



Разработка метода тактильного очищения для мобильного шагающего робота

Студент: Олег Буличев

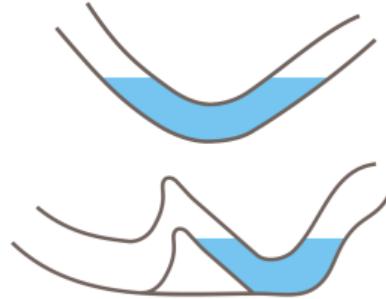
Научный руководитель: Александр Малолетов



Необходимость исследования пещер роботами



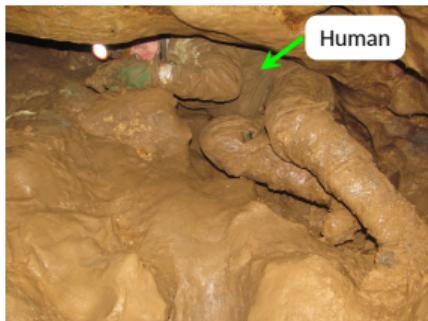
Соляные отложения



Сифоны



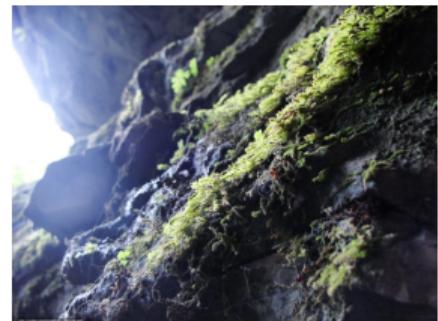
Ледяные пещеры



Глина



Лужа

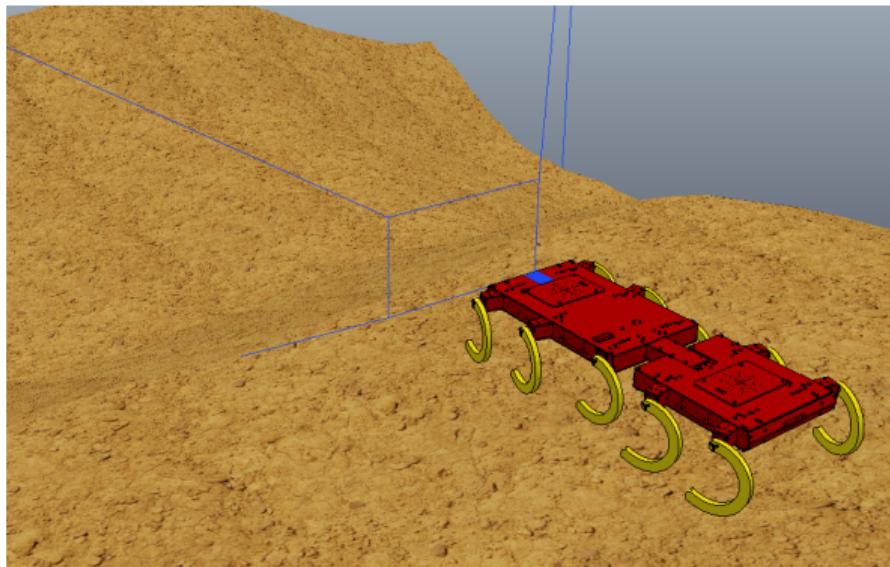


Mox

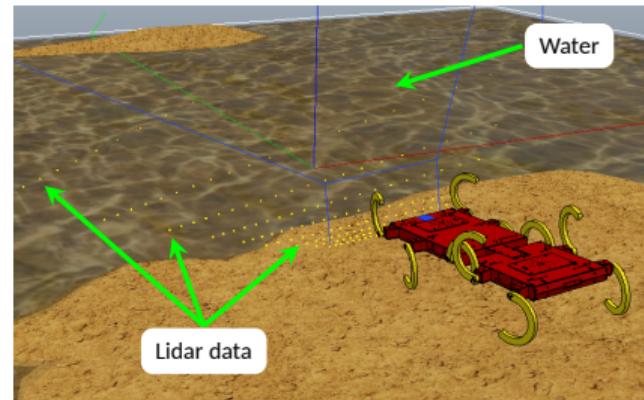


Нерешаемая задача с помощью камеры или лидара

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

Проблема – 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*;
- возможность залезать на *большие валуны*;



Разработка робота

Требования к работе

Проблема – 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*;
- возможность залезать на *большие валуны*;

Шагающий цикловой движитель с 1 степенью свободы в ноге



Разработка робота

Структурный синтез

Вопрос

Какое оптимальное количество ного должно быть в таком движителе?



Разработка робота

Структурный синтез

Вопрос

Какое оптимальное количество ного должно быть в таком движителе?

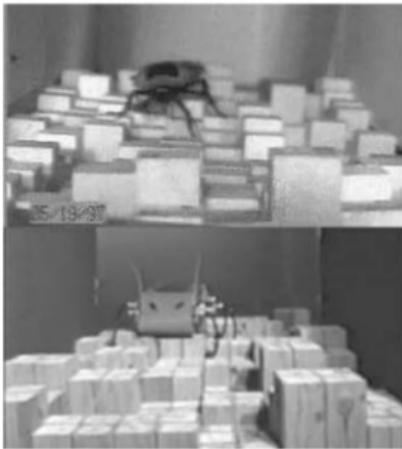
Ответ

Робот должен иметь **8—14 ног!**



Разработка робота

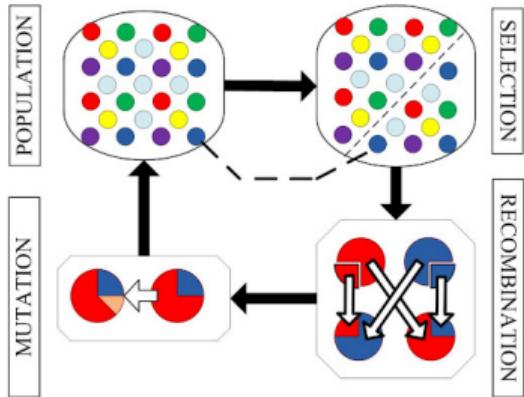
Используемые технологии



Генерация поверхности
(Робот проходит по
параметризованной
искусственной территории)



Робототехнический
симулятор



Генетический алгоритм
(OpenAI-ES алгоритм)



Разработка робота

Предположения

- Сгенерированное семейство с одинаковыми константами имеет ту же сложность.

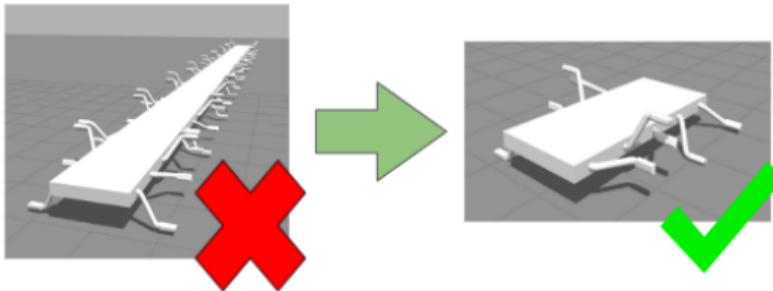
Параметры для генерации:

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

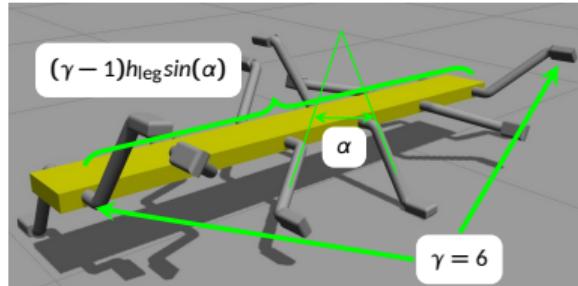


Разработка робота

Предлагаемое решение



Идея: Минимизировать кол-во ног
без потери проходимости



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

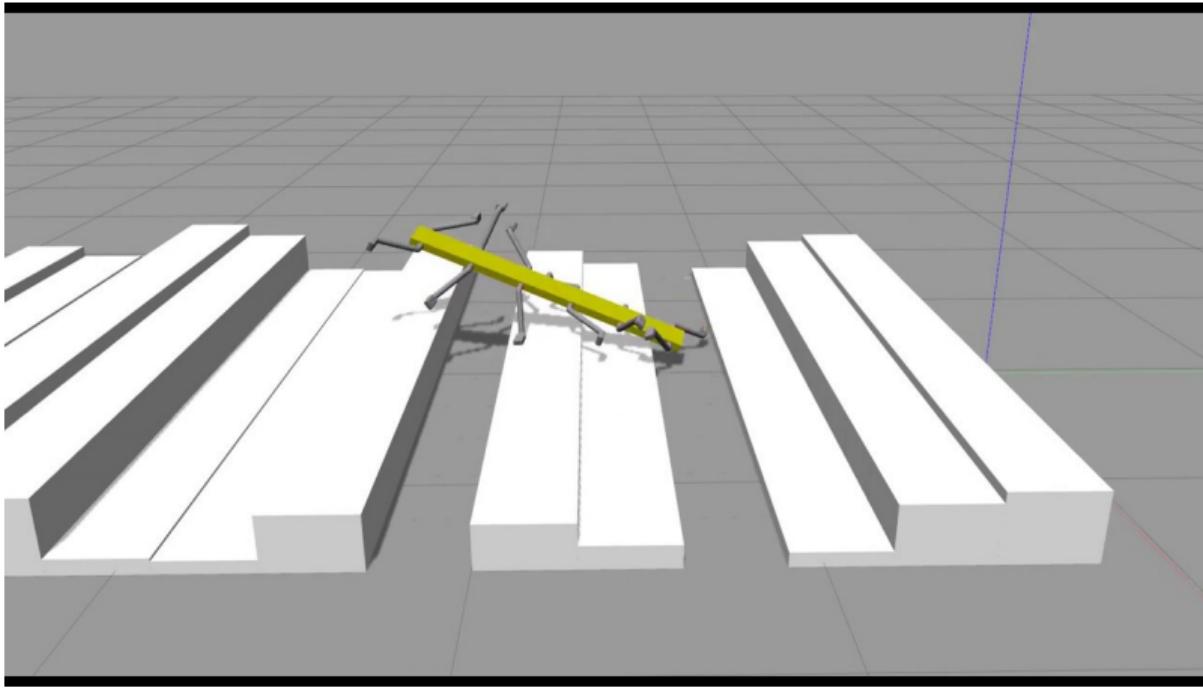
β – адаптивный параметр,

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



Разработка робота

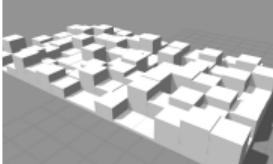
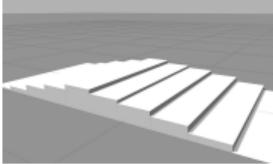
Видео: история одного сгенерированного робота





Разработка робота

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

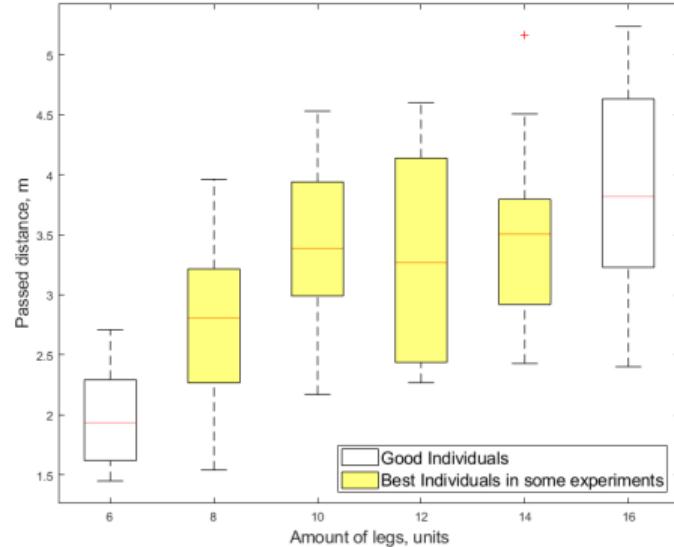
	Тип территории	Кол-во ног	Угол между соседними ногами	Кол-во индивидов
Этап 1		12	73	200
		12	72	
Этап 2		10	68	55
		12	77	



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?

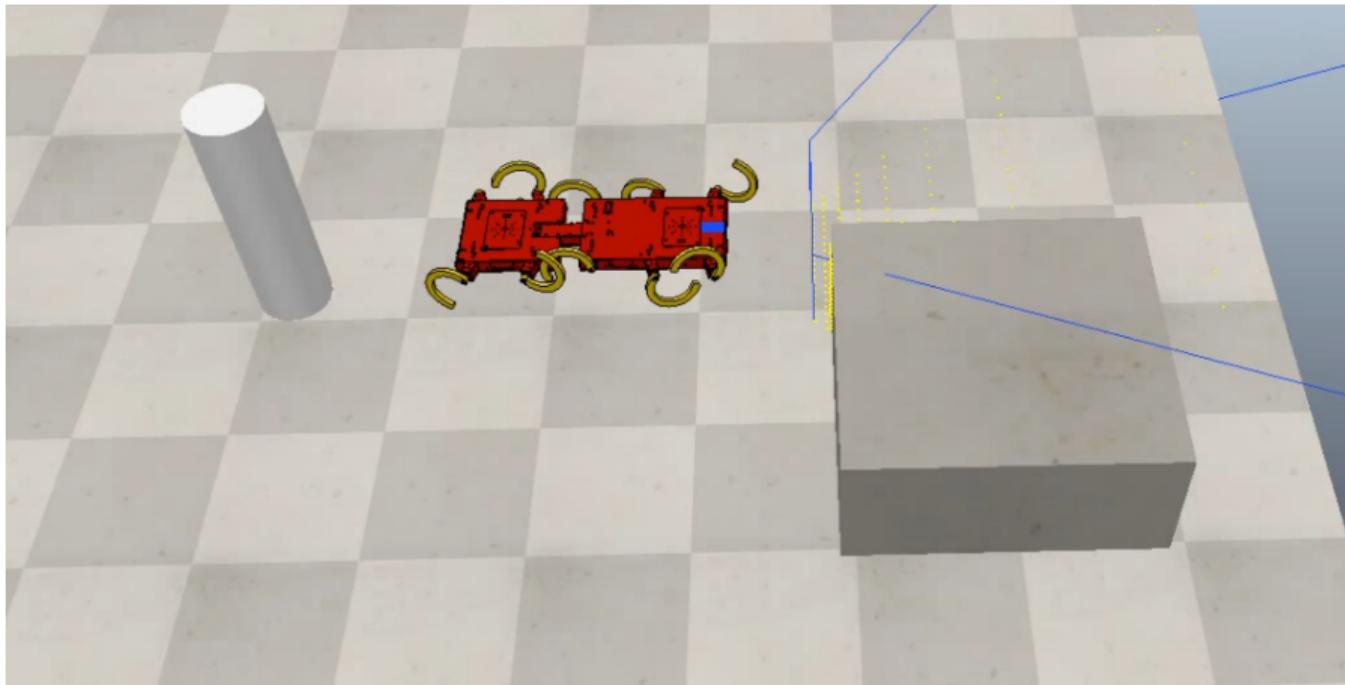
Answer

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



Разработка робота

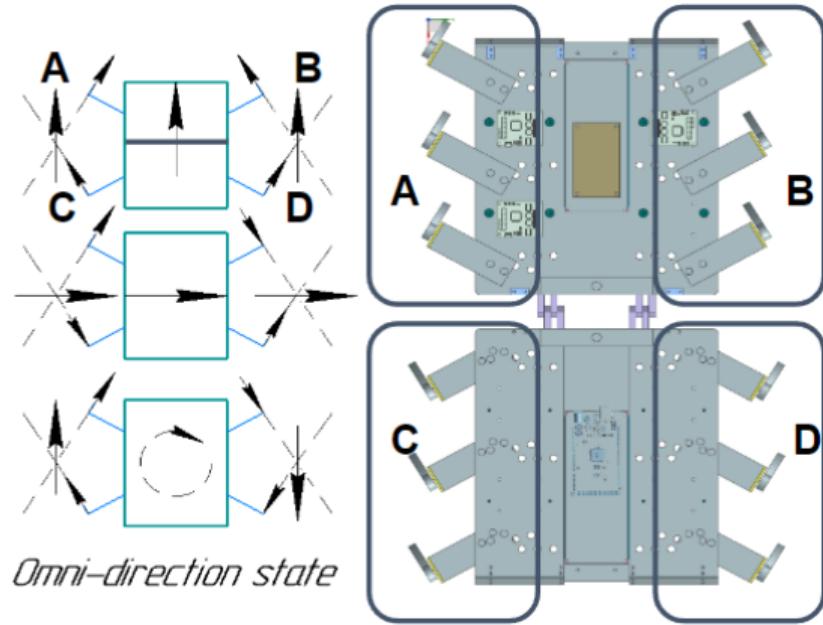
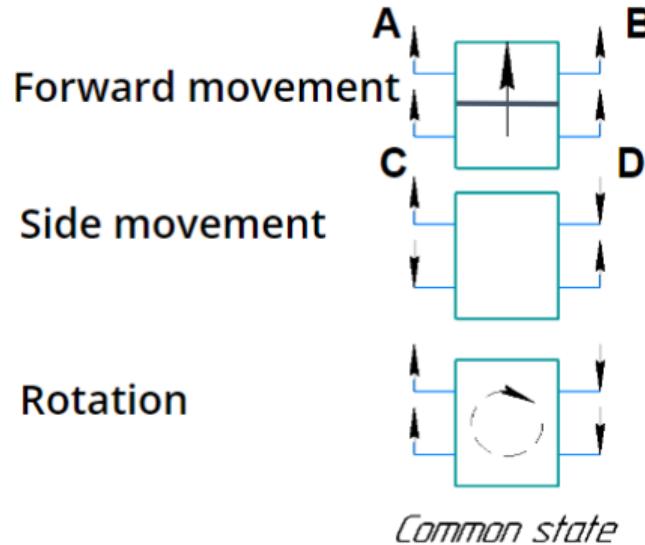
Видео





