



Разработка метода тактильного очищения для мобильного шагающего робота

Студент: Олег Буличев

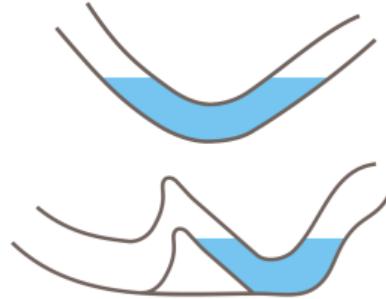
Руководитель: Александр Малолетов



Необходимость исследования пещер роботами



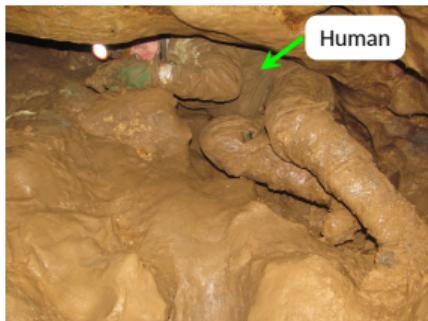
Соляные отложения



Сифоны



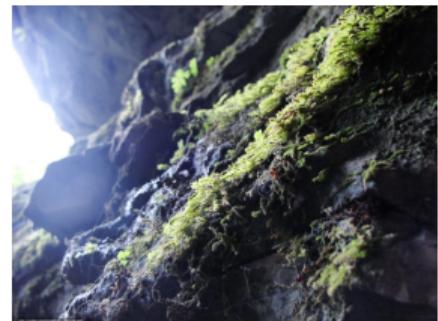
Ледяные пещеры



Глина



Лужа

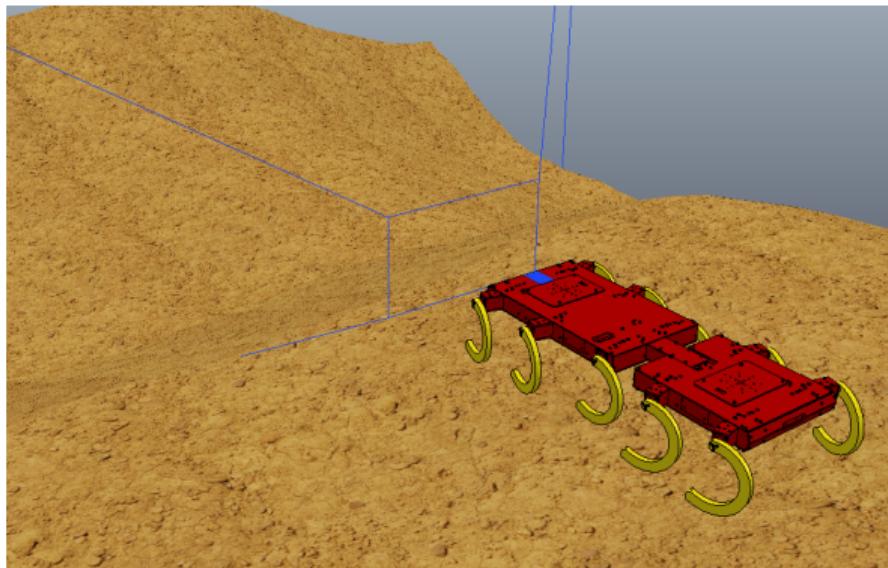


Mox

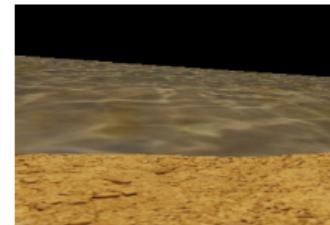
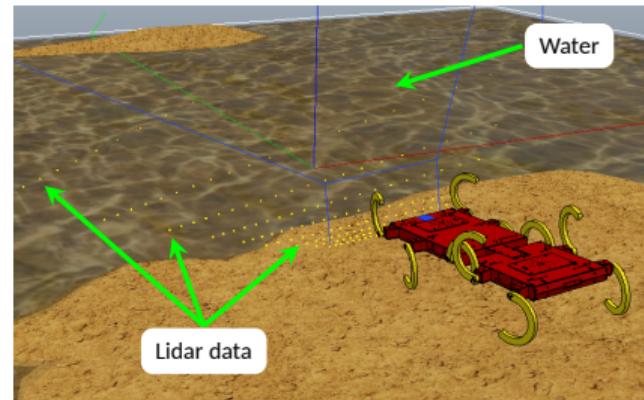


Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



Поверхность без воды



Вид с камеры



Постановка проблемы

Проблема 1

Как получить полезную информацию о поверхности, когда имеется решенная навигация?



Постановка проблемы

Проблема 1

Как получить полезную информацию о поверхности, когда имеется решенная навигация?

Карта местности и тип поверхности



Предлагаемое решение

Проблема 1

Карта может быть построена, используя датчики силы на каждой ноге робота, получив **плотное облако точек**. Облако точек генерируется из построенной полигональной сетки с помощью **модифицированной 2D триангуляции Делоне**. Полигональная сетка основана на точках касания ног поверхности.

Тип поверхности может быть получен с помощью решения задачи **классификация поверхности**, используя **Машинное Обучение**.



Литературный обзор

Рассмотренные проблемы:

- Пещеры: препятствия, размеры.
- Роботы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
- Методы построения карты: оптические и тактильные.

Существующие проблемы

- Робототехнические системы для исследования свободных пещер
- Построение поверхности с помощью датчика силы на манипуляторе
- Построение карты с помощью лидаров и камер



Литературный обзор

Рассмотренные проблемы:

- Пещеры: препятствия, размеры.
- Роботы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
- Методы построения карты: оптические и тактильные.

Существующие проблемы

- Робототехнические системы для исследования свободных пещер
- Построение поверхности с помощью датчика силы на манипуляторе
- Построение карты с помощью лидаров и камер

Найдена нерешенная проблема



Разработка робота

Требования к работе

Задача – выбрать движитель. Робот должен:

- Иметь *малые размеры*, чтобы лазать и не застевать в щелях
- Обладать достаточной проходимостью для преодоления сыпучих грунтов
- Преодолевать *небольшие водные препятствия*
- Иметь возможность залезать на *большие валуны*



Разработка робота

Требования к работе

Задача – выбрать движитель. Робот должен:

- Иметь *малые размеры*, чтобы лазать и не застевать в щелях
- Обладать достаточной проходимостью для преодоления сыпучих грунтов
- Преодолевать *небольшие водные препятствия*
- Иметь возможность залезать на *большие валуны*

Шагающий цикловой движитель с 1 степенью свободы в ноге



Разработка робота

Структурный синтез

Вопрос

Какое оптимальное количество ног должен иметь такой движитель?



Разработка робота

Структурный синтез

Вопрос

Какое оптимальное количество ног должен иметь такой движитель?

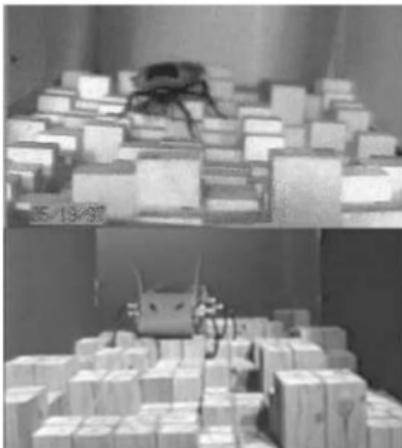
Ответ

Робот с таким движителем должен иметь **8–14 ног!**



Разработка робота

Используемые технологии

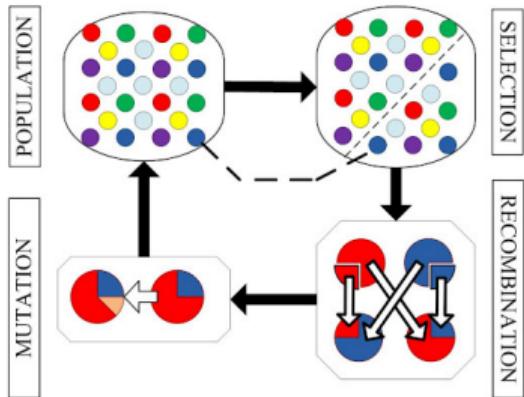


Генерация поверхности
(Робот проходит по
параметризованной
искусственной территории)



GAZEBO

Робототехнический
симулятор



Генетический алгоритм
(OpenAI-ES)



Разработка робота

Предположения

- Сгенерированное семейство с одинаковыми константами имеет ту же сложность.

