



Разработка метода тактильного ощущения для мобильного шагающего робота

Соискатель: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов



Проблематика

Проблема

Исследование пещер

Обзор, кто смотрел эту проблему



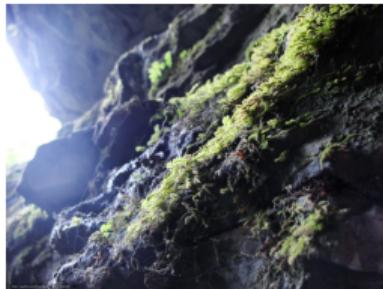
DARPA Subterranean Challenge



Предментная область: Пещеры



(a) Лужа



(b) Мох

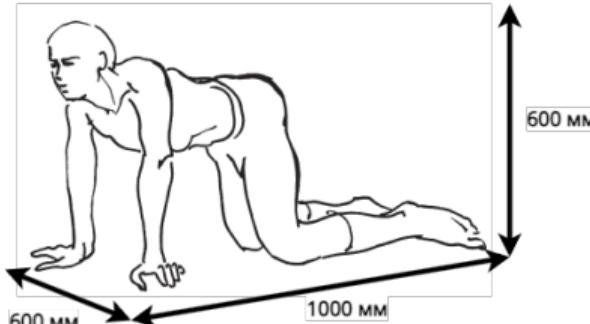


(c) Твердые породы

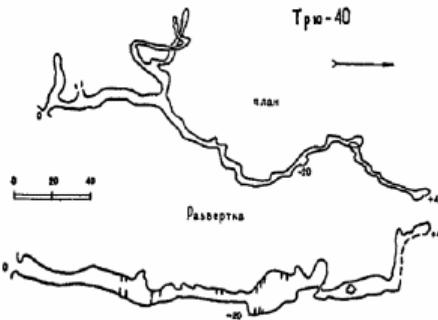


(d) Земля

Типы опорных поверхностей



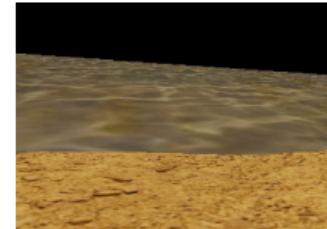
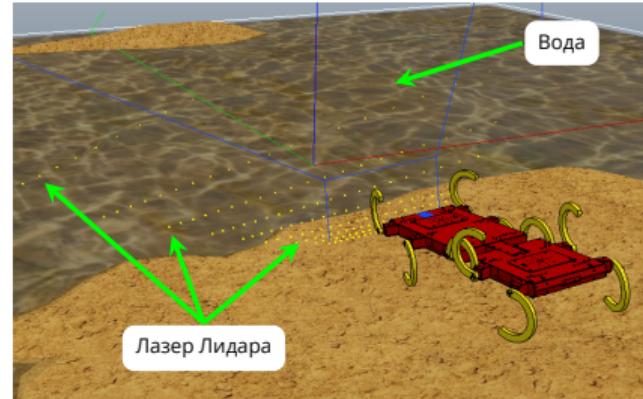
Габариты пещеры



Протяженность пещер: 1-2 км



Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?

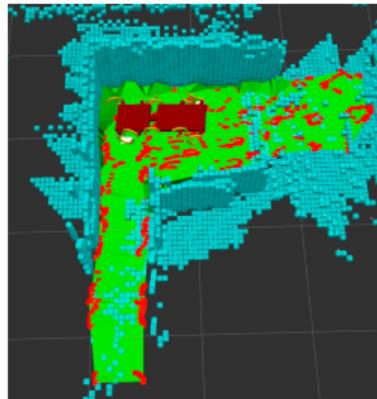


Вид с камеры



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

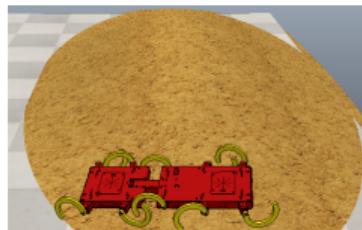
"1, 2" Построение рельефа местности

Геометрические свойства:

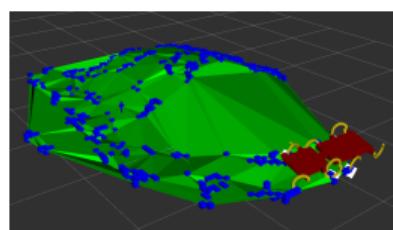
Входные данные: следовая дорожка, представленная в виде облака точек.

Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек.

Допустимая точность: 0.1 м



(a) Исследуемая поверхность



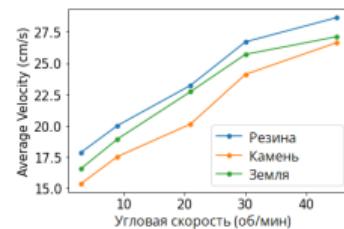
(b) Следовая дорожка и полигональная сетка

Физико-механические свойства:

Входные данные: обученный классификатор поверхностей, данные с внутренних датчиков робота.

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

Допустимая ошибка: 20



Пример данных для обучения



Пример поверхности



Объект исследования

Класс многоногих шагающих роботов с цельным или сочленённым корпусом, и цикловыми движителями с одной степенью свободы, управляемые зависимо или независимо друг от друга.

Требования к данному классу:

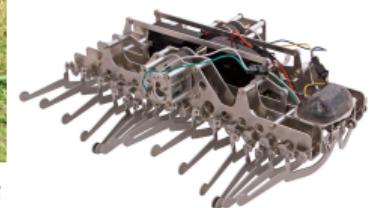
- Компактные размеры (меньше чем $1000 \times 600 \times 600$ мм)
- Залезать на препятствия высотой меньше, чем $\frac{3}{4}$ длины корпуса
- Преодолевать представленные опорные поверхности



(a) WHegs



(b) Boston Dynamics
RHex



(c) Gakken Centipede

"З" Оптимизация кинематической схемы

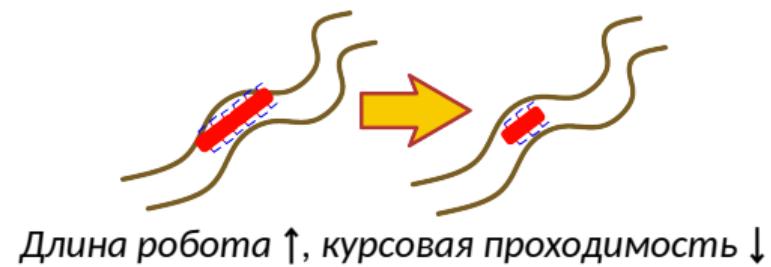
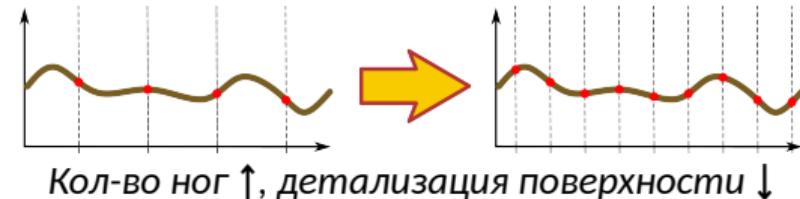
Решить $F = f(x) \rightarrow \max$ критерий

оптимизации, где

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

(x) — параметр: количество ног

Количество ног имеет прямую зависимость с длиной корпуса робота.





