



Разработка метода тактильного очувствления для мобильного шагающего робота

Соискатель: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов



Исследование пещер

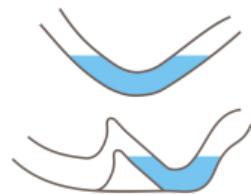
Назначение — геологоразведка, изучение подземных экосистем

Непроходимые места для человека

- Узкие галереи, огромные пропасти, обвалы, сифоны
- Скопление угарного газа
- Потеря ориентации в пространстве



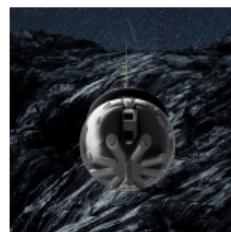
Завал



Сифоны

Организации, исследующие пещеры

1. Ученые — Горный институт Уральского отделения РАН, Университет Минас-Жерайса, Фонд Бруно Кесслера
2. Космические агентства — ESTEC (DAEDALUS), Роскосмос (FEDOR), NASA (CADRE)
3. Военные — Darpa Subterranean Challenge



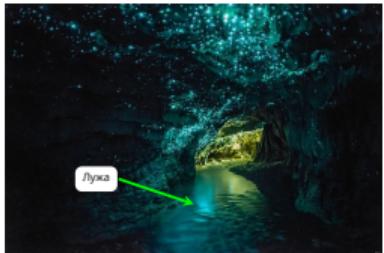
DAEDALUS для
исследования
пещер на луне



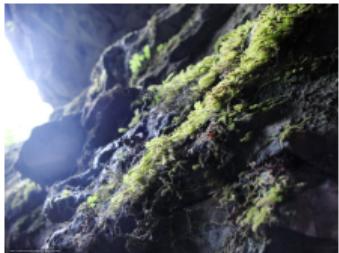
DARPA
Subterranean
Challenge



Характеристики пещер



(a) Малый водоем



(b) Мох

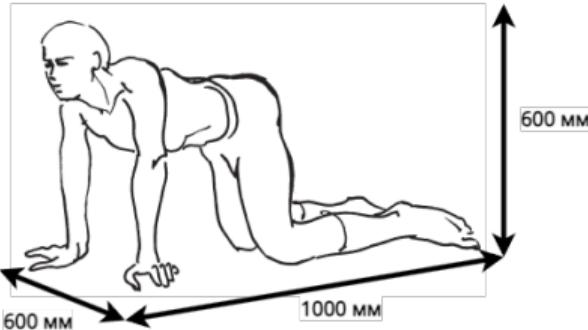


(c) Твердые породы

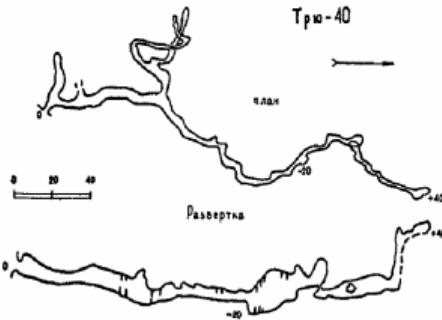


(d) Грунт

Типы опорных поверхностей



Габариты пещеры (Свободная узость)



Протяженность пещер: 1-2 км

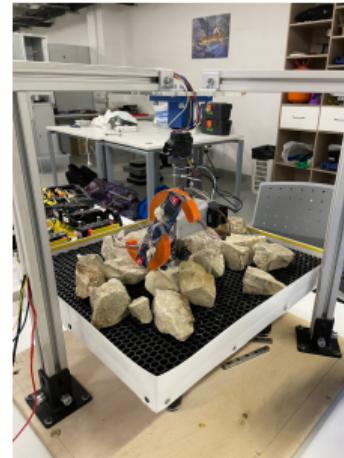


Цель работы

Разработать метод построения карты местности с определением геометрических и физико-механических свойств опорной поверхности роботом с шагающими двигателями снабженными тактильными датчиками, без использования оптических сенсоров.



Определение геометрических свойств



Определение физических свойств

Построение рельефа местности

"4" Геометрические свойства:

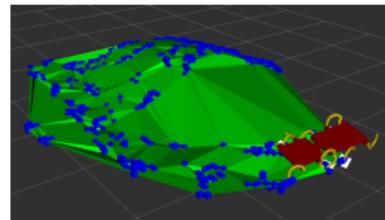
Входные данные: следовая дорожка, представленная в виде облака точек.

Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек.

Допустимая точность: 0.1 м



Исследуемая поверхность



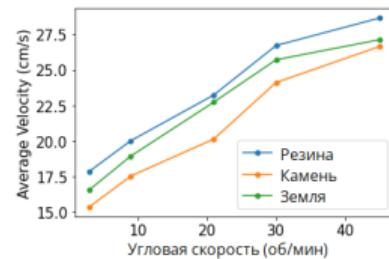
Следовая дорожка и полигональная сетка

"3" Физико-механические свойства:

Входные данные: данные с внутренних датчиков робота.

Выходные данные: процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности.

Допустимая ошибка: 20%



Данные для обучения Пример поверхности



Основные научные задачи исследования

1. Разработка метода **оптимизации конструкции многоногих шагающих роботов с цикловыми двигателями** с одной степенью свободы по критериям проходимости, покрытия опорной поверхности и её детализации, длины пройденного пути.
2. Создание методики **исследования датчика силы**, когда площадь контакта нажатия на сенсор меньше чувствительной области самого сенсора.
3. Реализация алгоритма, позволяющего **определять физические свойства опорной поверхности**.
4. Разработка метода **построения карты местности и определения геометрических свойств поверхности** с помощью тактильного ощущения.



Положения, выносимые на защиту

1. 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.
2. Зависимость погрешности датчика силы на основе полимерного материала от площади пятна контакта относительно размеров датчика, применяемого для тактильного очуствления мобильного робота. Методика роботизированного исследования датчика силы.
3. Метод определения физико-механических свойств опорной поверхности на основе тактильного очуствления, позволяющий различать материалы с упругими, жёсткими, пластичными свойствами.
4. Метод построения карты местности, состоящий в определении геометрической формы поверхности с помощью тактильного очуствления, который позволяет решать задачу определения плана и профиля поверхности в условиях отсутствия видимости и при движении по поверхности, находящейся под водой.



Объект исследования

Класс многоногих шагающих роботов с

а) Цельным или сочленённым корпусом

б) Цикловыми движителями с
одной степенью свободы, управляемые
зависимо или независимо друг от друга.