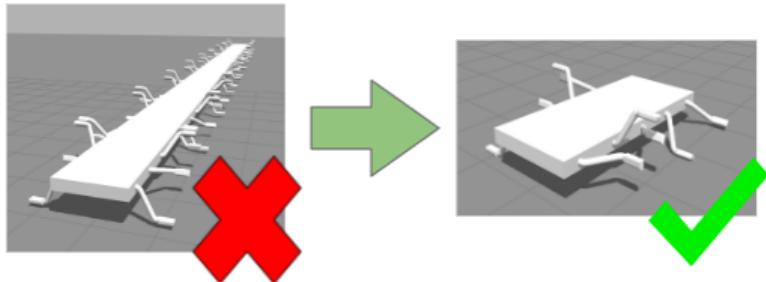
Параметры для генерации:

- Длина и ширина ячейки
- Диапазон высот ячейки
- Закон распределения

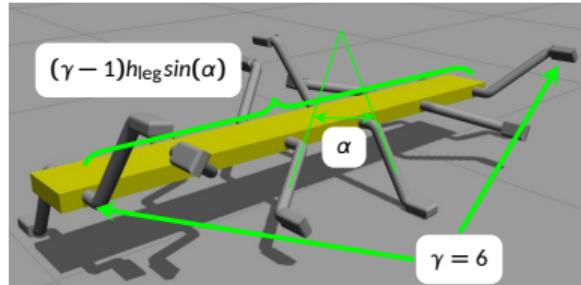


Разработка робота

Предлагаемое решение



Идея: Минимизировать кол-во ног
без потери проходимости



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

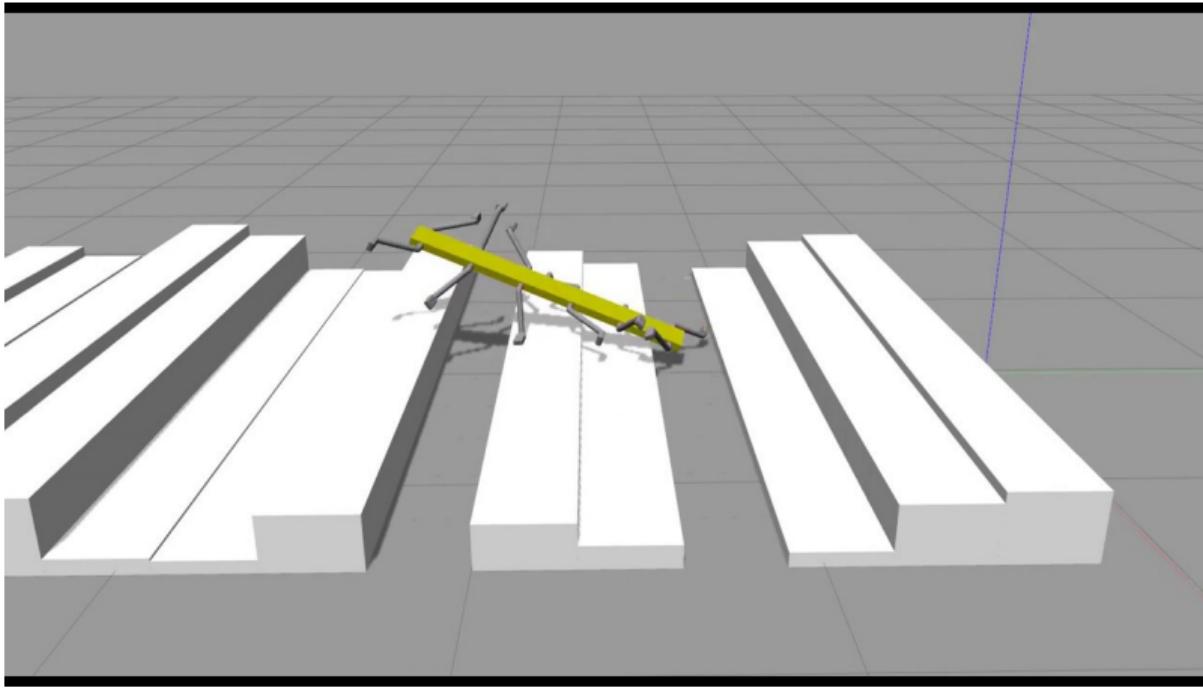
β – адаптивный параметр,

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



Разработка робота

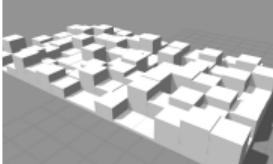
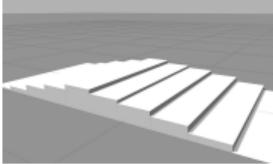
Видео: История одного сгенерированного робота





Разработка робота

Конкретные результаты: $\omega_1 = 0.6$, $\omega_2 = 0.4$

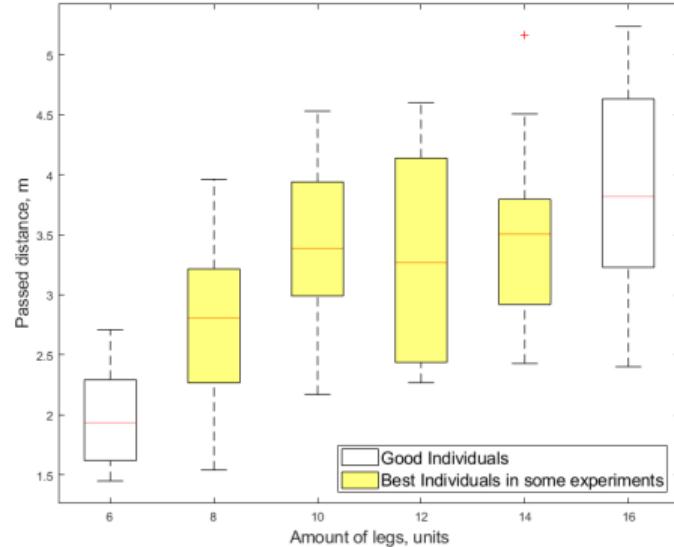
	Тип территории	Кол-во ног	Угол между соседними ногами	Кол-во индивидов
Этап 1		12	73	200
		12	72	
Этап 2		10	68	55
		12	77	



Разработка робота

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



Разработка робота

Улучшение проходимости

Question

1. Длинный робот может застрять в щели во время поворота. Как избежать это?
2. Как залезать на большие уступы?



Разработка робота

Улучшение проходимости

Question

1. Длинный робот может застрять в щели во время поворота. Как избежать это?
2. Как залезать на большие уступы?

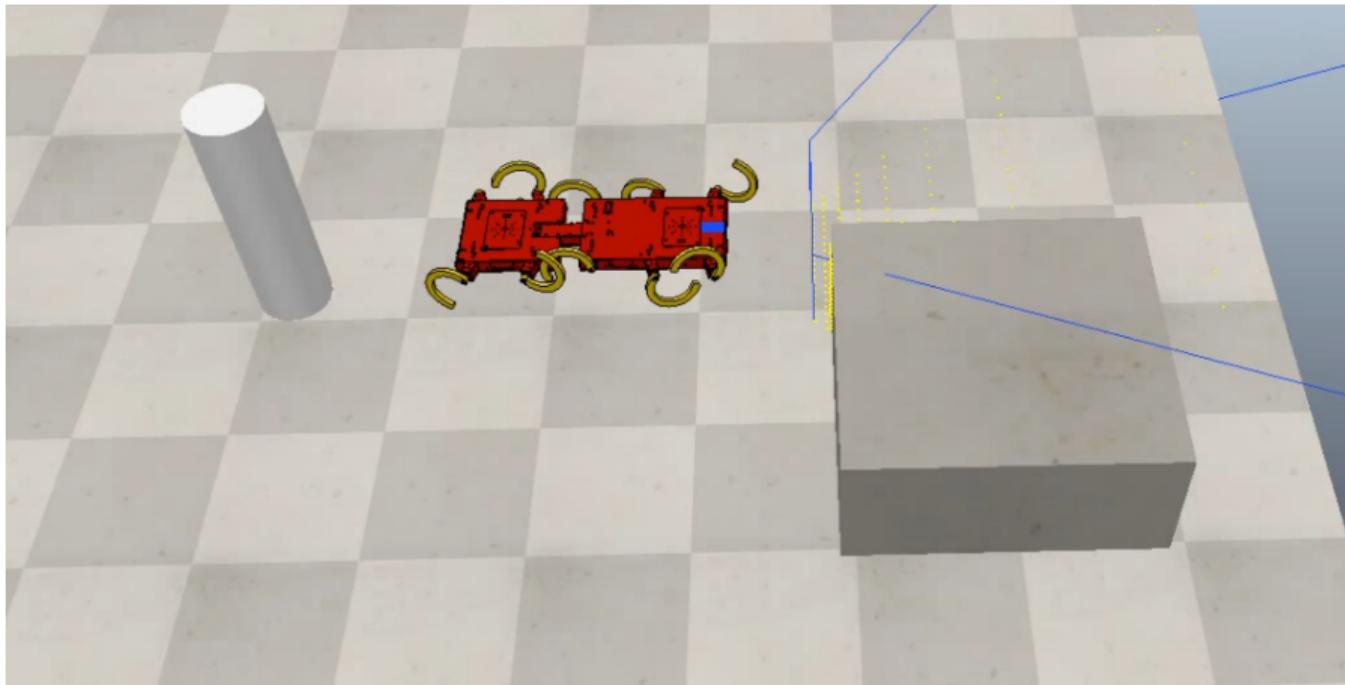
Answer

1. Добавить возможность двигаться вбок без смены ориентации.
2. Сделать сегментированное тело.



