

極限環境へ適用可能な  
ロボット技術研究  
(2021-2023)

会津大学 コンピュータ理工学部

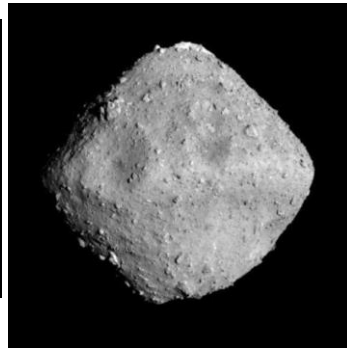
山田 竜平

# 研究目的

## 極限環境に適用可能なロボット技術・観測技術の研究と開発



月惑星



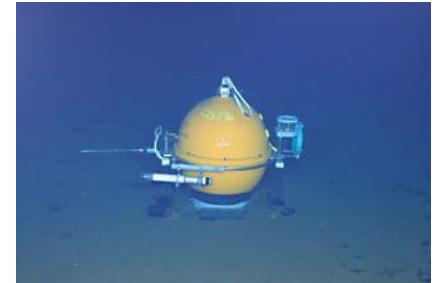
極域



活火山



災害・事故現場



海溝域

災害・事故現場や月惑星等の人々が容易に踏みこめない  
「極限環境域」ではロボット技術の利用が必要不可欠である。

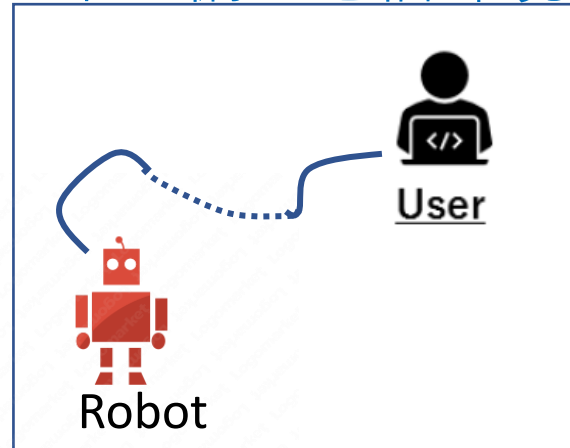
# 極限環境における問題点

○走行困難、危険を伴う不整地



活火山領域

○不整備な通信環境



○認識できる特徴点の少なさ



月表面

○滞在困難な環境

(極高低温、真空、高圧、放射能等)



福島第一原発建屋内

極限環境はロボットの活動に対しても困難な環境であり、適用環境を想定した技術研究が必須である。

# 現在のロボット研究課題(1)

## ○3次元地図生成の研究

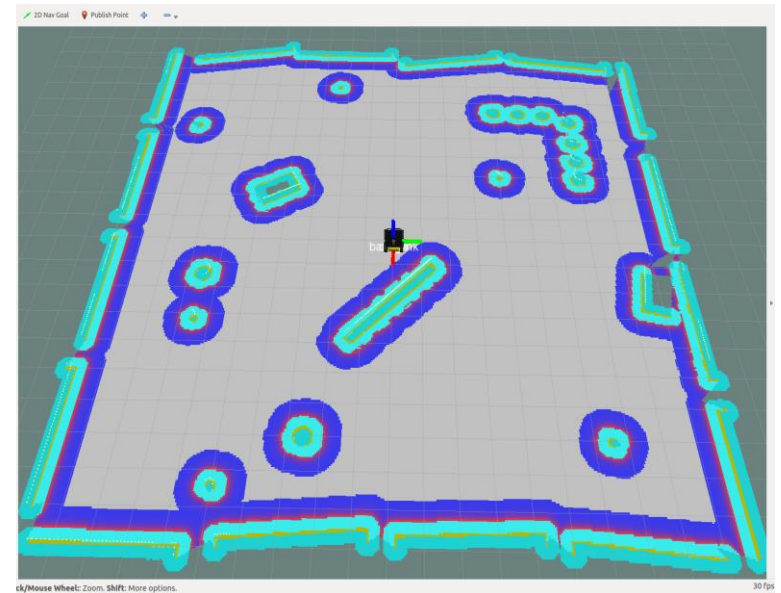
ロボットが周辺環境・障害物認識や、自律移動時の経路計画、自己位置推定等を行ううえで「**地図データ**」が必須

※EAC, AIZUK, FSK, 日本アドシス

配送  
ロボット



経路計画  
環境認識  
等を利用



地図データ

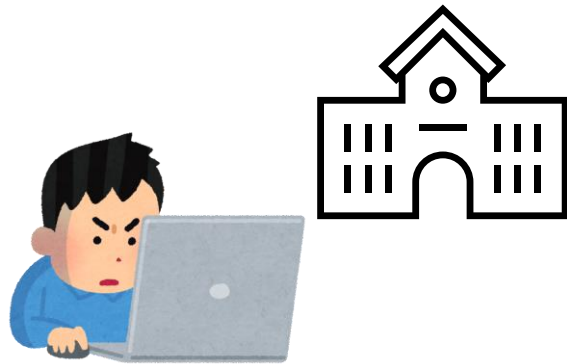
極限環境に想定される**屋外不整地**でロボットに利用可能な高精度・高解像の3次元地図を生成する手法の研究  
(**路面の凹凸や障害物識別のため数cmレベルでの環境復元**)

# 現在のロボット研究課題(2)

## ○遠隔通信・自律移動の研究

極限環境下は一般に、人が近づくのが困難で、かつ、通信環境も未整備であるので、頻繁な通信を伴わない、**遠隔からの通信制御による自律的な移動・作業**が望まれる。

※EAC, AIZUK, アクアクルー, 日本アドシス



[指令拠点]  
(大学のオフィスとか)



指令！



遠くの災害現場等

遠隔からの通信制御で屋外不整地にも適用可能な  
遠隔自律移動システムの研究開発

(生成した3次元地図を利用した自律移動の実現)