Требования:

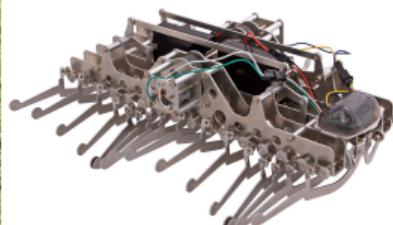
- Компактные размеры (меньше чем $1000 \times 600 \times 600$ мм)
- Залезать на препятствия высотой не меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса
- Преодолевать представленные опорные поверхности



WHegs



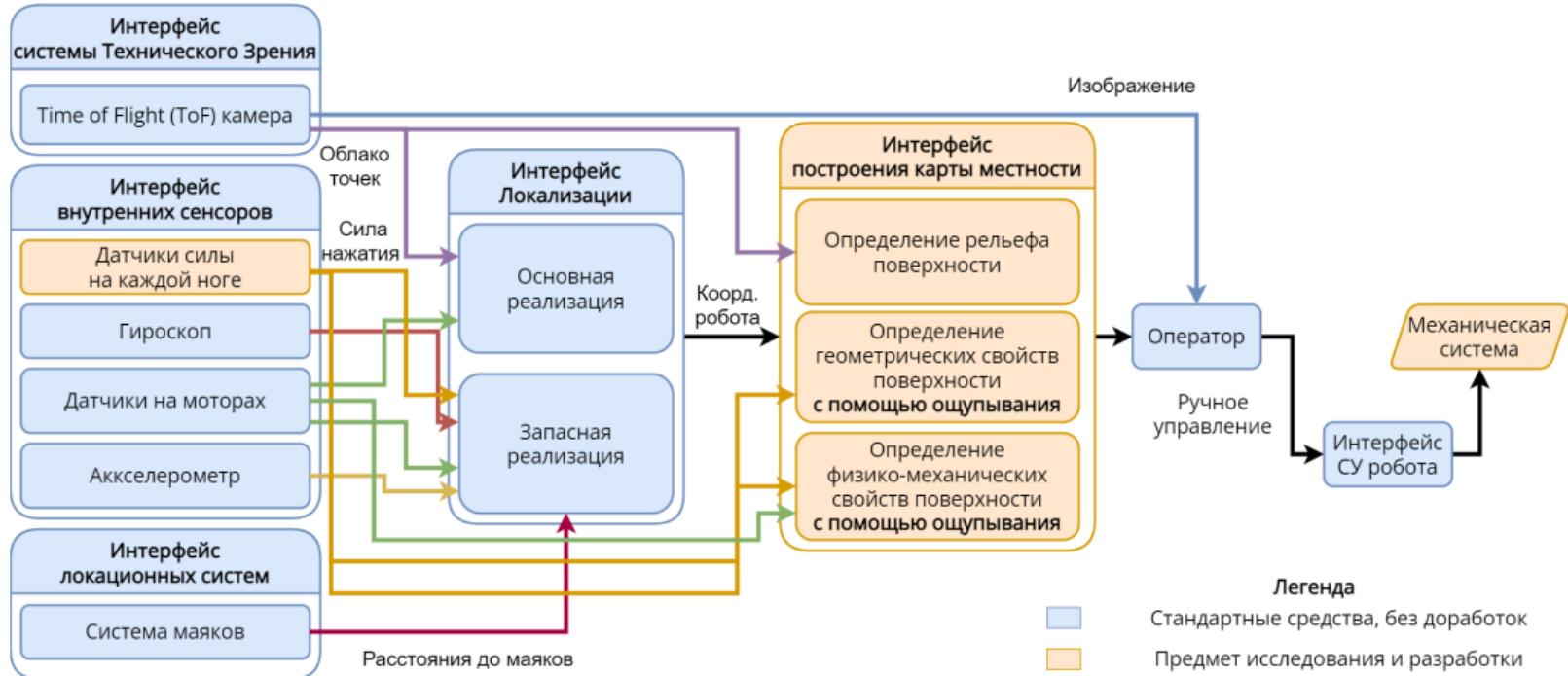
Boston Dynamics RHex



Gakken Centipede



Структура робота





Обзор источников

- **Задача оптимизации конструкции:** Б. Петриашвили (СССР), Stefano Nolfi (Италия), Dario Sanch-Pradel (Италия), S. Feng (США) и др.
- **Шагающие цикловые роботы:** Е. С. Брискин (Россия), Ю. Д. Андриантов (СССР), Edward Z. Moore (Канада), Wei-Hsi Chen (Китай) и др.
- **Верификация Velostat:** Igor Vehec (Словакия), Robert Schroer (США) и др.
- **Определение геометрических свойств поверхности:** Tobias Ebert (Германия), Subodh Kumar (США), И. Рядчиков (Россия), Shan Luo (Британия) и др.
- **Определение физико-механических свойств поверхности:** X. Alice Wu (США), Krzysztof Walas (Польша), Hendrik Kolenbach (Швейцария) и др.

"1" Оптимизация кинематической схемы

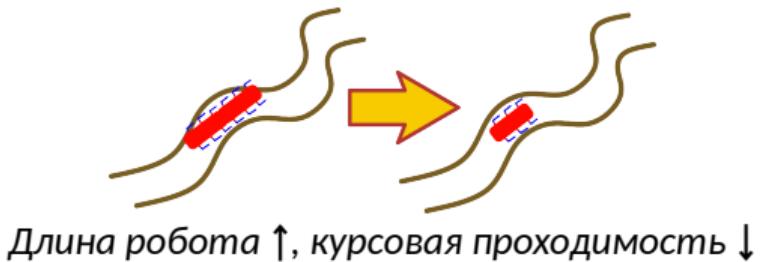
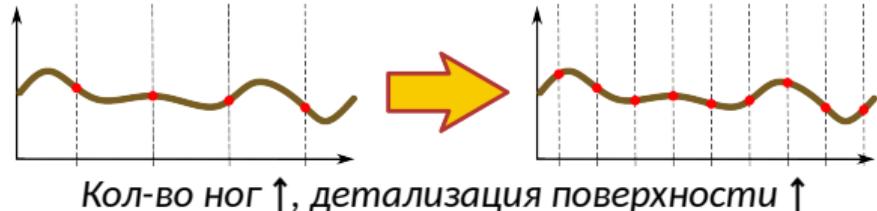
Решить задачу оптимизации

$$F = f(x) \rightarrow \max, \text{ где}$$

$f(x)$ — критерии: пройденная дистанция, длина корпуса

(x) — параметры: **количество ног**, сдвиг фазы между соседними ногами

Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.





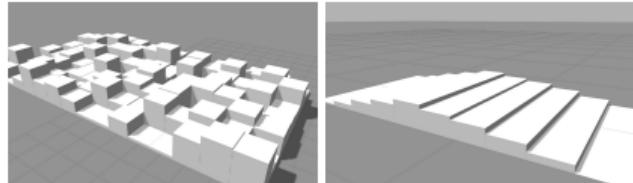
Определение количества ног

Метод решения: Генетический алгоритм: Open AI-ES

Алгоритм: генерируется множество особей, а также семейство территорий с одинаковой сложностью. За фиксированное время, с постоянной угловой скоростью на моторах, каждый робот проходит это семейство территорий и записываются данные.

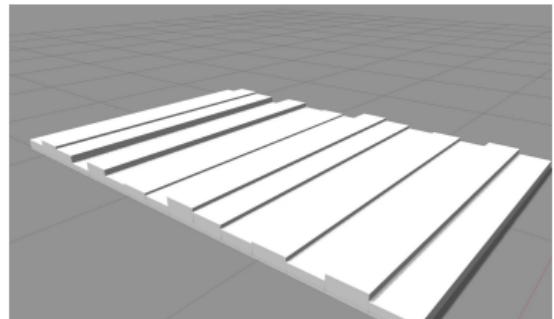
Предположения: 1) есть только сухое трение между ногами и поверхностью. 2) Созданные поверхности с помощью одной функции и параметров имеют одинаковую сложность.

Утверждение: Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.



Равномерное
распределение
ячеек

Гауссово
распределение
ячеек





Описание механической системы

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

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

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

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

где, M_i — матрица массово-инерционных характеристик; m_i — масса тела; I_i — тензор инерции; \ddot{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.



