



Разработка метода тактильного очищения для мобильного шагающего робота

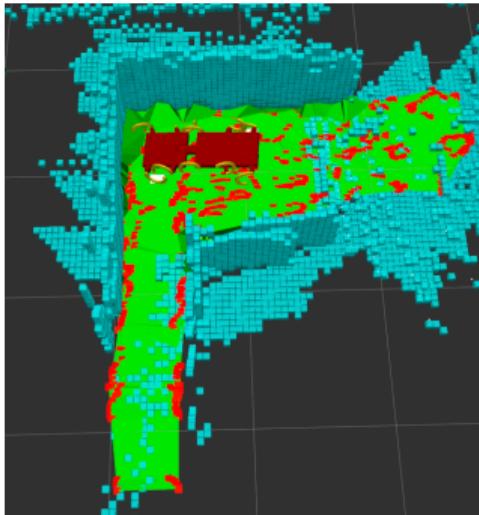
Аспирант: Олег Буличев

Руководитель: Александр Малолетов

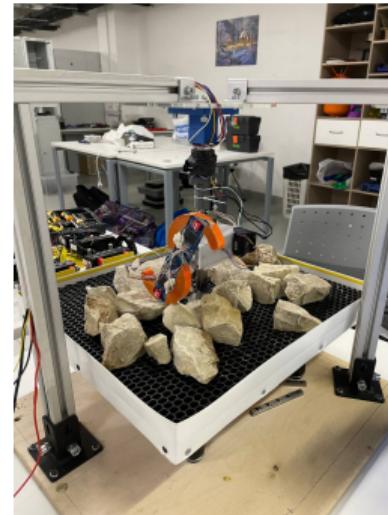


Цель работы

Определить геометрические и физические свойства пройденной поверхности с помощью шагающего движителя, используя тактильное очущение.



Определение геометрических свойств

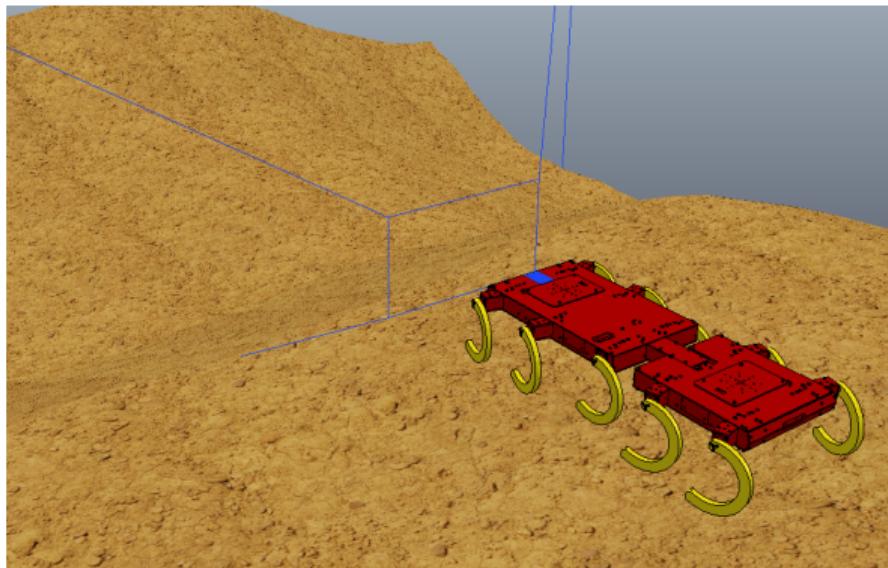


Определение физических свойств

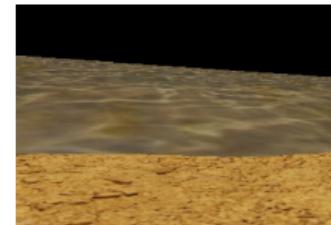
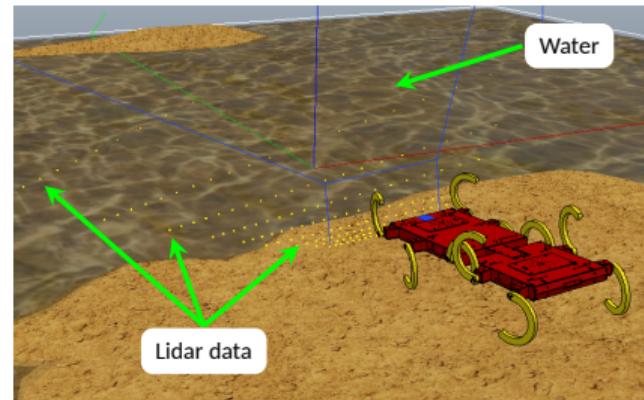


Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

Вопрос: Как картографировать поверхность под лужей?



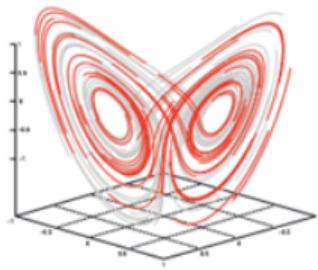
Поверхность без воды



Вид с камеры



Актуальность проблематики



Национальная
технол \circ гическая инициатива





Результаты решения задач

Научных задач (научная новизна)

1. Методика подбора количества ног для шагающих цикловых движителей.
2. Методика характеристизации датчика, когда площадь касания нагрузки меньше, чем размеры датчик.
3. Методика калибровки и алгоритм определения типа поверхности.
4. Методика определения геометрических свойств местности.

Инженерных задач

1. Шагающий цикловой движитель с одной степенью свободы в ноге.
2. Выбраны, откалиброваны и установлены не оптические сенсоры для определения свойств поверхности.
3. Алгоритм определения типа поверхности.
4. Алгоритм картографирования местности с помощью пальпирования ногами робота.



Литературный обзор

- Пещеры: препятствия, размеры.
 - Классификация пещер и препятствий
 - Оценка сложности территории
- Роботы для исследования пещер: от дирижаблей, до шагающих.
 - Робототехнические системы для исследования **свободных пещер**
- Способы получения силы реакции опоры.
 - Неявные и явные способы. Классификация типов датчиков силы
- Методы определения типа поверхности.
 - С помощью машинного обучения, используя набор датчиков
- Методы построения карты: оптические и тактильные.
 - Построение поверхности **с помощью датчика силы на манипуляторе**
 - Построение карты с помощью **лидаров и камер**

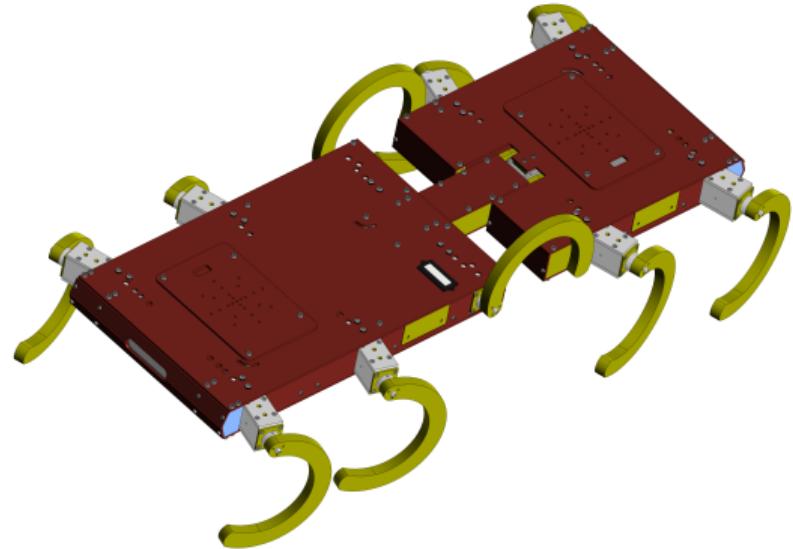


Разработка робота

Требования к роботу

Задача – выбрать движитель. Робот должен:

