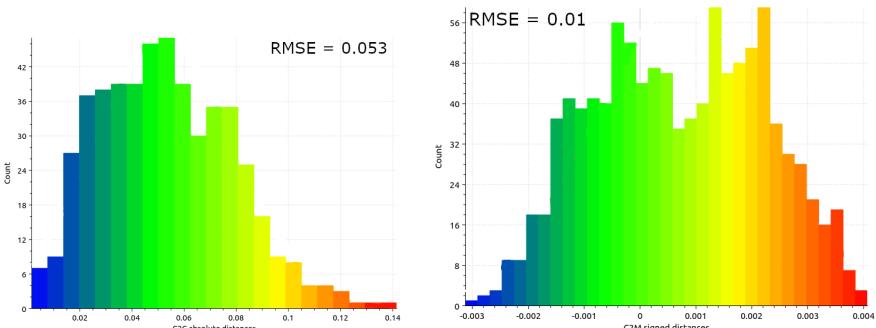


в) Вогнутая оболочка

Рис. 19 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне

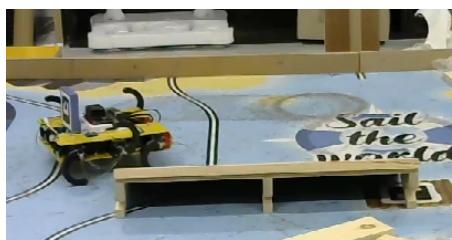
ся и кластеризуются, на основе предварительно определенной базы знаний территорий.

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

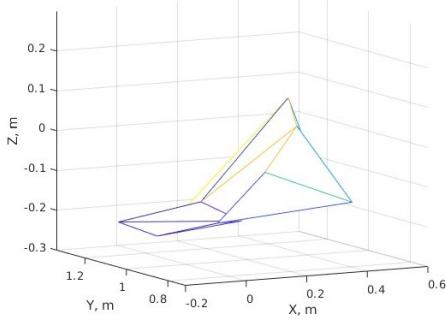


а) Метрика С2С: гистограмма ошибок (абсолютное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки) б) Метрика С2М: Гистограмма ошибок (относительное расстояние от точки до ближайшей реферальной точки)

Рис. 20 — Метрики оценки точности полученной карты



а) Робот проходит препятствие

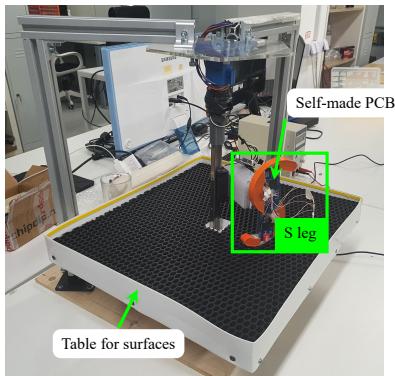


б) Полученная полигональная сетка

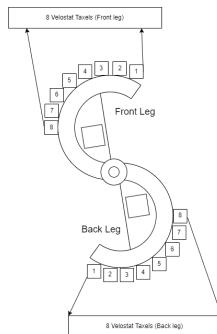
Рис. 21 — Пример натурного эксперимента

обучения. Узел с ногой должен быть взят с робота, чтобы не пришлось решать похожую задачу на роботе.

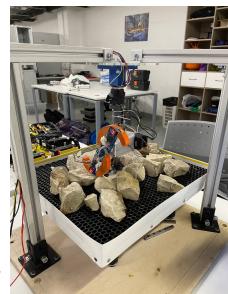
Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и 2ух степенному механизму, который ходит по окружности (рис. 22а). Для бесконечного движения пришлось соединить две ноги робота в одну. На рисунке ниже (рис. 22б) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.



а) Общий вид экспериментальной установки



б) Пояснение по расположению сенсоров на ноге робота



в) Каменистая поверхность

Рис. 22 — Экспериментальная установка для определения типа поверхности

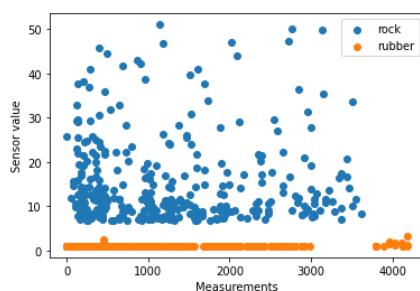
Были взяты 2 сильно разных поверхности и изучены сырье данные. Резина (рис. 22а)