Наложенные связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

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

$$\vec{q}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{x}_i^T & \vec{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

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

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

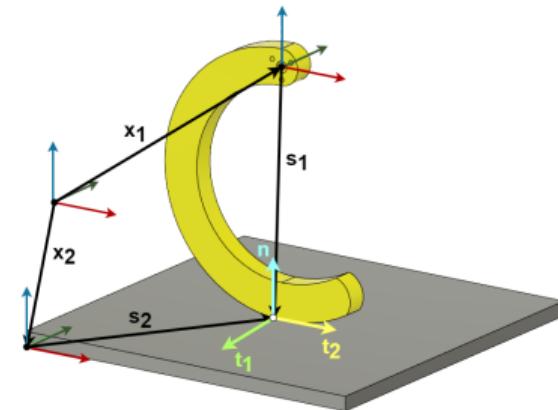
Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

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

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

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

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; $f_{1,2}$ — значения сил трения вдоль осей $t_{1,2}$.



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

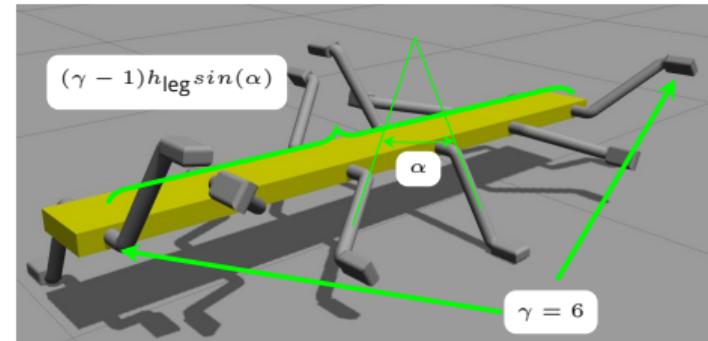


Целевая функция

$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2} \quad (13)$$

$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \quad (14)$$

Где β – адаптивный параметр,
 $\omega_{1,2} \in [0..1]$ – весовые коэффициенты,
 δ – пройденный путь,
 L – упрощенная длина робота

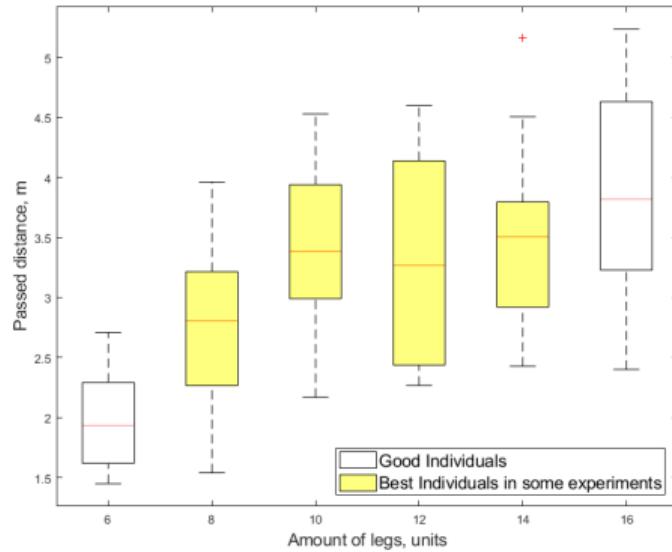


Геометрическое представление особи



Закономерность

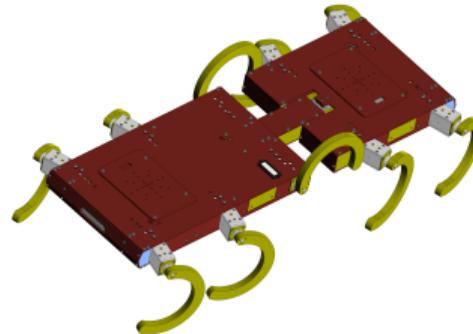
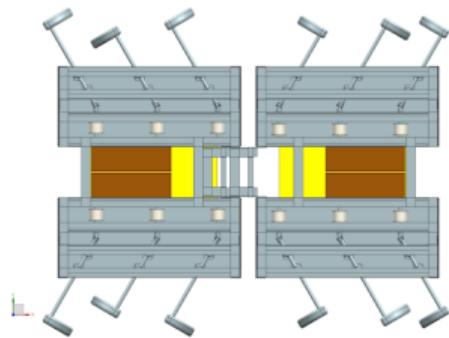
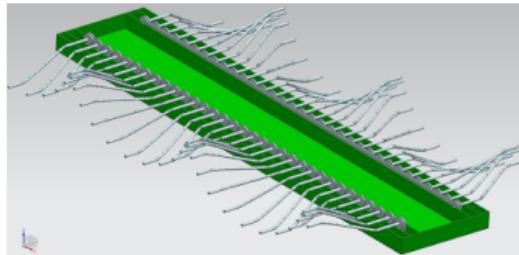
Лучшие роботы в экспериментах начинались с 10 до 14 ног для различных значений ω . Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касаются поверхности.



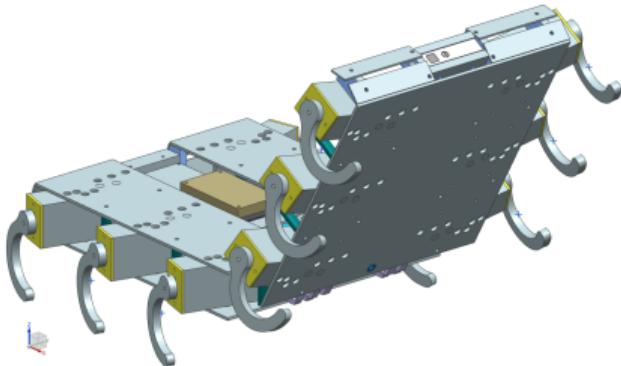
Зависимость между кол-вом ног и
пройденной дистанцией