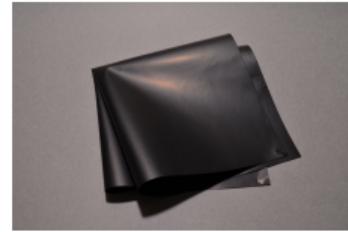
"4" Верификация преобразователя силы

Охарактеризовать материал для случаев,
когда площадь приложения силы меньше,
чем площадь активной части сенсора.

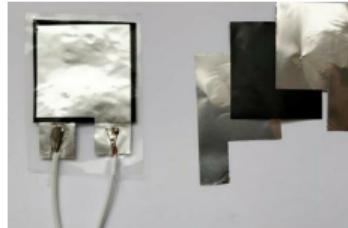
Входные данные: показания разработанного
датчика и значение реально приложенной
нагрузки

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

Допустимая ошибка: 10



(a) Материал Velostat



(b) Простейший преобразователь силы



Структура



Легенда

- Стандартные средства, без доработок
- Предмет исследования и разработки



Основные научные задачи исследования

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



Положения, выносимые на защиту

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



Литературный обзор

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



Определение количества ног

Решить $F = f(x) \rightarrow \max$ критерий оптимизации, где

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

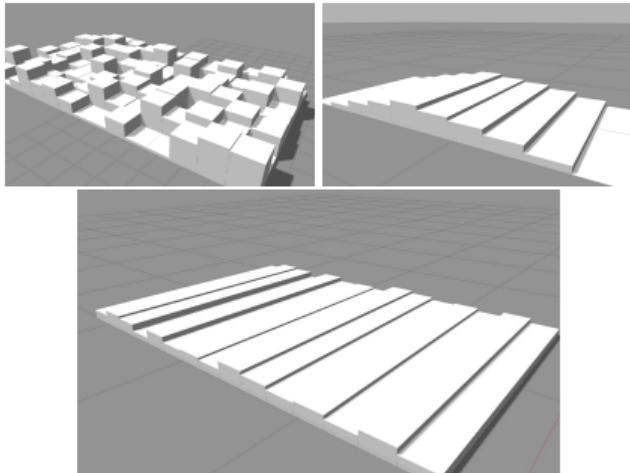
(x) — Параметры: количество ног, сдвиг фазы между соседними ногами

Метод решения: Генетический алгоритм: Open AI-ES

Идея решения: 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.



Пример прохождения особью
сгенерированной поверхности



Целевая функция

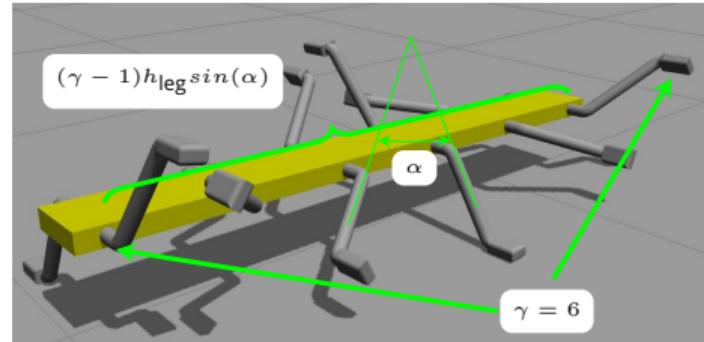
$$F \rightarrow \max = \beta (\omega_1 \cdot \delta + \omega_2 \cdot L) + \quad (1)$$

$$+ (1 - \beta) \delta^{\omega_1} (L)^{\omega_2}$$

$$L = \frac{1}{(\gamma - 1) h_{\text{leg}} \sin(\alpha)} \quad (2)$$

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

Для решения однокритериальной задачи
использовалась
аддитивно-мультипликативная свертка





Описание механической системы

$$M\ddot{u} = \vec{g} \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & M_n \end{bmatrix}, \quad M_i = \begin{bmatrix} m_i E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & I_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\vec{u}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{v}_i^T & \vec{\omega}_i^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{g}^T = \left[\cdots \vec{F}_i^T, \quad (\vec{\tau}_i - \vec{\omega}_i \times I_i \vec{\omega}_i)^T \cdots \right] \quad (6)$$

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.



Геометрические связи

Тела соединены цилиндрическими шарнирами:

$$\phi(q_{j_1}, u_{j_1}, \dots, q_{j_k}, u_{j_k}, t) \geq 0 \quad (7)$$

$$\vec{q}_i^T = \begin{bmatrix} \vec{x}_i^T & \vec{Q}_i^T \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{\vec{q}}_i = \begin{bmatrix} E_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & G(\vec{q}_i) \end{bmatrix} \vec{u}_i \quad (9)$$

$$\ddot{\vec{q}}_i = \tau^T \vec{z}_{i-1} - k_i \dot{\vec{q}}_i \quad (10)$$

где через ϕ обозначена 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; через $G(\vec{q}_i)$ обозначена матрица, вид которой зависит от выбранной системы координат; k — коэффициент вязкого трения в шарнире.

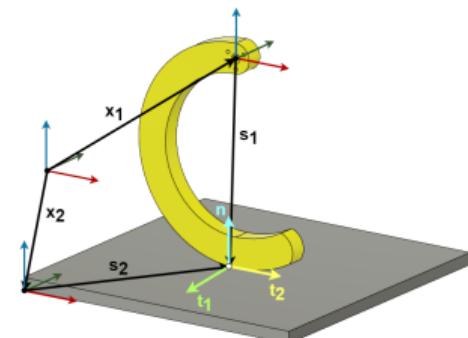
Взаимодействие опорной поверхности и ноги робота

$$\phi_u(\vec{q}) \geq 0 \quad (11)$$

$$\phi_u(\vec{q}) = (\vec{x}_1 + \vec{s}_1 - \vec{x}_2 - \vec{s}_2) \cdot \vec{n} \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_u(\vec{q}) \approx \begin{bmatrix} \vec{n}^T & (\vec{s}_1 \times \vec{n})^T & -\vec{n}^T & (-\vec{s}_2 \times \vec{n})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{\omega}_1 \\ \vec{v}_2 \\ \vec{\omega}_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

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 $t_{1,2}$.

