

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Жизнь многих народов Земли неразрывно связана с закрытыми пространствами естественного происхождения (пещерами). В них можно найти множество полезных ресурсов, такие как металлы, драгоценные камни редкие разновидности мхов.

Изучение пещер всегда сопровождается большими опасностями и трудностями. К примеру таковыми являются сифоны (Рис. 2б), сталактиты, обилие скользких грунтов (Рис. 2в и 2е). В пещерах недостаток света, часто влажно.

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.

Для полноценного функционирования робота в пещере необходимы сенсоры. Классическими внешними сенсорами являются камера и лидар.

Но из-за представленных выше препятствий, они могут выйти из строя. К примеру грязь (Рис. 2г) может закрыть обзор камере или лидару. Или водная гладь (Рис. 2д) будут отражаться от лазера лидара и искажать данные (Рис. 1).

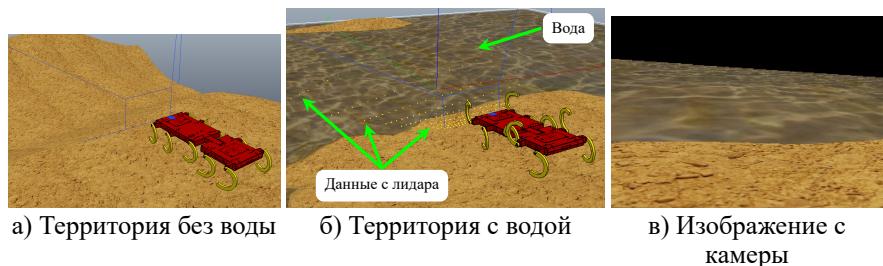


Рис. 1 — Пример ситуации, где обычная система навигации будет выдавать некорректные данные

Эту проблему возможно частично решить с помощью другого набора сенсоров. С помощью внутренних сенсоров, на которые меньше влияют внешние факторы. Такими сенсорами являются Инерциальное Измерительное устройство (IMU), датчики силы и маяки.

Таким образом необходимо разработать методику получения полезной информации об окружающей среде с помощью данного набора датчиков. Так как основные данные получаются с помощью касаний. Это называется тактильным обучением.

Подтверждением актуальности проблемы могут являться DARPA Subterranean Challenge, а также выделенные средства фондов НТИ и РФФИ на решение данной проблемы.

**Целью диссертационной работы** данной работы является разработка метода тактильного чувствования мобильного шагающего робота в закрытых пространствах естественного или искусственного происхождения, в которых невоз-

можно получение данных со спутниковой навигации, затруднено применение оптических сенсоров.

Это необходимо для получения достоверных данных о поверхности, когда робот передвигается по лужам и классические внешние сенсоры выдают некорректные данные.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. спроектировать объект исследования — шагающего многоногого робота: подобрать количество ног, их форму. Обосновать конструкцию тела и количество степеней свободы;
2. подобрать сенсоры для решения поставленной задачи;
3. разработать методику построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного чувствования;
4. решить проблему локализации на основе тактильного чувствования.

**Объект исследования.** Для разведки местности под землей в труднодоступных местах с малой видимостью разработан прототип многоногого шагающего робота СтриРус (Рис. 6д).

Данный робот состоит из двух сегментов с одной активной степенью свободы. Робот обладает 10 независимыми лапками, 6 лап в первом сегменте и 4 во втором.

Особенность конструкции робота в том, что возможно изменять угол между лапкой 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 базис были взяты методологии из теории 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:** формулирование проблемы построения карты с помощью тактильного чувствования, а так же ее комплексное решение. В это решение входит разработка метода оптимизации конструкции робота, методика исследования датчика силы, а так же методика построения карты местности с помощью датчиков силы, установленных на ногах робота.

**Доказана** возможность построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного чувствования 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 рассматривать как единое тело, при площади нажатия больше 50% площади сенсора.

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

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. метод оптимизации конструкции многоногих роботов;
2. разработанная методика исследования датчика силы, когда площадь нажатия на сенсор меньше самого сенсора;
3. реализация программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего определять тип поверхности;
4. методика построения карты местности с помощью датчиков силы, установленных на ногах робота.

**Значимость работы.** Реализация полученных результатов в виде продукта позволит получать информацию о типе пройденной поверхности, а так же строить карту поверхности под толщей воды, 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. Адлер, 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 13 печатных изданиях, 1 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 очищения мобильного шагающего робота, перемещающегося в закрытом пространстве естественного происхождения».