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

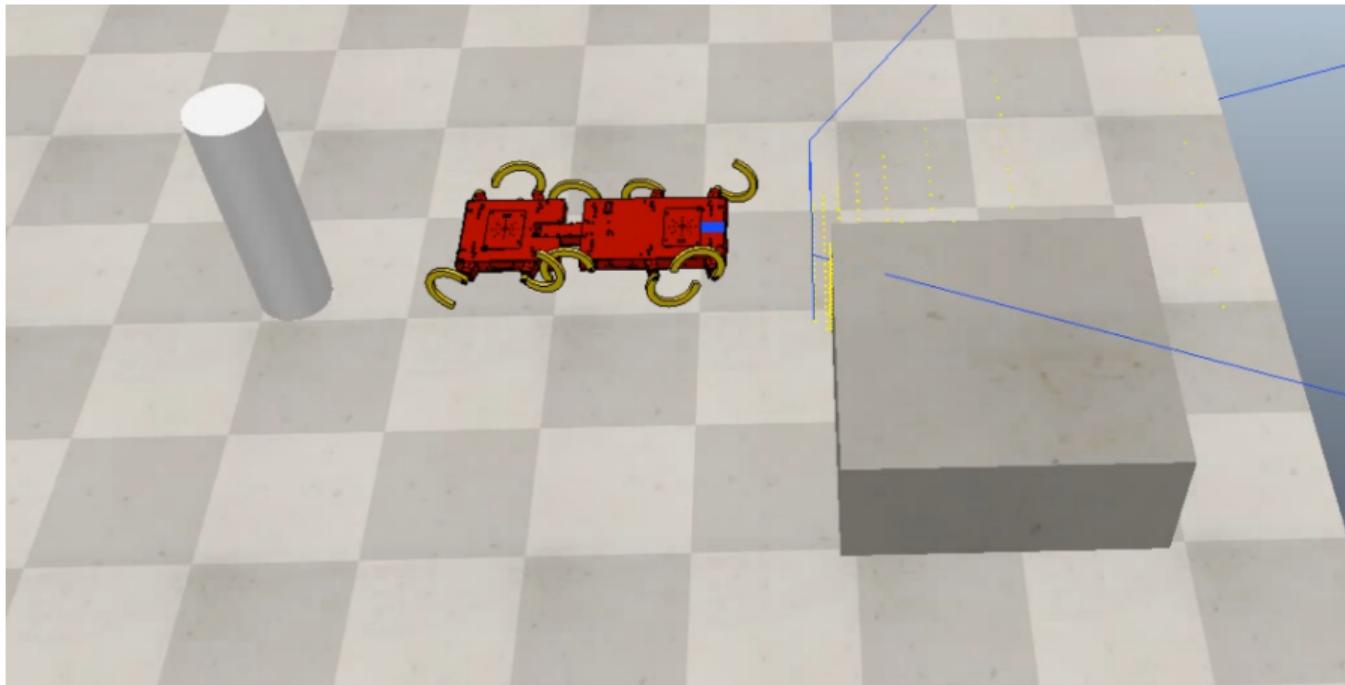


Шагающий цикловый движитель с 1 степенью свободы в ноге
СтриРус, 4-ая итерация



Разработка робота

Видео





Разработка робота

Структурный синтез

Вопрос

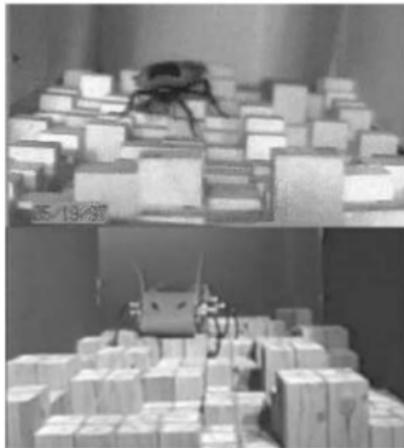
Какое оптимальное количество ног должен иметь такой движитель?

Ответ

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

Разработка робота

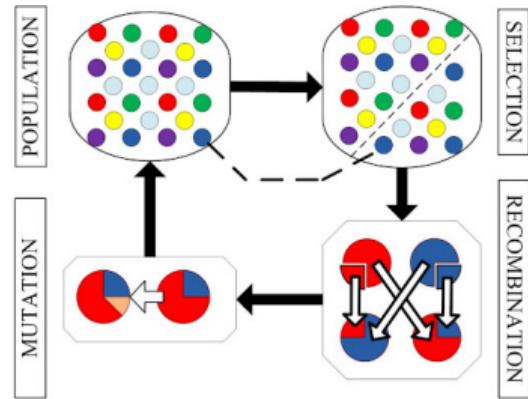
Используемые технологии



Генерация поверхности
(Параметризованная
искусственная территория)
Проблема формализации
сложности поверхности



Робосимулятор
(Неявная математическая
модель)
Громоздкость явной модели

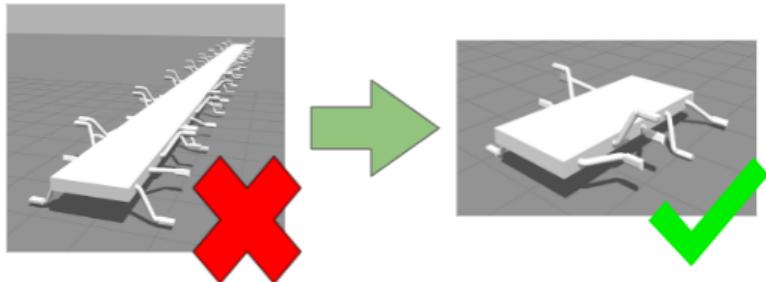


Генетический алгоритм
Отличен для
дискретной глобальной
мультикритириальной задачи
оптимизации