Разработка робота

Предлагаемое решение

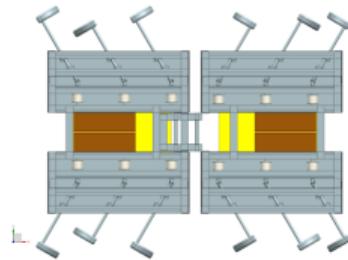
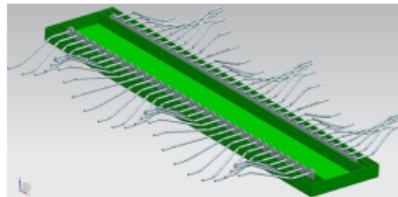


Векторное представление сил в стандартной и всенаправленной компоновке



Разработка робота

Проботипы робота СтриРус (1)

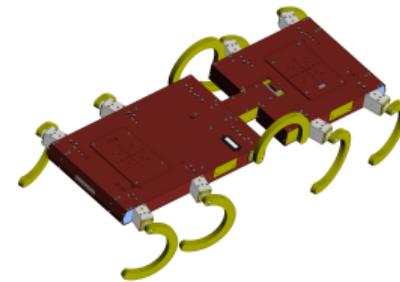
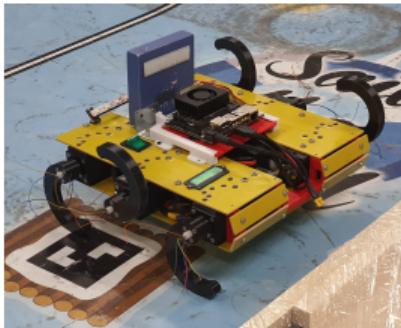


Поколение	1	2	3
Кол-во ног	54	12	12
Кол-во сегм.	1	2	2
Соед. узел	—	Тангаж	Тангаж, Рыскание
Отн. угол нога-тело, град	0	0-45	0, 15, 30, 45
Высота ноги, мм	54	60	60
Особенности	Волноход	Непрерывный механизм	2 DoF у соед. узла
Недостатки	- Невозможно установить датчики силы - Малый КПД	- Сложный механизм изм. угла	- 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

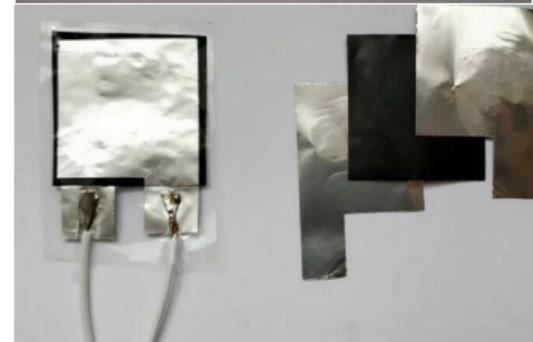
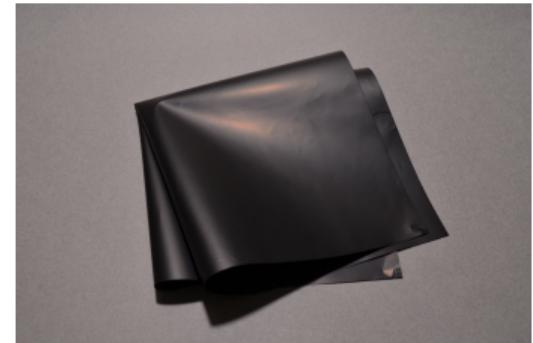
Velostat

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.



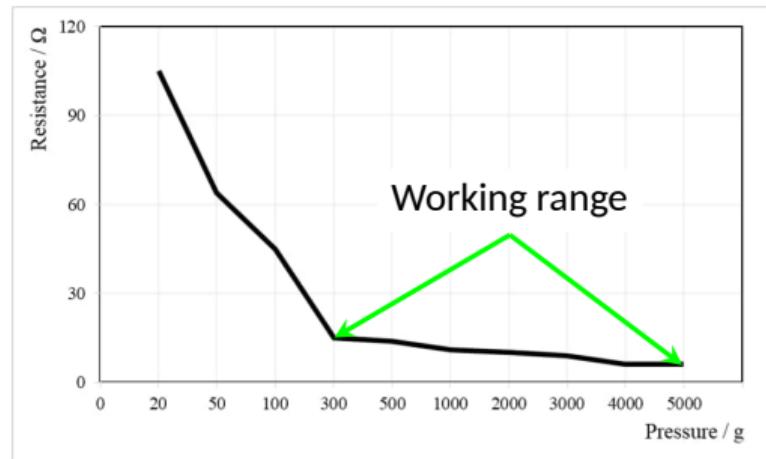
Простейший
преобразователь силы



Разработка преобразователя силы

Velostat: Faced problems

- Hysteresis
- Nonlinearity
- Different values with the same pressure if the square of load is less than the sensor



Scientific Problem Statement

To characterize Velostat material for cases when point load is less than sensor size and propose solutions for avoiding such issues.



Разработка преобразователя силы

Experimental setup requirements

- Force control.
- Position and force repeatability.
- To have an ability to apply force only on a particular part of a sensor.



Разработка преобразователя силы

Experimental setup requirements

- Force control.

Solved by Impedance Control

- Position and force repeatability.

Solved by adding a manipulator and a camera

- To have an ability to apply force only on a particular part of a sensor.