Разработка робота

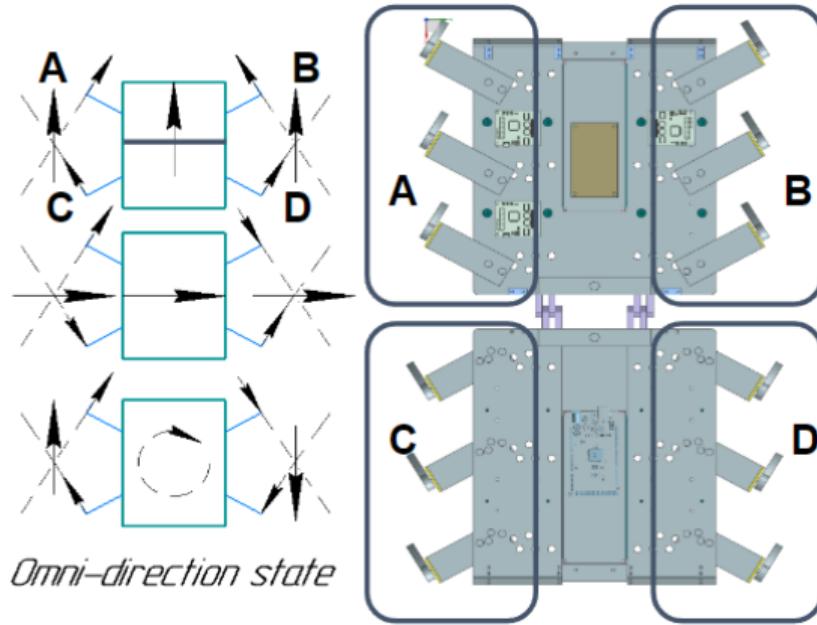
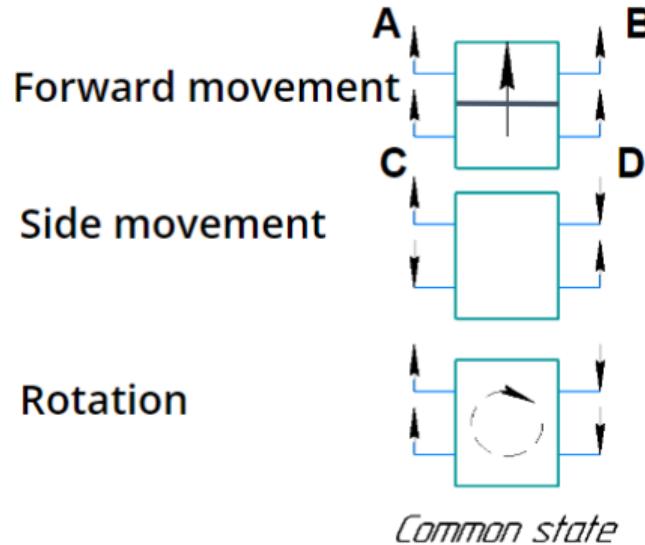
Видео





Разработка робота

Предлагаемое решение

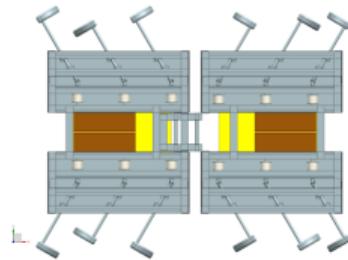
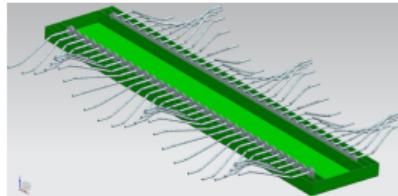


Векторное представление сил в стандартной и всенаправленной компоновке



Разработка робота

Проботипы робота СтриРус (1)

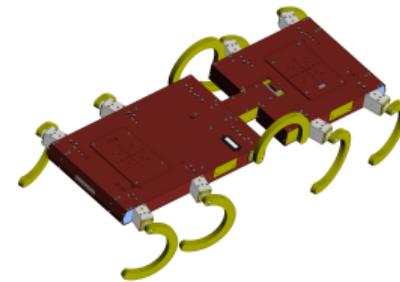
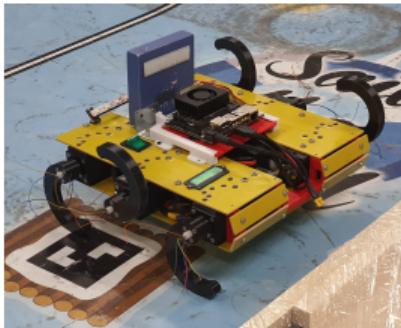


Поколение	1	2	3
Кол-во ног	54	12	12
Кол-во сегм.	1	2	2
Соед. узел	—	Тангаж	Тангаж, Рыскание
Отн. угол нога-тело, град	0	0-45	0, 15, 30, 45
Высота ноги, мм	54	60	60
Особенности	Волноход	Непрерывный механизм	2 DoF у соед. узла
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> - Невозможно установить датчики силы - Малый КПД 	<ul style="list-style-type: none"> - Сложный механизм изм. угла 	<ul style="list-style-type: none"> - Маленькие ноги - Бесполезная возможность рыскания



Разработка робота

Проботипы робота СтриРус (2)



Поколение	3+	
Кол-во ног	6	10
Кол-во сегм.	1	2
Соед. узел	—	Тангаж
Отн. угол нога-тело, град	0	0, 15
Высота ноги, мм	90	180
Особенности	Удлиненные ноги	Гигантские ноги
Недостатки	– 1 Сегмент	–



Разработка преобразователя силы

Question

Как получить силу реакции опоры?



Разработка преобразователя силы

Question

Как получить силу реакции опоры?

Answer

- Измерив ток/напряжение на моторе
- Установив датчик момента на вал мотора
- Установив датчик силы на ногу робота



Разработка преобразователя силы

Типы датчиков силы

- **Силомоментный:** массивный и дорогой для маленьких роботов
- **Оптический:** очень габаритный
- **Магнитный:** очень габаритный
- **Емкостной:** дорогой, но лучший для данной задачи
- **Пьезорезистивный датчик основанный на чернилах или полимерах:** дешевый и надежный, но имеет проблемы с гистерезисом
- **Тензометрический:** влияние температуры и влажности на чувствительность



Разработка преобразователя силы

Типы датчиков силы

- Силомоментный: массивный и дорогой для маленьких роботов
- Оптический: очень габаритный
- Магнитный: очень габаритный
- Емкостной: дорогой, но лучший для данной задачи
- Пьезорезистивный датчик основанный Velostat: дешевый и надежный, но имеет проблемы с гистерезисом
- Тензометрический: влияние температуры и влажности на чувствительность



Разработка преобразователя силы

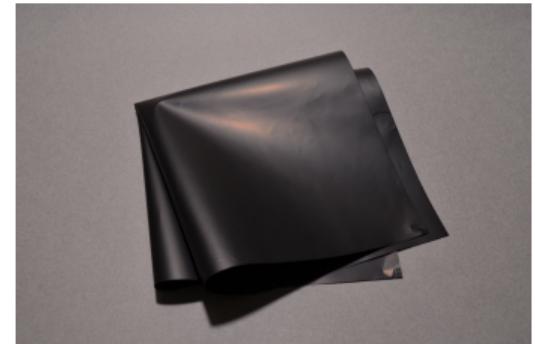
Velostat

Определение

Velostat представляет собой полимерный материал, наполненный техническим углеродом.

Ожидаемые эффекты:

- Туннельный эффект – диод обладает данным свойством
- Пьезорезистивный – удельное электрическое сопротивление полупроводника изменяется под действием механической деформации
- Вязкоупругий – может гасить вибрации



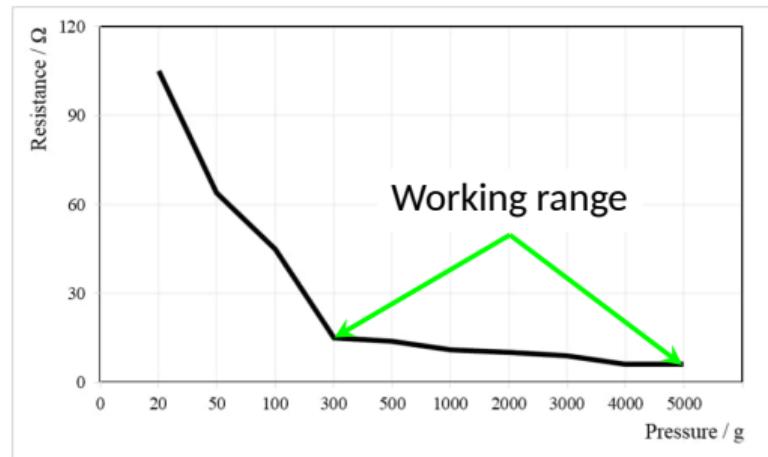
Простейший
преобразователь силы



Разработка преобразователя силы

Velostat: Встреченные проблемы

- Гистерезис
- Нелинейность материала
- Разные значения при одинаковом давлении, если площадь нагрузки меньше площади датчика



Научная постановка задачи

Охарактеризовать материал Velostat для случаев, когда точечная нагрузка меньше размера датчика, и предложить решения для предотвращения подобных проблем.