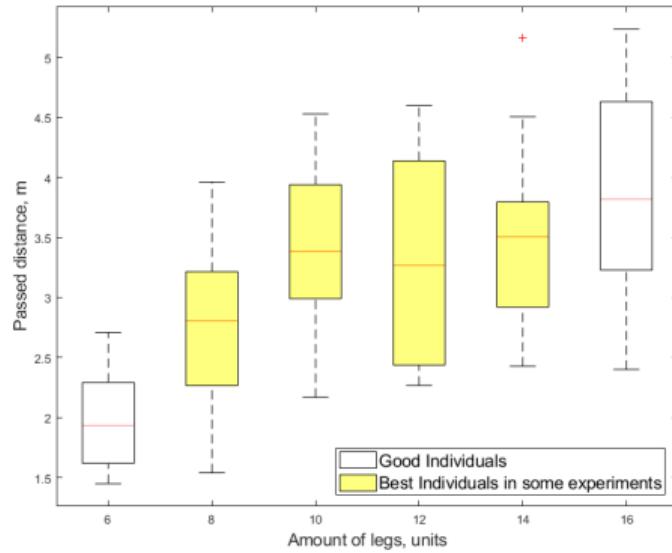


$$\begin{cases} \mu f_n \geq \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \\ \|\vec{v}_t\| (\mu f_n - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}) = 0 \\ \frac{\vec{f}_t}{\|\vec{f}_t\|} = -\frac{\vec{v}_t}{\|\vec{v}_t\|} \end{cases} \quad (14)$$



Закономерность

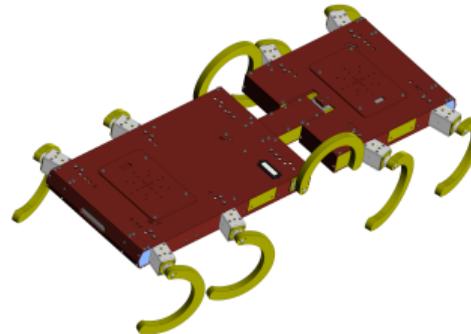
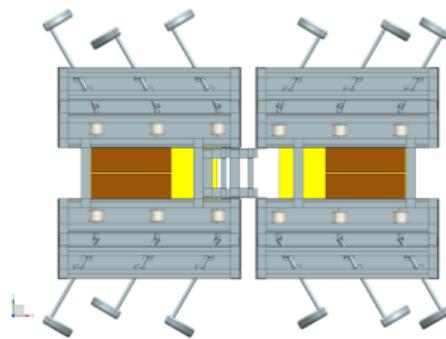
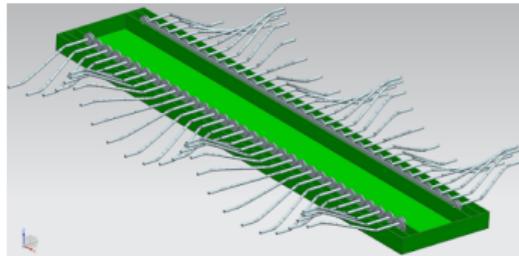
Лучшие роботы в экспериментах начинались с 8 до 14 ног для различных значений ω . Это объясняется критерием статического равновесия. В таком случае минимум 4 ноги всегда касаются поверхности.



