建設施工と建設機械シンポジウム

建設ロボットによる建設業の生産性向上ならびに自然災害対応

～できていること・これから期待されること～

東京大学 大学院 工学系研究科
i-Constructionシステム学寄付講座
特任教授　永谷圭司

自己紹介

本日の講演内容

建設分野の生産性向上ならびに自然災害対応を目指した**ロボット技術**の現在と未来

～できていること・これから期待されること～

建設分野のロボット技術で重要なこと

己を知ること
(Position/Attitude)

環境を理解すること
(Sensing & Mapping)

例：地盤の形状，状態，材質

動作を行うこと
(Motion Planning & Control)

センサデータに応じた動作

期待されること：Moonshot型研究開発（2020年12月～）

長期的に達成すべき９つの目標

目標１	2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現
目標２	2050年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現
目標３	2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現
目標４	2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現
目標５	2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出
目標６	2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータ を実現
目標７	2040年までに、主要な疾患を予防・克服し100歳まで健康不安なく人生を楽しむためのサステイナブルな医療・介護システムを実現
目標８	2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現
目標９	2050年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、精神的に豊かで躍動的な社会を実現

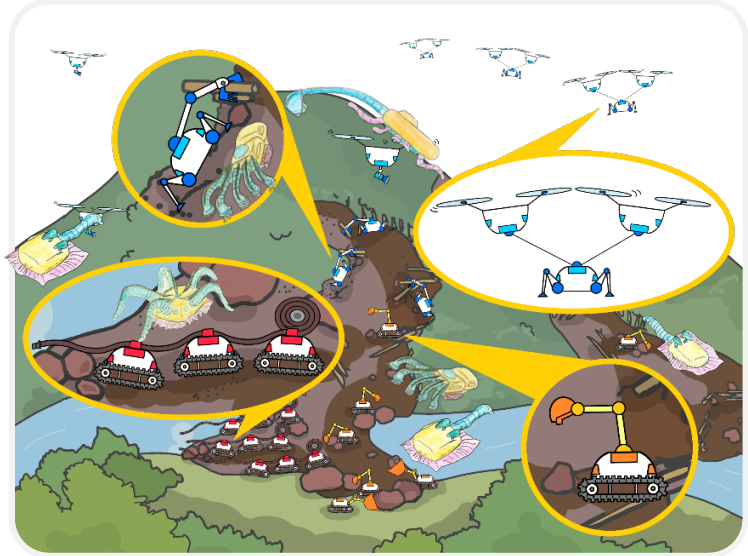
Collaborative
AI
Field robot
Everywhere
Project

多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働 AI ロボット

多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働 AI ロボット

地球温暖化により発生する自然災害：
→ 被害を最小限に抑える**自然災害の応急復旧技術**.

将来の有人探査の拠点構築：
→ 有人探査の**月面**拠点構築のための**インフラ技術**.



上記を実現するようなフィールドロボットシステムの構築

土工を革新する
AIロボットシステム

多様な環境において
インフラ構築を行う
協働AIロボットシステムの実現

動的協働AI
ロボット群

現場を俯瞰する
センサポッドシステム

Dynamic
Synthesis

複数台ロボットの
動的協働システム

研究開発体制

土工を革新する AIロボットシステム

1-1.開いた設計の体系化（大阪大）

1-2.革新的な土工作業に関する技術（大阪大，東工大，奈良先端，ヤンマー）

1-3.革新的なロボット移動に関する技術（大阪大，東北大，東京大，奈良先端）

1-4.協働AIロボットのプラットフォーム（ヤンマー，慶應義塾大，土木研）

1-5.河道閉塞対応に必要なシステム（熊谷組，国際航業，工学院大）

1-6.月面着陸拠点構築に必要なシステム（慶應義塾大，九工大，JAXA）

多様な環境において インフラ構築を行う 協働AIロボットシステムの実現

4-1.河道閉塞／月面などの模擬環境構築とフィールド評価（九州大，JAXA，熊谷組）

動的協働AI ロボット群

現場を俯瞰する センサポッドシステム

3-1.センサポッドを構成する要素技術（九州大，東京大，奈良先端，国際航業）

3-2.センサポッド要素技術のインテグレーション（九州大，東京大）

3-3.AIによるセンシングデータ解析（東京大，筑波大，理化学研）

複数台ロボットの 動的協働システム

2-1.動的協働AIの体系化（東京大）

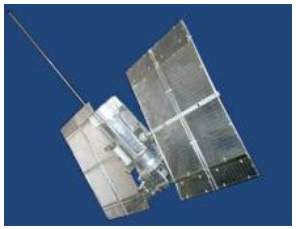
2-2.動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現（東京大，弘前大，土木研）