**Структура работы.** В введении рассказывается об актуальности проблемы, в чем научная новизна и цель проекта. Во первой главе показан обзор существующих решений. Вторая глава покрывает разработку объекта исследования, а именно решение задачи топологического синтеза и инженерную разработку прототипа. Третья глава посвящена разработке и исследованию самодельного преобразователя силы на основе Velostat. Четвертая глава раскрывает детали создания алгоритма построения карты с помощью тактильного очищения, определения типа поверхности.

## Содержание работы

### Литературный обзор

Рассматривались 3 глобальных темы: обзор препятствий, роботы, которые используются в исследованиях пещер, а также методы построения карты местности.

### Обзор препятствий

Для решения поставленной цели необходимо понимать в каких условиях будет использоваться робот.

Пещера – полость в верхней части земной коры, сообщающаяся с поверхностью одним или несколькими входными отверстиями. Они бывают различных типов, от этого зависит какой набор препятствий будет встречаться чаще.

Основные структуры поверхностей следующие (Рис. 2):

- 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 ;
- разрушающие поверхности – каменная грязь, паутина.

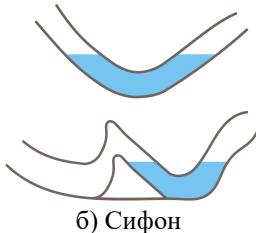
Так же были рассмотрены размеры пещер, чтобы понимать необходимый запас хода, размеры робототехнического комплекса.

### Прототипы роботов

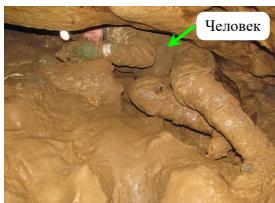
В диссертации рассматривались роботы, которые создавались специально для исследований пещер, космические, а также те, которые потенциально могут быть использованы в условиях, определенных выше.



а) Соляные отложения



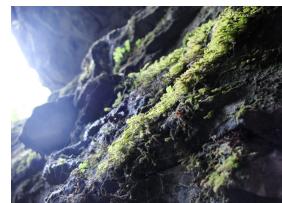
в) Ледяная пещера



г) Глина



д) Пещера, заполненная водой по колено



е) Мох

Рис. 2 — Препятствия, встречающиеся в пещерах

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.

Продуктовым решением является робототехническая система, включающая в себя несколько роботов одного типа или комбинацию наземного и летающего роботов.

## Методы для получения полезной информации о поверхности

Под полезной информацией рассматривается как получение самой поверхности, так и получение ее свойств. К примеру тип поверхности.

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

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 и с помощью комбинации предложенных решений.

## **Вывод**

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 решалась академией.

## **Разработка объекта исследования**

### **Введение**

Для эффективного исследования пещер необходимо выставить требования к разрабатываемому роботу. На основании литературного обзора было решено, что робот должен:

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.

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

## **Решение задачи структурного синтеза**

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 Deap.

Геометрическая модель робота представлена в виде трехмерного параллелепипеда с несколькими ногами  $\gamma$  с каждой стороны. Каждая нога имеет постоянное смещение угла поворота относительно своей соседней ноги  $\alpha$  (Рис. 3).

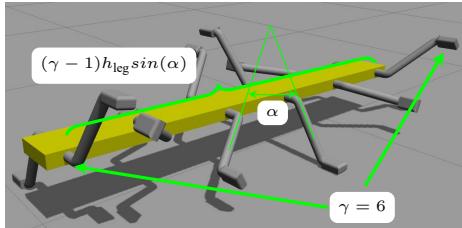


Рис. 3 — Объяснение параметров, участвующих в описании индивида в популяции

Эту задачу можно сформулировать как мультикритериальную задачу оптимизации, где мы пытаемся максимизировать дистанцию, пройденную за фиксированное время, и минимизировать длину робота (1). Параметрами индивида являлись  $\gamma$  и  $\alpha$ .

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

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

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

Было проведено два испытания. На первом испытании мы стремились найти только одного лучшего робота, только для местности T1 (Рис. 4а). 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 дизайна. [Видео прохождения препятствия лучшим индивидом.](#)

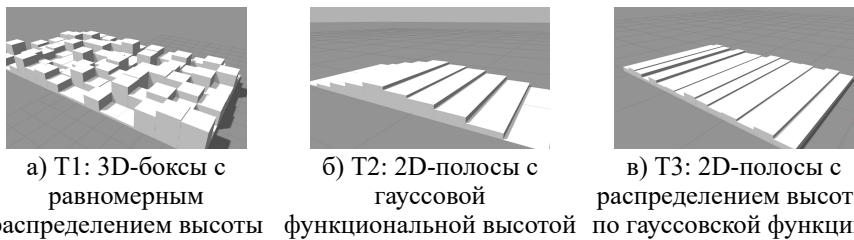


Рис. 4 — Примеры сгенерированных территорий

Таблица 1 — Зависимость между статистикой значения пригодности (средняя, std) и типами ландшафта