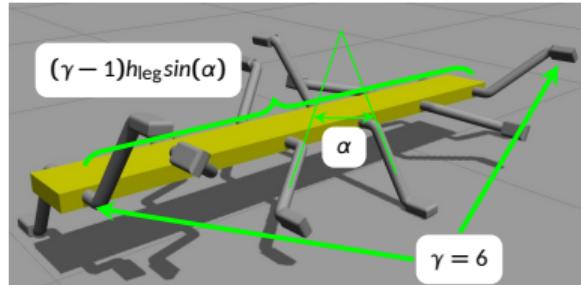


Разработка робота

Предлагаемое решение



Идея: Минимизировать кол-во ног
без потери проходимости



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

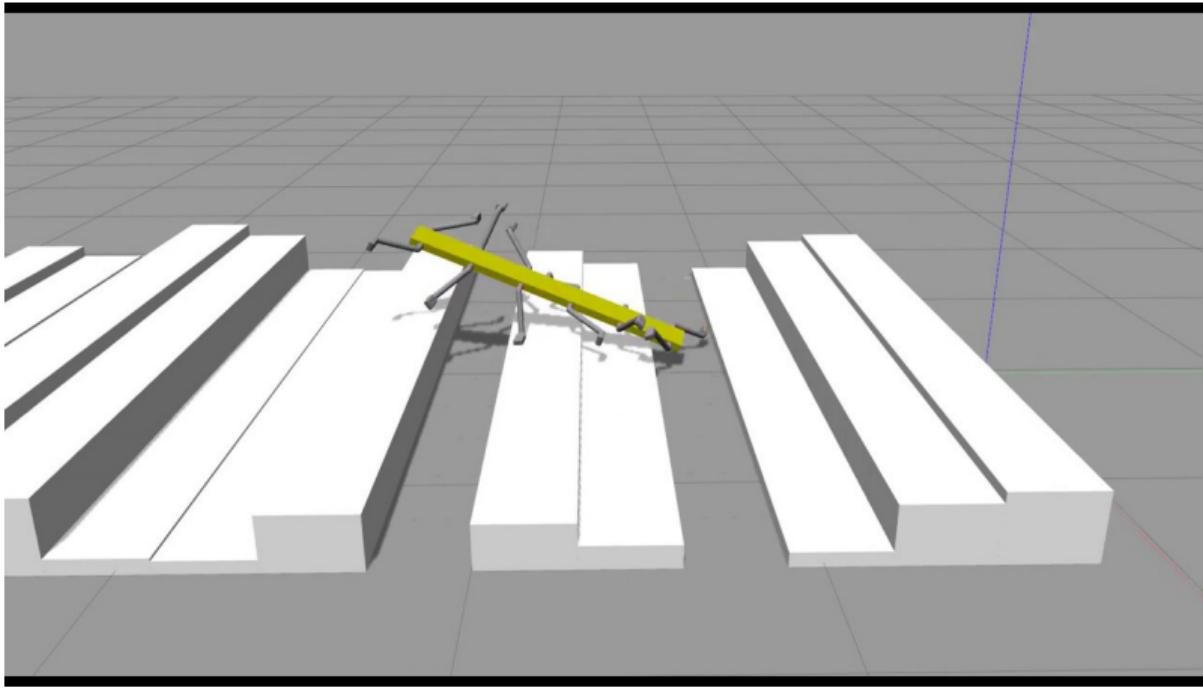
β – адаптивный параметр,

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



Разработка робота

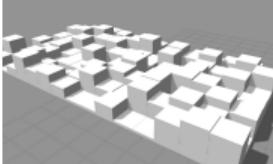
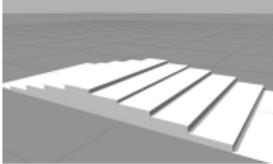
Видео: История одного сгенерированного робота





Разработка робота

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

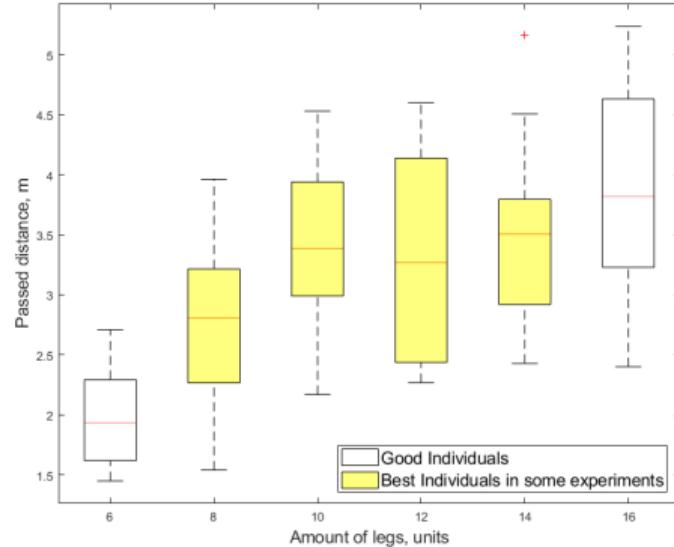
	Тип территории	Кол-во ног	Угол между соседними ногами	Кол-во индивидов
Этап 1		12	73	200
		12	72	
Этап 2		10	68	55
		12	77	



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 преобразователя силы

Вопрос

Как получить силу реакции опоры?

Ответ

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

Пьезорезистивный датчик основанный Velostat: дешевый и надежный, но имеет проблемы с гистерезисом



Разработка преобразователя силы

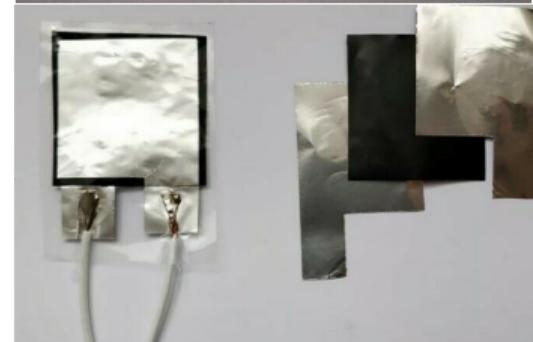
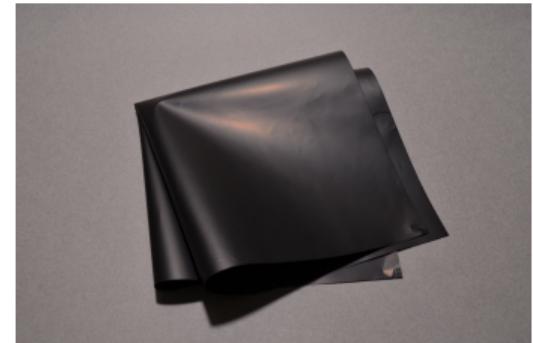
Velostat

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



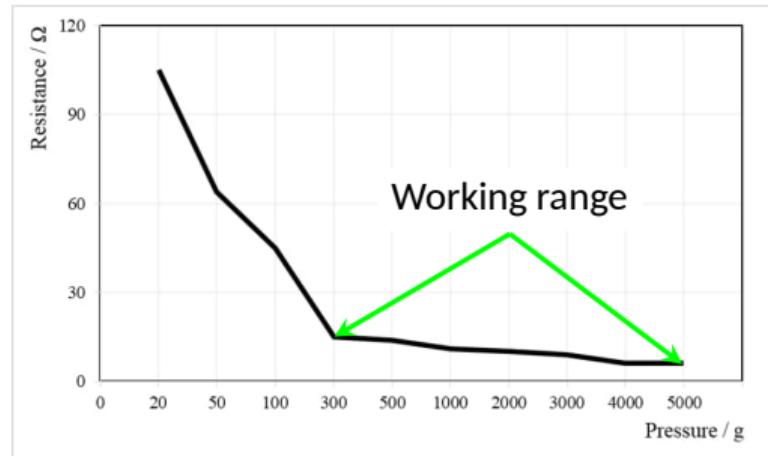
Простейший
преобразователь силы



Разработка преобразователя силы

Velostat: Встреченные проблемы

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



Научная постановка задачи

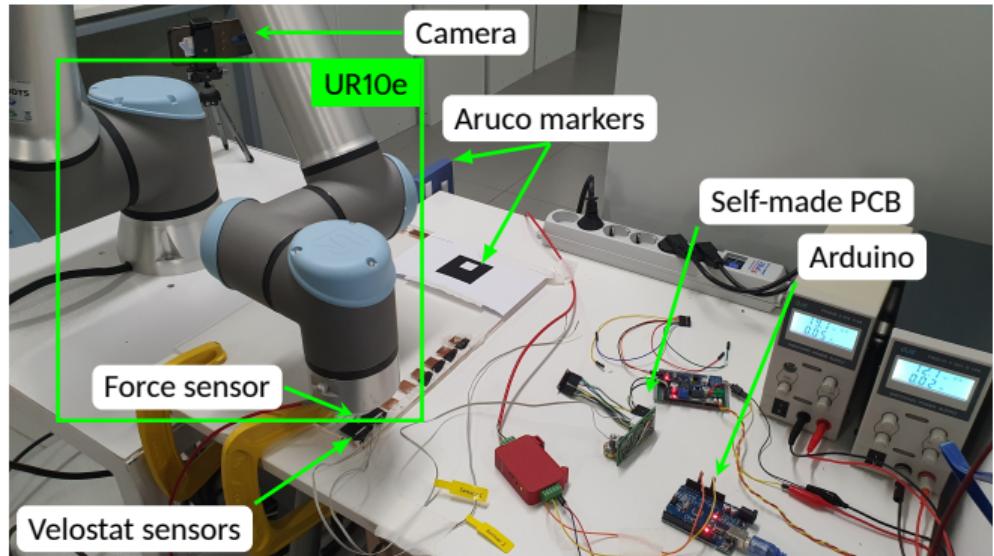
Охарактеризовать материал Velostat для случаев, когда точечная нагрузка меньше размера датчика, и предложить решения для предотвращения подобных проблем.