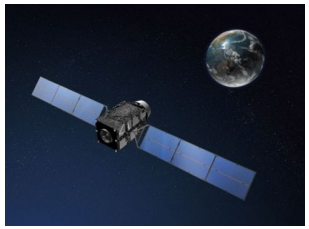
2-3.1人のオペレータによる複数台ロボット遠隔操作の実現（東京大，弘前大，土木研）

Dynamic Synthesis

己を知ること
Position/Attitude

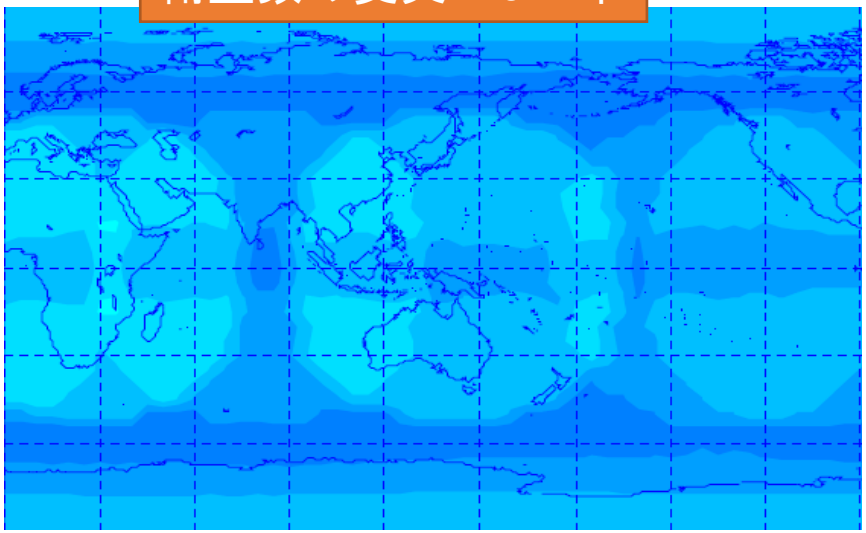
位置推定（GNSS: Global Navigation Satellite System）





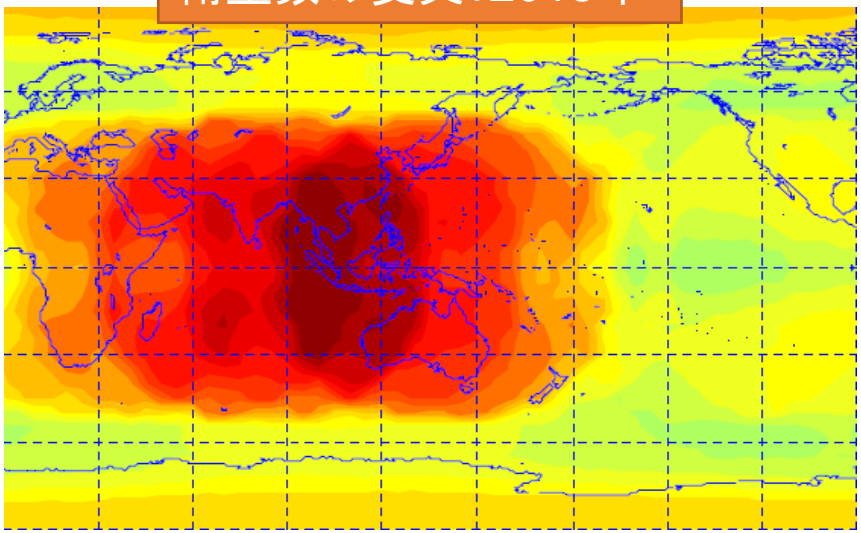
GPS	GLONASS	GALILEO	BeiDou	QZSS	IRNSS
USA	Russia	Europe	China	Japan	India
32→31	24→24	20→30	17→35	4→4+3	7