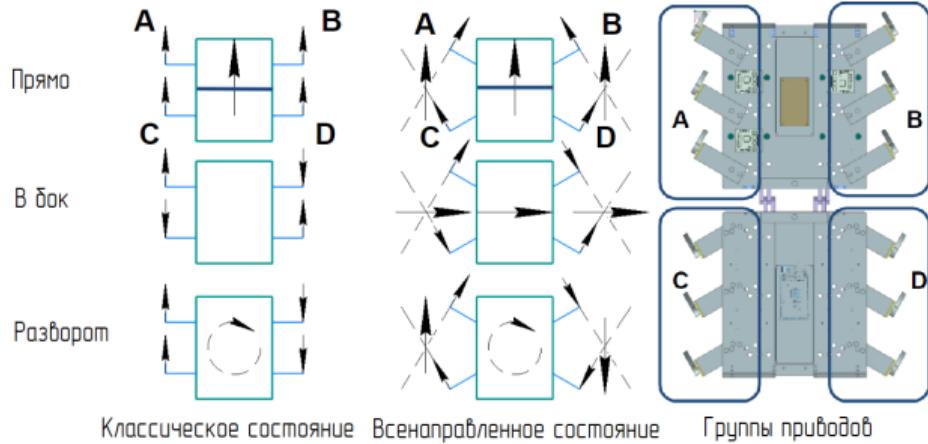
Прототипы робота



Особенности конструкции



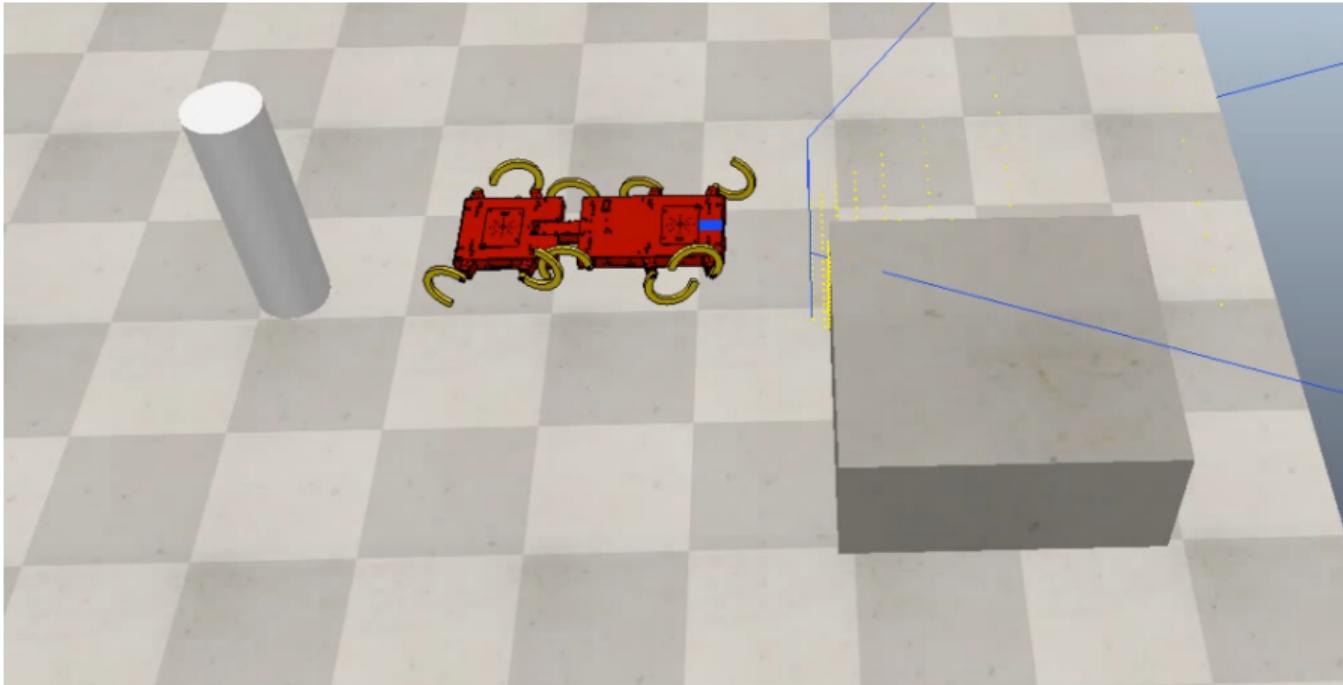
*Одноступенчатый активный сегмент,
соединяющий 2 части робота*



*Векторное представление сил в обычном и
всенаправленном состояниях*



Четвертая итерация робота



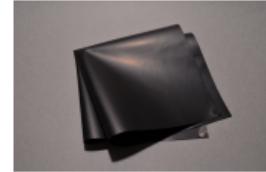
"2" Верификация преобразователя силы

Измерить характеристики материала для случаев,
когда площадь приложения силы меньше, чем
площадь активной части сенсора.

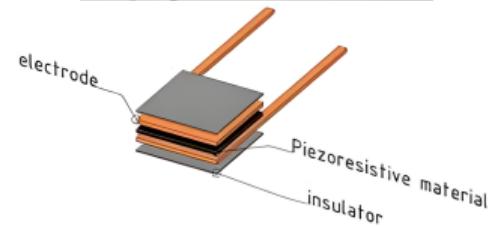
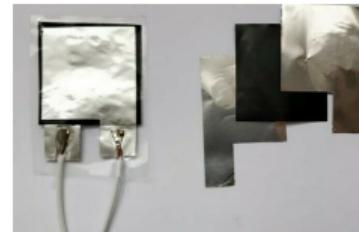
Входные данные: показания разработанного датчика и
значение реально приложенной нагрузки.

Выходные данные: разница между нормализованным
значением с датчика и реальной нагрузкой.

Допустимая ошибка: 10%



Материал Velostat



Преобразователь силы

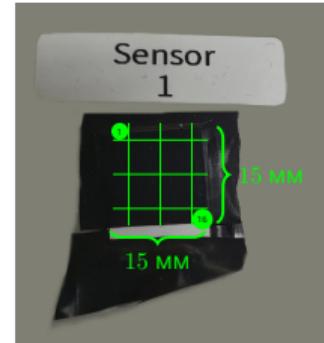


Верификация преобразователя силы

Алгоритм: 2 эксперимента:

1. Статический — прикладывается статический груз с размером в сенсор для калибровки.
2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки 4×4 . Происходит **касание** каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.

Предположения: 1) материал обладает вязко-эластичными свойствами, поэтому надо учитывать гистерезис.



Поверхность
как 4×4 сетка



Все насадки



Статический эксперимент

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

$$k_p = A_1 e^{-A_2 p} \quad (16)$$

$$\tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}} \quad (17)$$

Где V_0 – начальное напряжение,

p – приложенное давление,

A_i , B_i , τ_{res} , k_i искомые параметры,

t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.

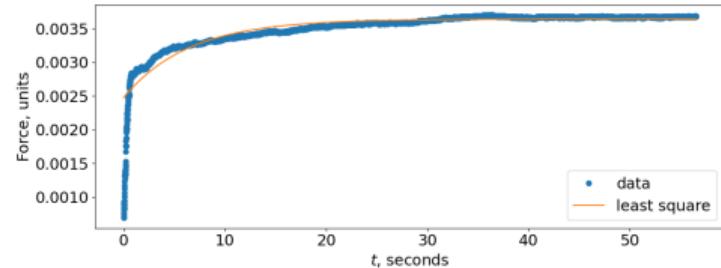
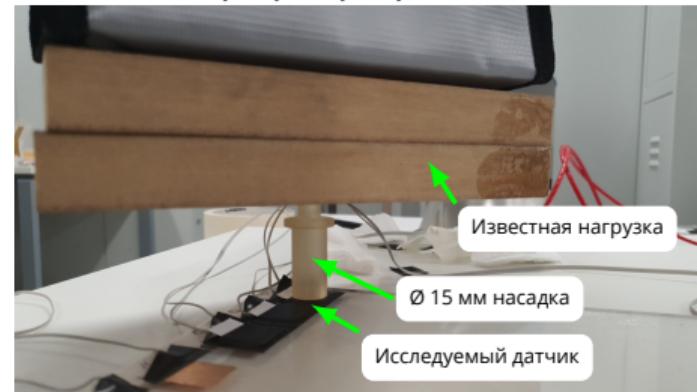