Разработка преобразователя силы

Требования к установке

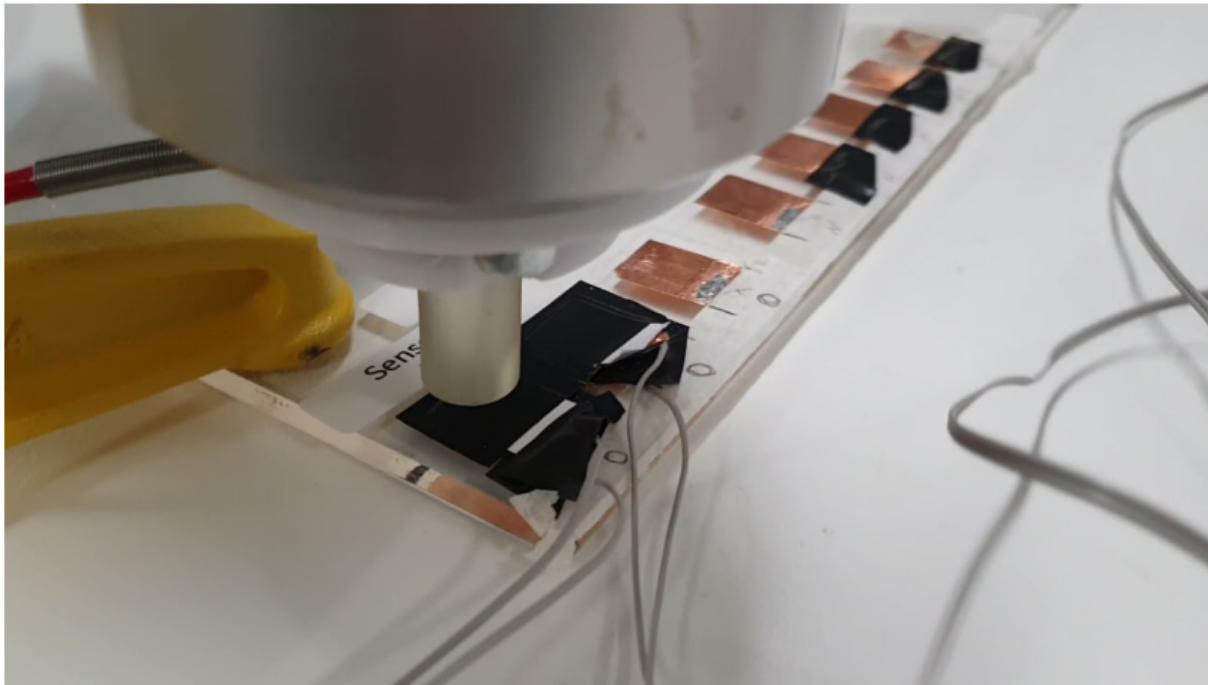
- Управление силой нажатия
Импедансное управления
- Повторяемость
эксперимента по силе и
позиции
Добавив манипулятор и
камеру
- Возможность нажимать
только на часть сенсора
Насадки для манипулятора





Разработка преобразователя силы

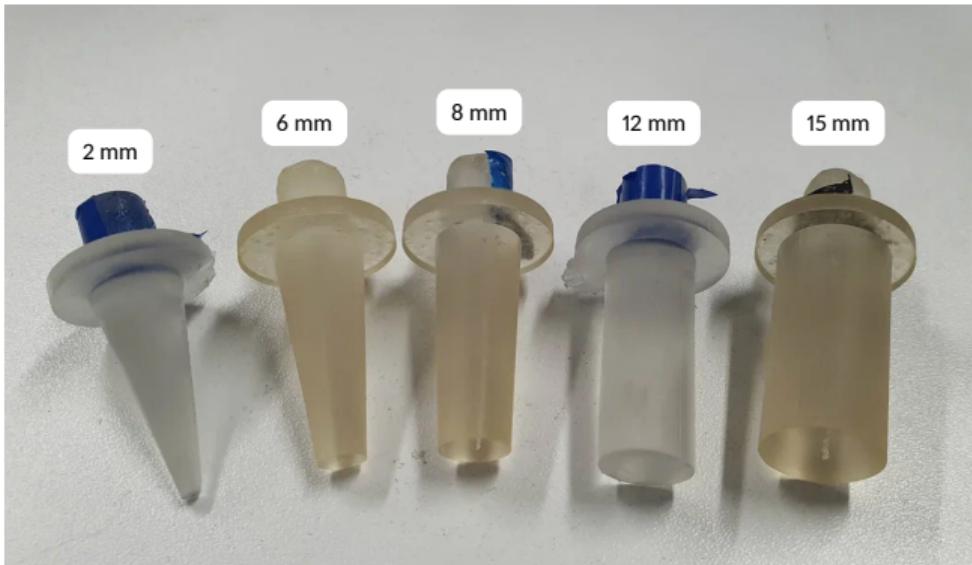
Установка: Видео





Разработка преобразователя силы

Установка: Насадки



Все насадки



Промышленный
датчик силы



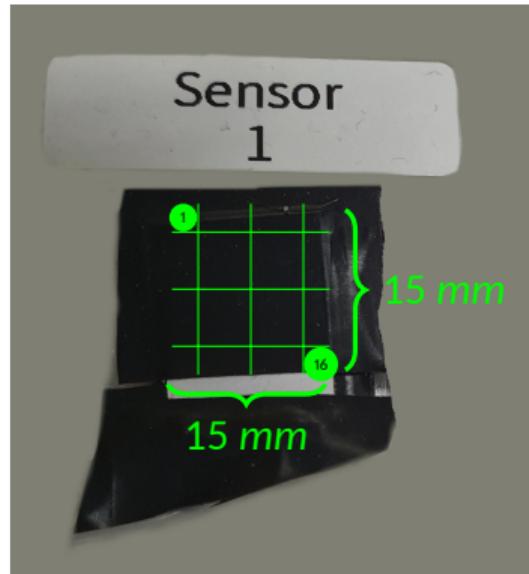
Насадка в сборке



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

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

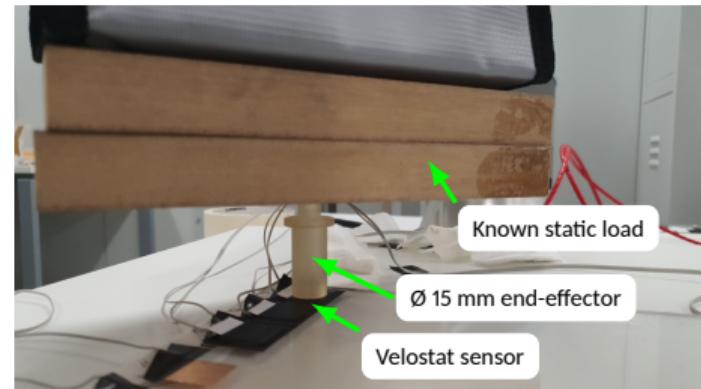
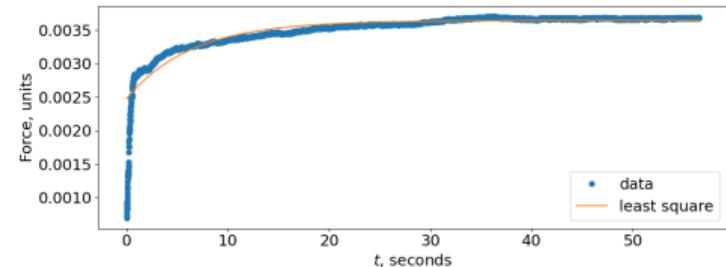
$$k_p = A_1 e^{-A_2 p}; \tau_{res} = B_0 + B_1 e^{-\frac{p}{B_2}}$$

Где V_0 – начальное напряжение,

p – приложенное давление,

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

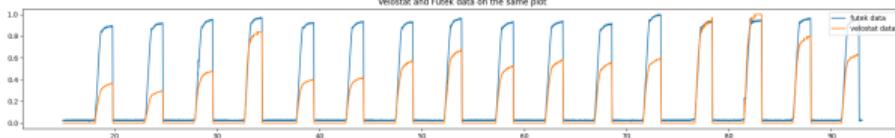
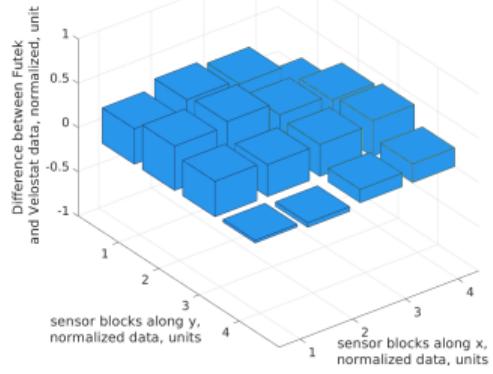
t – текущее время, t_0 – время начала нажатия.