Разработка преобразователя силы

Требования к установке

- Управление силой нажатия
- Повторяемость эксперимента по силе и позиции
- Возможность нажимать только на часть сенсора



Разработка преобразователя силы

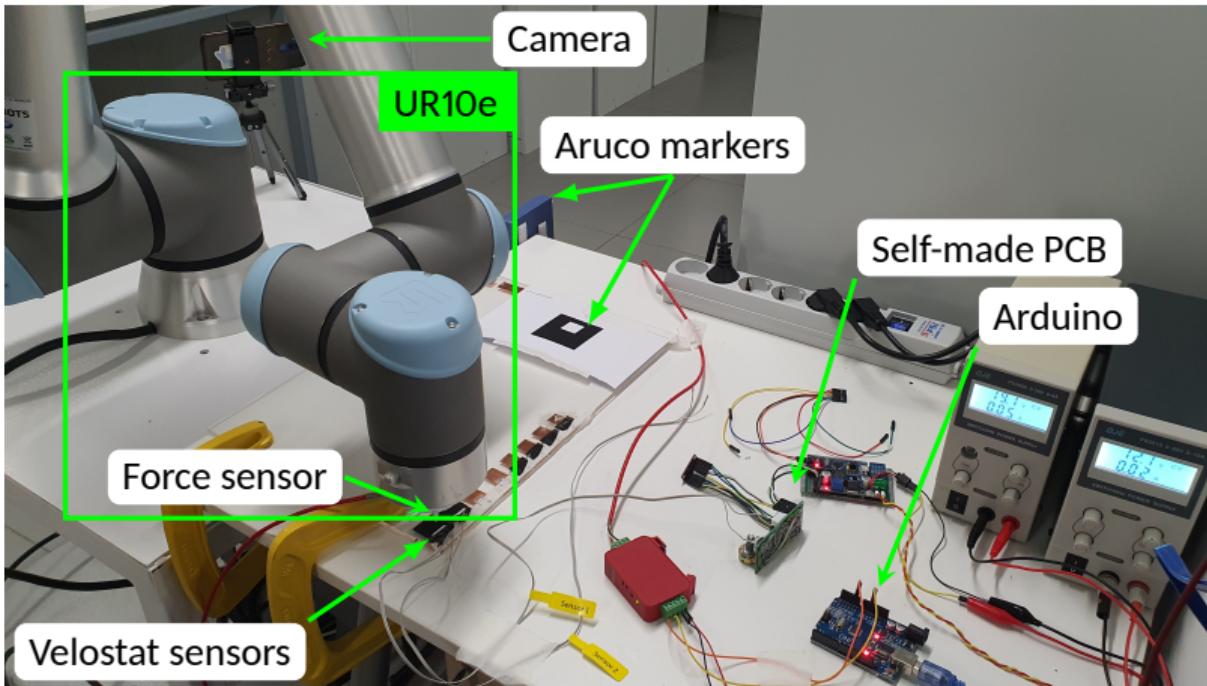
Требования к установке

- Управление силой нажатия
Решено с помощью импедансного управления
- Повторяемость эксперимента по силе и позиции
Решено, добавив манипулятор и камеру
- Возможность нажимать только на часть сенсора
Возможно благодаря насадкам для манипулятора
Все требования выполнены



Разработка преобразователя силы

Установка: Общий вид





Разработка преобразователя силы

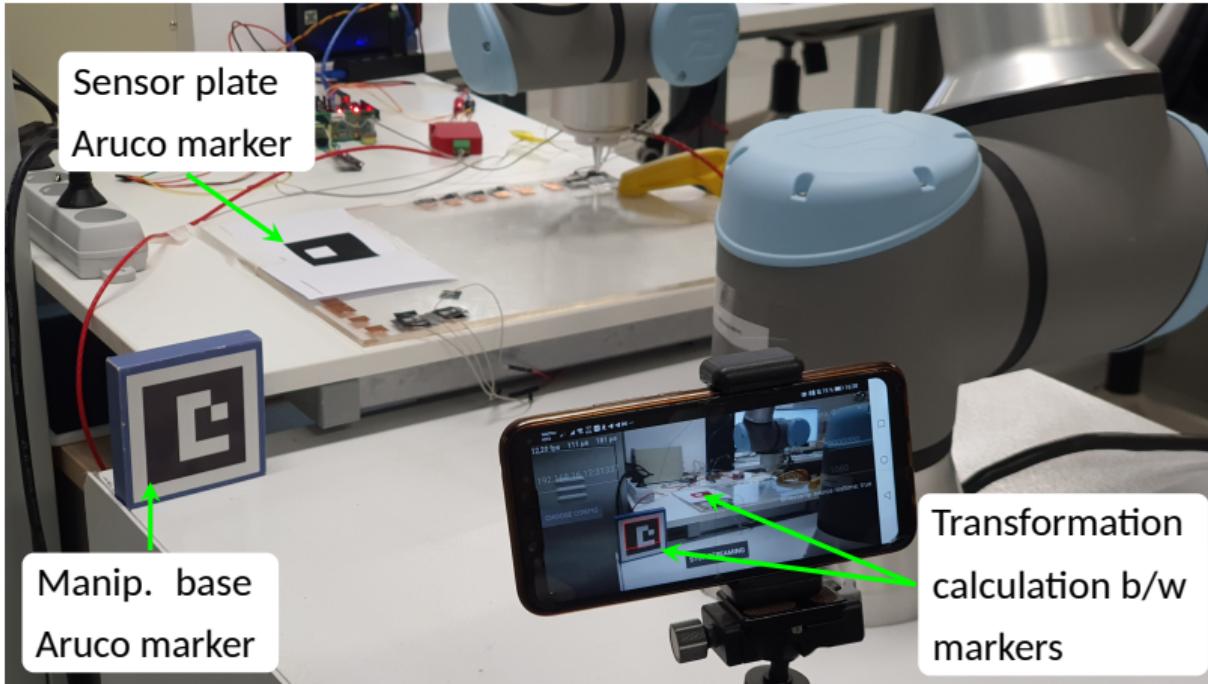
Установка: Видео





Разработка преобразователя силы

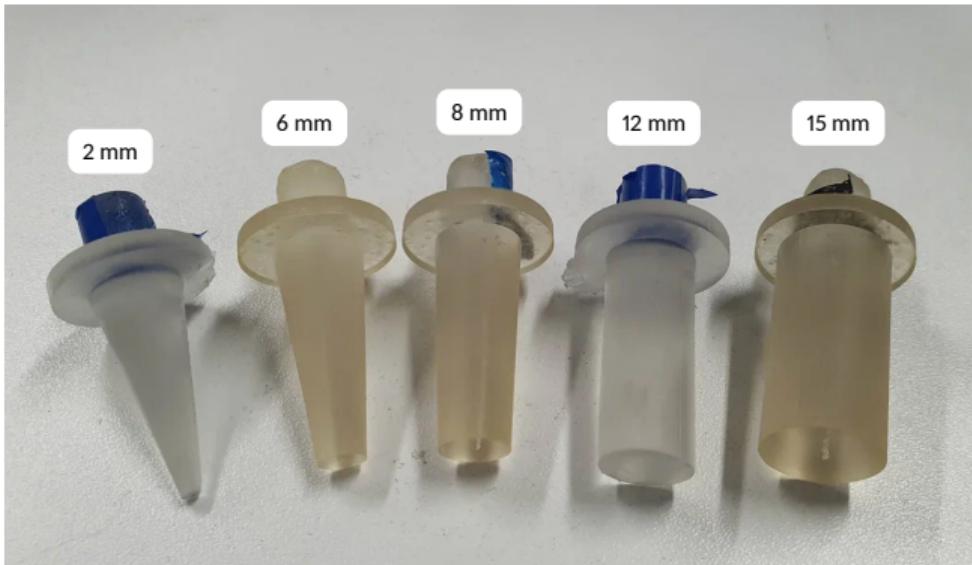
Установка: Снижение ошибки по углу с помощью Aruco маркеров





Разработка преобразователя силы

Установка: Насадки



Все насадки



Промышленный
датчик силы



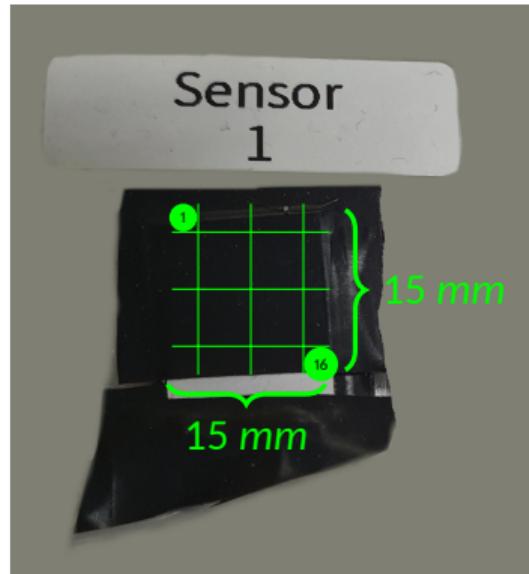
Насадка в сборке



Разработка преобразователя силы

Эксперименты

- 1. Статический.** Прикладывается статический груз с размером в сенсор
- 2. Динамический.**
 - Преобразователь представляется в виде сетки 4×4 . Мы касаемся с одинаковым давлением, используя все 5 насадок
 - Используются насадки только 2 и 15 мм. Происходит нажатие с силой 5, 10, 20, 30, 40 Н