# 目標とするビジョン

## 指令拠点



生成した  
地図を使用  
しての遠隔通信  
による自律移動

遠隔自律移動・  
マニュアル操作



3次元的な地形情報  
を反映させた地図

## 極限環境

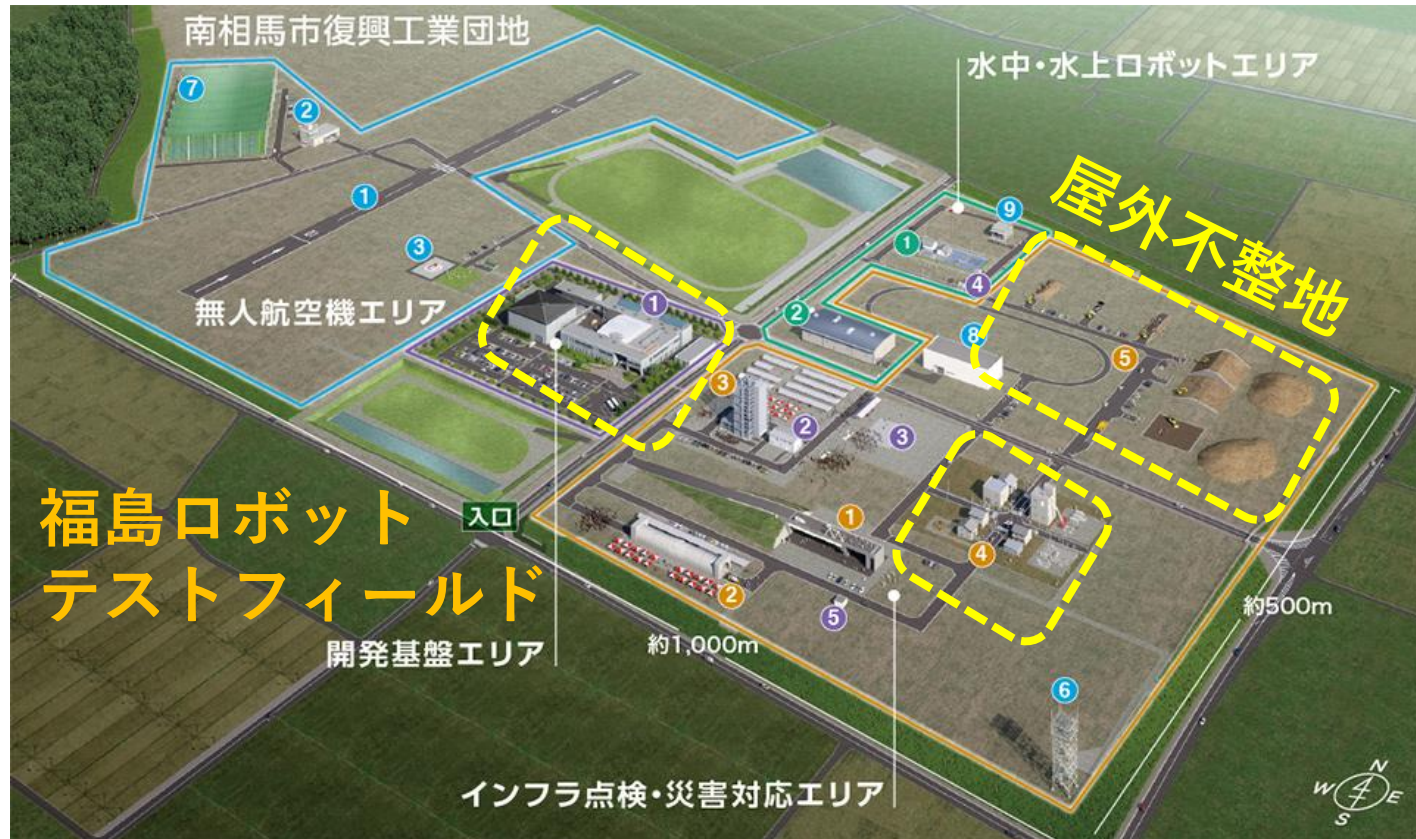


災害地域・極限環境に配置  
したロボットの観測データ  
による数cm精度での  
3次元地図生成

※[3次元地図生成]、[遠隔通信]、[自律移動]等、  
本ロボット事業において産学連携で成熟させてきた  
技術を極限環境に適用!

# 研究・実験環境

整備された屋内・屋外試験環境と、極限環境に想定される屋外不整地の試験フィールドを有する南相馬市の「福島ロボットテストフィールド(RTF)」を研究・実験拠点に利用



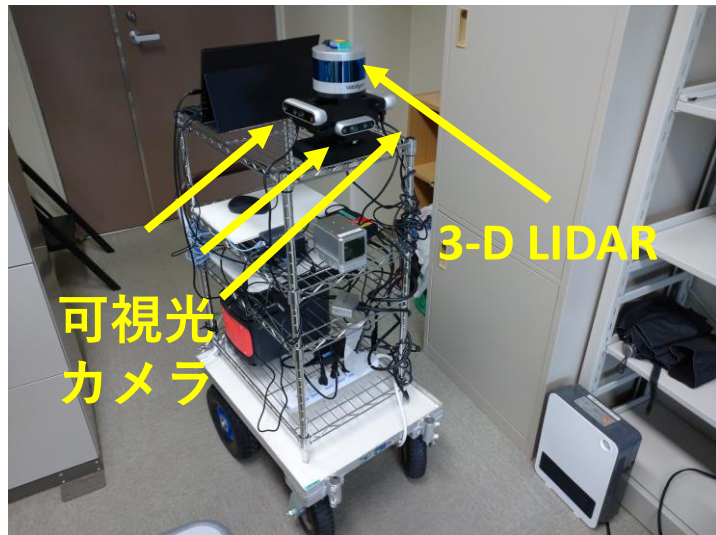
整備環境でシステム  
検証・実証



屋外不整地で検証・  
問題点の抽出・改良

# 研究に利用したロボット

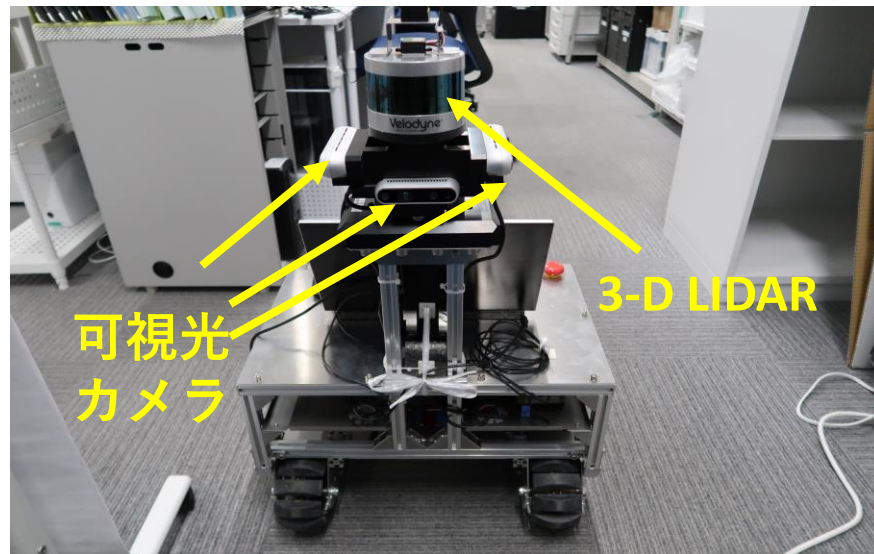
2021-2023年度に計3台のロボット(ロボット台車)を開発・利用



可視光  
カメラ

3-D LIDAR

台車2号機改F (手押し台車)



可視光  
カメラ

3-D LIDAR

台車3号機 (小型クローラロボット)