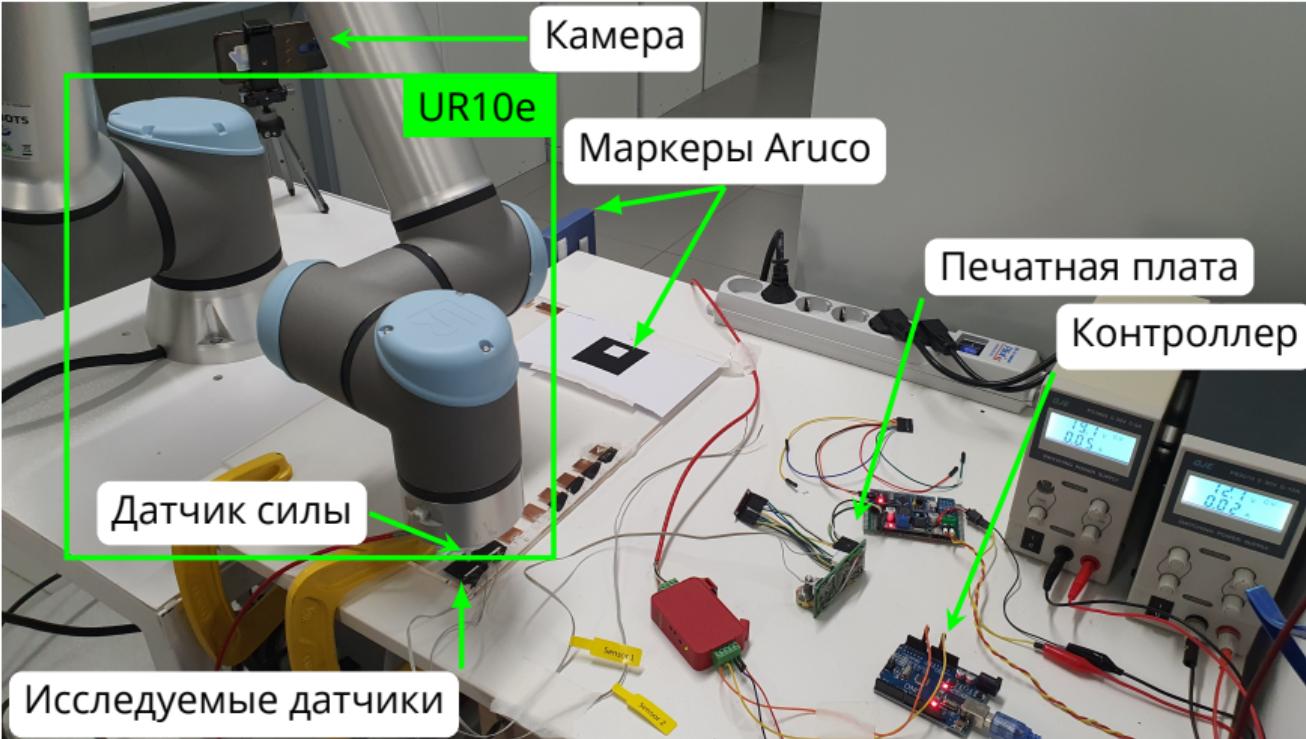
График регрессии



Экспериментальная установка

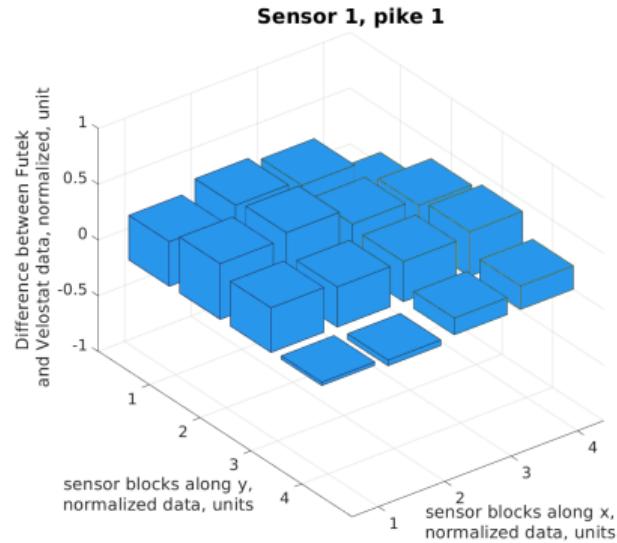


Динамический эксперимент: Установка

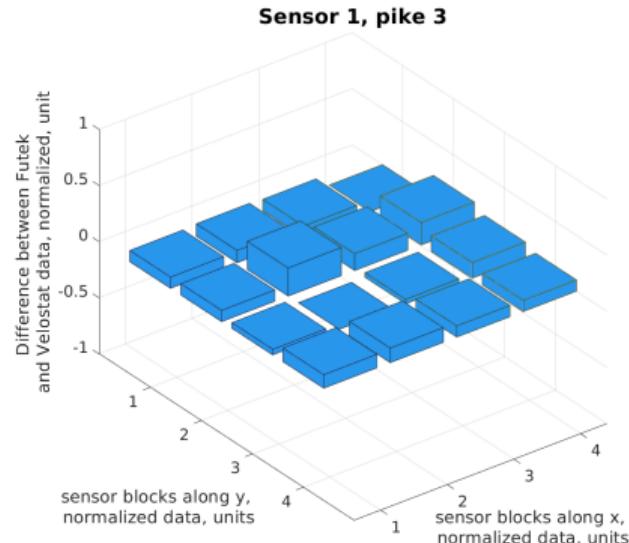




Результаты динамического эксперимента



2 мм диаметр насадки



8 мм диаметр насадки

Однаковые данные, когда площадь нажатия превышает 25% от площади датчика



"3" Определение физико-механических свойств

Определить процентное соотношение твердых, упругих и пластичных свойств пройденной поверхности

Метод решения: машинное обучение, Метод Опорных Векторов (SVM)

Алгоритм: Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Модель обучается на 80% данных с помощью ядра PUK7. Тестирование: происходит на оставшихся 20%. Используются **метрики** меткости, точности, полноты и F1-счета.

Входные данные: данные с внутренних датчиков робота

Выходные данные: процентное соотношение упругих, твердых и пластичных свойств пройденной поверхности

Допустимая ошибка: 20% - точность

Предположения: 1) На рисунке.

	Упругая	Твердая	Пластичная
Установка			
Пещера			



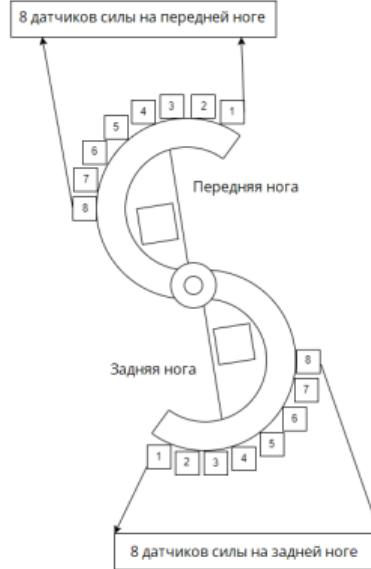
Стенд



Установка



Нога робота с
установленными сенсорами



Схематическое
распределение сенсоров на
ноге



Метод опорных векторов

$$f(x) = w^T x + b$$

(18) Ядро на основе функции Пирсона VII:

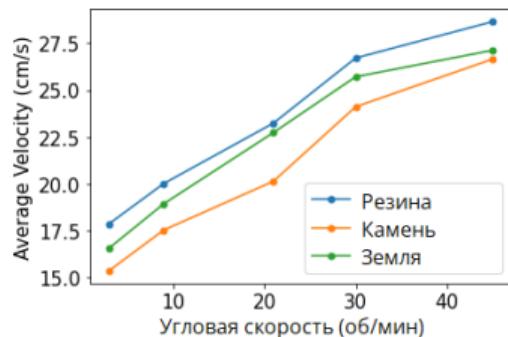
$$K(x, y) = (1 + ((|x - y|^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (19)$$

где w — весовой вектор, b — смещение,
 x — **входной вектор**:

(1) Частота движения ног

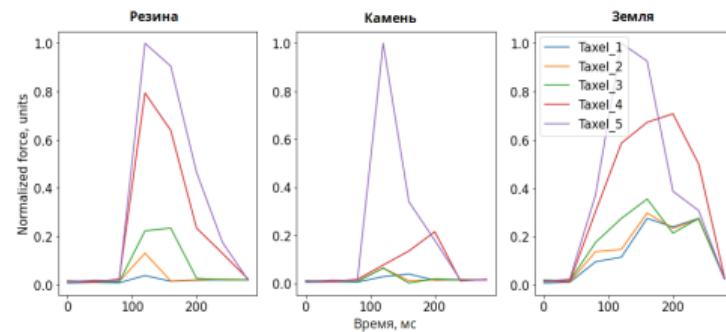
(2-12) Данные с датчика силы

(13-16) Данные крутящего момента двигателя



Зависимость угловой скорости от
линейного перемещения

Где x, y — векторы во входном пространстве,
 $\|x - y\|$ — евклидово расстояние между x и y , σ —
масштабный параметр; ω — это параметр формы.