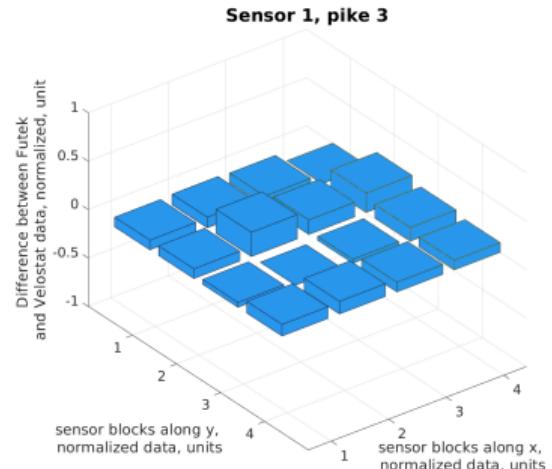


Разработка преобразователя силы

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

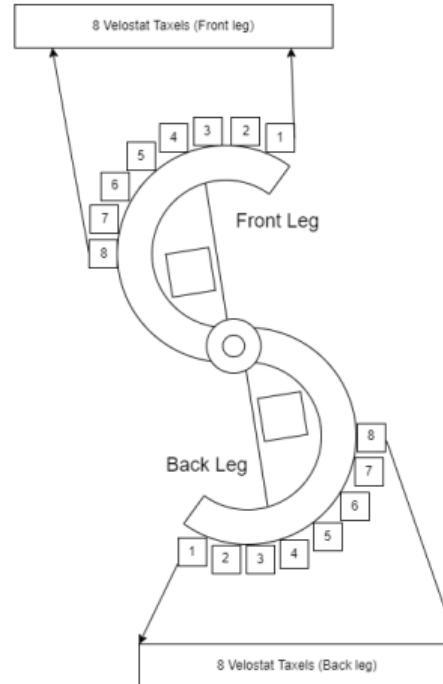
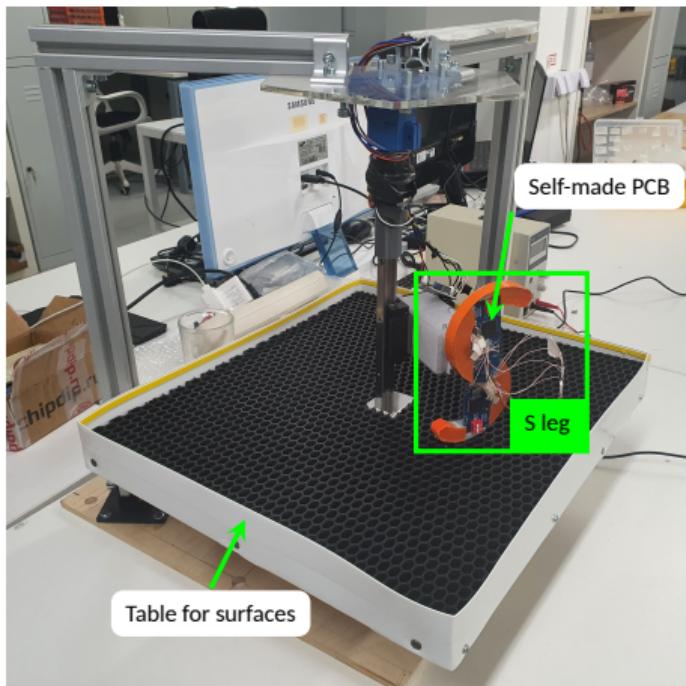
- Иметь возможность быстро менять используемые поверхности
Решается с помощью быстроразборного стола
- Бесконечное движение робота
Решается путем создания 2-ух степенного механизма и ноги S-образной формы
- Узел движителя должен быть такой же как на СтриРусе
Решено путем создания крепления для узла ноги

Все требования выполнены



Определение типа поверхности

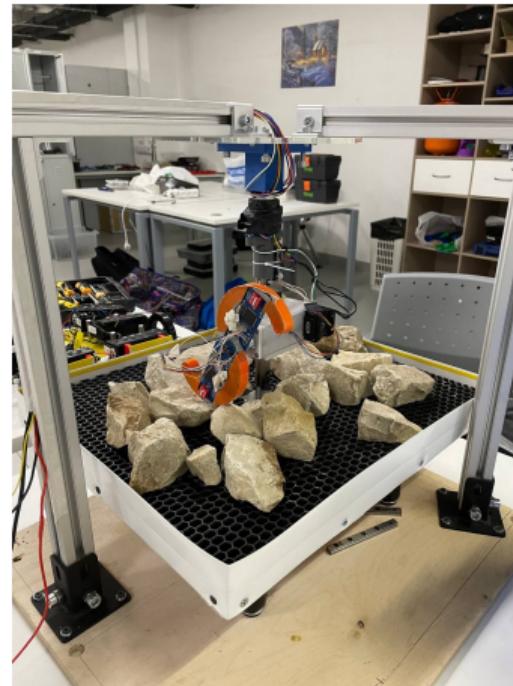
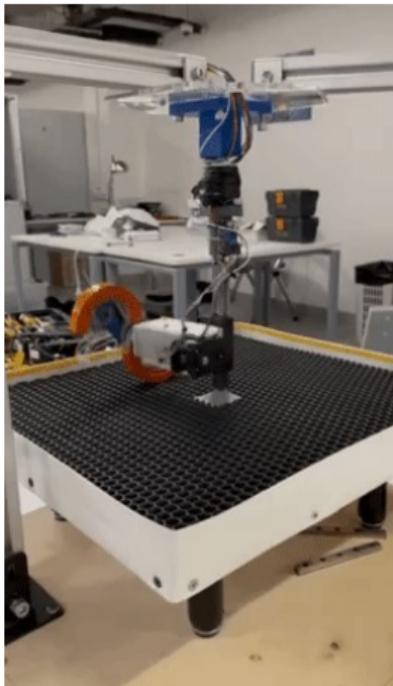
Установка





Определение типа поверхности

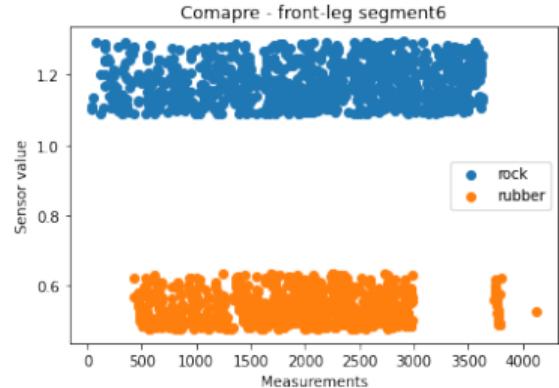
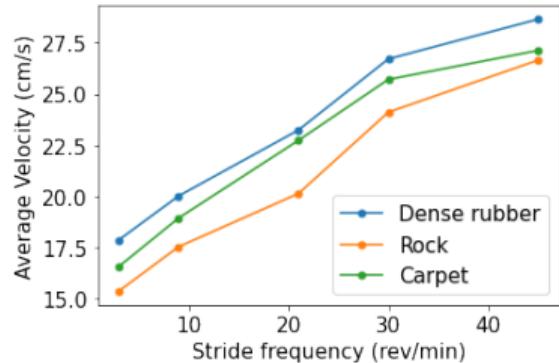
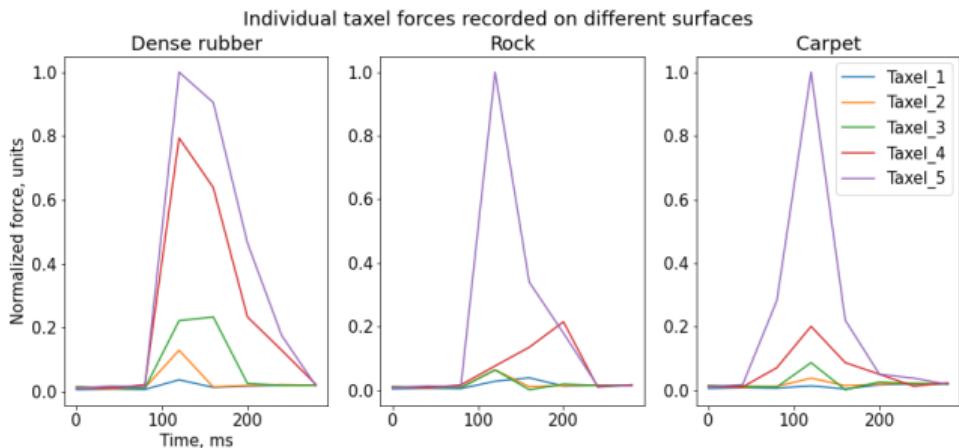
Установка: Типы поверхности, видео





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?