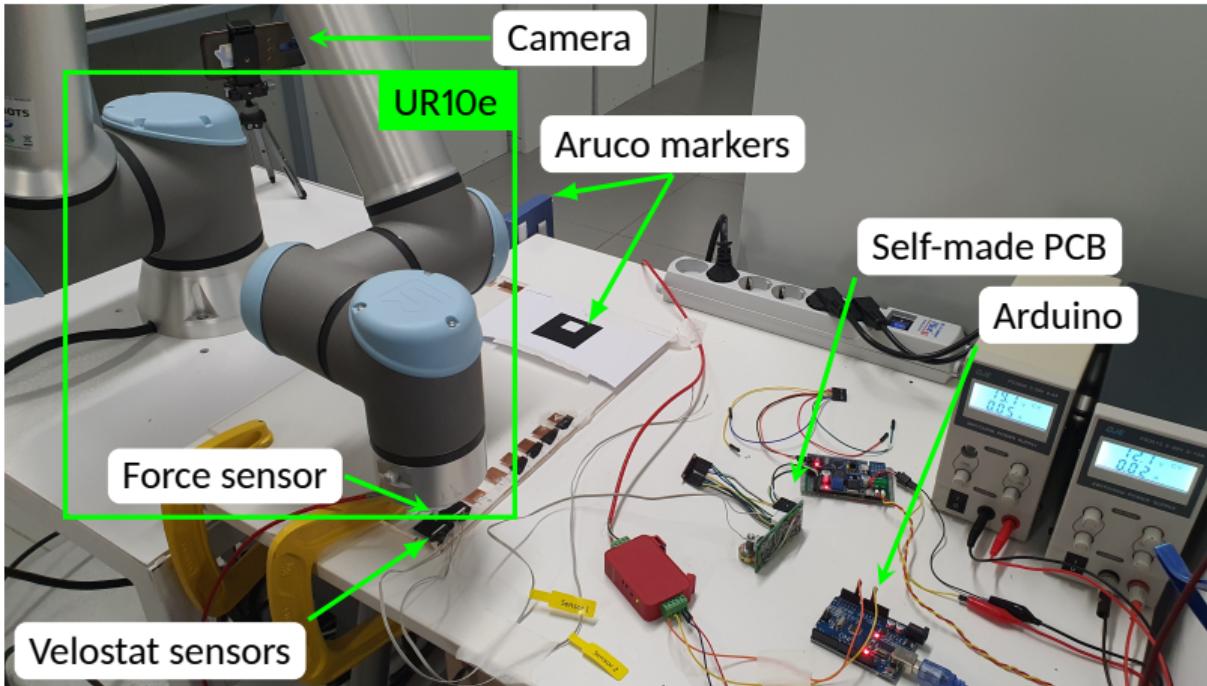
Solved by adding several end-effectors

All setup requirements are fulfilled



Разработка преобразователя силы

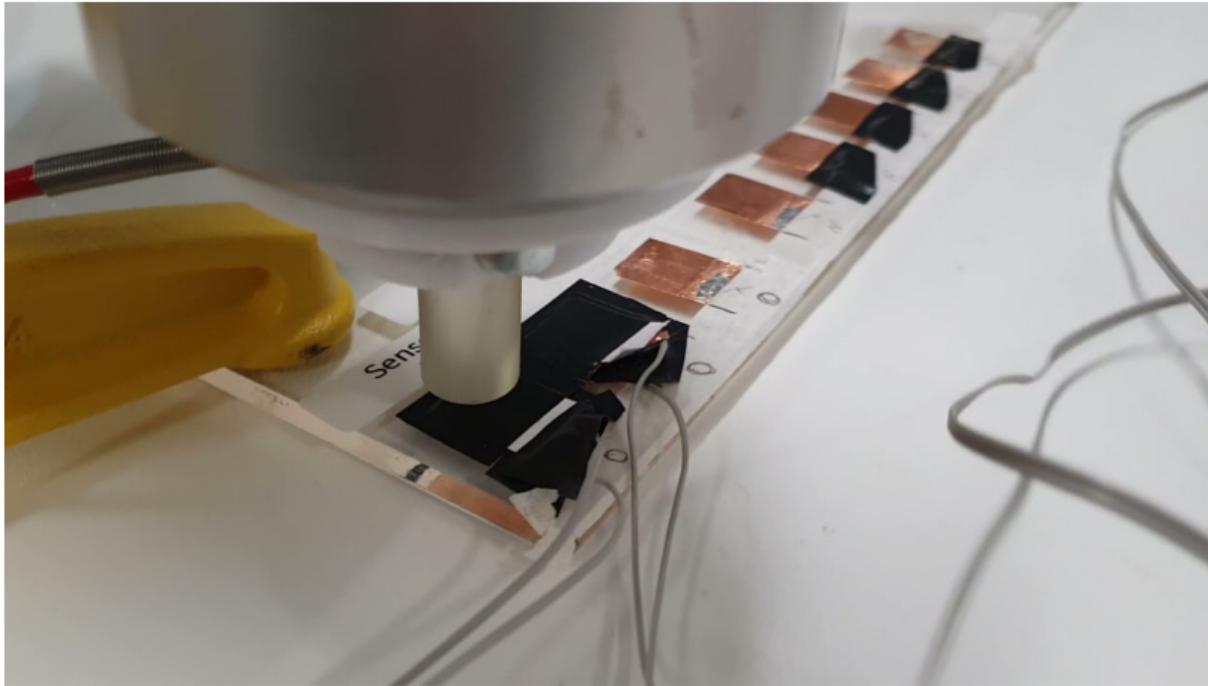
Experimental Setup: Hardware overall





Experiment Design

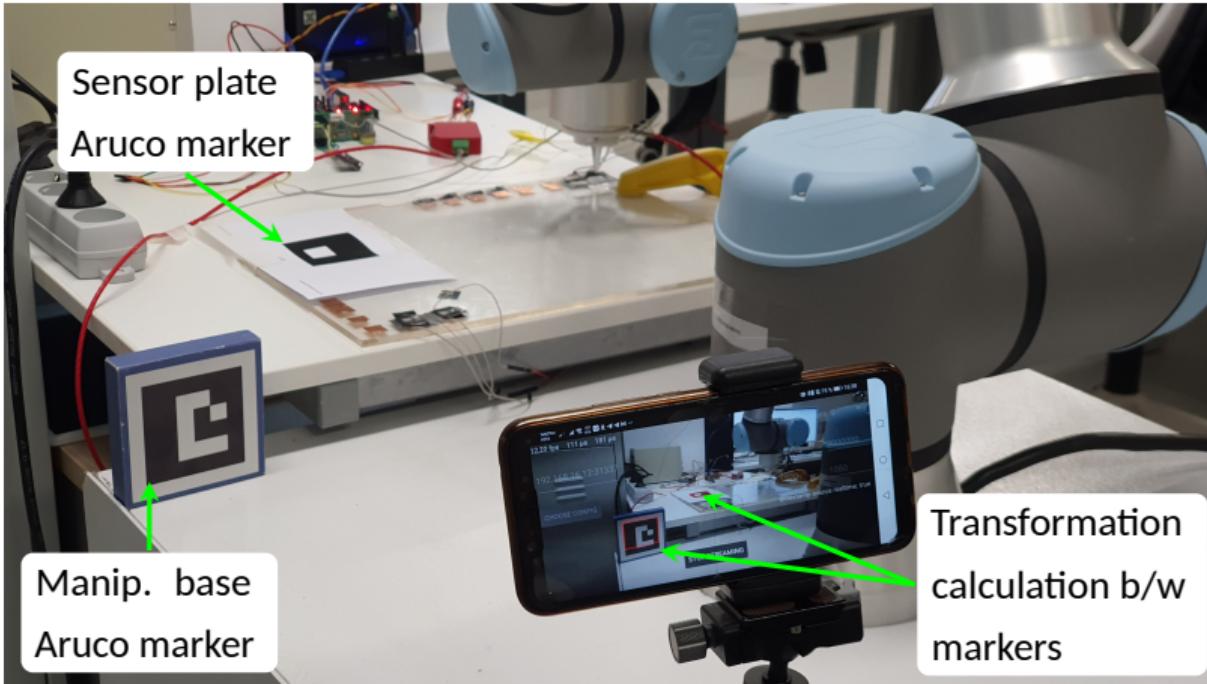
Experimental Setup: Hardware, video





Разработка преобразователя силы

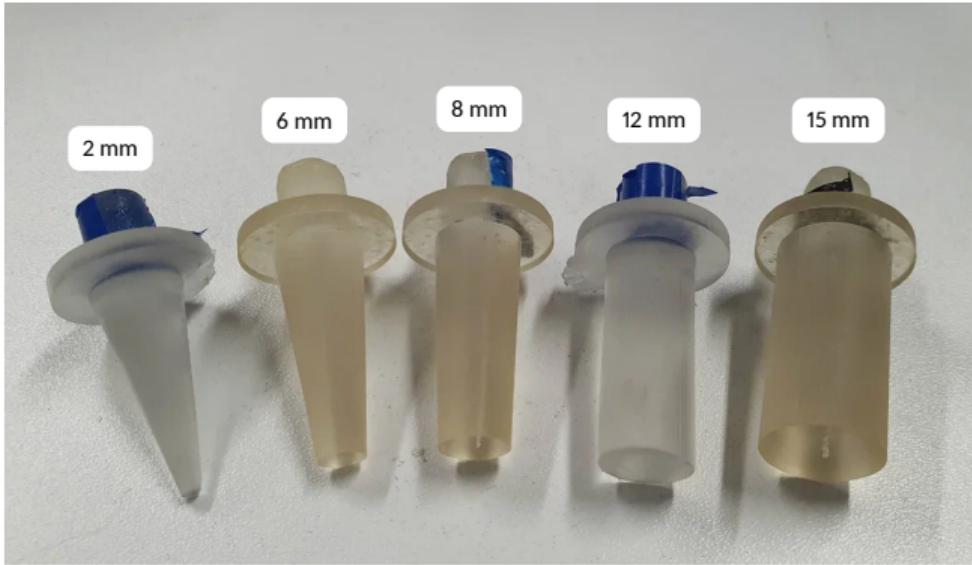
Experimental Setup: Hardware, Aruco markers





Разработка преобразователя силы

Experimental Setup: Hardware, end-effector



All end-effectors



*Ground Truth
Force sensor*



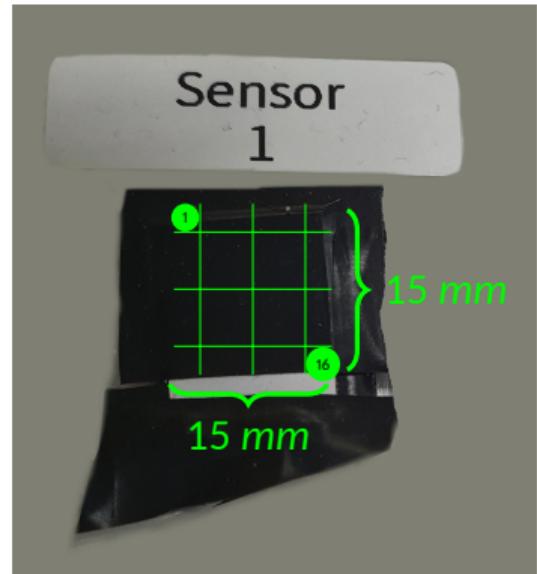
*End-effector in
assembly*

Разработка преобразователя силы

Experiments

- 1. Static experiment.** The goal is to identify the coefficients for the transducer model.
- 2. Dynamic experiment.**

- We are representing a transducer as a 4×4 grid. We touch with the same pressure using five different end-effectors (area starting from 2mm till 15mm).
- We are using 2 mm and 15 mm end-effectors. We touch with different forces (5, 10, 20, 30, 40 N).