Представление сенсора
как 4×4 сетки



Разработка преобразователя силы

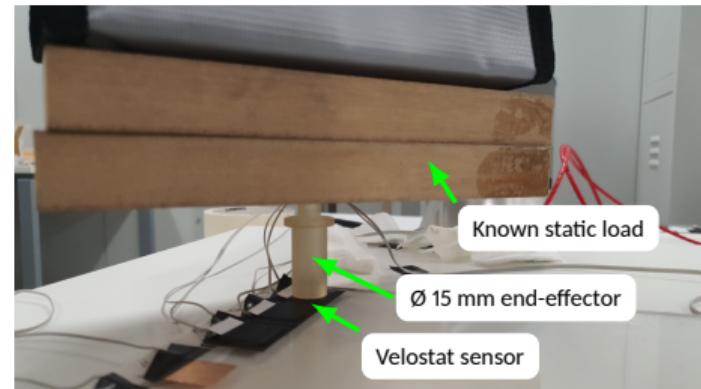
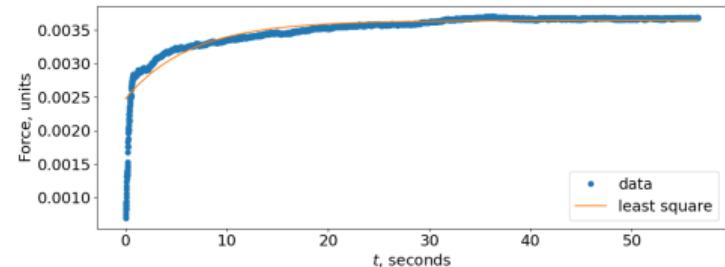
Результаты: Статический эксперимент

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

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

Где V_0 – начальное напряжение,

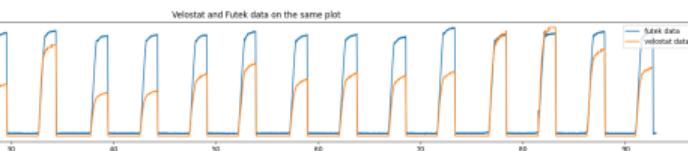
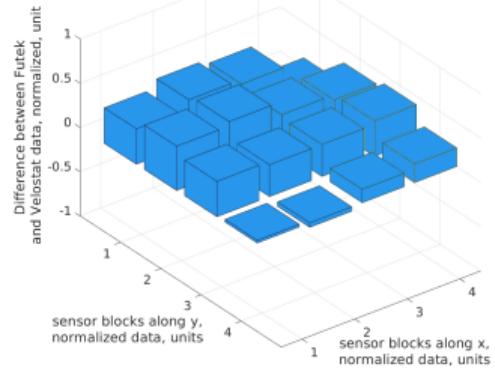
$p, A_i, B_i, \tau_{res}, k_i$ константы, t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.



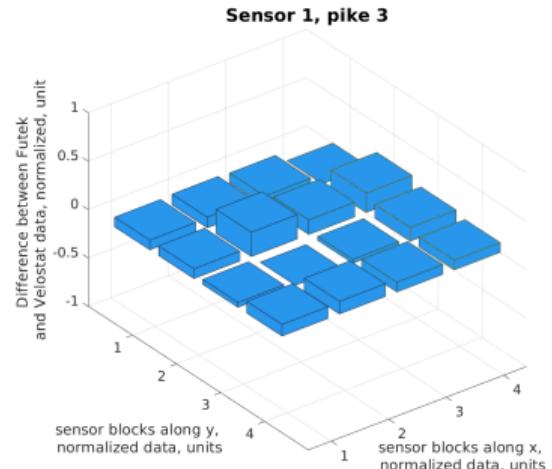


Разработка преобразователя силы

Результаты: Динамический эксперимент



2 мм диаметр насадки



8 мм диаметр насадки



Разработка преобразователя силы

Итог

1. Статический эксперимент: определены коэффициенты преобразователей p , A_i , B_i , τ_{res} , k_i .
2. Динамический эксперимент: преобразователь может быть представлен как единое тело, если площадь давления превышает 50% от площади датчика.



Определение типа поверхности

Вопрос

Как определить тип местности во время движения по такой местности?



Определение типа поверхности

Вопрос

Как определить тип местности во время движения по такой местности?

Ответ

Решенить проблему классификации местности с помощью машинного обучения



Определение типа поверхности

Требования к установке

- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности
- Бесконечное движение робота
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе



Определение типа поверхности

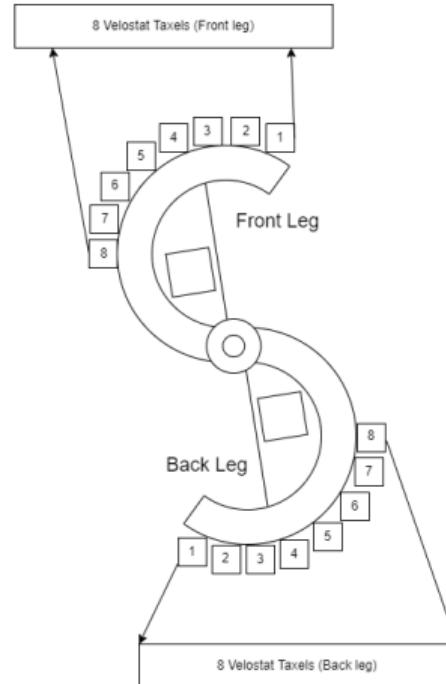
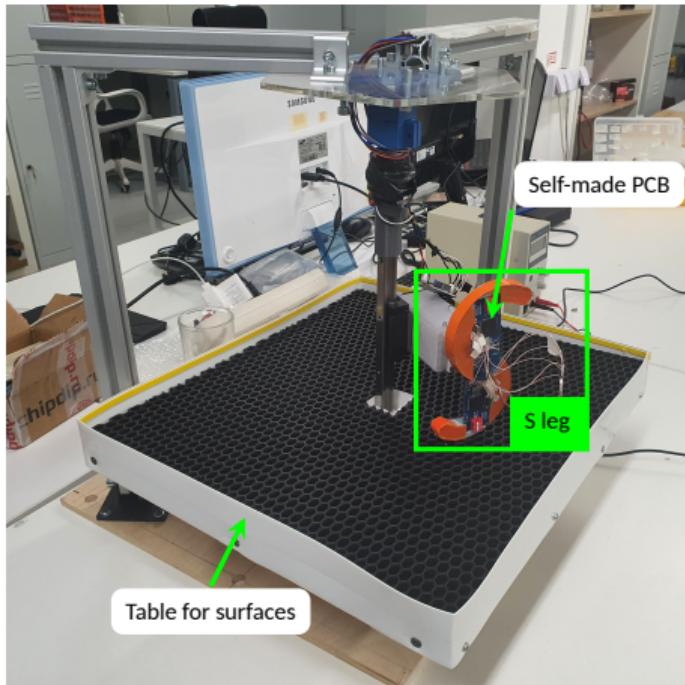
Требования к установке

- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности
Решается с помощью быстроразборного стола
- Бесконечное движение робота
Решается путем создания 2-ух степенного механизма и ноги S-образной формы
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе
Решено путем создания крепления для узла ноги
Все требования выполнены