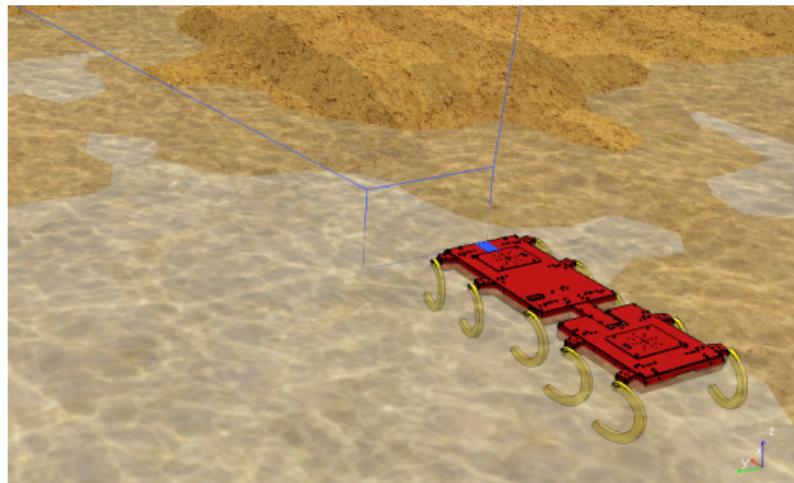
Ответ

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

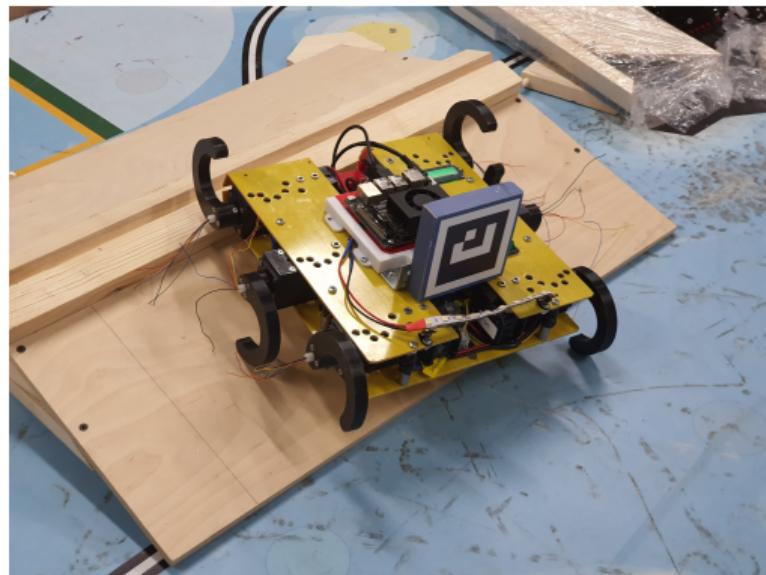


Картографирование с помощью датчиков силы

Места проведения экспериментов



CoppeliaSim симулятор,
4th gen СтриРус



Натурные испытания,
3th+ gen СтриРус



Картографирование с помощью датчиков силы

Предположения

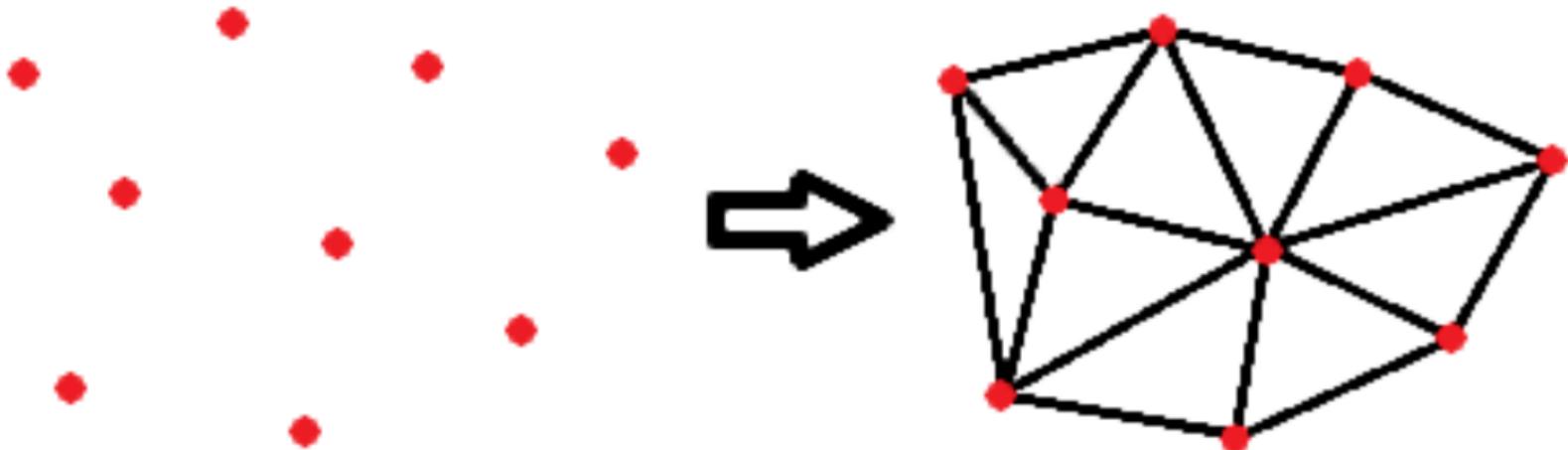
Текущее решение с учетом таких предположений:

- 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

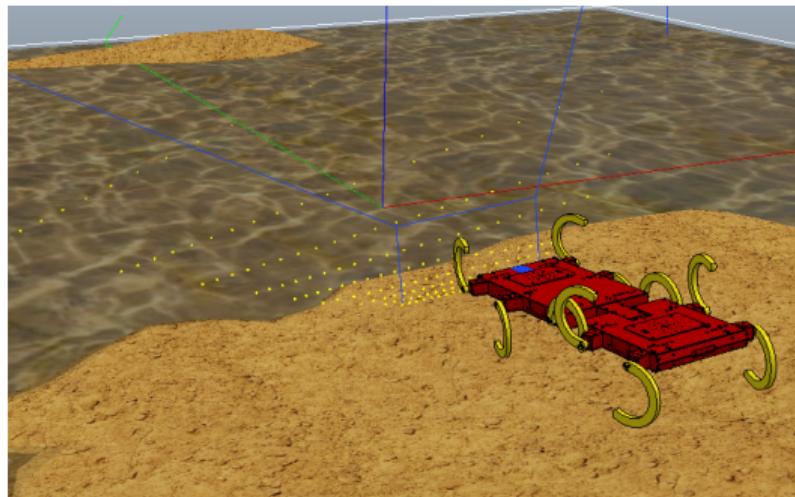


2D триангуляция Делоне (Выпуклая оболочка)
От облака точек к полигональной сетке

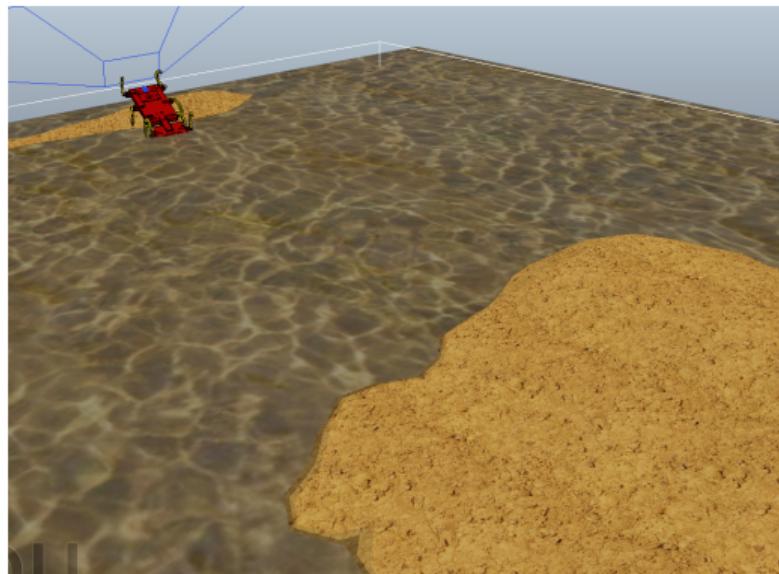


Картографирование с помощью датчиков силы

Результат: Симулятор, маршрут



Начало маршрута

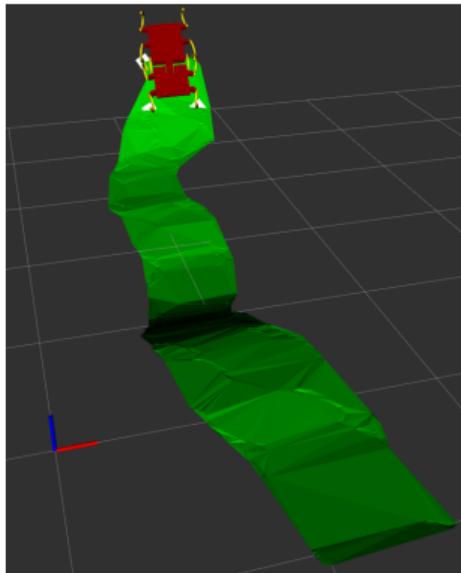


Конец маршрута

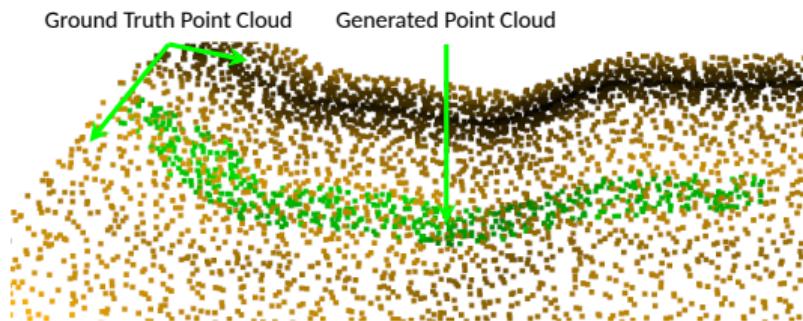


Картографирование с помощью датчиков силы

Результат: Полигональная сетка и сгенерированные точки



Сетка, созданная 2D триангуляцией
Делоне (вогнутая оболочка)

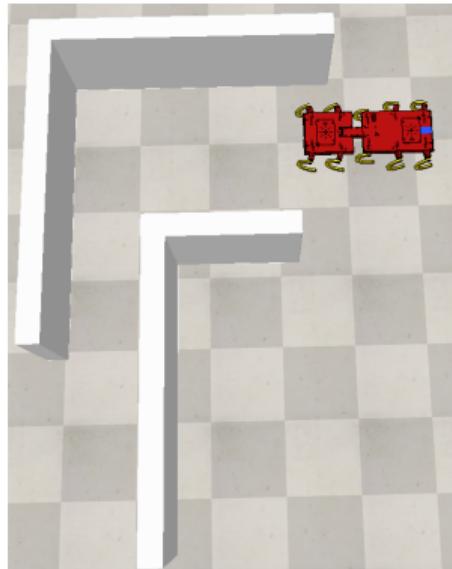


Наложенные облака точек

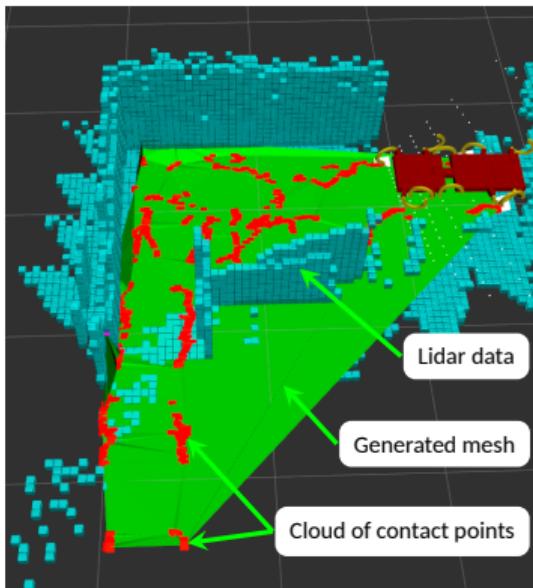


Картографирование с помощью датчиков силы

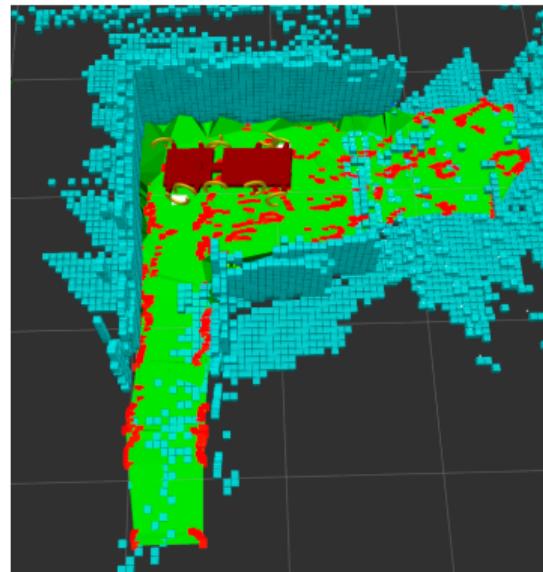
Почему важно использовать вогнутую оболочку