衛星数の変異:2011年



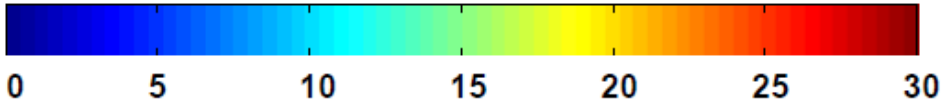
GPS:27 GLO. 18 GAL:3 COM: 2 QZS:1

衛星数の変異:2018年



GPS:32 GLO. 24 GAL:30 COM: 22 QZS:4

できていること

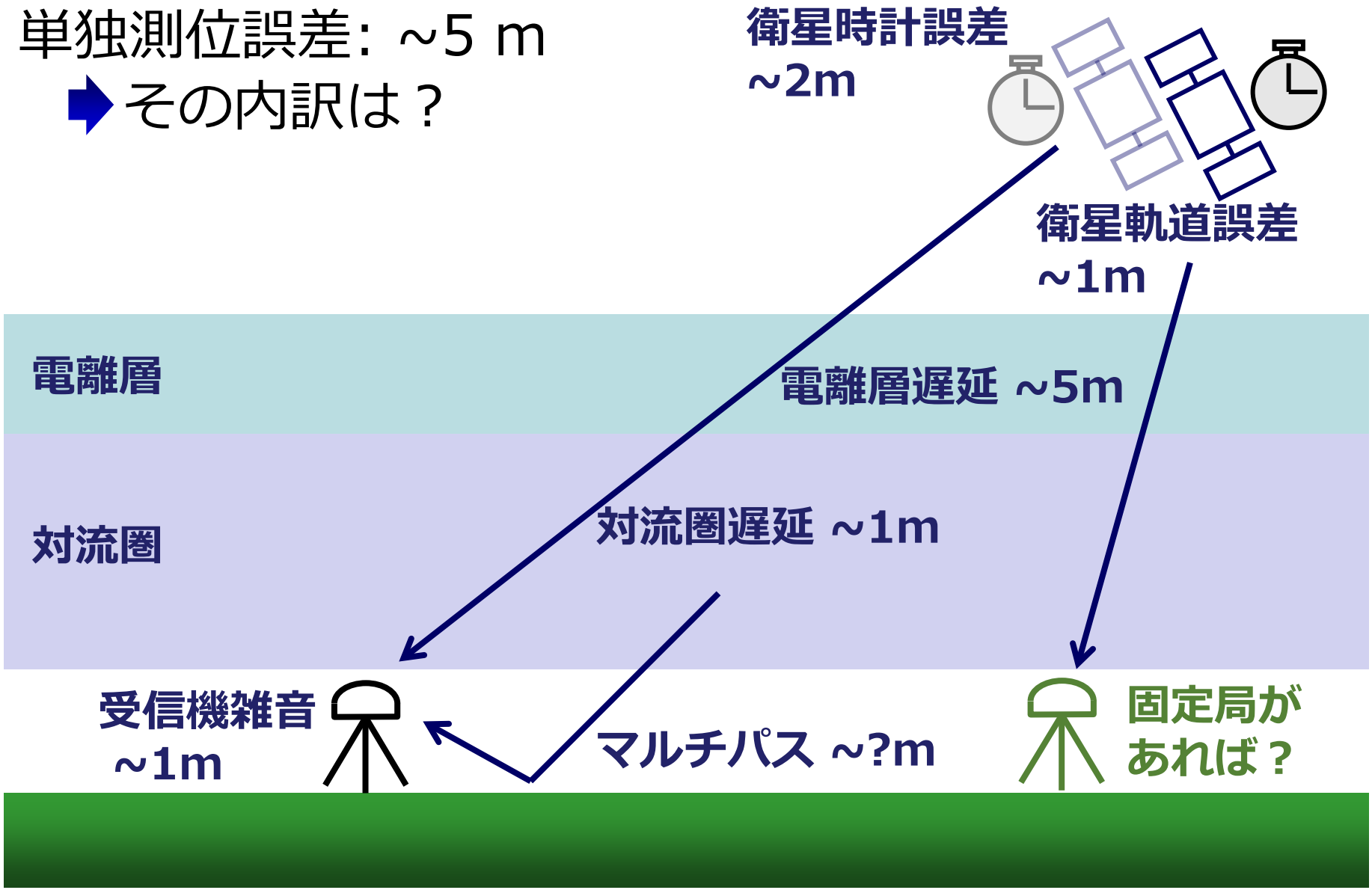


引用:第7回 衛星測位と地理空間情報フォーラムJAXA資料