Территория, популяция	Параметры	Среднее значение	Std целевая функция
T1 (Рис. 4а), 110	(6, 72)	2.38	0.34
T2 (Рис. 4б), 55	(5, 68)	1.95	0.35
T3 (Рис. 4в), 55	(6, 77)	2.08	0.33

## Концепт движения циклового движителя вбок без смены ориентации

Одно из требований было, чтобы робот мог проходить сквозь узкие про- странства и не застревать при поворотах. Проблема застревания решается с по- мощью изменения угла между лапкой и корпусом робота.

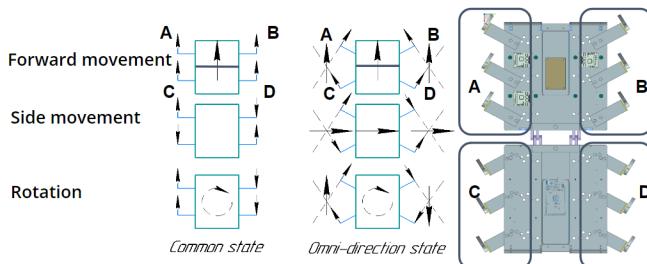


Рис. 5 — Векторное представление сил в классическом и всенаправленном состоя- янии

На рисунке 5 представлена иллюстрация данной концепции: для того, чтобы робот двигался во всех направлениях, необходимо разбить его лапки на группу

пы, чтобы получилось 4 группы. Данные группы на рисунке названы А-Д. То есть в каждую группу вошли по 3 лапки, с каждой стороны одного сегмента.

Если сравнивать с классической компоновкой роботов (угол между корпусом робота и осью вала привода лапки равен 90 градусов), то вектор внешних сил будет таким, как на левой части Рис. 5. Стрелка в центре робота — суперпозиция всех сил. Если изменить угол оси привода лапок в соответствии с предлагаемой концепцией, то возможно получить значения суперпозиции сил, представленные на Рис. 5 в центре. То есть, чтобы переместить корпус робота направо, группы А и Д должны вращать лапки в одну сторону, а группы С и В — в противоположную. Правая часть рисунка иллюстрирует расположение групп лапок на исследуемом роботе.

## Разработка итераций

Робот разрабатывался итеративно и на основе новых данных создавалась новая концепция. Основные плюсы и недостатки итераций представлены в таблице 2.

Концептуально было замечено, что высота лапки и наличие сегмента разительно влияет на проходимость конструкции. [Демонстрационное видео](#).