Определение типа поверхности

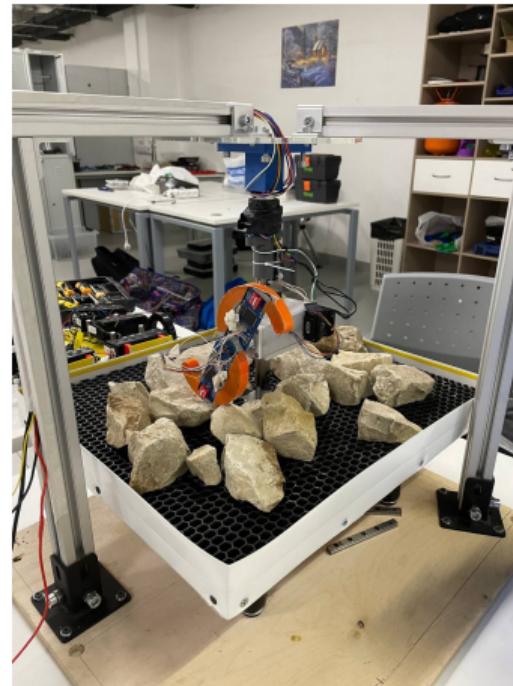
Установка





Определение типа поверхности

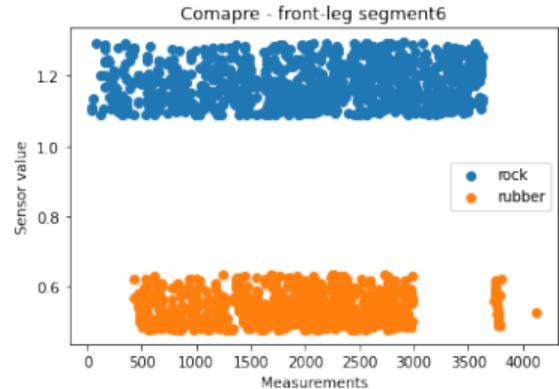
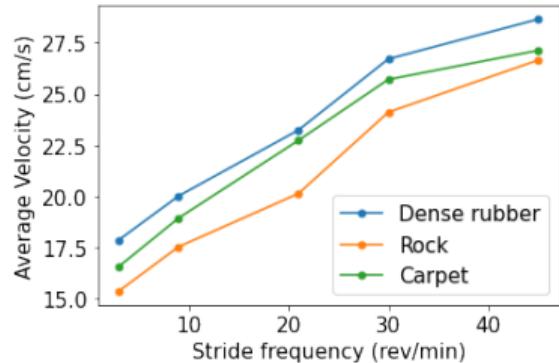
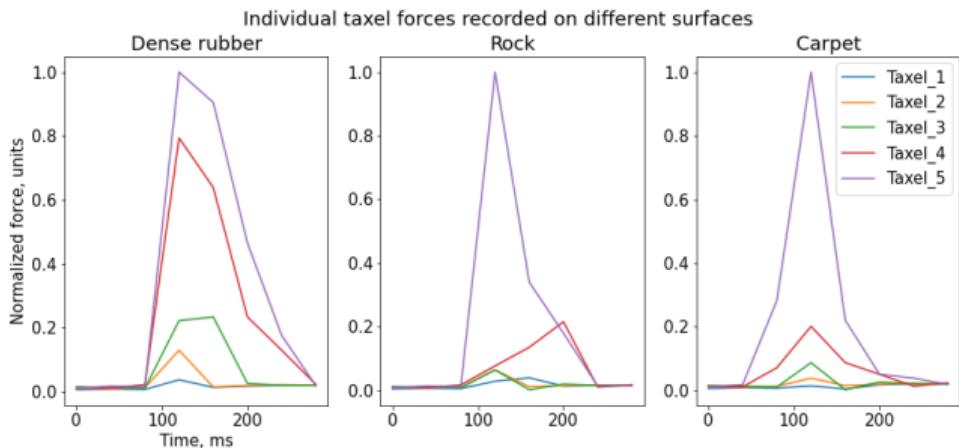
Установка: Типы поверхности, видео





Определение типа поверхности

Данные с одного эксперимента





Определение типа поверхности

Итог

- Возможность различать резиновую и каменистую поверхность.
- Выбраны параметры классификации рельефа для машинного обучения:
 - Число оборотов в минуту
 - Крутящий момент двигателя
 - Ускорение от IMU
 - Данные о силе, которые представлены как значение датчикасегмент, пиковая амплитуда, средняя амплитуда
- Velostat датчик силы доказал свою работоспособность.



Картографирование с помощью датчиков силы

Вопрос

Как создать плотное облако точек, используя разреженные данные об точках касания ног?



Картографирование с помощью датчиков силы

Вопрос

Как создать плотное облако точек, используя разреженные данные об точках касания ног?

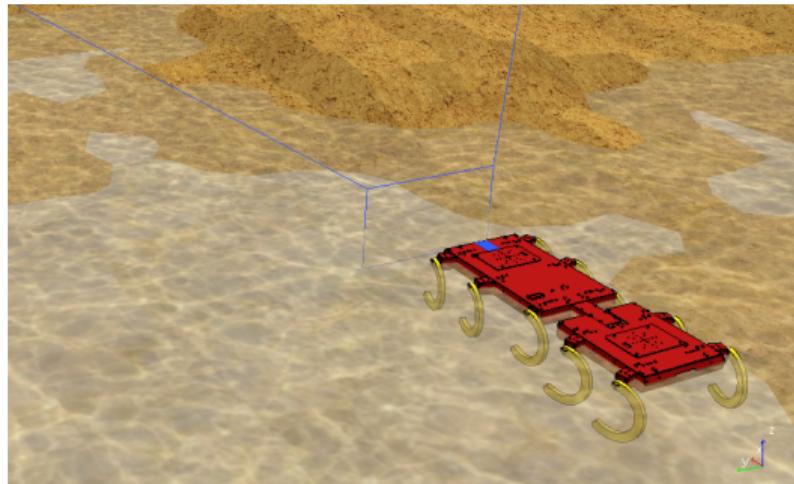
Ответ

Создать полигональную сетку, используя 2D триангуляцию Делоне (вогнутая оболочка) с использованием разреженных данных, сгенерировать новые точки и вернуть данные навигации

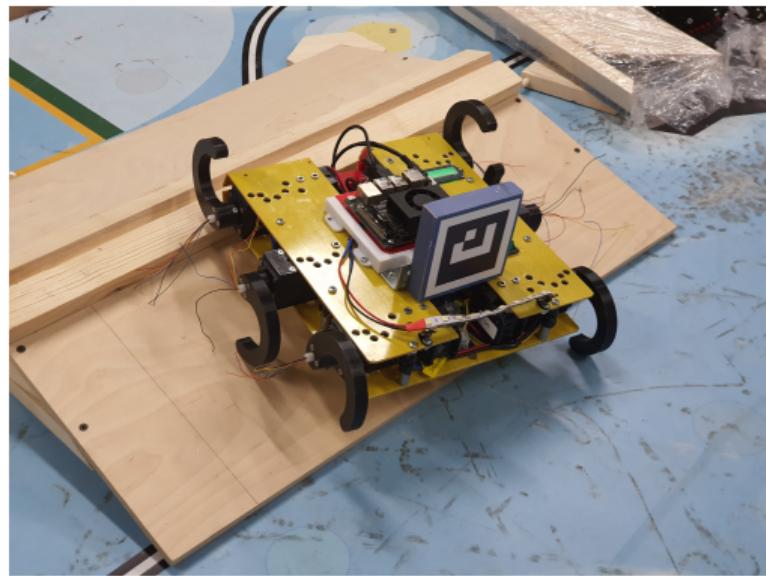


Картографирование с помощью датчиков силы

Места проведения экспериментов



CoppeliaSim симулятор,
4th gen СтриРус



Натурные испытания,
3th+ gen СтриРус



Картографирование с помощью датчиков силы

Предположения

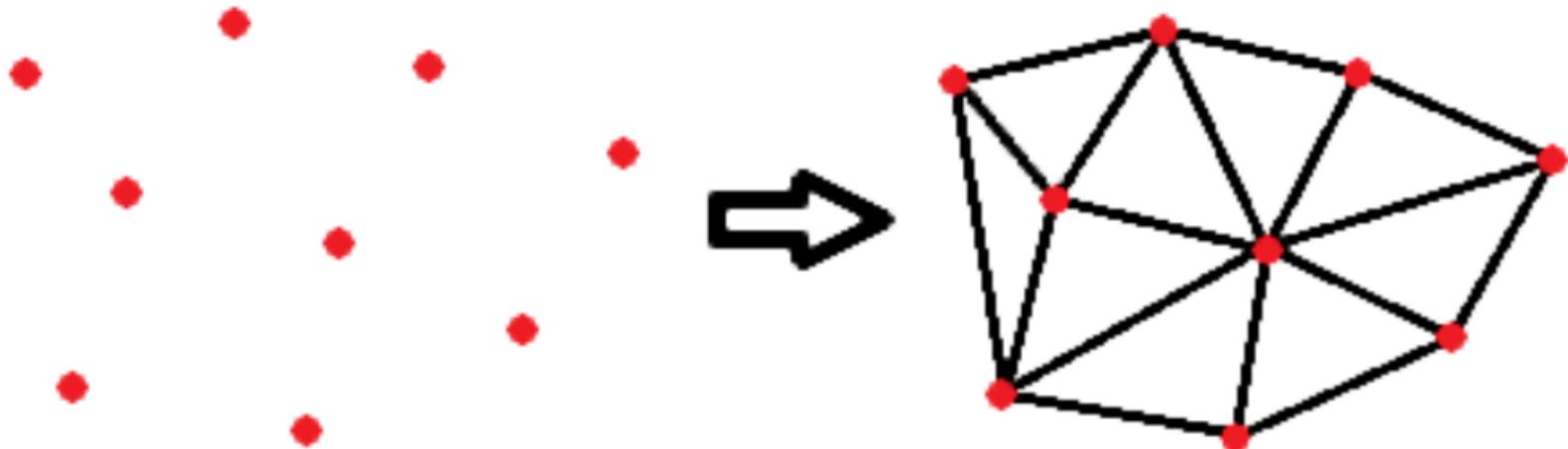
Текущее решение с учетом таких предположений:

- Наша местность может быть представлена $z = f(x, y)$. Поэтому используется 2D триангуляция Делоне (проецирование точек на плоскость)
- Все данные моделирования предварительно обрабатываются белым шумом