Зависимость между кол-вом ног и
пройденной дистанцией

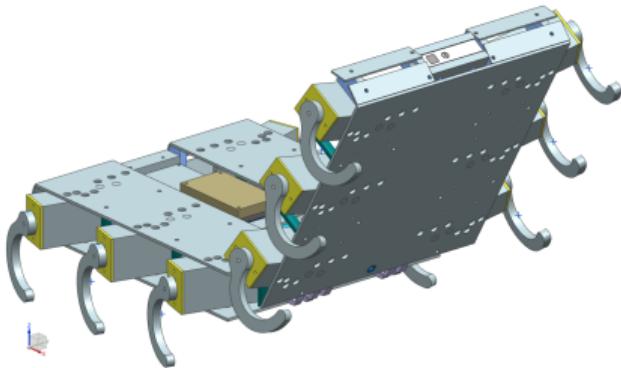


Прототипы робота

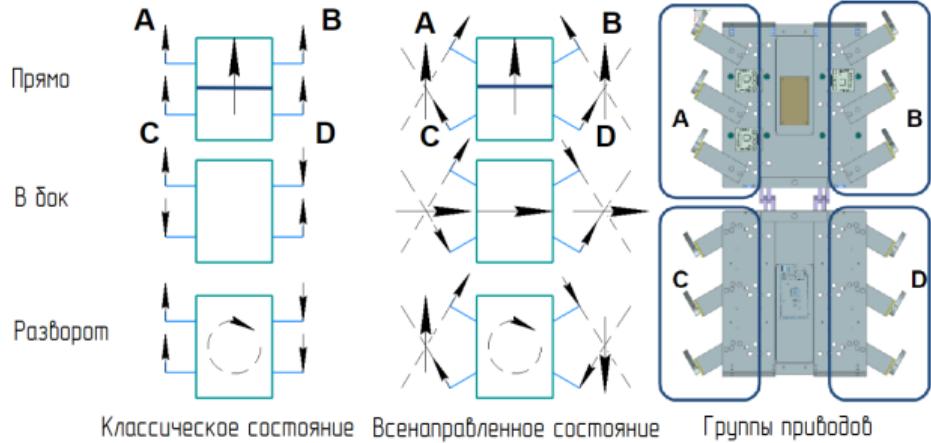




Особенности конструкции



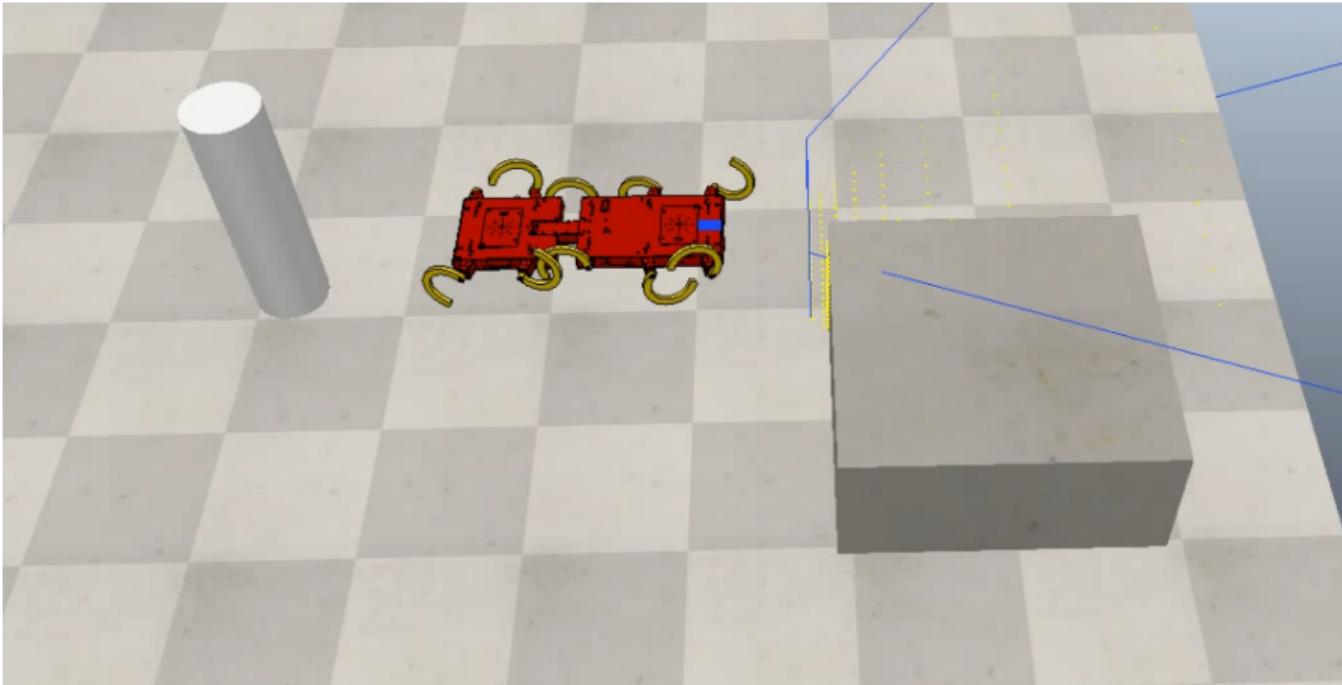
(a) Одноступенчатый активный сегмент, соединяющий 2 части робота



(b) Векторное представление сил в обычном и всенаправленном состояниях



Четвертая итерация робота





Верификация преобразователя силы

Охарактеризовать материал для случаев, когда площадь приложения силы меньше, чем площадь активной части сенсора.

Идея решения: Разработка двух экспериментов:

1. Статический — прикладывается статический груз с размером в сенсор для калибровки.

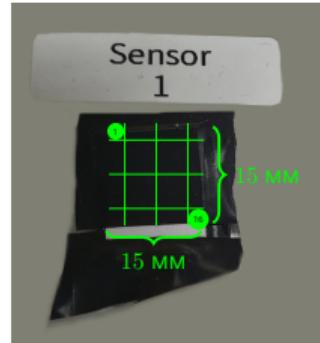
2. Динамический — чувствительная область представляется в виде сетки 4×4 . Происходит касание каждой области с одинаковым давлением, но разной площадью контакта.

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

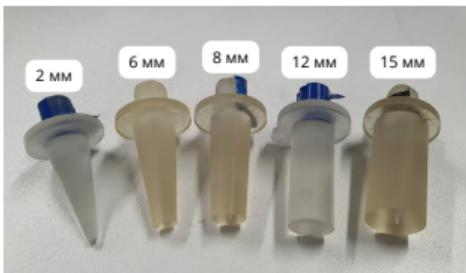
Выходные данные: разница между нормализованным значением с датчика и реальной нагрузкой.

Допустимая ошибка: 10%

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



Поверхность
как 4×4 сетка



Все насадки

Статический эксперимент

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

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

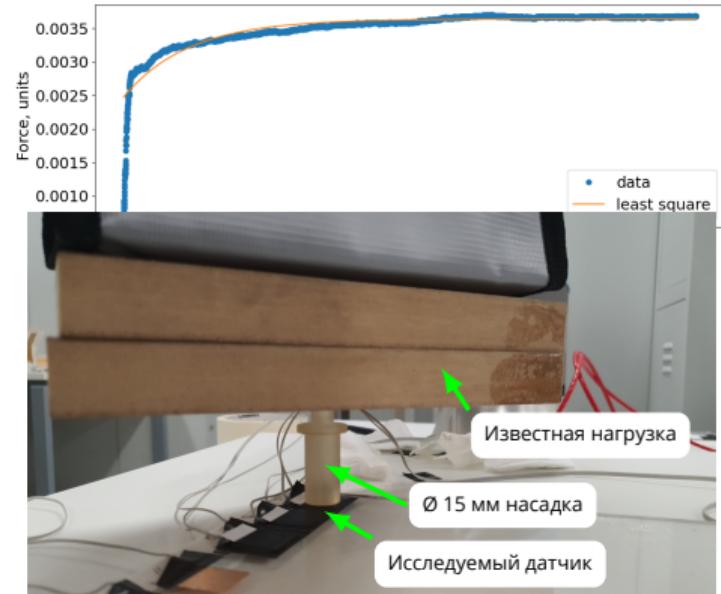
Где V_0 – начальное напряжение,

p – приложенное давление,

$A_i, B_i, \tau_{res}, k_i$ искомые параметры,

t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.

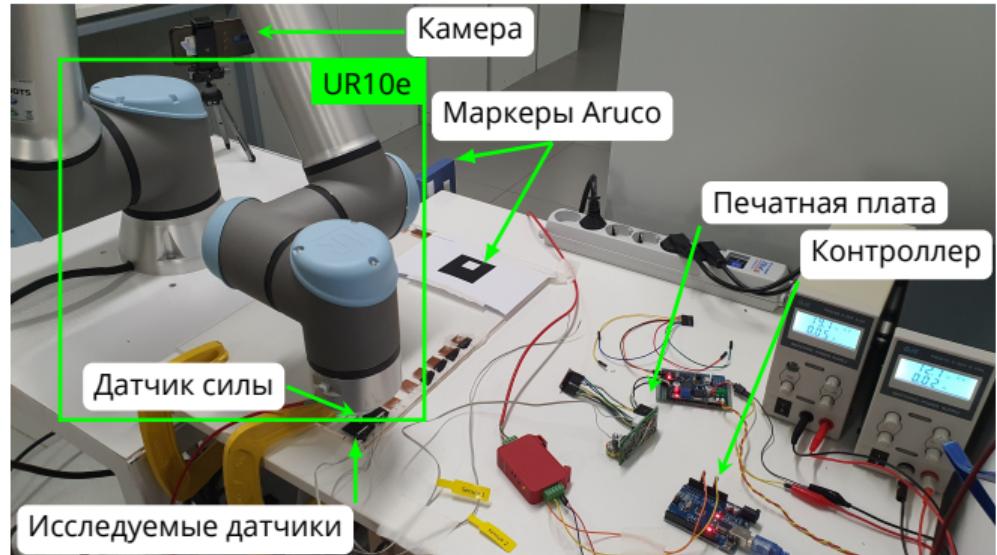
Апробирована модель для калибровки датчика