Распределение силы нажатия на каждый
сенсор



Результаты

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

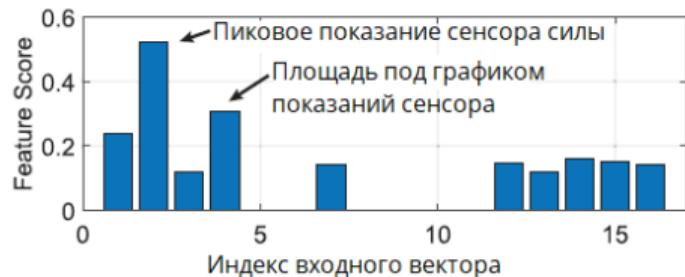
Таблица: Результаты обученного классификатора опорных поверхностей

Камень — эталон твердых свойств

поверхности;

Резина — эталон упругих свойств;

Земля — эталон пластичных свойств.



Гистограмма влияния входных данных на результат предсказания



"4" Определение геометрических свойств

С помощью **ощупывания** роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Метод решения: Триангуляция Делоне с использованием альфа формы

Алгоритм: Решив задачу локализации, получить облако точек следовой дорожки. **Очистить шумное облако точек и его усреднить** с помощью Voxel Grid. Применить триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек,

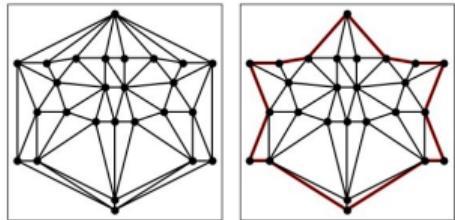
получив полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

Входные данные: следовая дорожка, в виде облака точек.

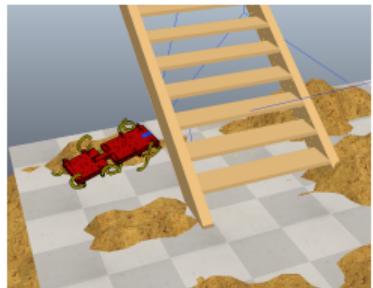
Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек

Допустимая точность: 0.1 м, оценки Cloud2Cloud и Cloud2Mesh

Предположения: 1) Имеется поверхность. Координаты задаются $z = f(x, y)$. 2) Расстояние между ногами робота мало относительно размеров поверхности, следовательно, поверхность между ногами считается плоскостью.

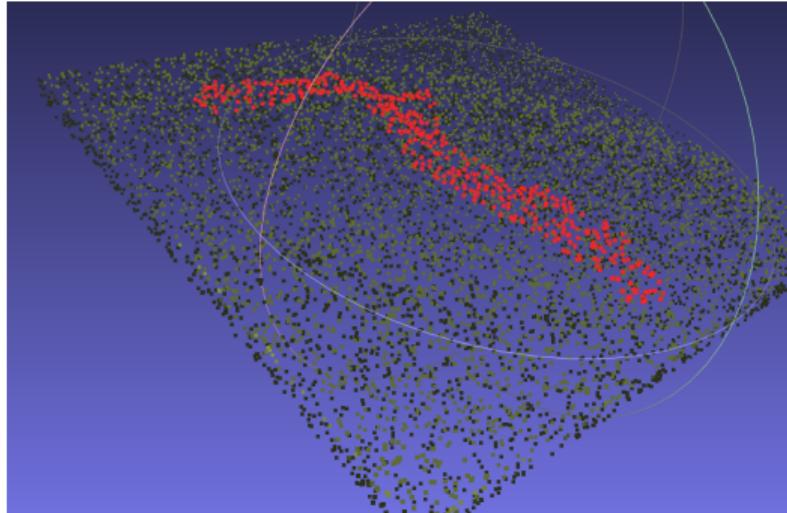


Триангуляция Делоне

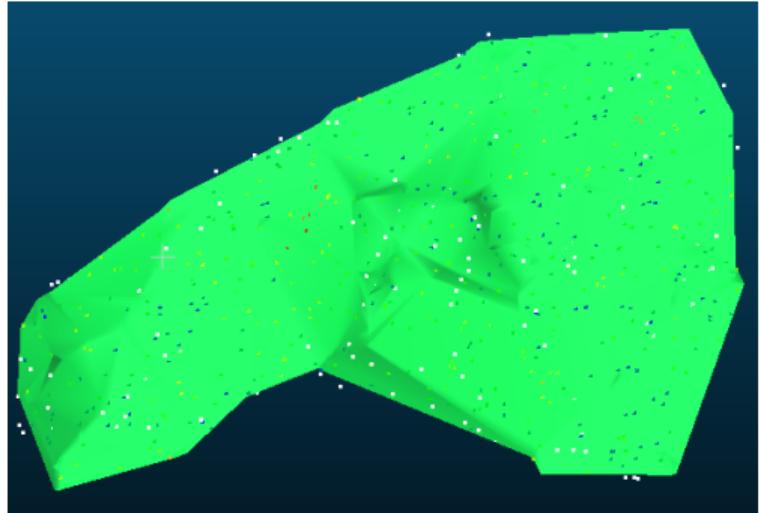


Когда $z \neq f(x, y)$

Оценки C2C и C2M



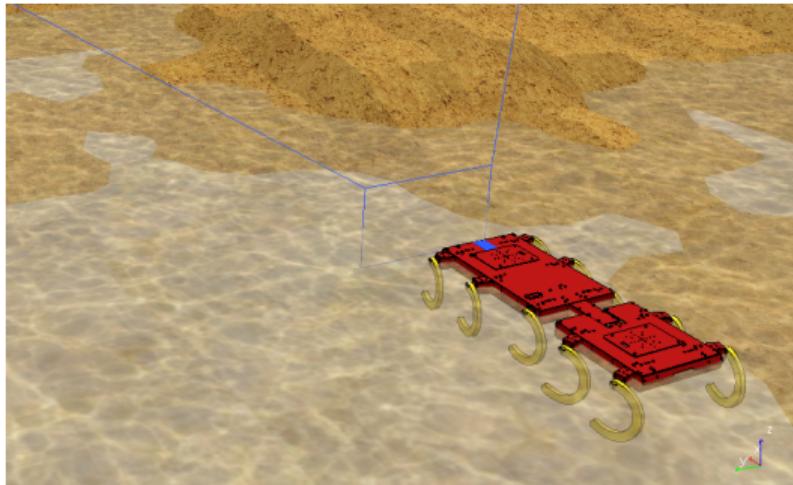
Cloud to Cloud: высчитывается абсолютное
расстояние до ближайшей соседней точки