Картографирование с помощью датчиков силы

Триангуляция Делоне

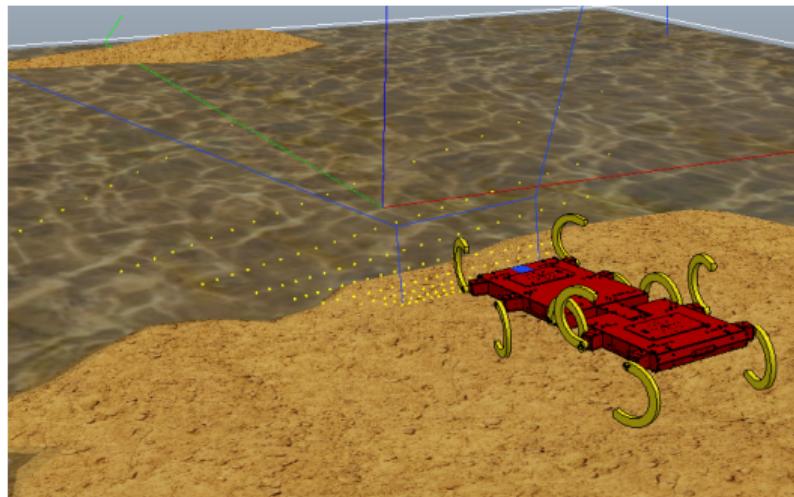


2D триангуляция Делоне (Выпуклая оболочка)
От облака точек к полигональной сетке

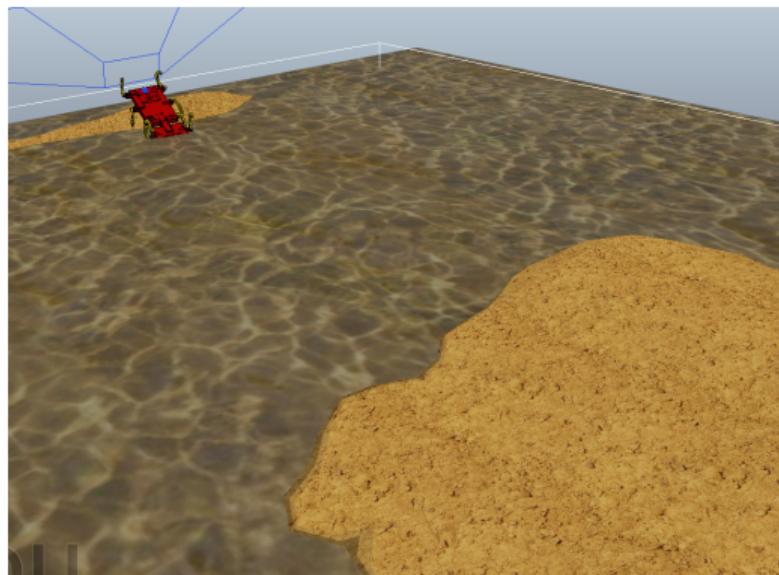


Картографирование с помощью датчиков силы

Результат: Симулятор, маршрут



Начало маршрута

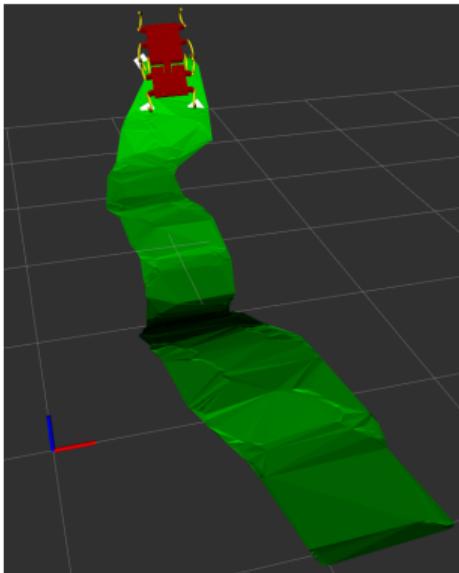


Конец маршрута

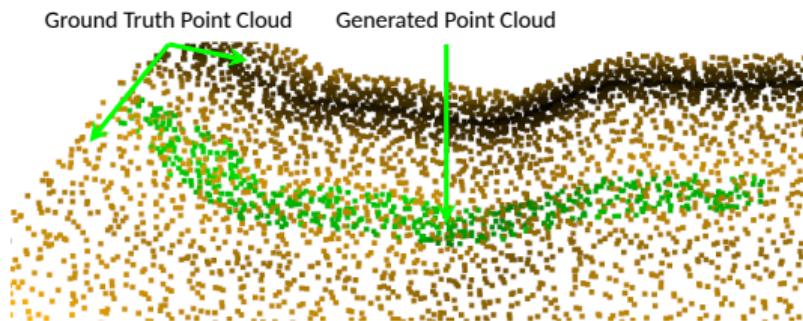


Картографирование с помощью датчиков силы

Результат: Полигональная сетка и сгенерированные точки



Сетка, созданная 2D триангуляцией
Делоне (вогнутая оболочка)

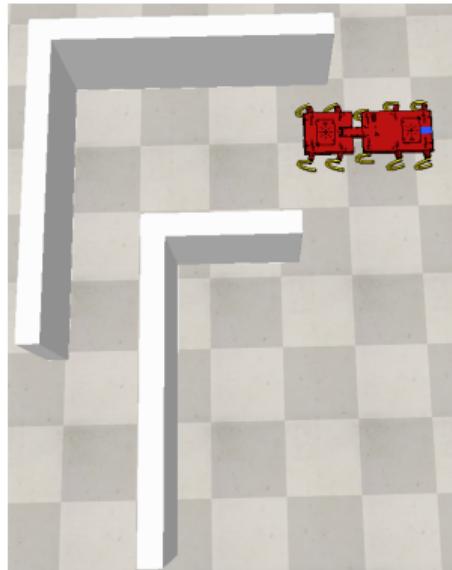


Наложенные облака точек

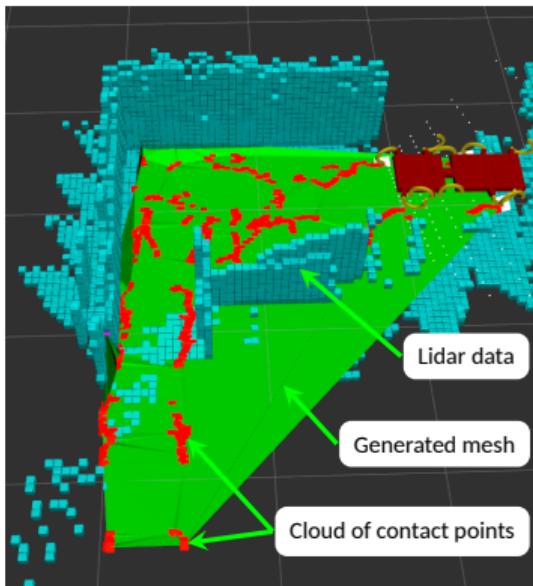


Картографирование с помощью датчиков силы

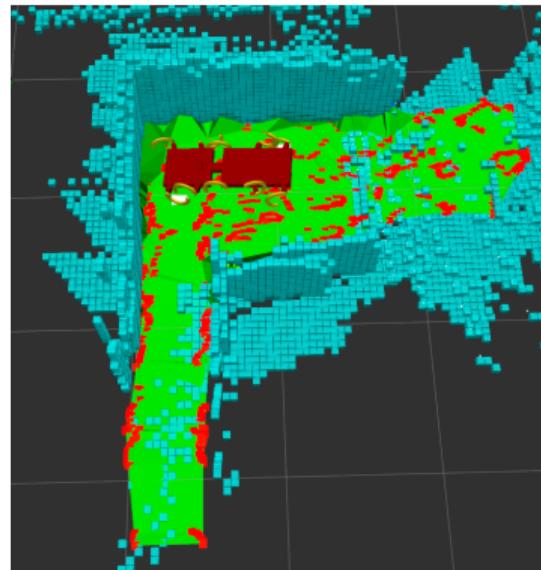
Почему важно использовать вогнутую оболочку