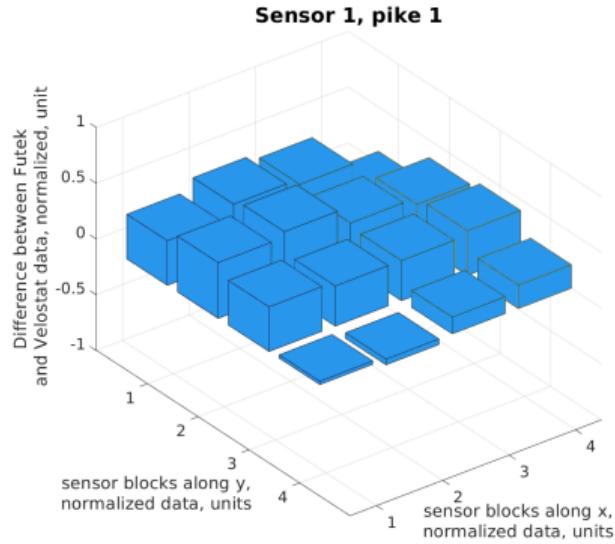
Динамический эксперимент: установка

- Управление силой нажатия
Импедансное управление
- Повторяемость эксперимента
по силе и позиции
Добавив манипулятор и камеру
- Возможность нажимать только
на часть сенсора
Насадки для манипулятора

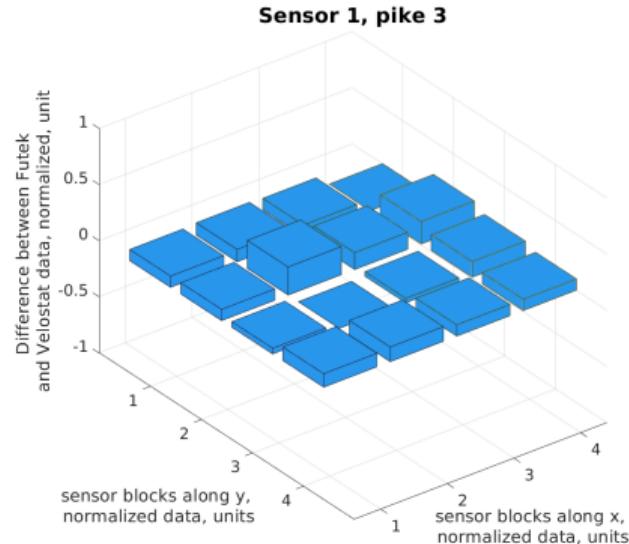




Результаты динамического эксперимента



2 мм диаметр насадки



8 мм диаметр насадки

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



Определение физико-механических свойств

Определить процентное соотношение твердых, упругих и пластичных свойств пройденной поверхности

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

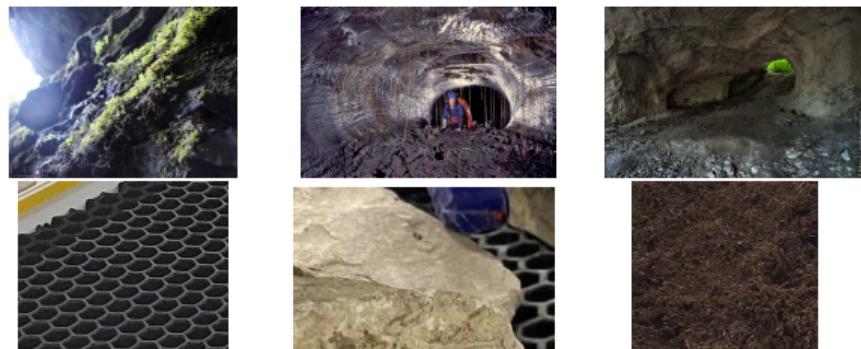
Идея решения: Создается установка для обучения. Обучение: робот ходит по различным типам поверхностей фиксированное количество касаний поверхности с постоянной угловой скоростью. Собранные данные разбиваются на 2 части 80% и 20%. Модель обучается на 80% с помощью ядра PUK7. Тестирование: происходит на оставшиеся 20%. Используются метрики меткости, точности, полноты и F1-счета.

Входные данные: обученный классификатор поверхностей, данные с внутренних датчиков робота

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

Допустимая ошибка: 20% - точность

Предположения: 1) На рисунке.



Эталоны упругой, твердой и пластичной поверхностей



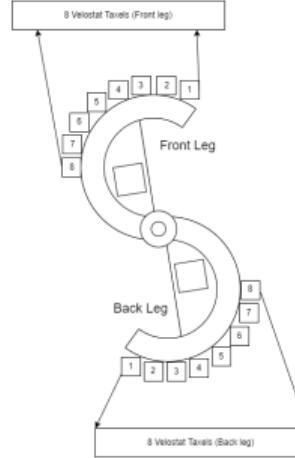
Стенд



(a) Установка



(b) Нога робота с установленными сенсорами



(c) Схематическое распределение сенсоров на ноге



Метод опорных векторов

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

(15) Ядро на основе функции Пирсона VII:

$$K(x, y) = (1 + ((|x - y|^2)/\sigma^2)^\omega)^{(-1/\omega)} \quad (16)$$

где x — входной вектор, w является весовым вектором, и b — смещение.