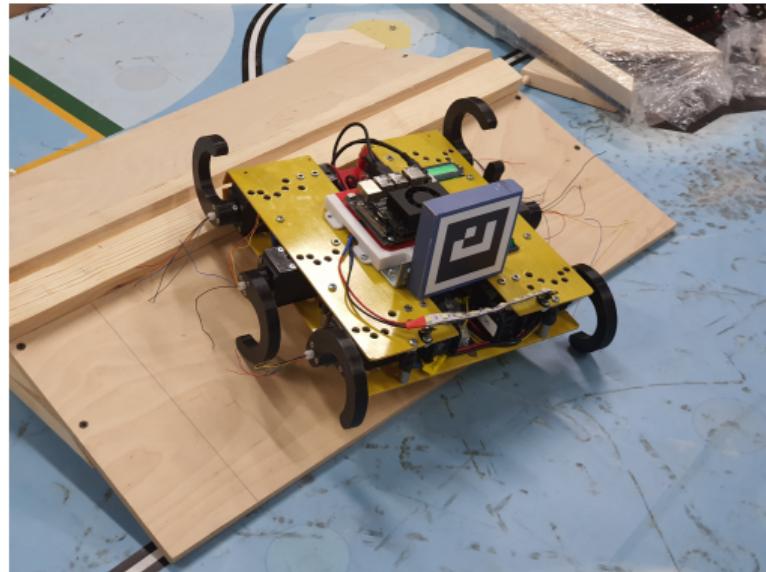
Cloud to Mesh: высчитывается расстояние с
учетом знания о векторе нормали
плоскости



Эксперименты



CoppeliaSim симулятор,
4е поколение СтриРус



Натурные испытания,
Зе+ поколение СтриРус

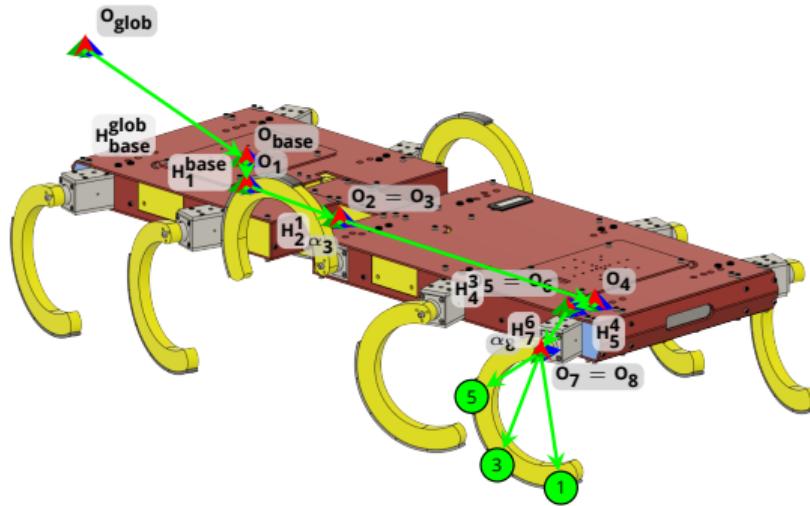


Задача локализации

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

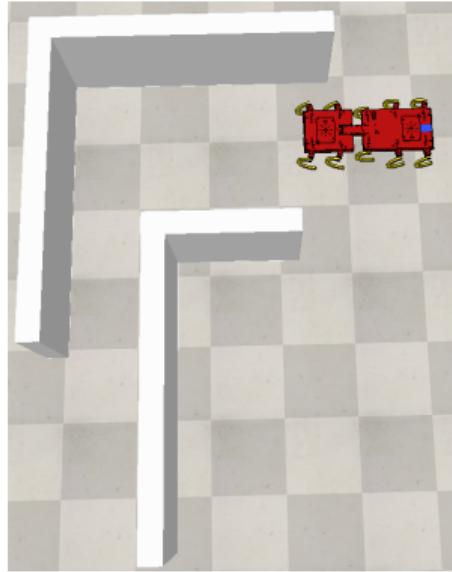
(20)

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

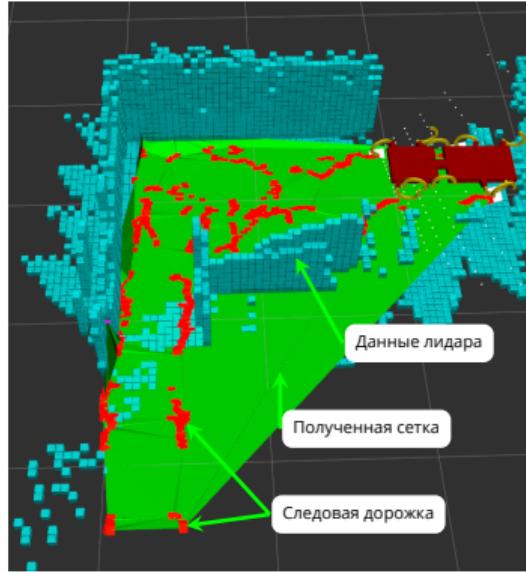




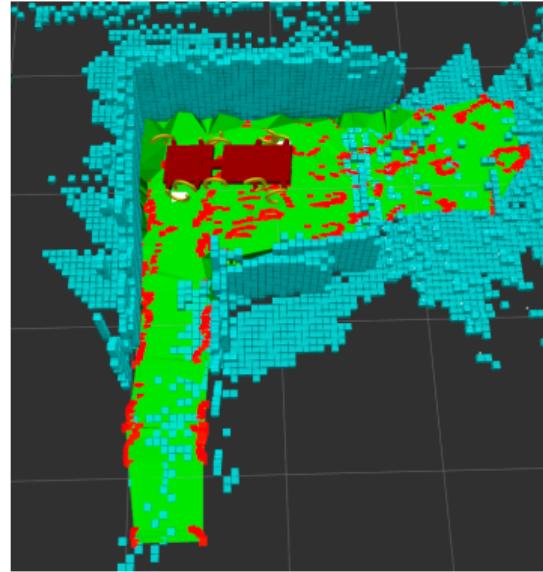
Триангуляция Делоне для вогнутых оболочек