*Sensor representation
as 4×4 grid*



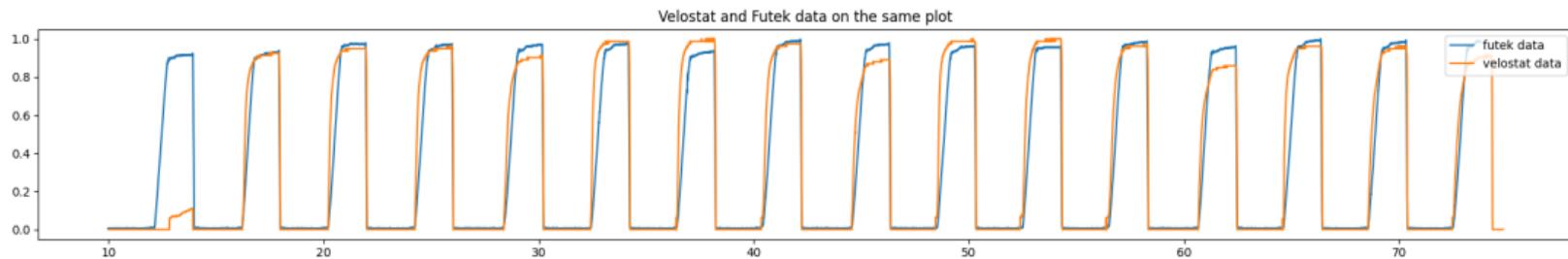
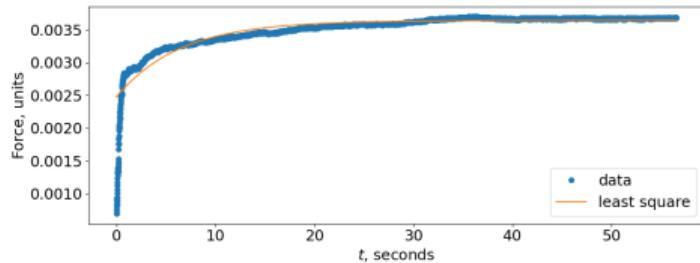
Разработка преобразователя силы

Result: static experiment

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

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

Where V_0 - initial voltage, p , A_i , B_i , τ_{res} , k_i are constants, t - current time, t_0 - the time when the pressure appeared.

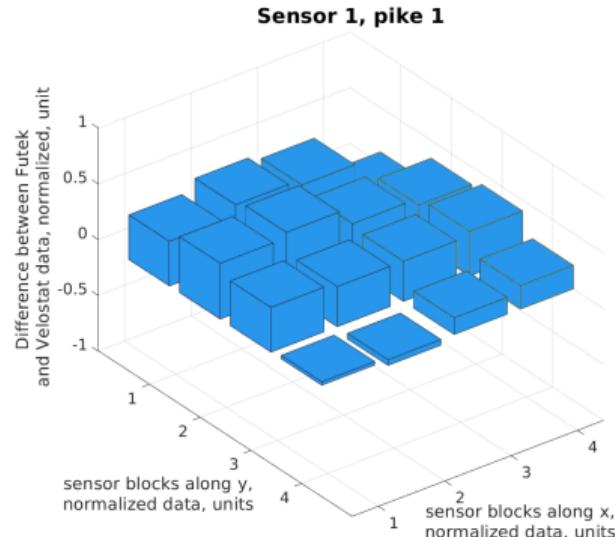


Normalized force data from sensor and transducer

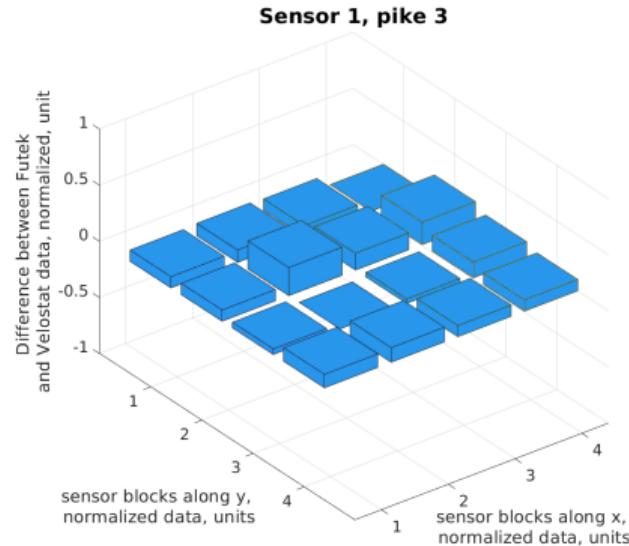


Разработка преобразователя силы

Result: dynamic experiment



2mm end-effector diam



8mm end-effector diam



Разработка преобразователя силы

Summary

1. Static experiment: transducers coefficients p , A_i , B_i , τ_{res} , k_i were identified.
2. Dynamic experiment: a transducer can be represented as a single body, when pressure area is higher than 50% of the sensor area.



Terrain classification

Question

How to define the terrain type during the movement on such terrain?



Terrain classification

Question

How to define the terrain type during the movement on such terrain?

Answer

Solving terrain classification problem using Machine learning



Terrain classification

Experimental setup requirements

- To have a possibility to install new surfaces and change it quickly.
- Infinite movement.
- Movement part should be the same as on the StriRus.



Terrain classification

Experimental setup requirements

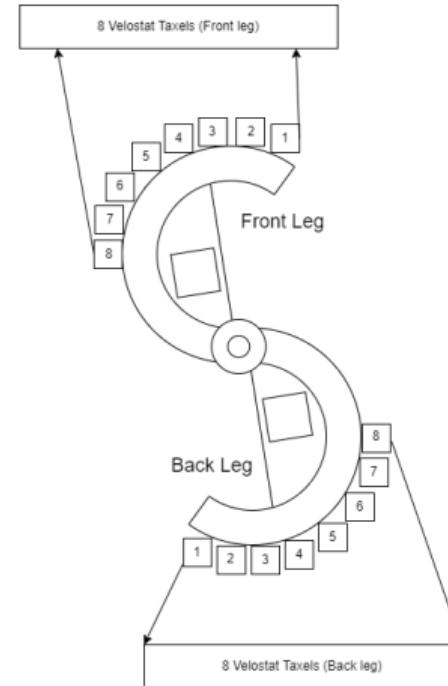
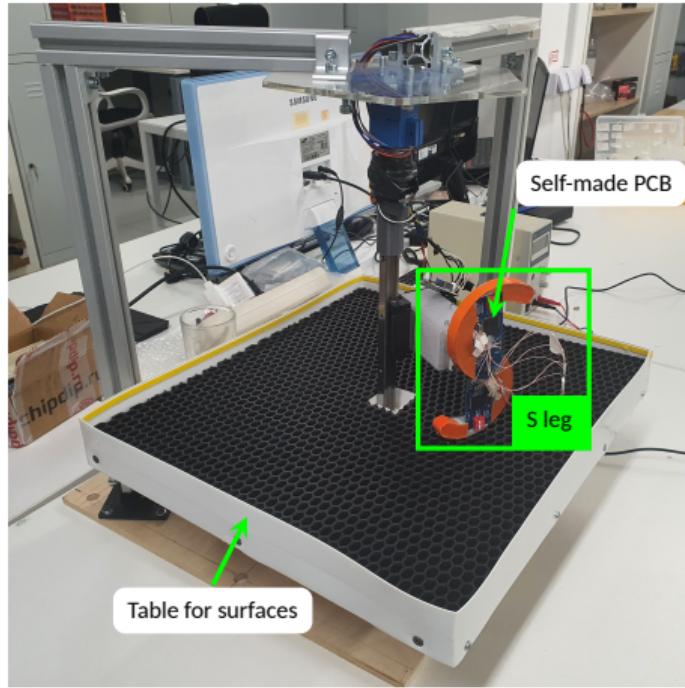
- To have a possibility to install new surfaces and change it quickly.
Solved by quick detachable table
- Infinite movement.
Solved by creating the 2 DoF mechanism and a S-shape leg
- Movement part should be the same as on the StriRus.
Solved by creating a mount for a leg assembly