Где входной вектор:

(1) Частота движения ног

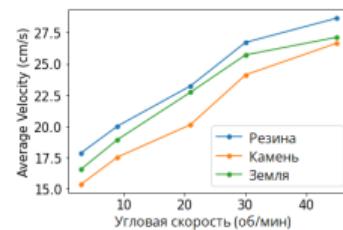
(2-6) Пиковая и средняя амплитуда, среднее значение, ширина, площадь под кривой давления с датчика силы

(7-11) Индивидуальная пиковая амплитуда силы для каждого датчика

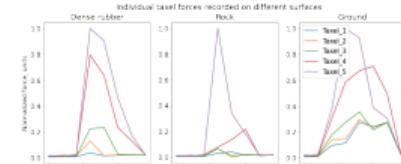
(12-15) Пиковая и средняя амплитуда, среднее значение, ширина, площадь под кривой крутящего момента двигателя

(16) Среднее давление на сенсорах

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



(a) График



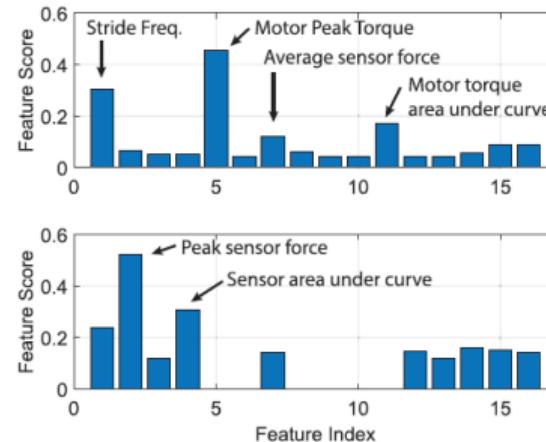
(b) Таксель



Результаты

(a) Таблица

		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%



(b) Feature score

Определение геометрических свойств

Необходимо с помощью ощупывания роботом поверхности получить плотное облако точек и полигональную сетку.

Метод решения: Триангуляция Делоне с использованием альфа формы

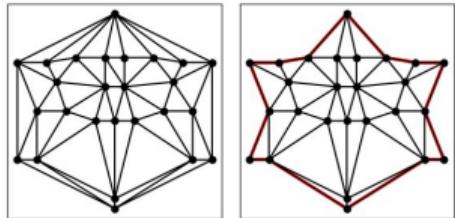
Идея решения: Решив задачу локализации, получить облако точек следовой дорожки. Очистить шумное облако точек и его усреднить с помощью Voxel Grid, применить триангуляцию Делоне для вогнутых оболочек, получив полигональную сетку. Сгенерировать новые точки из полигональной сетки с нужным разрешением.

Входные данные: следовая дорожка, в виде облака точек.

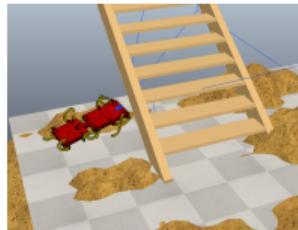
Выходные данные: полигональная сетка и плотное облако точек

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.