Пример поверхности



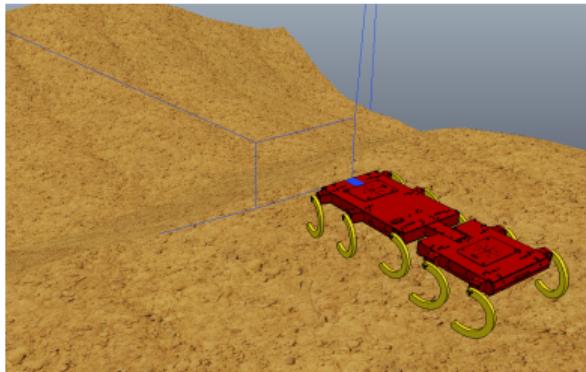
Выпуклая оболочка



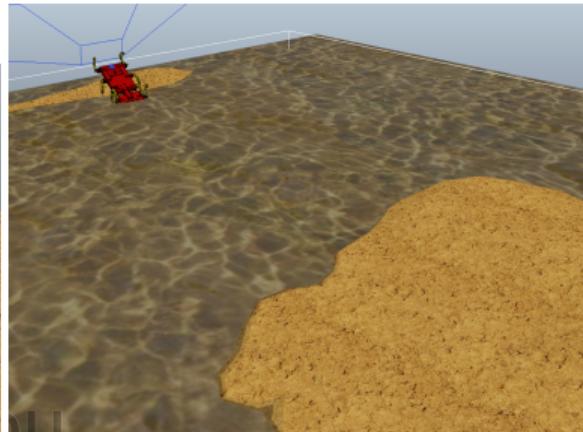
Вогнутая оболочка



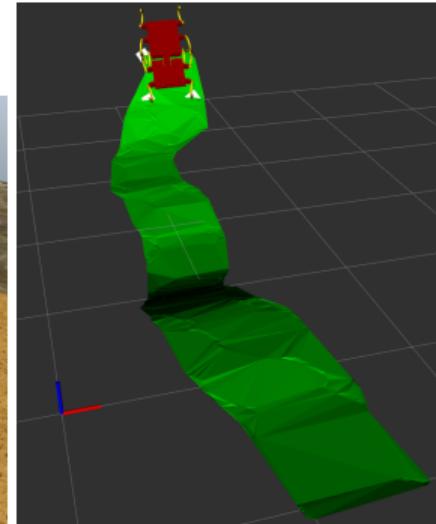
Симуляция: Пример опорной поверхности



Начало маршрута



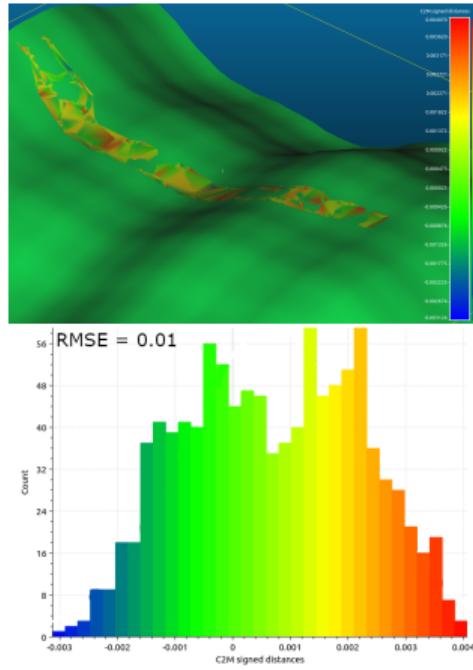
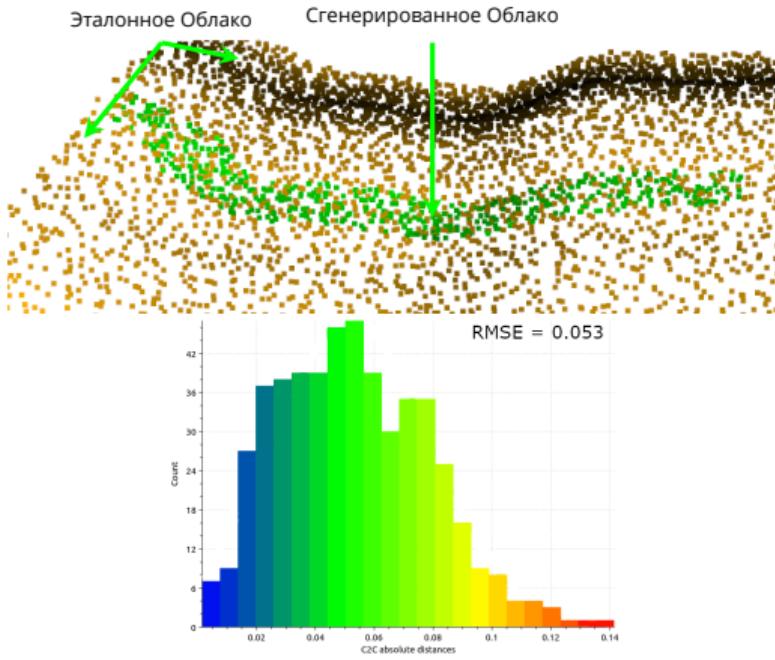
Конец маршрута



Созданная сетка

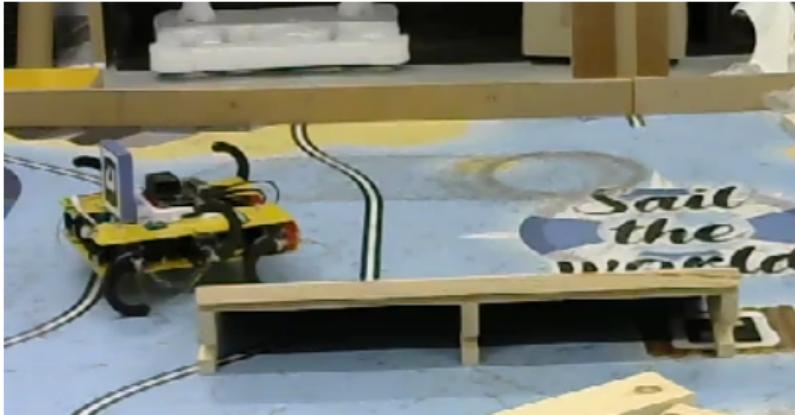


Симуляция: Результат C2C и C2M критериев

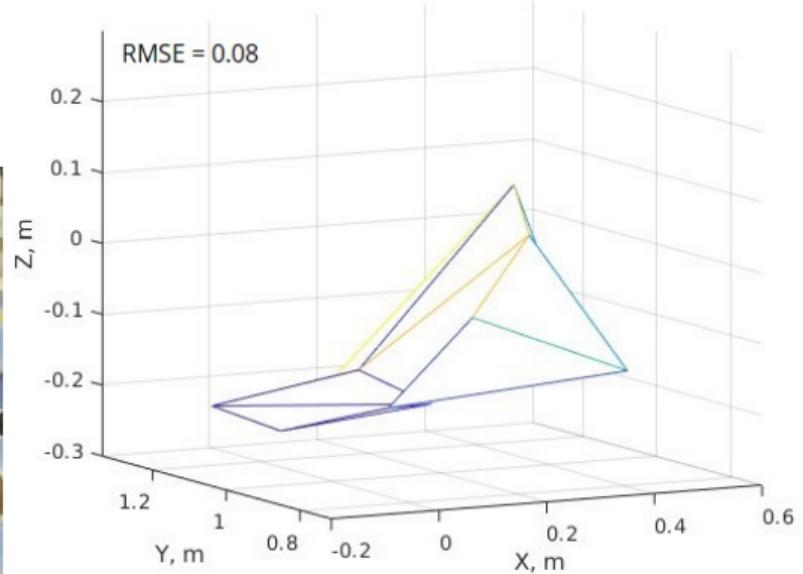




Натурные испытания: Пример и результат



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ощупывания опорной поверхности



Результаты

Научные задачи (научная новизна)

1. Метод подбора количества ног для шагающих цикловых движителей.
2. Методика характеризации датчика, когда площадь касания нагрузки меньше, чем размеры датчика.
3. Алгоритмы калибровки и определения физических свойств поверхности.
4. Метод определения геометрических свойств местности.

Экспериментальные разработки

1. Спроектированы и собраны 2 прототипа с Шагающим цикловым движителем с одной степенью свободы в ноге.
2. Разработана и создана экспериментальная установка для автоматизированного исследования датчика силы.
3. Разработана и создана экспериментальная установка для определения типа поверхности.



Публикации

- Количество публикаций
 - 2 — журналы, рекомендованных ВАК
 - 3 — статьи, индексируемые в Scopus
 - 5 — РИНЦ
- 8 — Зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Работа сделана при грантовой поддержке ФСИ, ЦНТИ, РФФИ.



Соответствие паспорту специальности

2.5.4 Робототехника, Роботы, мехатроника и робототехнические системы

1. Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем.

7. Методы экспериментального исследования, создания прототипов и экспериментальных стендов и модульных платформ для разработки роботов, робототехнических и мехатронных систем.

9. Методы расчета и проектирования мехатронных сервоприводов, исполнительных, сенсорных и управляющих компонентов роботов, робототехнических и мехатронных систем.

Спасибо за внимание!