位置推定（GNSS: Global Navigation Satellite System）

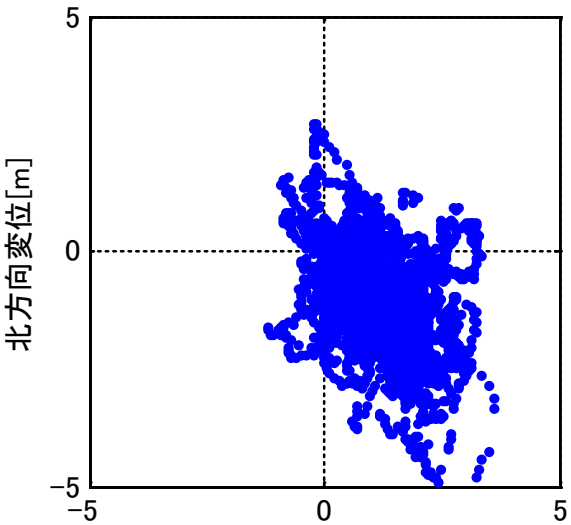
単独測位誤差: ~5 m

➡その内訳は？

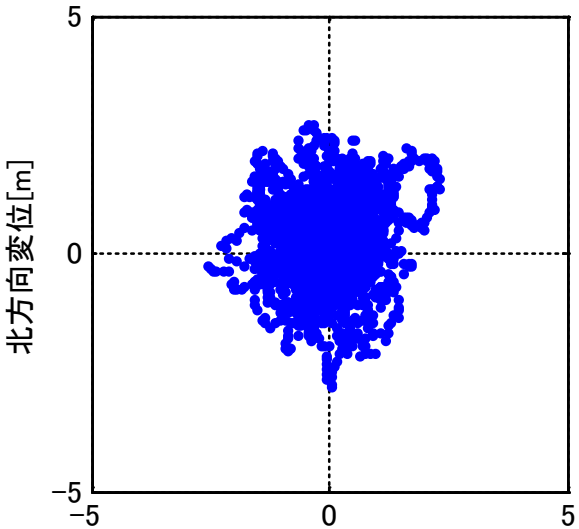


できていること

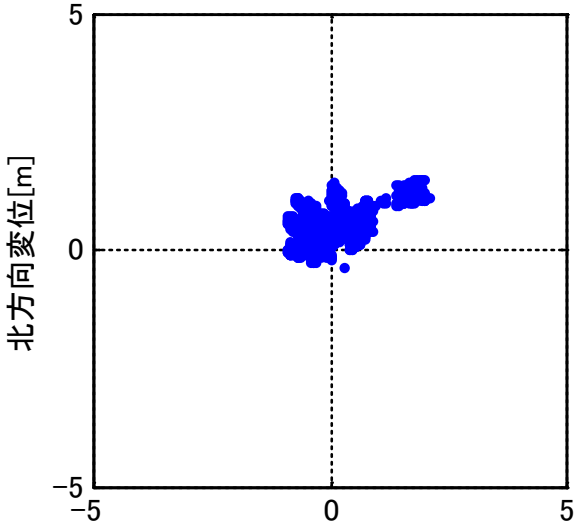
位置推定 GNSSの測位精度比較