3-D LIDAR

Turtlebot3

## ○搭載センサー・システム

- 3次元LIDAR
- 可視光カメラ
- IMU
- Ubuntu搭載PC
- ROSで制御可能



# 3次元地図生成手法

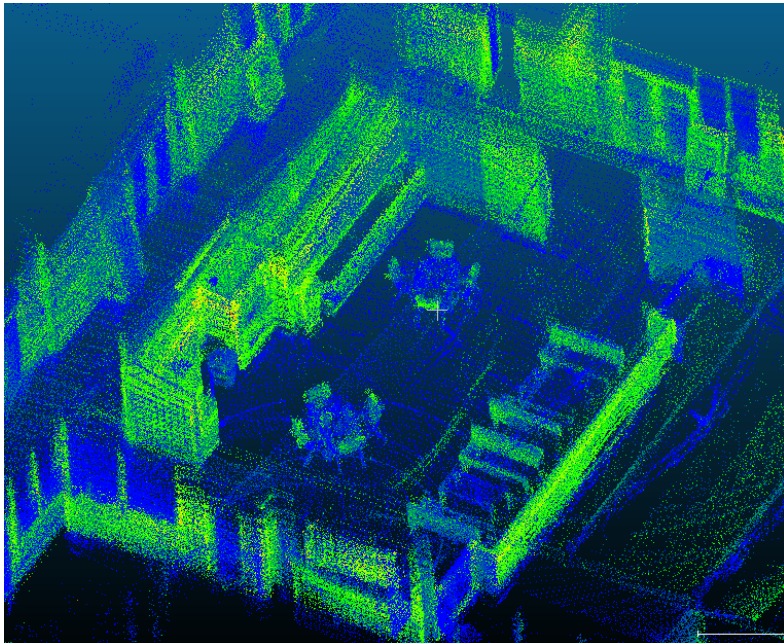
## ○SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

搭載センサーデータより地図生成と自己位置推定を同時に行う手法。3-D LIDAR点群とIMUデータのtightなカップリングでSLAMを行う [LIO-SAM](Shan et al.,2020)を採用。