All setup requirements are fulfilled



Terrain classification

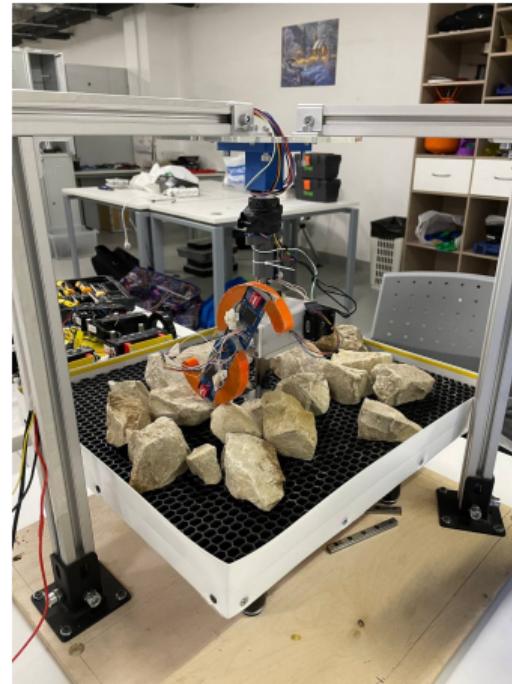
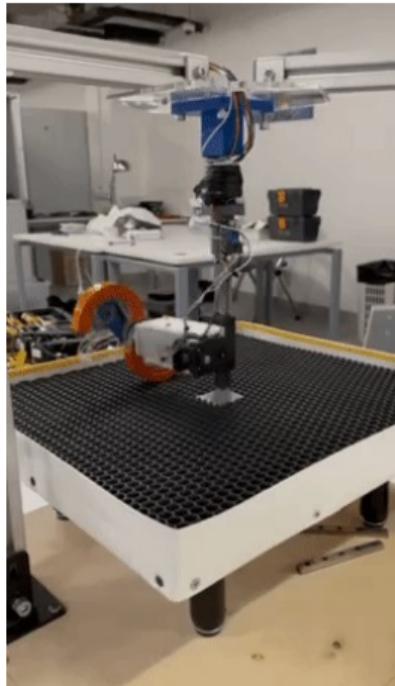
Experimental Setup





Terrain classification

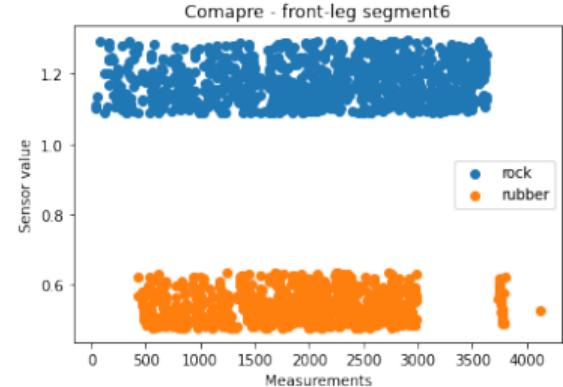
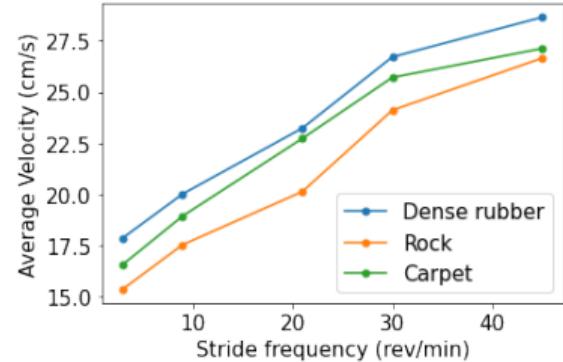
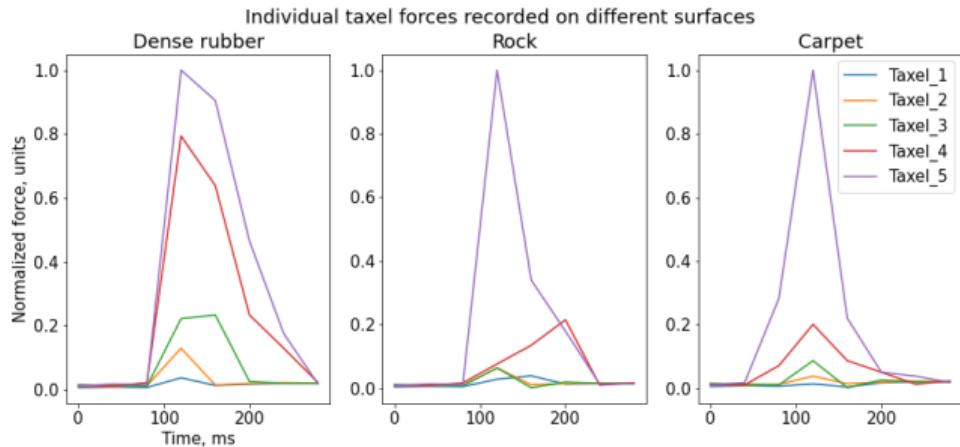
Experimental setup: surface types, video





Terrain classification

Obtained data from one experiment





Terrain classification

Summary

- We can distinct rubber and rock surfaces
- Terrain classification parameters was chosen:
 - RPM
 - Motor Torque
 - Acceleration from IMU
 - Force data which are represented as Sensor valuessegment, Peak amplitude, Average amplitude
- The force transducer has been proven to work



Map creation based on tactile data

Question

How to create a dense point cloud, using sparse data from legs?



Map creation based on tactile data

Question

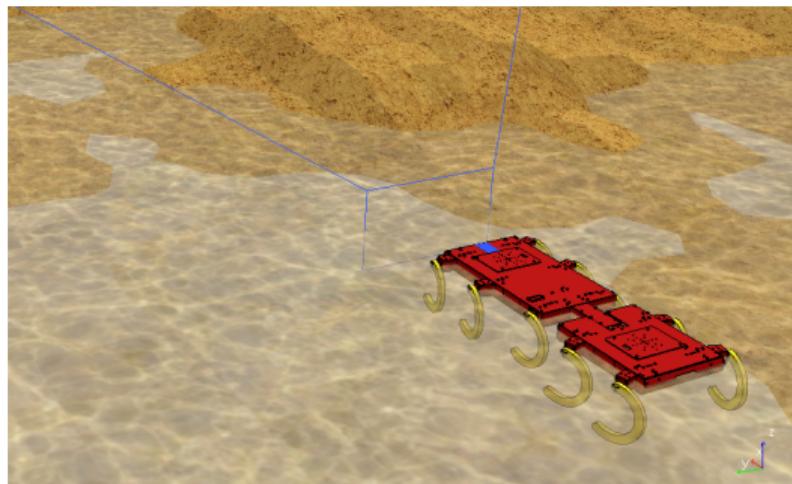
How to create a dense point cloud, using sparse data from legs?

Answer

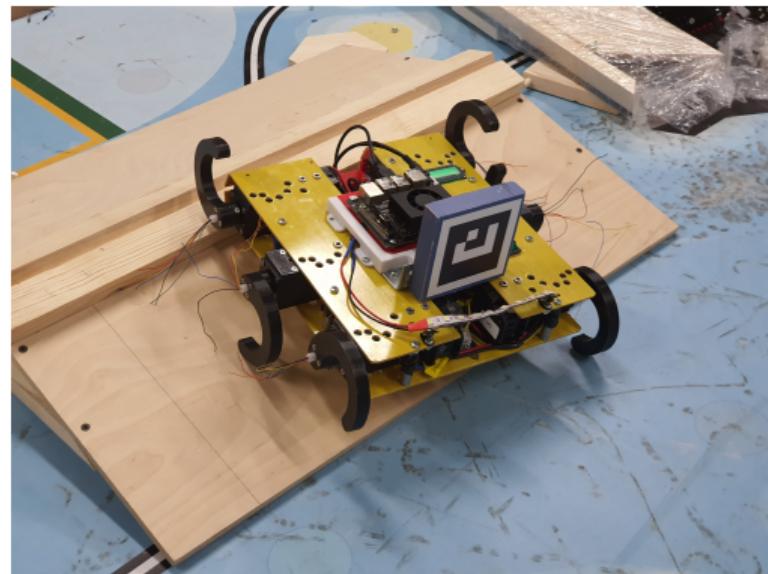
*Create a mesh, using concave hull Delaunay triangulation using sparse data,
sampling it and return to navigation*

Map creation based on tactile data

Experimental setup



CoppeliaSim simulator, 4th gen StriRus



IRL, 3th+ gen StriRus



Map creation based on tactile data

Assumptions

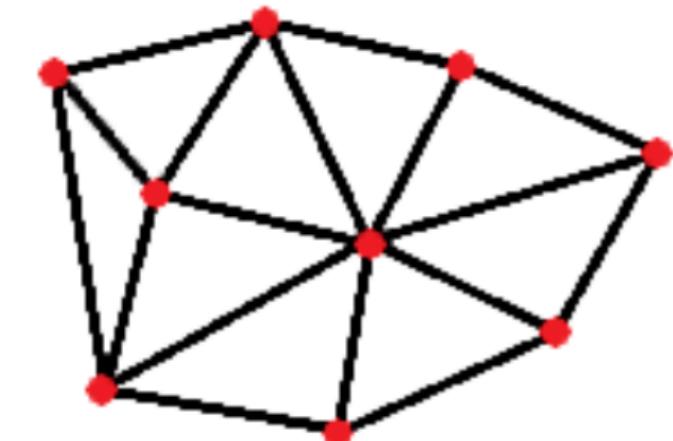
Current solution considering such assumptions:

- Our terrain can be represented $z = f(x, y)$. We can use 2D Delaunay triangulation (projected points on a plane)
- All simulation data are preprocessed by white noise