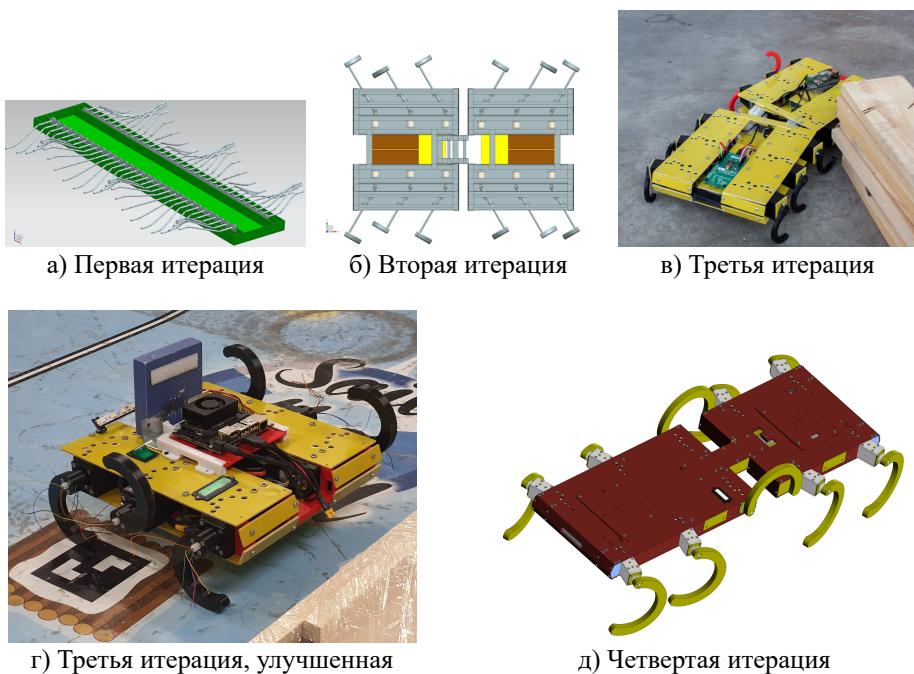


Рис. 6 — Итерации робота СтриРуса

Таблица 2 — Сравнение итераций робота

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

## Вывод

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

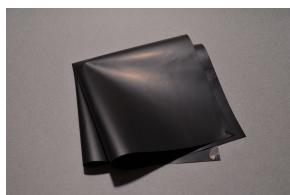
Конструкция робота соответствует всем требованиям, поставленным вначале. А именно, возможность проходить сквозь узкие пространства, иметь возможность преодолевать большие каменные гряды и возможность эффективно перемещаться по сыпучим грунтам.

## Разработка и исследование 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.

Та же проблема применима к оптическим и магнитным датчикам. 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. 7а) в качестве промежуточного слоя для датчика (Рис. 7б).



а) Материал Velostat



б) Простейший преобразователь силы на основе Velostat

Рис. 7 — Примеры использования Velostat

При исследовании преобразователя силы на основе Velostat, было замечено, что площадь нажатия разительно влияет на показания преобразователя. Площадь контакта может сильно повлиять на данные при перемещении роботом по неровной твердой поверхности, к примеру по камням. 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. 8) показана рабочая область сенсора, основанная на весе, который может быть приложен на одну лапку робота.

## Экспериментальный стенд

Для исследования преобразователя Velostat, когда нагрузка меньше, чем размер преобразователя, необходимо сделать лабораторный стенд. 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. Указан-

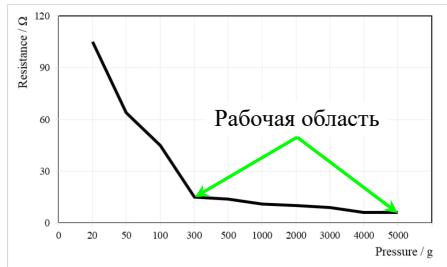


Рис. 8 — График зависимости прикладываемого веса от сопротивления

ным требованиям возможно удовлетворить, используя коллаборативный робот-манипулятор, который будет управляться с помощью impedance управления.

Использование коллаборативного робота позволяет также удовлетворить требованиям безопасности и допустить работу робота в непосредственно близости от экспериментатора. Разработанный стенд, представлен на рисунке 9а.  
[Видео работы стенда.](#)

Для касания только части объекта исследования были разработаны различные концевые инструменты. К примеру, (Рис. 10а)

Impedance управление состоит из двух блоков – модификация траектории для оси  $z$ , начиная с(2), и управление по скорости – с (8).

$$X_s^0 = 0, \dot{X}_s^0 = 0, X_g^k, \dot{X}_g^k - \text{goal state}, X_s = X_g - X_d \quad (2)$$

$$X_g = X_g^0 + \frac{F_d}{\eta} \quad (3)$$

$$\dot{X}_s + \eta X_s = F^k \quad (4)$$

$$X_s^k = \text{odeint}(X_s^{k-1}, t, F^k), t = [0, dT] \quad (5)$$

$$X_s^{k-1} = X_s^k; \dot{X}_s = f(X_s, t, F^k) \quad (6)$$

$$X_d = X_g - X_s; \dot{X}_d = \dot{X}_g - \dot{X}_s \quad (7)$$

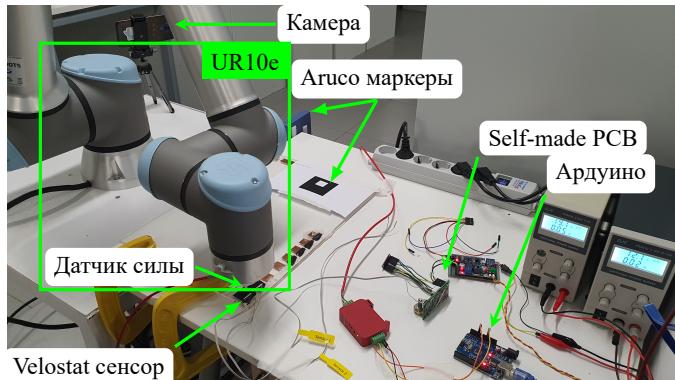
$$X_d = \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$U = \dot{X}_d + K(X_d - X), \quad (9)$$

$$\text{where } X = \text{get\_state}(); \quad (10)$$

$$\text{set\_speed}(U) \quad (11)$$

На рисунке ниже (Рис. 11) представлен результат работы алгоритма на частоте 450 Hz. Необходимая сила нажатия — 17 H.