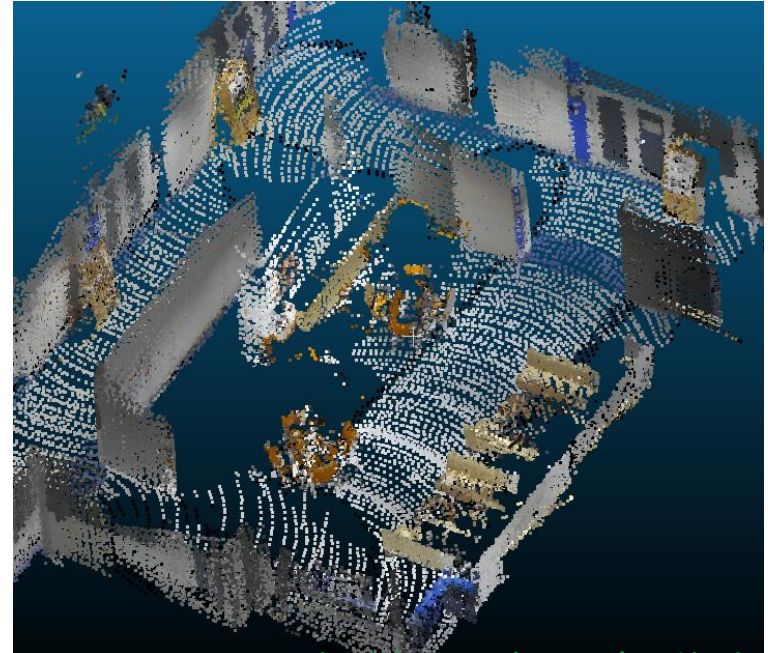
※本ロボット事業でコアとしている地図生成技術

## ○LIDAR-Camera Data fusion

LIDAR-3次元点群をカメラ画像に投影し、各点群に対応するカメラ画像ピクセルからRGB値を与える。



RTF-2Fロビー3次元点群地図



RTF-2Fロビー色付き3次元点群地図

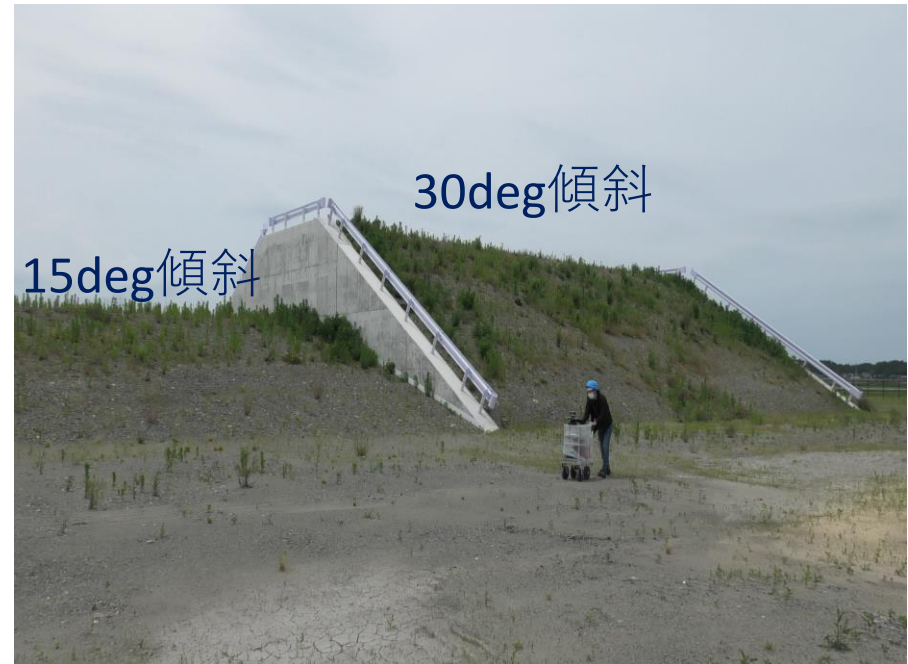
# 屋外不整地での3次元地図生成実験

福島RTFの屋外不整地フィールドを使用してSLAMを使用した3次元地図生成の実験を実施

➡ 屋内と比較して周辺特徴量の少ない凹凸地面の環境下で、いかに高精度で3次元地図を生成できるか検証



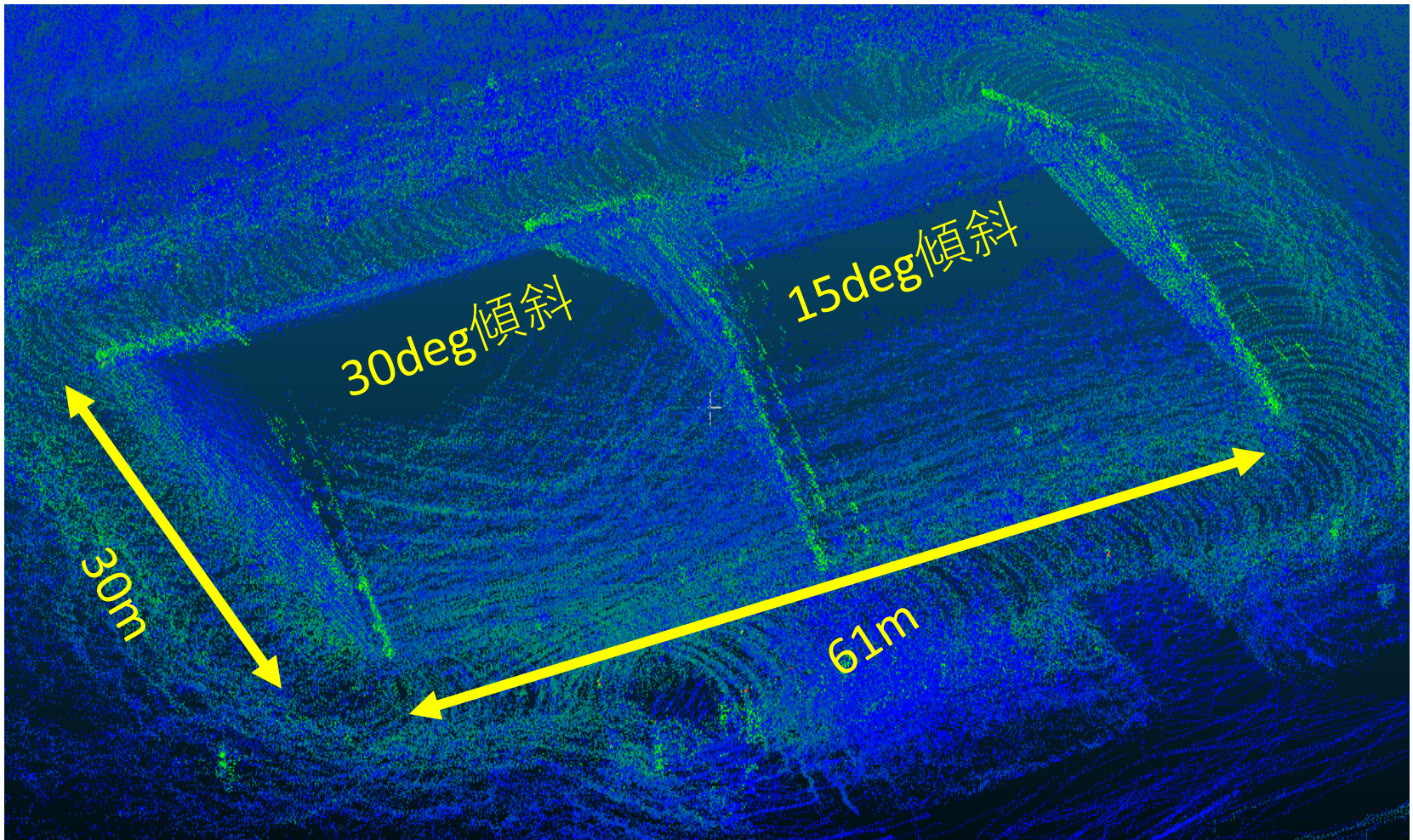
RTF 土砂倒木エリア



RTF 土砂傾斜エリア

はじめに手押し台車ロボット(台車2号機改F)で地図生成を実施

# 屋外不整地での3次元地図生成結果(1)



土砂傾斜エリア3次元点群地図

現状のSLAMアルゴリズム(LIO-SAM)でおよそ外観を正確に復元可能。  
ただし、土砂傾斜エリアでは地図が閉じない事象も生じる  
(スケールや周辺環境の問題があり得る。)

## 屋外不整地での3次元地図生成結果(2)



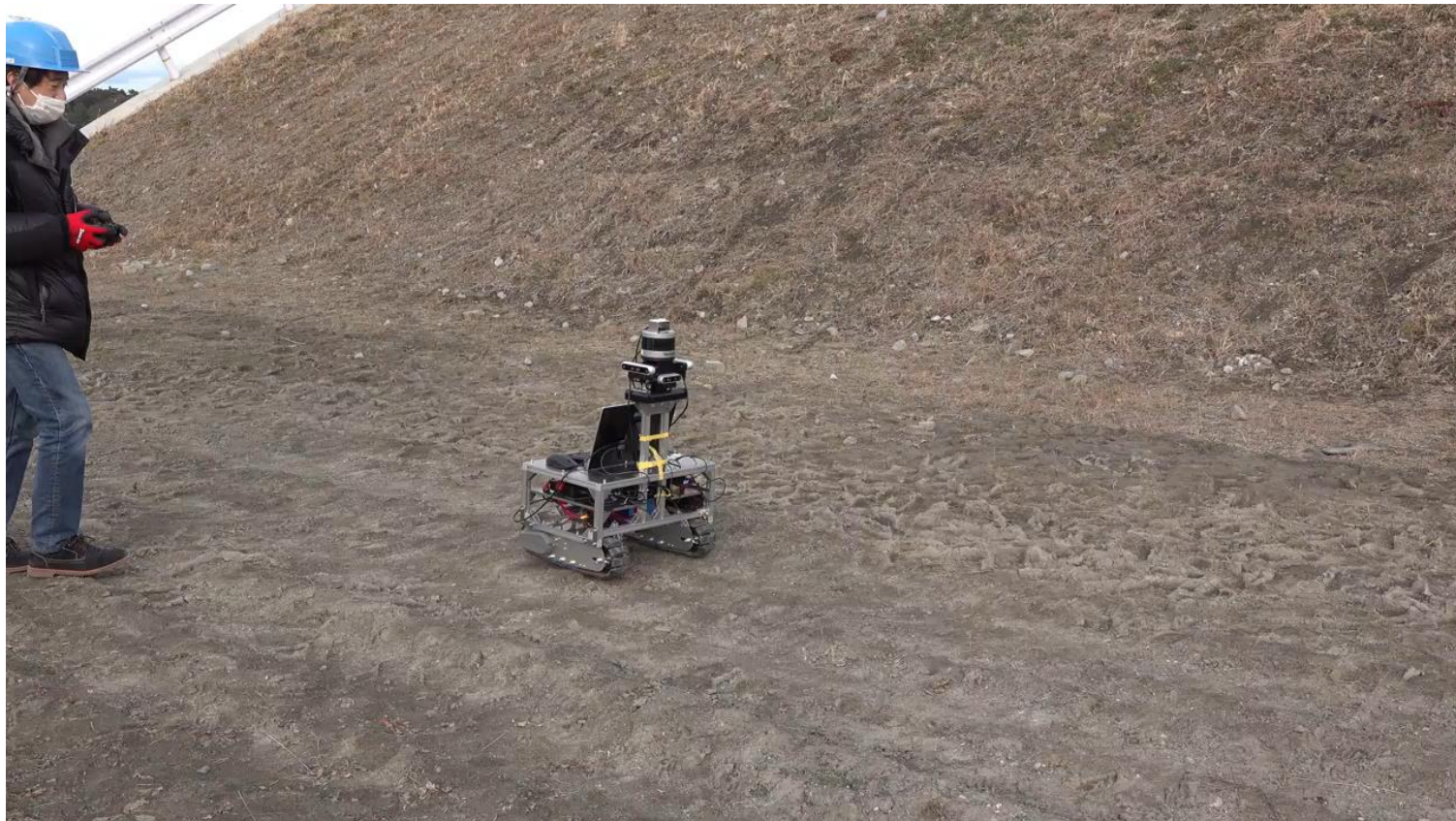
### 土砂傾斜エリア色付き3次元点群地図

- LIDARと3台のカメラとのMulti-Data fusionにより広範囲での色付き点群地図を作成
- エリア内の物体（配置したカラーBox)を±10cm以下の精度で復元可能
- 手押し台車ロボットでは全体の3次元環境復元が困難（傾斜の登坂が困難）