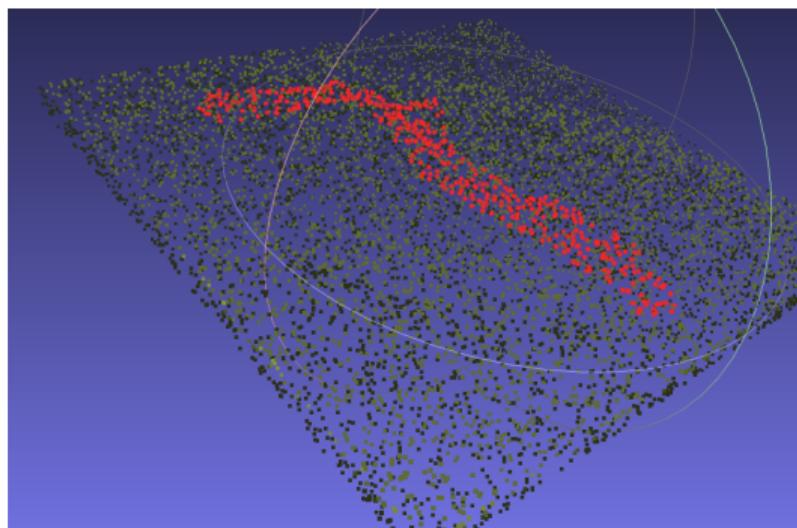
(a) Пример Делоне



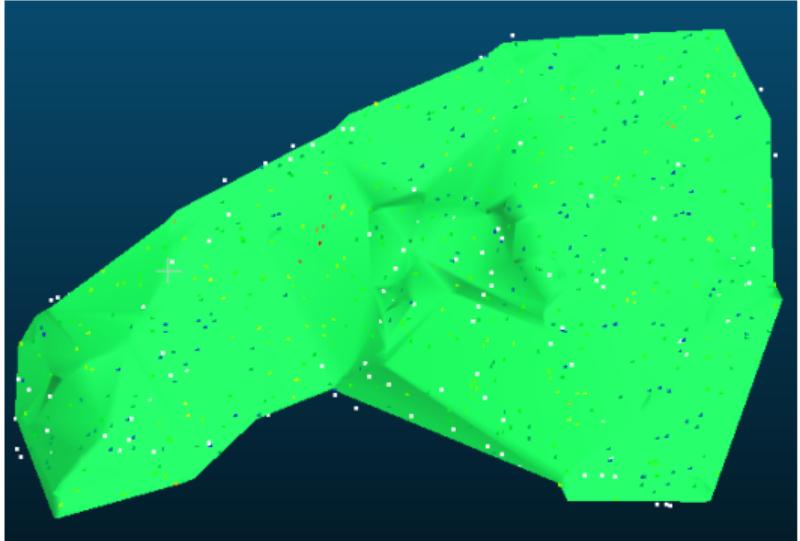
(b) Когда $z \neq f(x, y)$



Оценки C2C и C2M



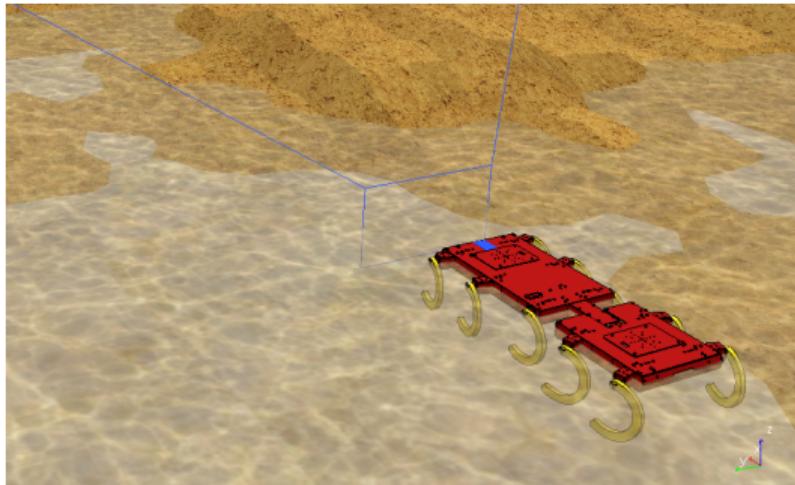
(a) *Cloud to Cloud*



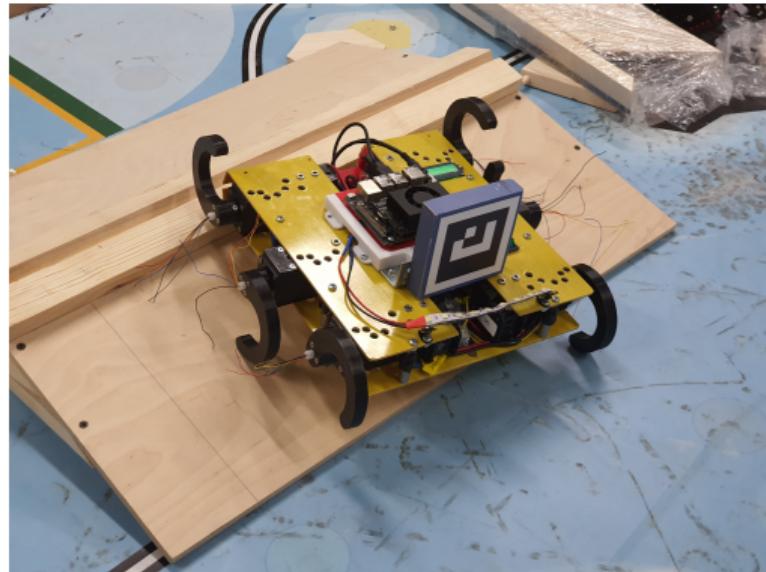
(b) *Cloud to Mesh*



Эксперименты



CoppeliaSim симулятор,
4ое поколение СтриРус



Натурные испытания,
Зье + поколение СтриРус

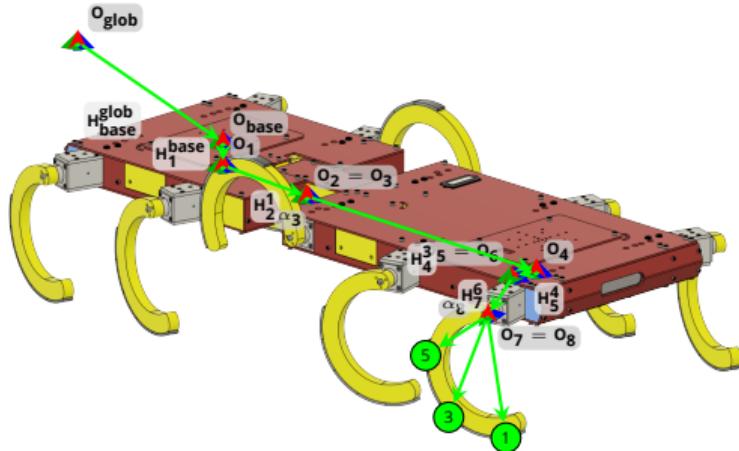


Задача локализации

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

(17)

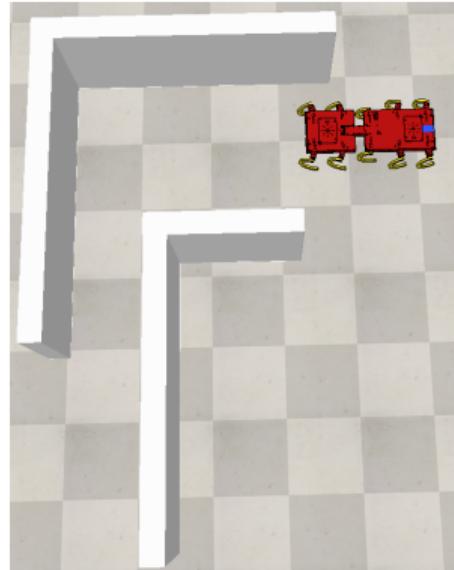
Где $H = \begin{bmatrix} R & T \\ 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 0 & 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{bmatrix}$, R_i — матрица поворота, относительно одной из осей, T_i — вектор сдвига.