а) Общий вид экспериментального стенда



б) Способ нивелировать ошибку по углу с помощью Aruco маркеров

Рис. 9 — Разработанный экспериментальный стенд

## Экспериментальная часть

Было решено провести следующие эксперименты.

- Статический эксперимент.** Цель — определить коэффициенты для мат. модели. Для этого на сенсор кладется известная нагрузка на 60 секунд и собираются данные с преобразователя.
- Динамический эксперимент.** Цель — определить влияние показаний сенсора в зависимости от положения площадки контакта. Для этого преобразователь представляется в виде матрицы  $4 \times 4$ . 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. 106).



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

б) Представление сенсора как  $4 \times 4$  сетка

Рис. 10 — Представление места нажатия инструментом сенсора и сам инструмент

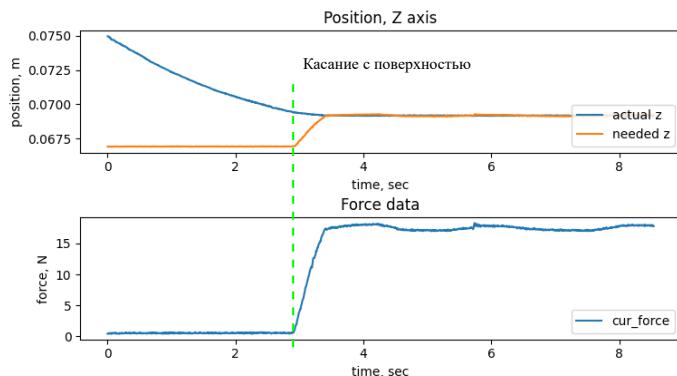


Рис. 11 — Графики зависимости силы и позиции по  $z$  от времени во время эксперимента по исследованию Velostat

Статическим экспериментом проверялась формула (12). Из-за гистерезиса необходимо учитывать время нажатия на объект.

$$V_{out} = V_0 + p[k_p + k_e(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_{res}}})](1 - e^{-\frac{A}{p}}) \quad (12)$$

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (13)$$

где,  $V_0$  - начальное напряжение,  $p$ ,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $\tau_{res}$ ,  $k_i$  - настраиваемые константы,  $t$  - текущее время,  $t_0$  - время начала нажатия. Для решения задачи регрессии использовался робастный нелинейный алгоритм наименьших квадратов. Результат представлен ниже (Рис. 12).

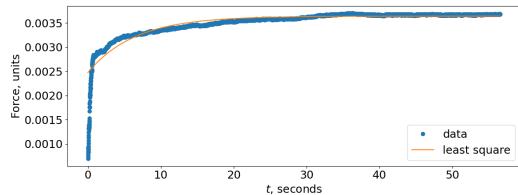
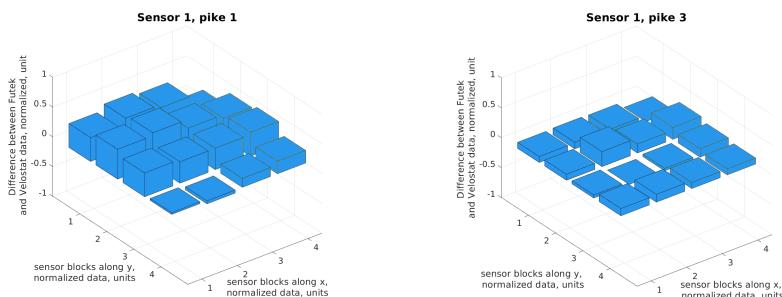


Рис. 12 — Результаты статического эксперимента

Ниже (Рис. 13) 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 13а показаны ошибки для концевого эффектора диаметром 2 мм, а на рисунке 13б — для концевого эффектора диаметром 8 мм.

Можно заметить, что в 13б максимальная разница между Futek и Velostat не более 0.2 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. 13 — Динамический эксперимент

## Вывод

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

## Разработка метода чувствования

### Построение карты поверхности

Традиционно, карта для навигации представляется в виде облаков 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 аппроксимировать это расстояние в виде плоскости.