Пример поверхности



Выпуклая оболочка

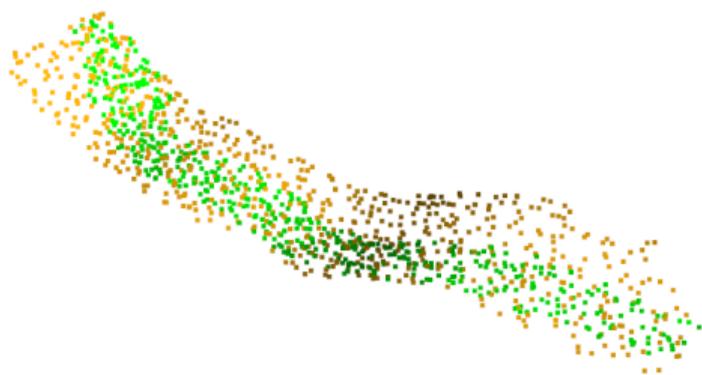


Вогнутая оболочка

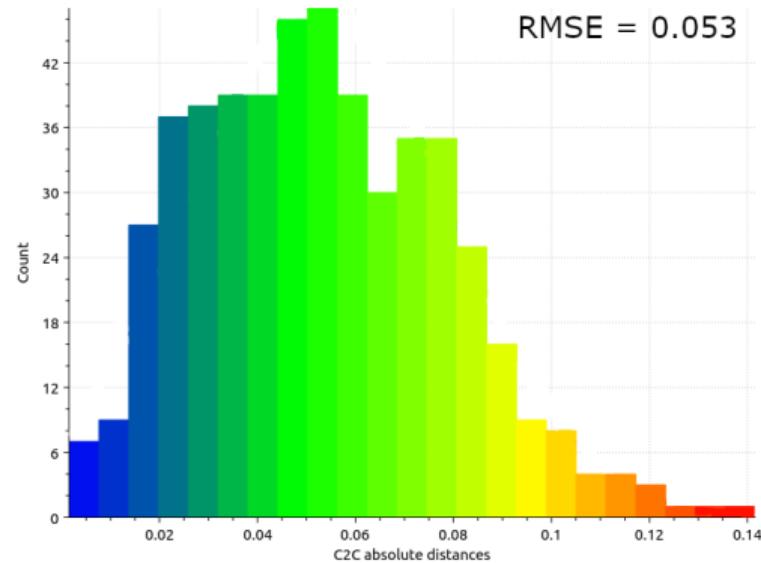


Картографирование с помощью датчиков силы

Метрика C2C: Сравнение эталонного и полученного облаков точек



Наложенные облака точек

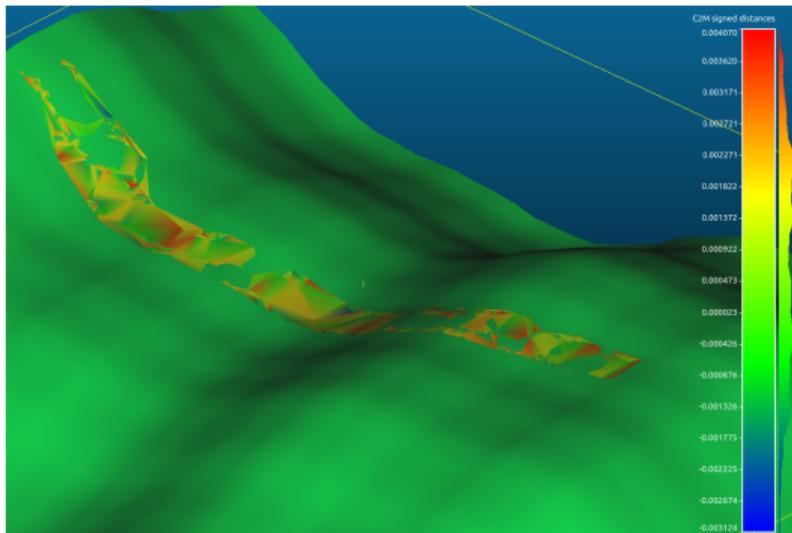


Гистограмма ошибок (расстояние от точки до ближайшей эталонной)

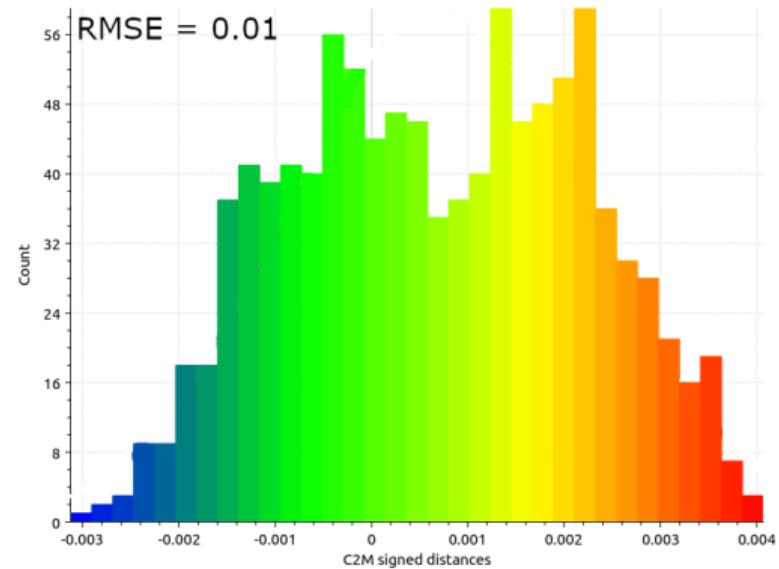


Картографирование с помощью датчиков силы

Метрика C2M: Сравнение эталонной и полученной сеток



Наложенные сетки

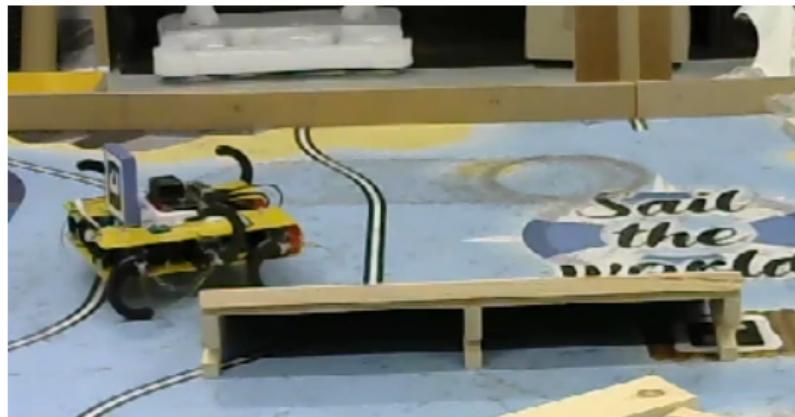


Гистограмма ошибок (расстояние от точки до ближайшей эталонной)

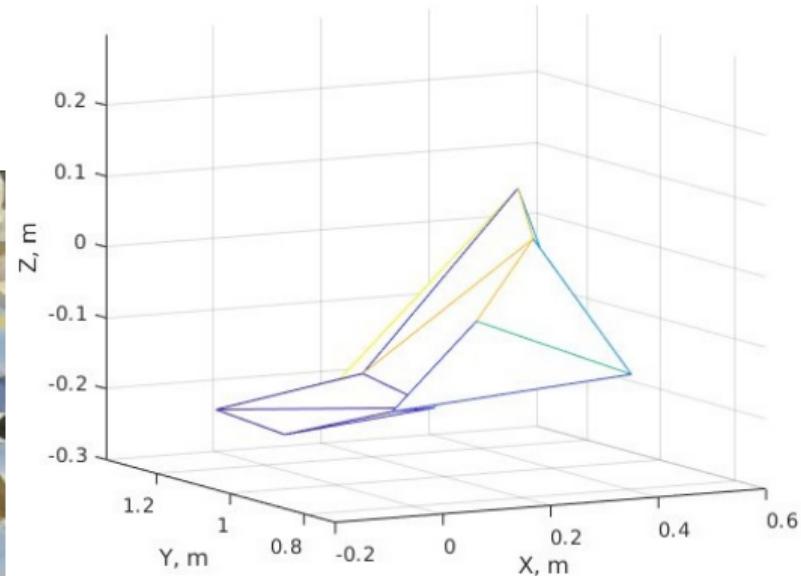


Картографирование с помощью датчиков силы

Результат: Натурные испытания, Видео



Робот проходит препятствие



Полигональная сетка, полученная с помощью ног



Картографирование с помощью датчиков силы

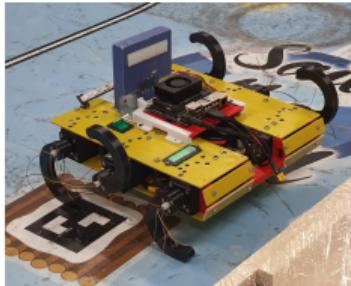
Итог

- 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.



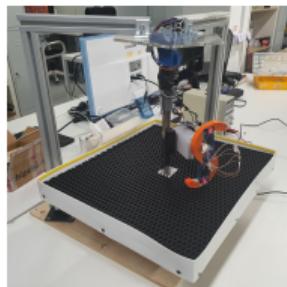
Глобальный итог



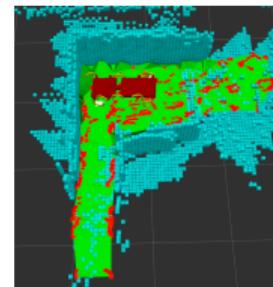
1. Структурный синтез



2. Датчик силы на основе Velostat



3. Определение поверхности



4. Ножное картографирование