Пример решения задачи
локализации с помощью
Aruco маркера



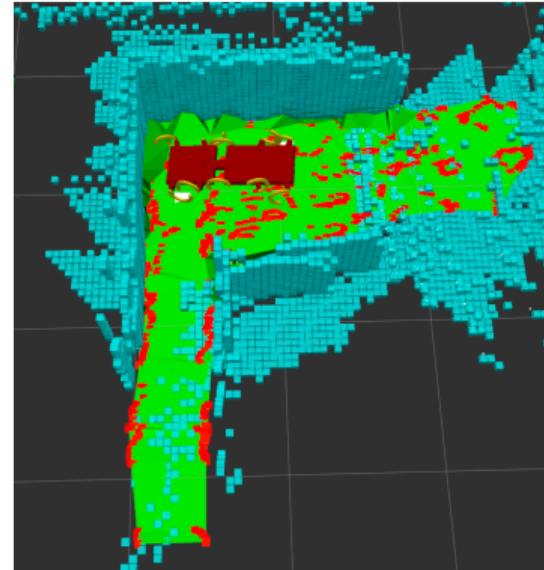
Делоне для вогнутых оболочек



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

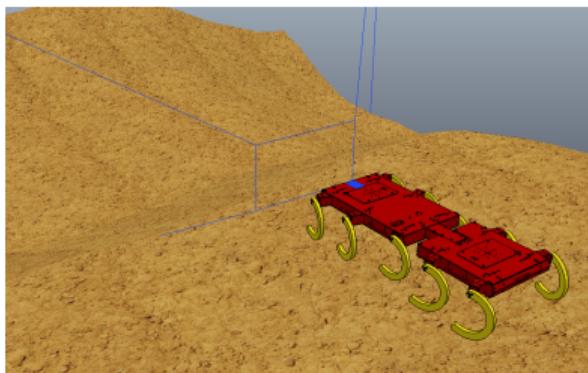


Вогнутая оболочка

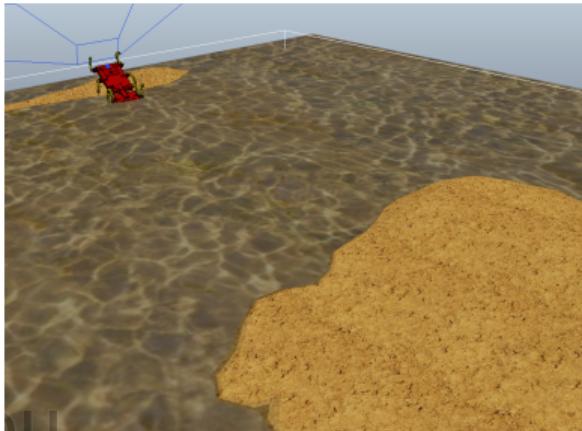


Определение геометрических свойств поверхности

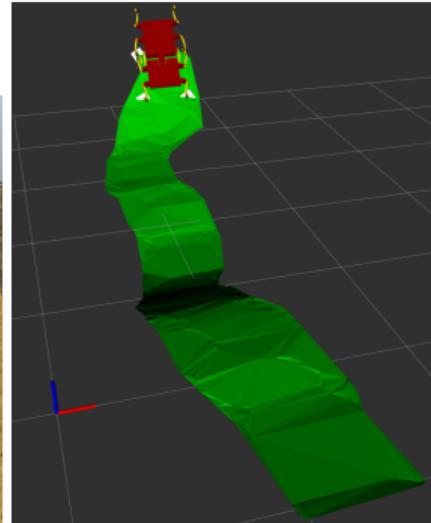
Результат: Маршрут, полигональная сетка



Начало маршрута



Конец маршрута

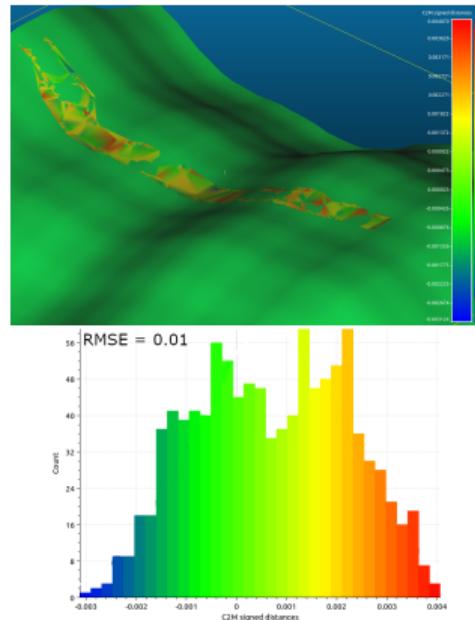
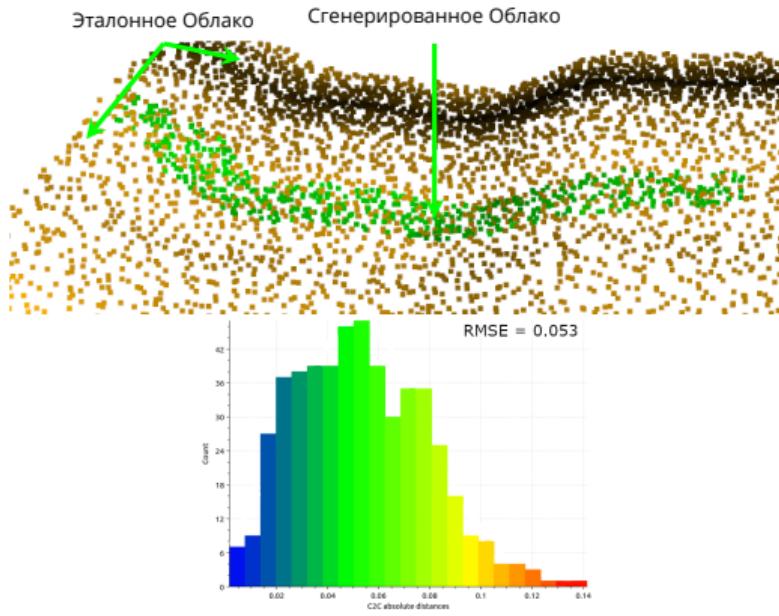


Созданная сетка



Определение геометрических свойств поверхности

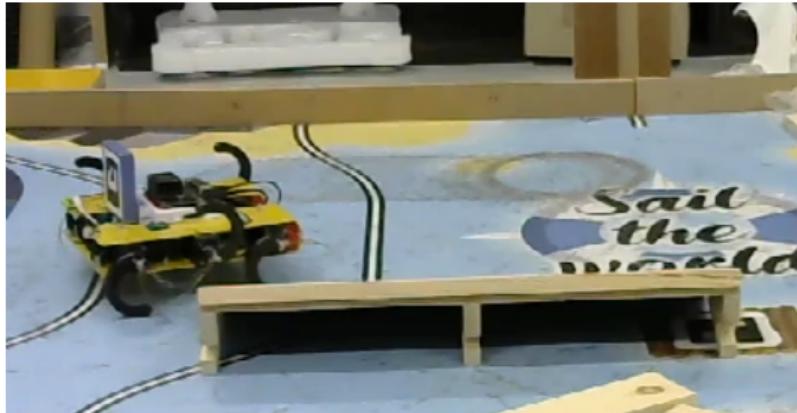
Результаты *Cloud2Cloud* и *Cloud2Mesh*



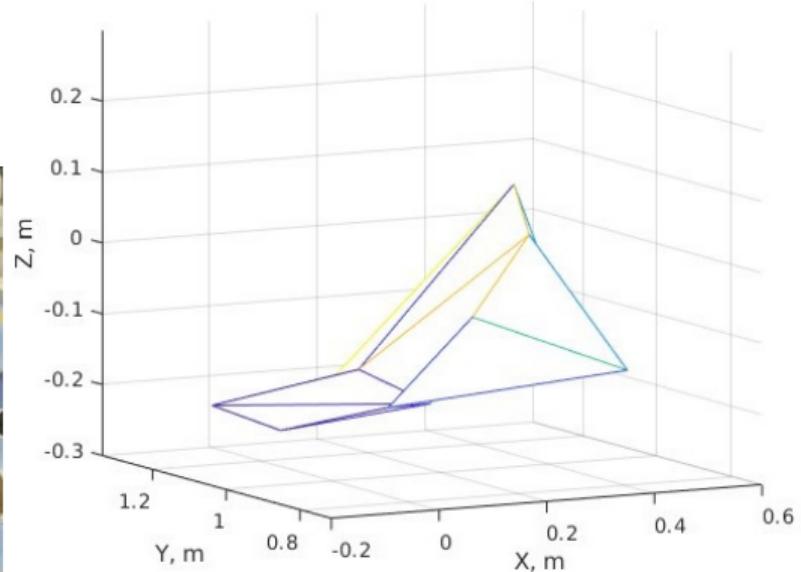


Определение геометрических свойств поверхности

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног



Результаты решения задач

Научных задач (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.

Экспериментальных разработок

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**.



Результаты интеллектуальной деятельности

- Количество публикаций
 - 2 — журналы, рекомендованных ВАК
 - 3 — журналы, индексируемые в Scopus
 - 5 — РИНЦ
- 8 — Зарегистрированных программ для ЭВМ
- 3 — Выигранных гранта (Умник, 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!