Так же, сделав предположение про то, что робот движется по поверхности, где координата  $z$  уникальная для каждого набора  $(x,y)$ . Возможно реализовать следующий алгоритм. Вначале необходимо очистить оригинальное облако точек от шумов и усреднить близлежащие точки с помощью Voxel grid. Потом из него создаем полигональную сетку с помощью 2D Триангуляции Делоне (Рис. 14) (вогнутая оболочка (Рис. 17)), а потом генерируем необходимое плотное облако точек (Рис. 16в).

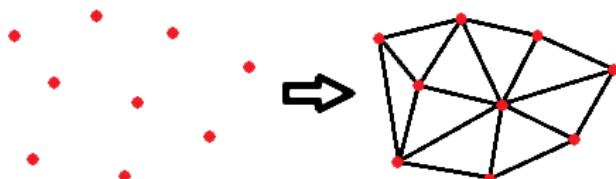
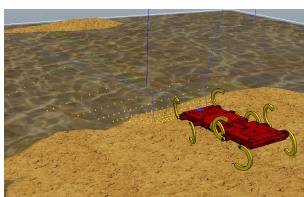
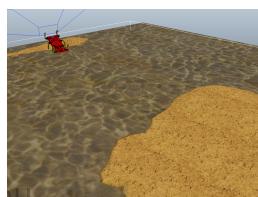


Рис. 14 — 2D Триангуляция Делоне (выпуклая оболочка)

Реализованный алгоритм проверялся, как в симуляции (Рис. 1, 15), так и на реальном роботе (Рис. 19) ([видео](#)).



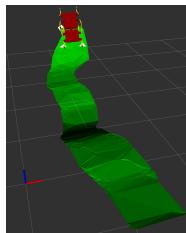
а) Начало движения



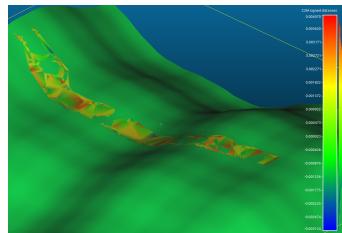
б) Конец движения

Рис. 15 — Эксперимент в симуляторе

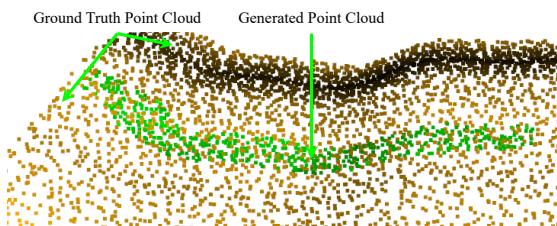
Ниже представлены полученные результаты (Рис. 16). Для оценки точности полученных данных было решено использовать 2 метрики C2C и C2M (Рис. 18).



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



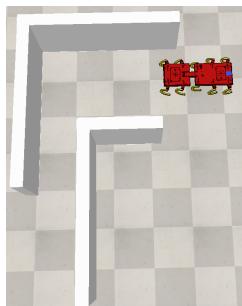
б) Наложенные полигональные сетки



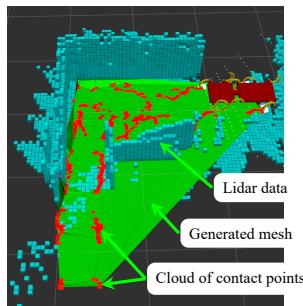
в) Наложенные облака точек

Рис. 16 — Результат эксперимента

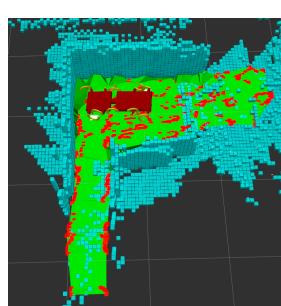
На рисунке 17 объясняется важность модификации триангуляции Делоне. Как можно заметить (Рис. 17б) алгоритм построил карту местности там, где робот не ходил и стоит стена. При использовании вогнутой оболочки (Рис. 17в) данная проблема не наблюдается.