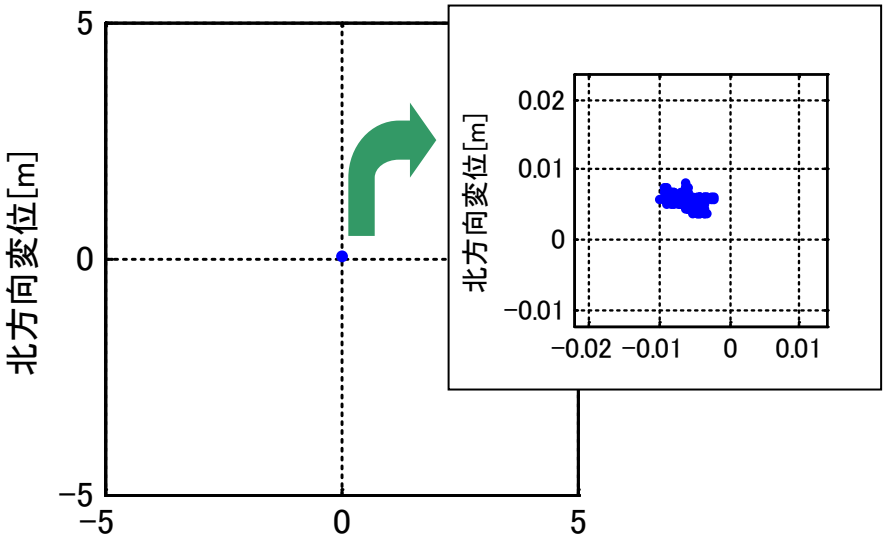
（1) Single Point Positioning



(2) Differential GNSS Positioning



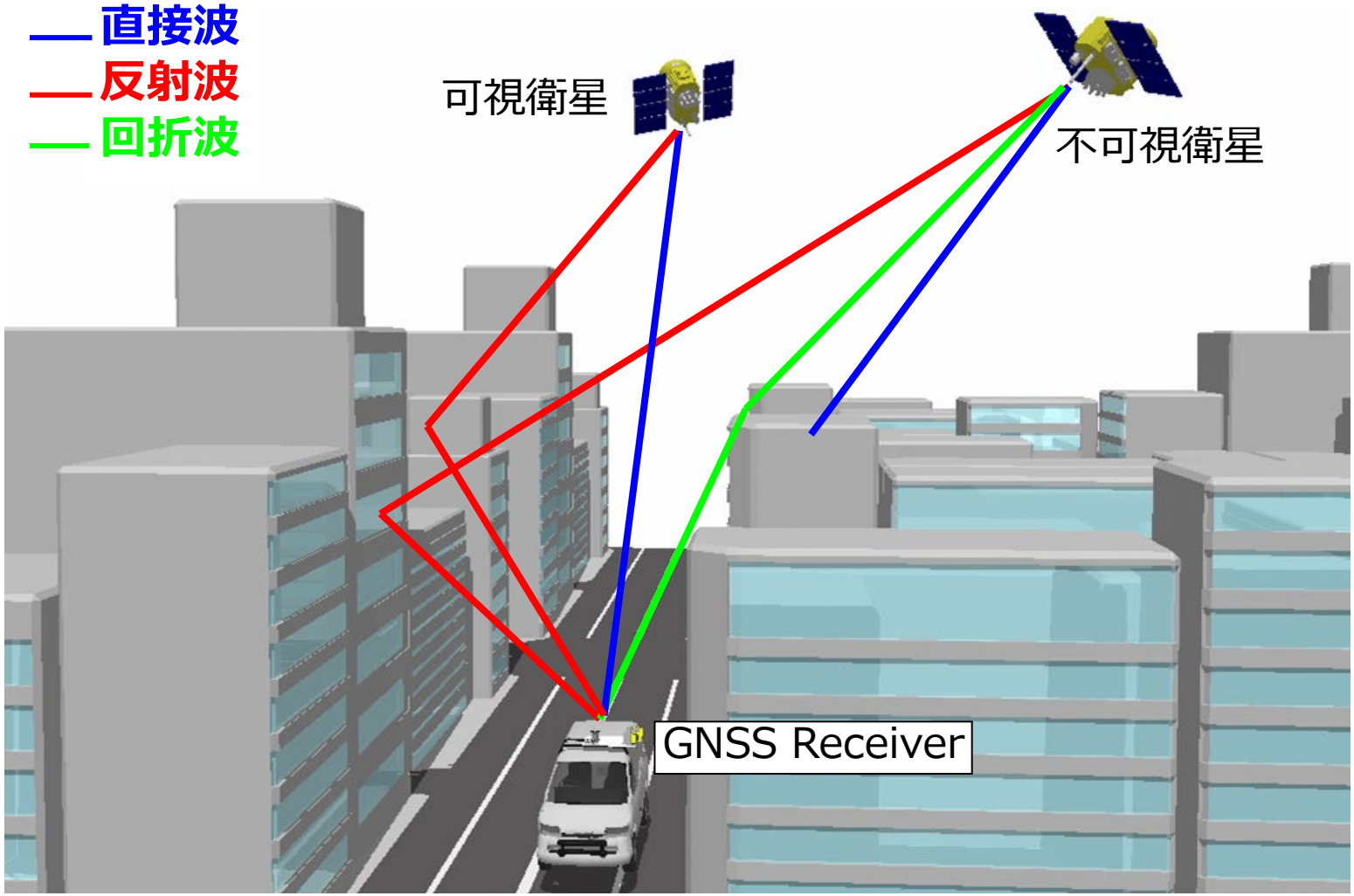
（3) D-GNSS + Carrier Smoothing



(4) Carrier Phase Differential GNSS

できていること

実は難しいこと：位置推定 GNSSの問題点