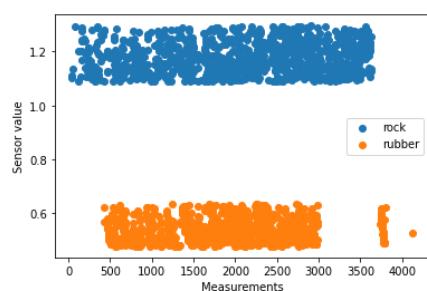
, камень (рис. 22в)



Ниже (рис. 23) 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. 23 — Сравнение сырьих 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 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 заключается в решении актуальной научной задачи, имеющей важное практическое значение: разработка и исследование робототехнической системы построения карты местности и определения геометрических и физических свойств опорной поверхности на базе многоугольного шагающего аппарата с тактильным ощущением без использования оптических сенсоров.

Данное решение отлично подходит для первичного исследования замкнутых труднодоступных пространств, где отсутствует освещение, 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.

Предложенное решение очень хорошо подходит для изначального изучения закрытых недоступных мест, где отсутствует освещение, много грязи, пыли, и водных преград. Методы и концепты навигации предоставленной системы имеют все шансы быть применены как запасная система навигации для иных робототехнических систем, когда больше точная — оптическая 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. То есть была проведена классификация машин, использующих ноги в качестве движителя, упор был сделан на машины с циклическими движителями. Рассмотрены 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 применимости разработанной системы.

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

Данный метод основан на применении генетического алгоритма OpenAI-ES, с самописными реализацией 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, была 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 найдена особенность, 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. Было разработан метод картографирования с помощью ощупывания поверхности. Для первичной проверки гипотез была разработана сцена в симуляторе CoppeliaSim. После череды экспериментов, было решено использовать и реализовать алгоритмы вогнутой Триангуляции Делоне с использованием альфа формы.

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

5. Для получения максимально полной информации о проходимой поверхности, необходимо знать еще и тип поверхности, по которой проходит робот. Это было реализовано с помощью методов машинного обучения, а все данные были получены из натурных экспериментов. Как результат, точность определения примерно в 85 процентов (3 типа поверхности, земля, резина и камень), позволяет довольно эффективно использовать данные знания для реализации алгоритмов управления.

Подведя итог, данная работа имеет как практическую, так и теоретическую составляющую. Предложенные методы апробировались на роботе.

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 обучения робота шаговым движениям [Текст] : пат. 2019661399 Russia / О. Буличев. — Заявл. 28.08.2019.
7. Программа ориентации шагающего робота Стрирус в условиях плохой видимости [Текст] : пат. 2019665262 Russia / О. Буличев, Д. Бураков. — Заявл. 21.11.2019.
8. Программа планирования траектории движения ног двенадцатиногого робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : пат. 2020665488 Russia / О. Буличев. — Заявл. 27.11.2020.
9. Программа подбора кинематических параметров у шагающих роботов [Текст] : пат. 2019660557 Russia / О. Буличев. — Заявл. 07.08.2019.
10. Программа позиционирования и стабилизации камеры для шагающего робота Стрирус [Текст] : пат. 2019665435 Russia / О. Буличев, Д. Бураков. — Заявл. 22.11.2019.

11. Программа построения 3D - карты местности с помощью многоногого биомиметического шагающего робота с использованием фреймворка ROS [Текст] : 2021681297 / О. Буличев. — Заявл. 27.12.2021.
12. Программа управления звеньями шагающего двенадцатиногого робота с помощью геймпада в робототехническом симуляторе Ignition [Текст] : пат. 2020665643 Russia / О. Буличев, А. Ахметшин. — Заявл. 27.11.2020.
13. Программа управления экспериментальным стендом для автоматизации проверки датчиков очутствления [Текст] : 2021681288 / О. Буличев. — Заявл. 27.12.2021.

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.* Нахождение реакций опор ног роботизированной платформы с поворотными цикловыми движителями и составным корпусом [Текст].
16. *Буличев О. В.* Обучение прямолинейному движению многоногого 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.
17. *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.
18. *Буличев О. В.* Разработка экспериментального стенда для автоматизации проверки датчиков очутствления [Текст].
19. *Буличев О. В.* Стабилизация видео на основе IMU-датчика и 3D облака точек для многоногого робота типа многоножки [Текст].
20. *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.
21. *Буличев О. В., Климчик А. С.* Стрирус: высокомобильный робот, вдохновленный насекомым муходоловкой [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.

22. *Буличев О. В., Малолетов А. В.* Моделирование движения роботизированной платформы в условиях трудной проходимости с определением рельефа опорной поверхности [Текст].

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 _____