а) Пример поля

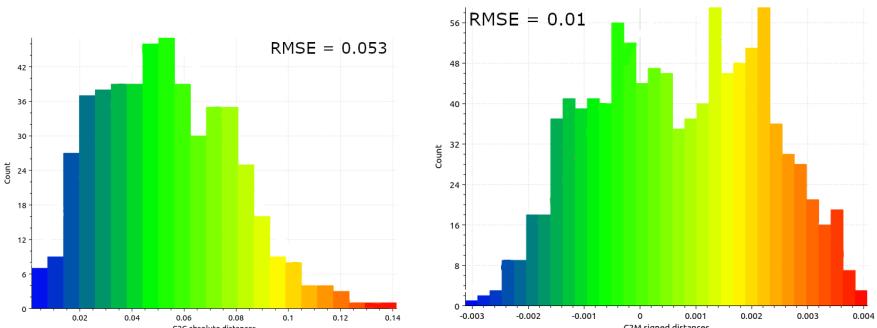


б) Выпуклая оболочка



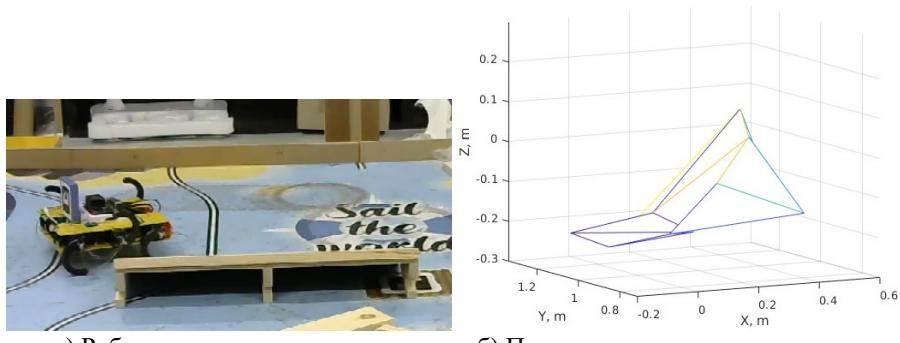
в) Вогнутая оболочка

Рис. 17 — Объяснение необходимости модификации алгоритма Делоне



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. 18 — Метрики оценки точности полученной карты



а) Робот проходит препятствие      б) Полученная полигональная сетка

Рис. 19 — Пример натурного эксперимента

Как итог,  $RMSE$  для С2С метрики была в среднем равна 5 см. А для С2М 1 см. В натурном эксперименте  $RMSE$  по метрике С2С получился 8 см. Это адекватные результаты, которые позволяют получить общее представление о пройденной местности.

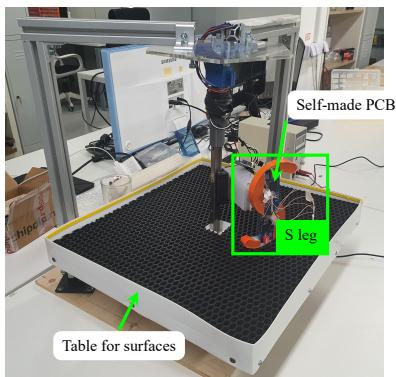
## Определение типа поверхности

Задачу определения типа поверхности можно определить следующим образом. Робот идет по поверхности, и собирает данные с разных сенсоров. На

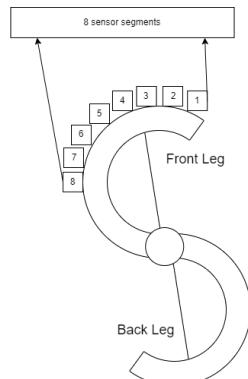
основе предварительного обучения, данные превращаются в нужный вид и кластеризуются, на основе предварительно определенной базе знаний территорий.

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

Все это было достигнуто благодаря разборному экспериментальному столу и 2ух степенному механизму, который ходит по окружности (Рис. 20a). Для бесконечного движения пришлось соединить две ноги робота в одну. На рисунке ниже (Рис. 20б) показаны как установлены сенсоры на получившейся ноге.



а) Общий вид экспериментальной установки



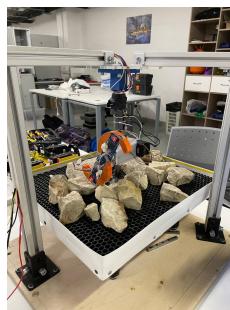
б) Пояснение по расположению сенсоров на ноге робота

Рис. 20 — Экспериментальная установка для определения типа поверхности

Для начала было решено взять 2 сильно разных поверхности и посмотреть на сырье данные. Было решено использовать резину (Рис. 21а) и камень (Рис. 21б). [Видео прохождения по резине, по камню.](#)



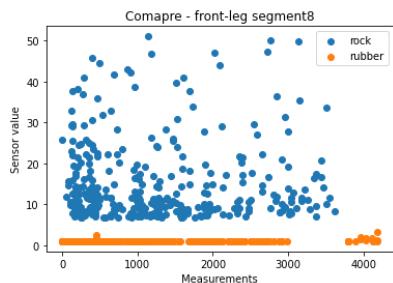
а) Резина



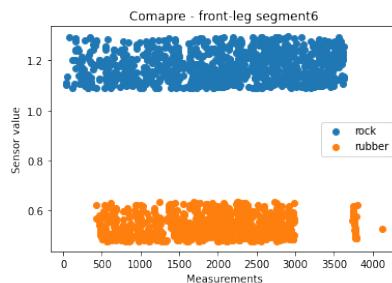
б) Каменистая поверхность

Рис. 21 — Типы определяемых поверхностей

Ниже (Рис. 22) 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. 22 — Сравнение сырых данных после эксперимента с разных сегментов ноги