# クローラロボットを使用した3次元地図生成実験

フィールド全体をカバーする3次元地図を生成するため、屋外不整地の走行に適した小型クローラロボットを開発し、地図データを取得できるようにした。

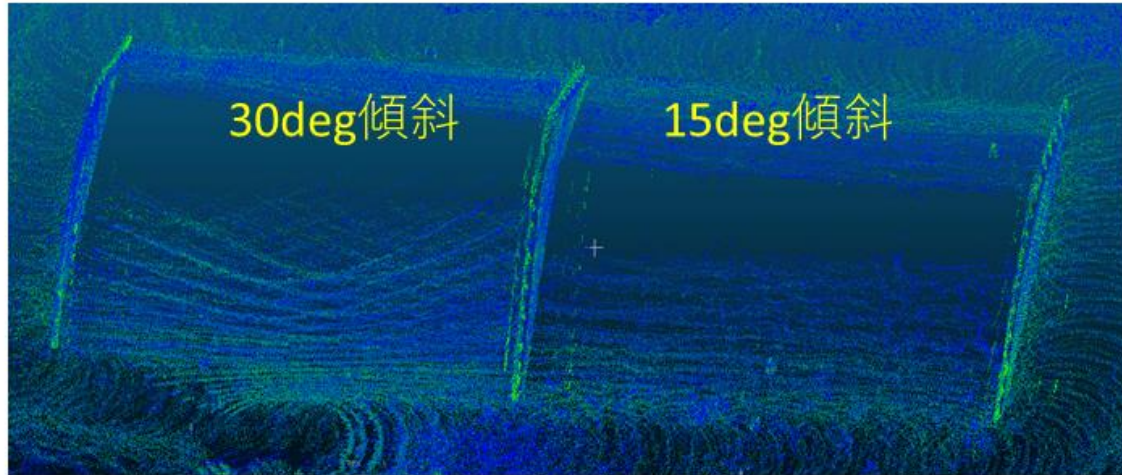
2023年1月土砂傾斜エリア



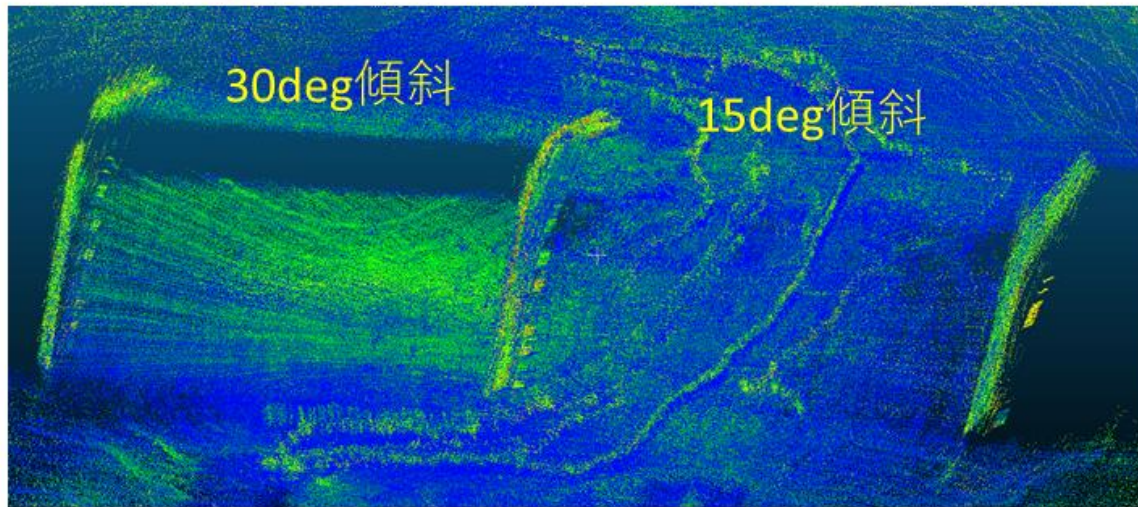
30deg傾斜は困難であるが、15deg傾斜は登坂可能

# クローラロボットによる3次元点群地図

屋外不整地での走行範囲を拡張させることで、3次元点群地図上での環境の復元範囲を拡張させる事ができた。



手押し台車による地図（従来ローバー）



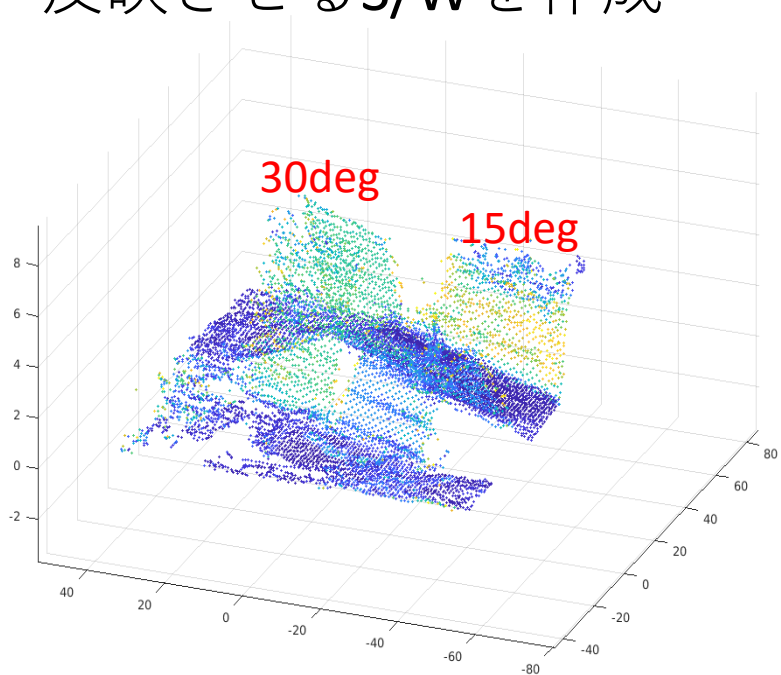
クローラロボットによる地図（台車3号機）

# 3次元傾斜地図

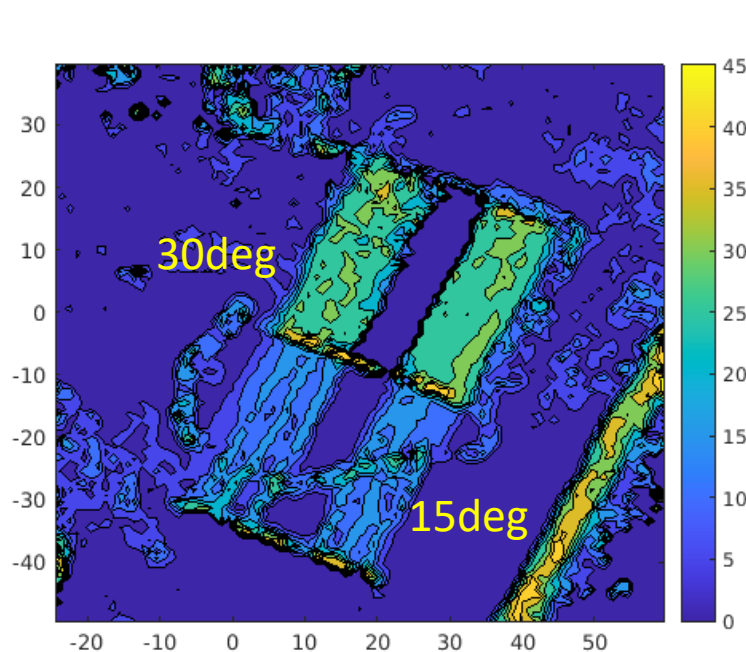
実際の自律走行に使用する場合、ロボットの走行不可領域や凹凸、障害物等の3次元情報を地図上に反映させる必要がある。



3次元点群解析よりフィールド上の傾斜角情報を地図に反映させるS/Wを作成



3次元点群傾斜地図  
(Z=0面を地表面と仮定)