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

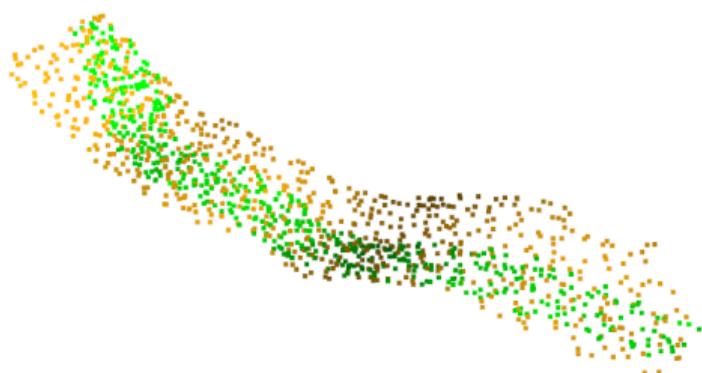


Вогнутая оболочка

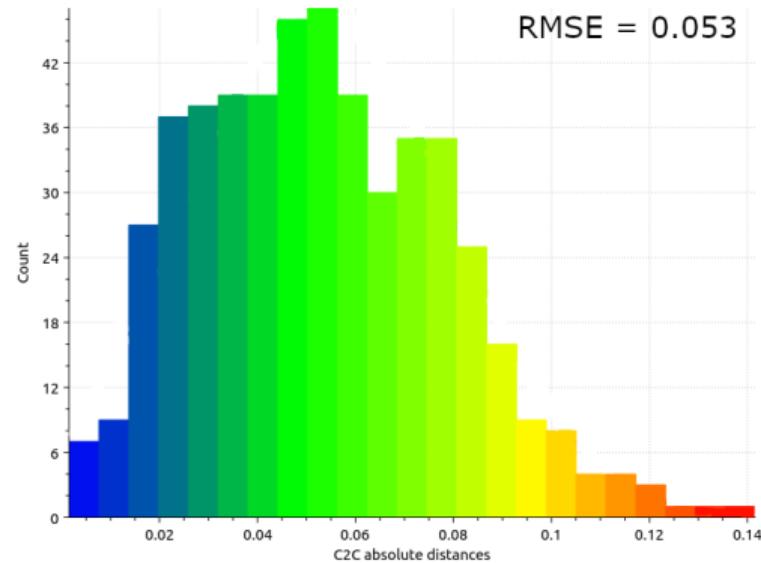


Картографирование с помощью датчиков силы

Метрика C2C: Сравнение эталонного и полученного облаков точек



Наложенные облака точек

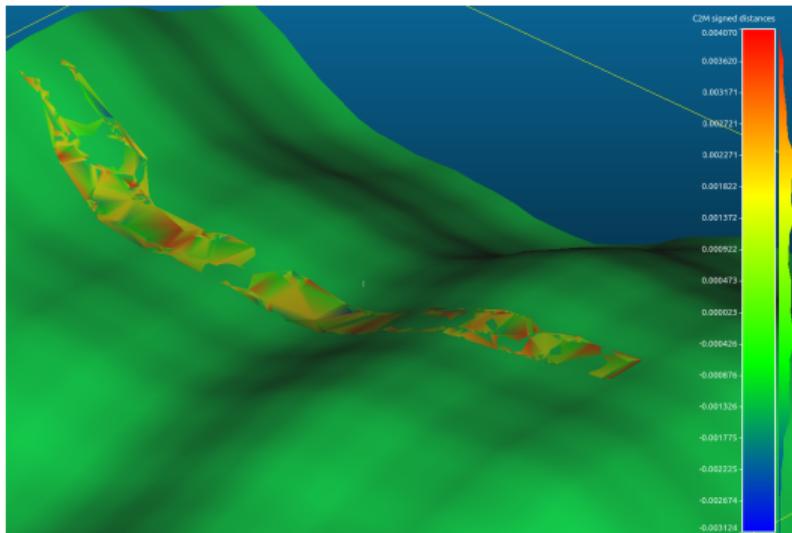


Гистограмма ошибок (расстояние от точки до ближайшей эталонной)

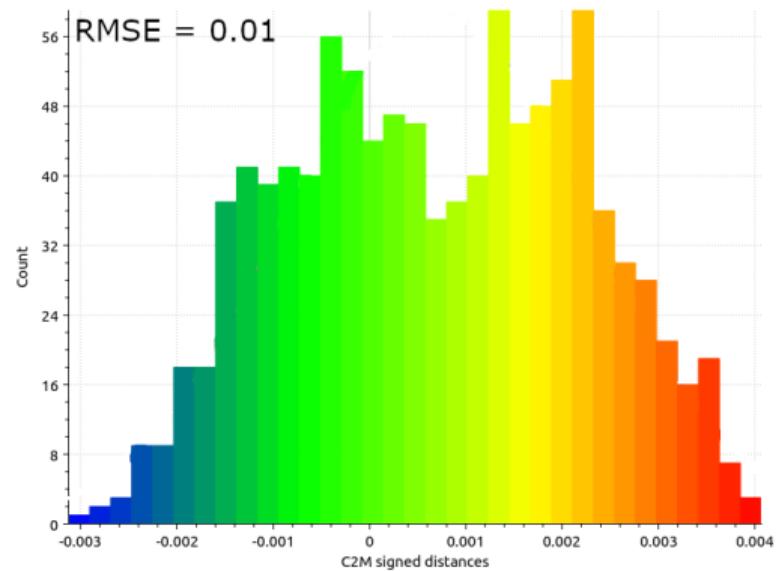


Картографирование с помощью датчиков силы

Метрика C2M: Сравнение эталонной и полученной сеток



Наложенные сетки

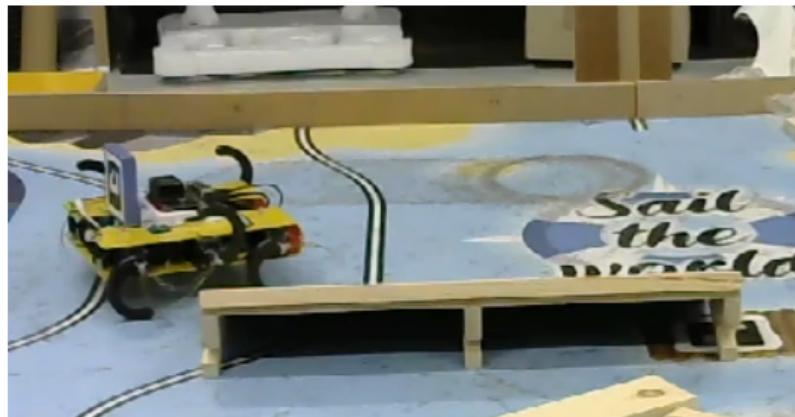


Гистограмма ошибок (расстояние от точки до ближайшей эталонной)

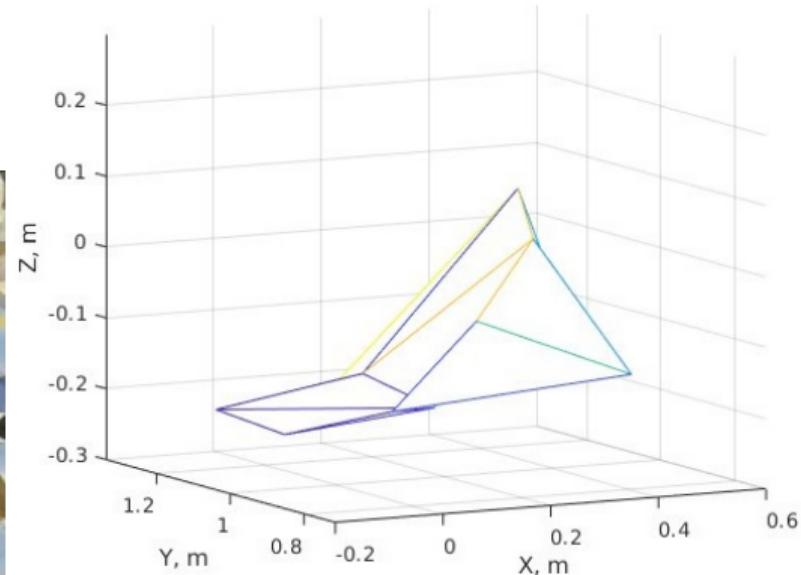


Картографирование с помощью датчиков силы

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног



Картографирование с помощью датчиков силы

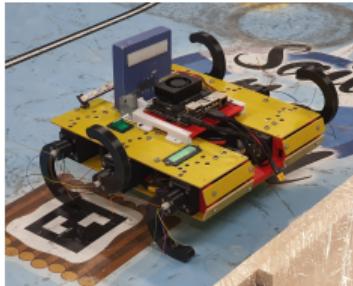
Итог

- Карта может быть построена с помощью вогнутой оболочки 2D триангуляции Делоне, где входными данными являются точки касания, определенные датчиком силы.
- Симулятор (Среднее значение среднеквадратичной ошибки):
 - При сравнении облаков точек составляет около 5 см.
 - При сравнении сеток составляет около 1 см.
- Натурный эксперимент (—//—):
 - При сравнении облаков точек составляет около 8 см.

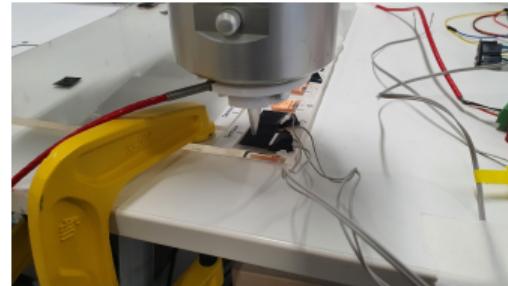
Это приемлемая точность для такой задачи.



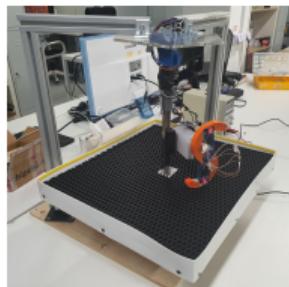
Глобальный итог



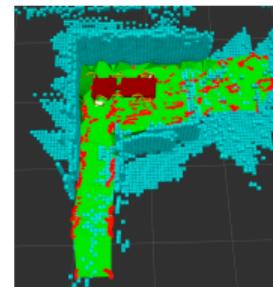
1. Структурный синтез



2. Датчик силы на основе Velostat



3. Определение поверхности



4. Ножное картографирование