Map creation based on tactile data

Delaunay triangulation

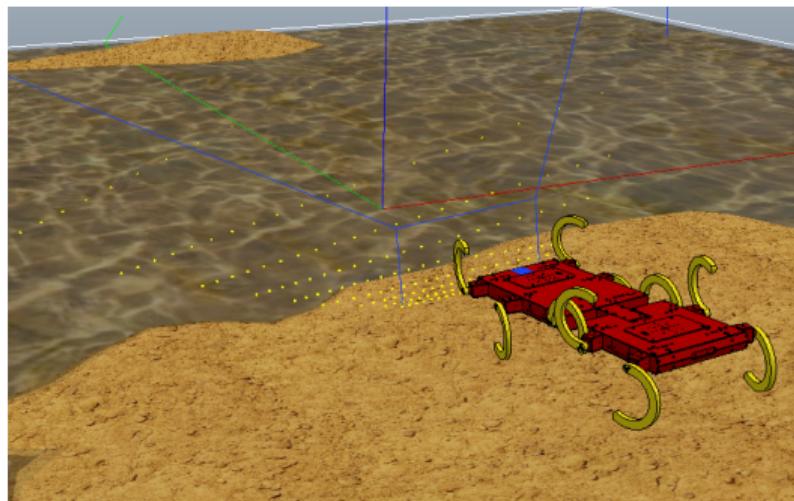


*Common 2D Delaunay triangulation (Convex Hull)
From Point Cloud to mesh*

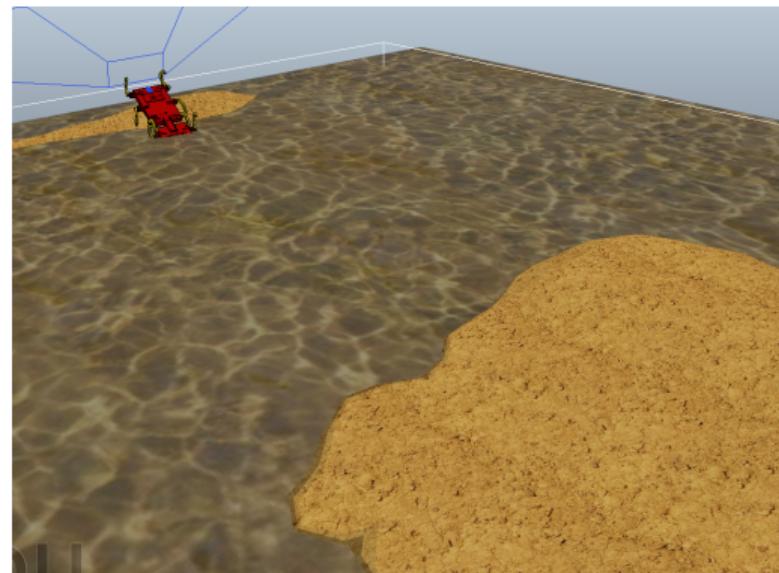


Map creation based on tactile data

Result: simulator



Start point

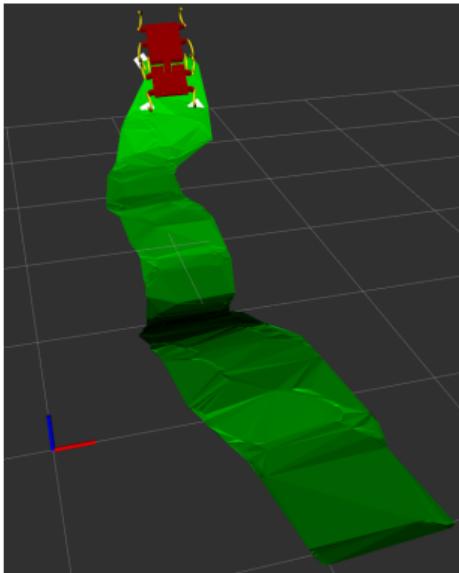


End point

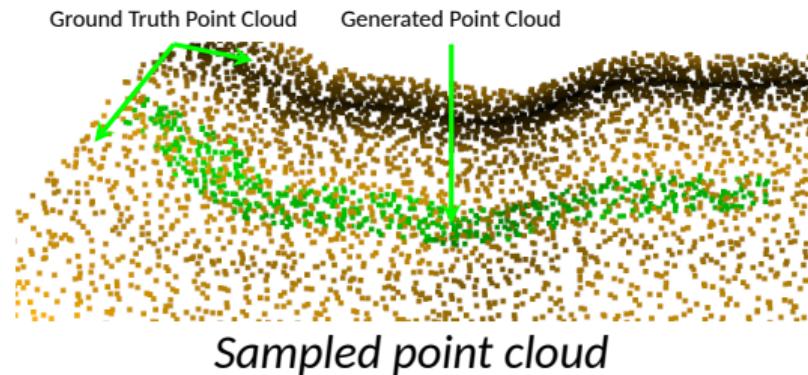


Map creation based on tactile data

Result: Mesh



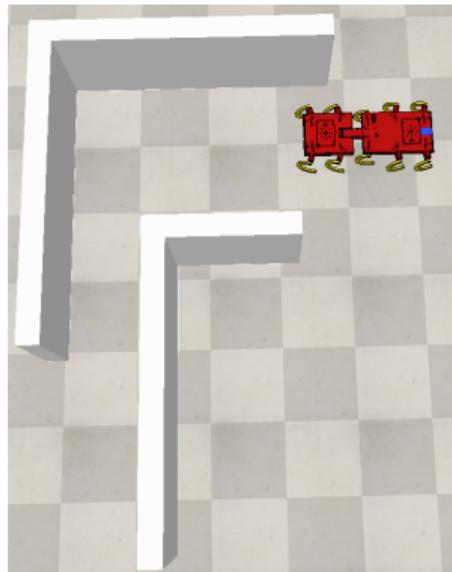
*Mesh created using concave hull 2D
Delaunay triangulation*



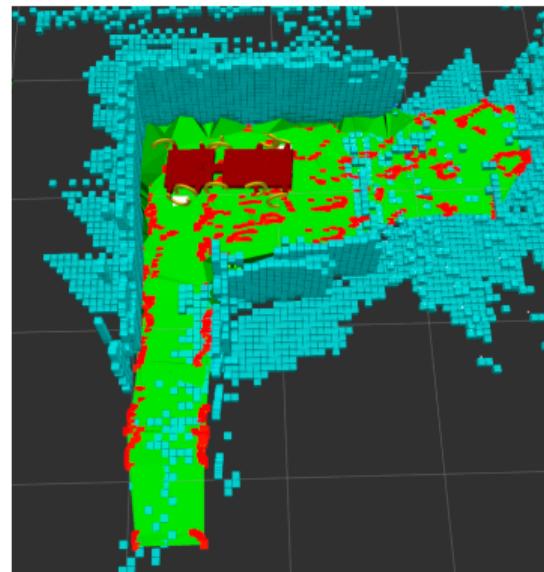
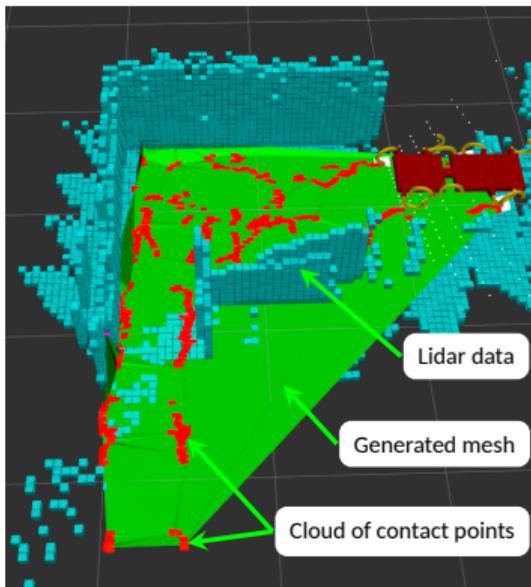