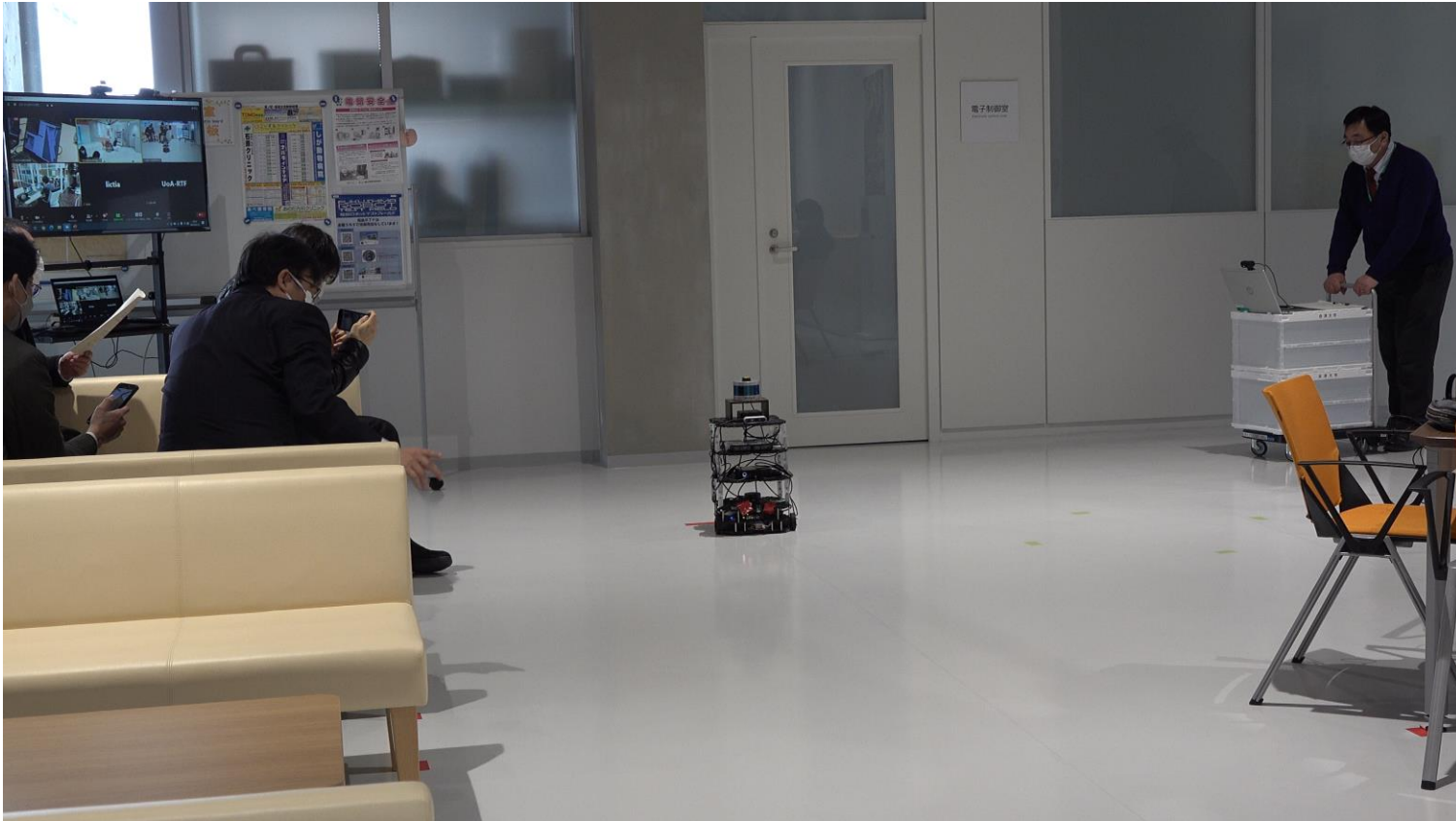


2.5次元傾斜地図

※より地形の解像度を向上させるためのデータフュージョンと斜面上での経路計画法の研究を実施予定

# 遠隔自律移動システムの研究開発

人が近づくのに困難な極限環境において、遠隔からの指令によりロボットが自律移動を行うシステムの研究開発中



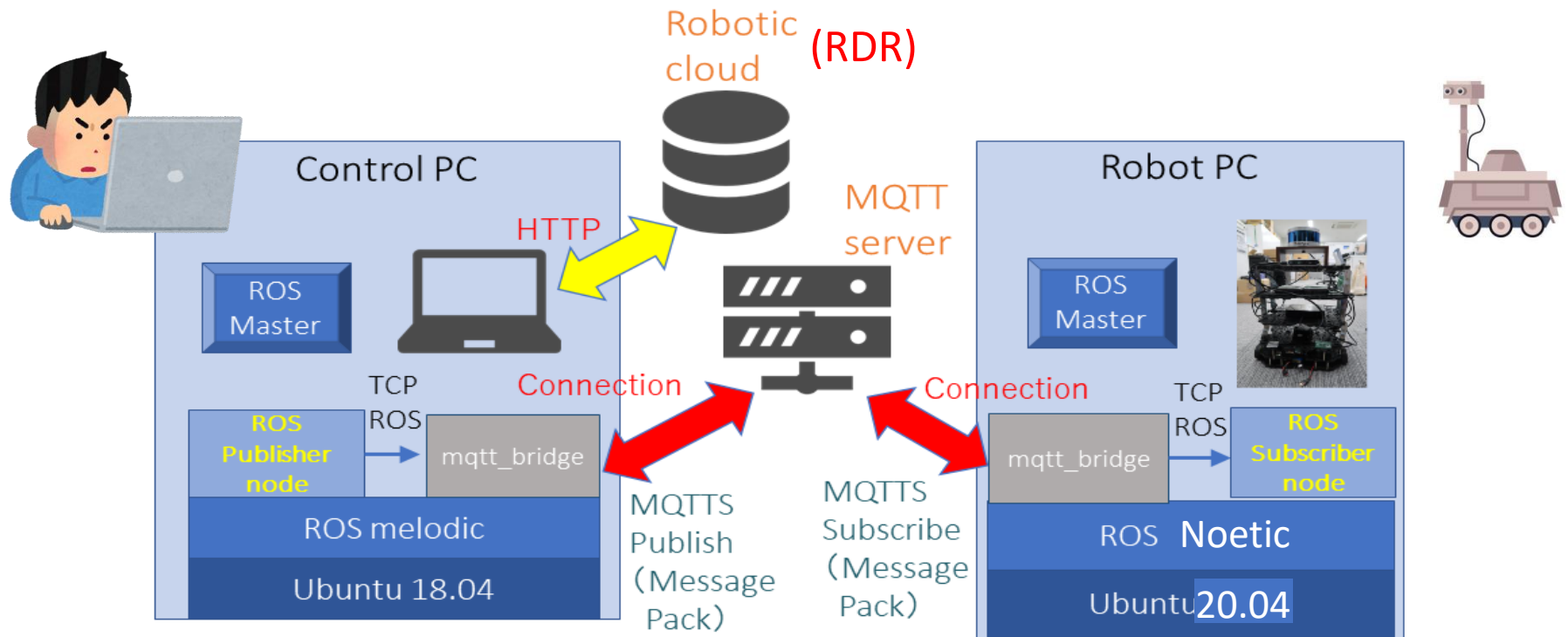
2021年度ロボット事業デモの様子

[遠隔通信]と[自律移動]のシステムが必要  
自律移動のシステムとしては、ROSのフレームワークとして  
公開されている[Navigation Stack]を使用



# 遠隔通信システム

自律移動のためのデータを[操作拠点]と[ロボット]間でインターネットを介して送受信するための**[遠隔通信システム]**を開発。



- ROS-MQTTブリッジでROSデータをMQTTに変換して、大学に設置したMQTTサーバーを介してデータを送受