## Выводы

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

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

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

## **Заключение**

Основной научный результат диссертации заключается в решении актуальной научной задачи, имеющей важное практическое значение: разработка метода тактильного чувствования для мобильного шагающего робота в закрытых пространствах естественного или искусственного происхождения.

При проведении исследований и разработок в диссертационной работе получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. метод оптимизации конструкции многоногих роботов;
2. разработанная методика исследования датчика силы, когда площадь нажатия на сенсор меньше самого сенсора;
3. реализация программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего определять тип поверхности;
4. методика построения карты местности с помощью датчиков силы, установленных на ногах робота.

**Доказана** возможность построения карты местности и определения типа поверхности с помощью тактильного чувствования 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.

**Предленено** использовать преобразователь силы на основе полимерного материала Velostat. **Установлено**, что данный преобразователь можно рассматривать как единое тело, при площади нажатия больше 50% площади сенсора.

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

## **Публикации автора по теме диссертации**

### **В изданиях из списка ВАК РФ**

1. *Буличев, О. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА СИЛЫ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА "VELOSTAT" ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА* [Текст] / О. В. Буличев, К. В. Полёткин, А. В. Малолетов // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2022. — № 4. — С. 6–12. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48268534>.

### **В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus**

1. *Bulichev, O. Concept Development Of Biomimetic Centipede Robot StriRus* [Text] / O. Bulichev, A. Klimchik // 2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT) (2018 23rd Conference of Open Innovations Association (FRUCT)). — Bologna : IEEE, 11/2018. — P. 85—90. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8587914/> (visited on 04/20/2021).

2. *Bulichev, O.* Optimization of Centipede Robot Body Designs through Evolutionary Algorithms and Multiple Rough Terrains Simulation [Text] / O. Bulichev, A. Klimchik, N. Mavridis // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)). — Macau : IEEE, 12/2017. — P. 290—295. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8324432/> (visited on 04/20/2021).
3. *Sokolov, M.* Analysis of ROS-based Visual and Lidar Odometry for a Teleoperated Crawler-type Robot in Indoor Environment: [Text] / M. Sokolov, O. Bulichev, I. Afanasyev // Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics). — Madrid, Spain : SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2017. — P. 316—321. — URL: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006420603160321> (visited on 04/20/2021).

### **Зарегистрированные программы для ЭВМ**

1. Программа Обучения Робота Шаговым Движениям [Текст] : пат. 2019661399 Russia / O. Bulichev ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 28.08.2019.
2. Программа Ориентации Шагающего Робота Стрирус в Условиях Плохой Видимости [Текст] : пат. 2019665262 Russia / O. Bulichev, D. Burakov ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 21.11.2019.
3. Программа Планирования Траектории Движения Ног Двенадцатиного Робота с Использованием Фреймворка ROS [Текст] : пат. 2020665488 Russia / O. Bulichev ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 27.11.2020.
4. Программа Подбора Кинематических Параметров у Шагающих Роботов [Текст] : пат. 2019660557 Russia / O. Bulichev ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 07.08.2019.
5. Программа Позиционирования и Стабилизации Камеры Для Шагающего Робота Стрирус [Текст] : пат. 2019665435 Russia / O. Bulichev, D. Burakov ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 22.11.2019.
6. Программа Управления Звеньями Шагающего Двенадцатиного Робота с Помощью Геймпада в Робототехническом Симуляторе Ignition [Текст] : пат. 2020665643 Russia / O. Bulichev, A. Akhmetshin ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — Заявл. 27.11.2020.

7. Программа Построения 3D - Карты Местности С Помощью Многоногого Биомиметического Шагающего Робота С Использованием Фреймворка ROS [Текст] / O. Bulichev ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — URL: <https://elibRARY.ru/item.asp?id=47783599>.
8. Программа Управления Экспериментальным Стендом Для Автоматизации Проверки Датчиков Очуствления [Текст] / O. Bulichev ; Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис» (RU). — URL: <https://elibRARY.ru/item.asp?id=47783681>.

**Другие публикации – 9 шт.**