Map creation based on tactile data

Why do we need a concave hull solution



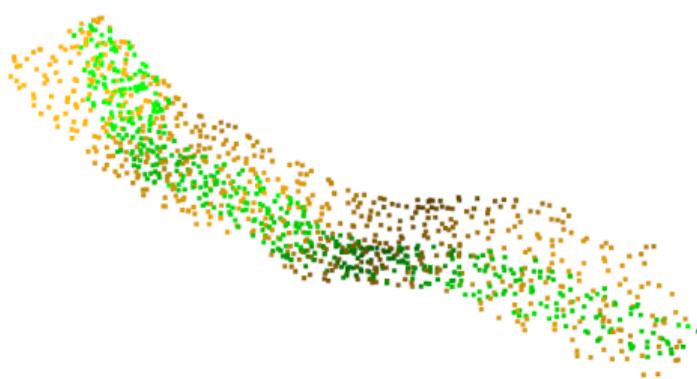
Case study



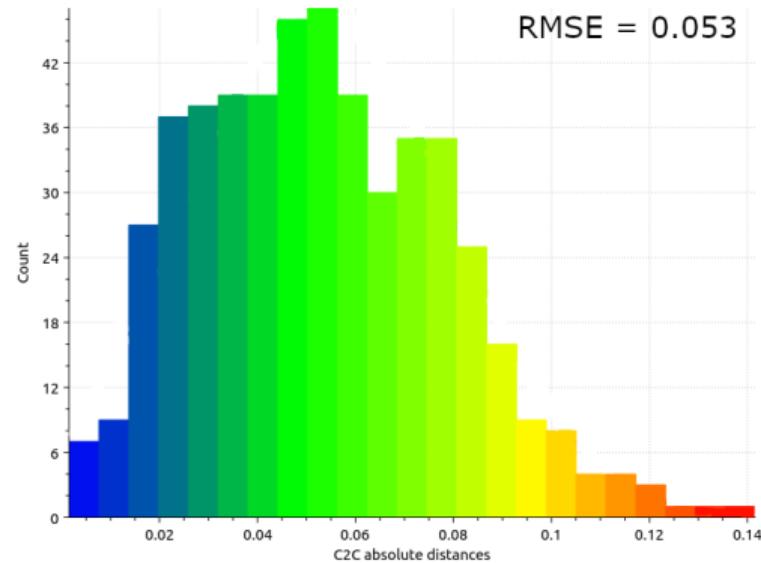


Map creation based on tactile data

Metric C2C: reference and ground truth point cloud comparison



Overlaid Point Clouds

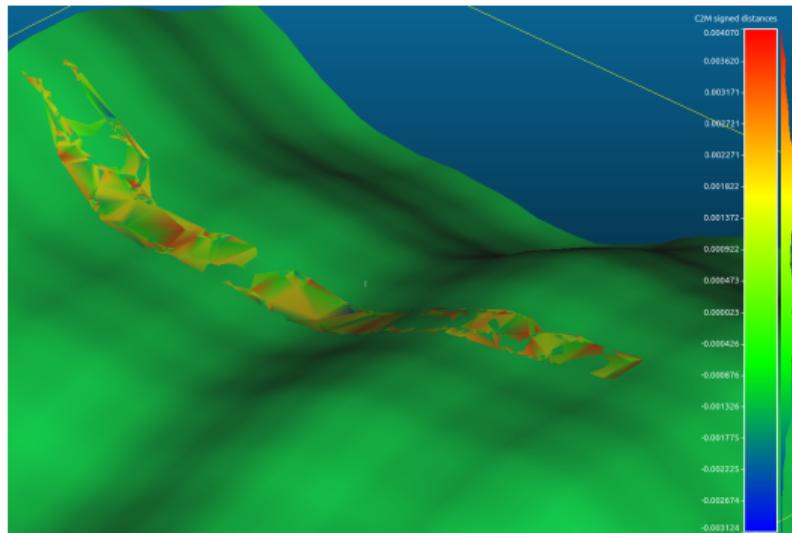


Error histogram (distance from a point to closest ground truth point)

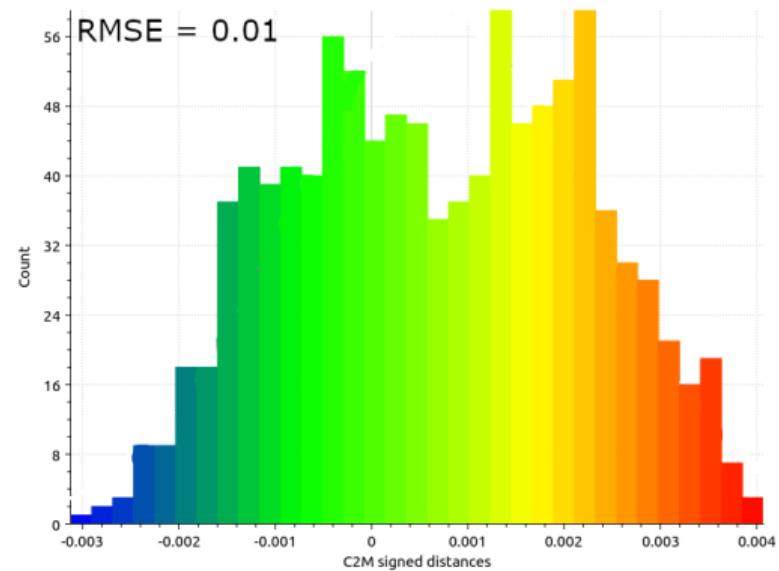


Map creation based on tactile data

Metric C2M: reference and ground truth mesh comparison



Overlaid Meshes

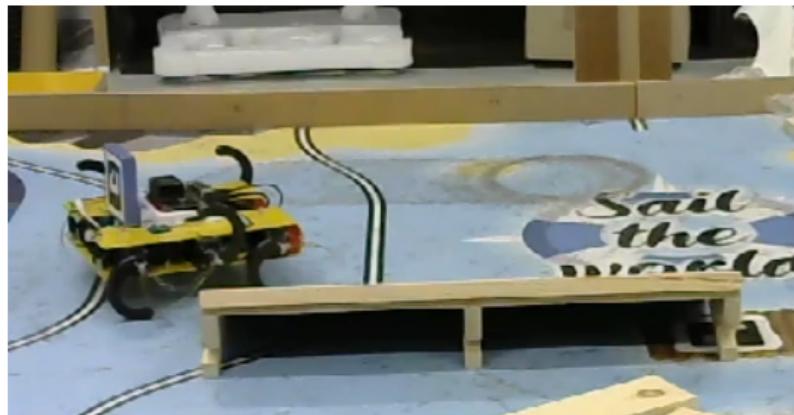


Error histogram (distance from a point to closest ground truth point)

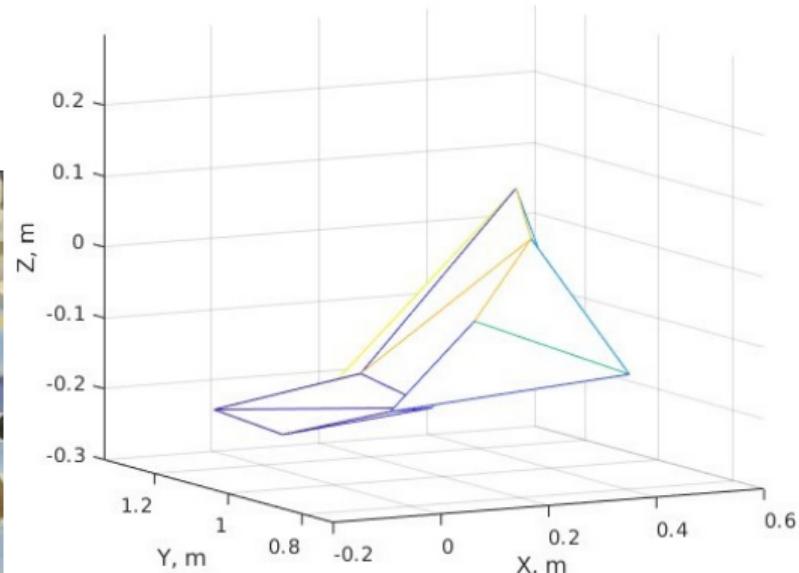


Map creation based on tactile data

Result: real world experiment, video



Robot is passing the obstacle



Mesh, obtained from legs



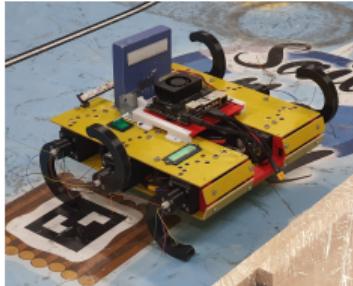
Map creation based on tactile data

Summary

- Map can be built using concave hull 2D Delaunay triangulation.
A Sparse point cloud obtained from force sensors, installed on legs.
 - *Simulator:*
 - Avg. Point cloud comparison RMSE is about 5 cm.
 - Avg. Mesh comparison RMSE is about 1 cm.
 - *Real world experiment:*
 - Avg. Point cloud comparison RMSE is about 8 cm.
- It is appropriate accuracy for such task.



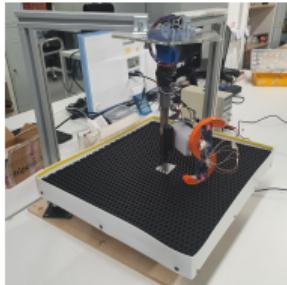
Summary



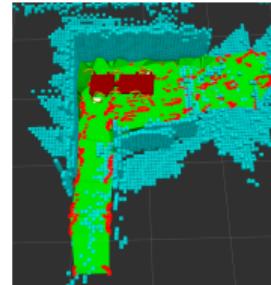
1. *StriRus was designed and assembled*



2. *Force transducer based on Velostat was created and was investigated*



3. *Robot distinct rubber and rock surfaces*



4. *Build a map using tactile sensors*