- Robot-Cloudから自律移動用の地図データをダウンロード
- MQTT通信に適合するよう自律移動用データを改修  
(※ROS-MQTT変換、MQTT遠隔通信も本事業で利用)

# 遠隔自律移動実験

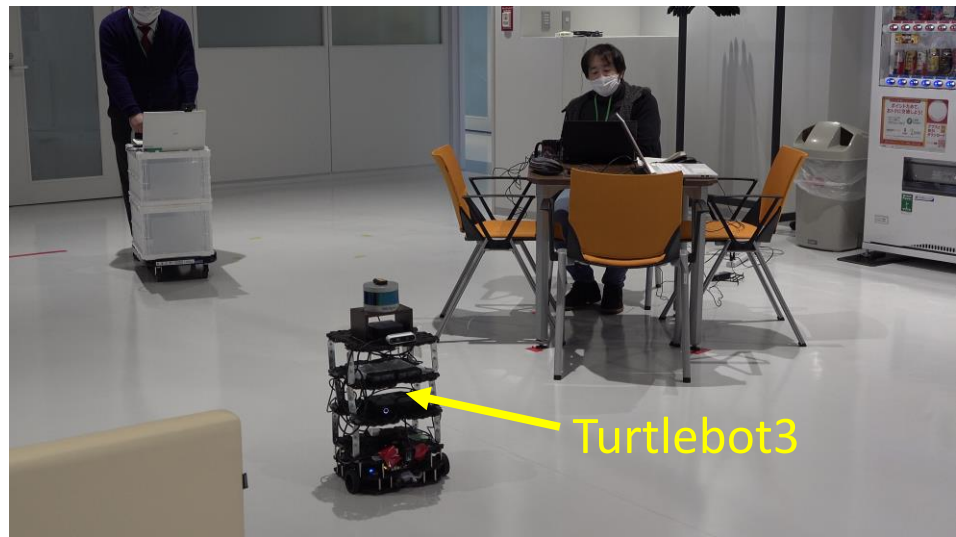
[会津大学]と[福島RTF]を接続して、遠隔自律移動の実験を実施

2022年3月にデモを実施

会津大学Lictiaの指令拠点から福島RTFの2Fロビーに配置したTurtlebot3に自律移動の指令を送るケースを検証し、問題なく遠隔自律移動が実行可能な事を確認した。

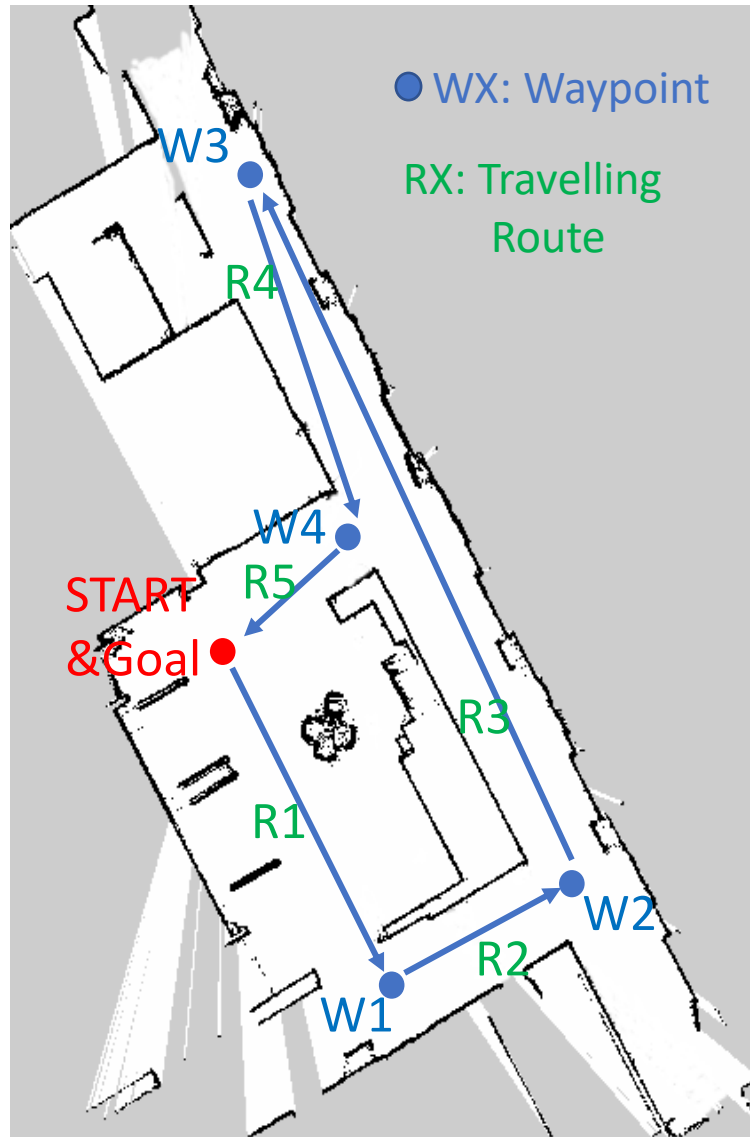


会津大学Lictia



福島RTF 2Fロビー

# Waypoint移動時間測定結果



各Waypoint間の移動時間  
(5回測定の平均と分散)

Route	Distance (m)	Travel time (s)	
		Local	Teleoperation
R1	10.7	55.3±5.2	51.8±0.8
R2	6.5	31.3±0.9	42.7±16.0
R3	21.2	99.7±2.1	100.4±1.5
R4	10.6	57.2±1.1	58.0±1.4
R5	4.5	25.7±0.6	26.9±2.4

ローカル通信と遠隔通信とで移動時間に有意な差異は見られない事を示した。

福島RTF2Fロビー2次元グリッドマップ (南相馬自律移動ルート)

# 屋外での自律移動実験

小型クローラロボット(台車3号機)に遠隔自律移動システムを実装し、屋外で自律移動の機能検証を実施。

会津大MQTTサーバーを介して遠隔通信を実施

2023年12月～2024年1月



RTF市街地エリア



RTF土砂傾斜エリア

屋外の整備環境である[市街地エリア]と屋外不整地環境である[土砂傾斜エリア]の両方で検証

# 市街地での遠隔自律移動実験

市街地では、作成した経路地図と、開発した遠隔通信システムを使用して、問題なく設定したWaypointsを通して自律移動を行う事を実証でき、汎用性も確認できた。

指令拠点: RTF研究棟



ロボット: RTF市街地エリア



RTF市街地での遠隔自律移動の様子

# 土砂傾斜エリアでの遠隔自律移動実験

遠隔通信により自律移動を実行する事は示せた。

➡ 設定したWaypointに向かってロボットが移動しない事象が発生

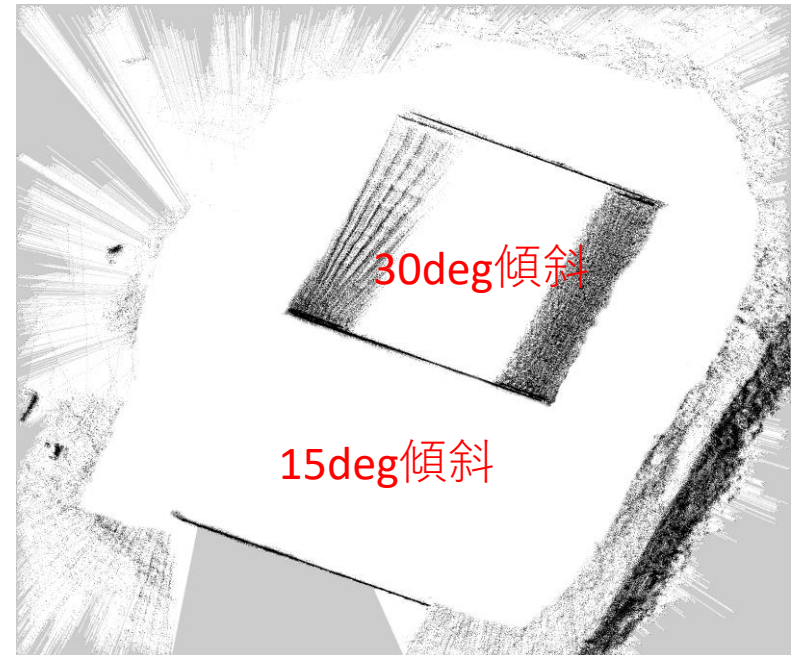
(予測原因)

- 周辺特徴量が少ない環境のため自己位置推定が安定しない
- 自律移動に使用した地図が周辺地形を反映できていない

他の自己位置推定手法(RTK-GNSS等)との組み合わせや、適用する地図の改良(2.5次元地図)等の研究を進める予定

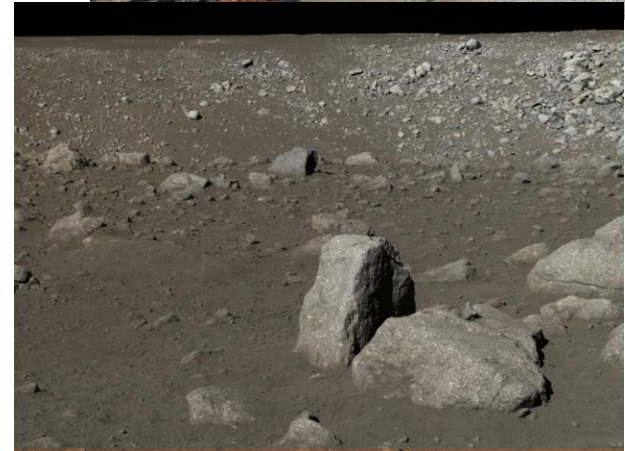
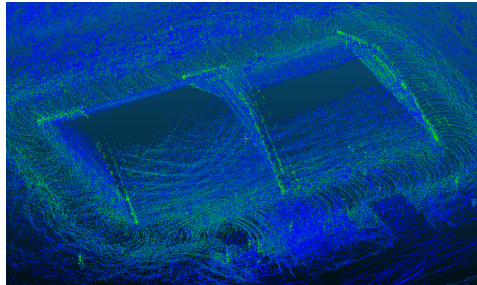
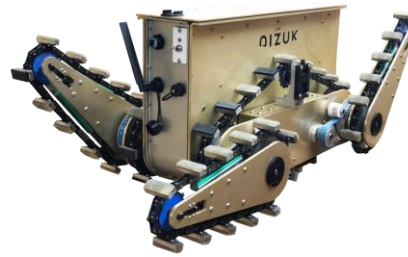
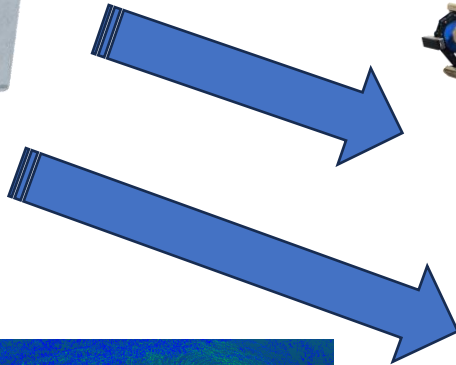


RTF土砂傾斜エリアでの遠隔自律移動のロボット



使用した2次元グリッド地図

# 極限環境への適用にむけて



**2021-2023年の期間で、本ロボット事業での産学連携・技術連携を通して極限環境にアプローチできるベースを構築できた。**



**次年度以降、極限環境へのより本格的な適用に向けて、地図生成、自律移動、経路計画等の研究を進めていく。**