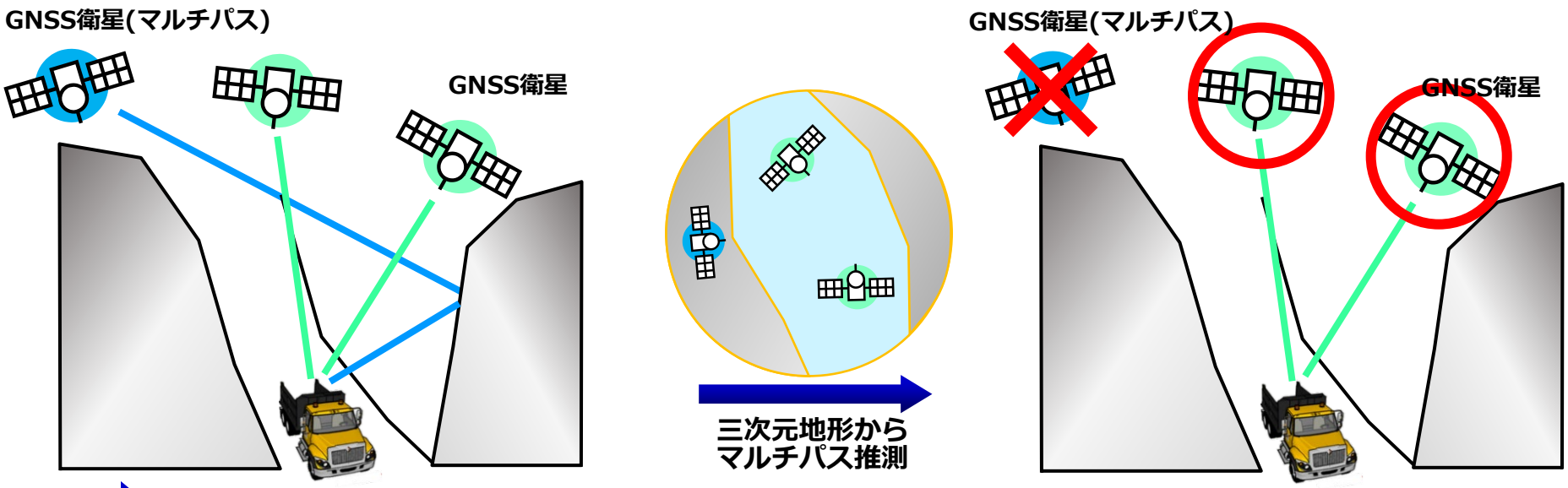
衛星数の増加が測位精度向上に必ずしも直結しない

位置推定 GNSSのマルチパスの解決案

衛星の電波の遮蔽・反射により測位誤差が増大（マルチパス）

三次元地形情報を利用することでマルチパスの影響を推測し，位置推定精度を向上させる

提案手法概要



事前に取得した地形情報から**可視衛星**のみを用いた測位
（千葉工大 鈴木太郎先生）

実は難しいこと：橋の下はアウト

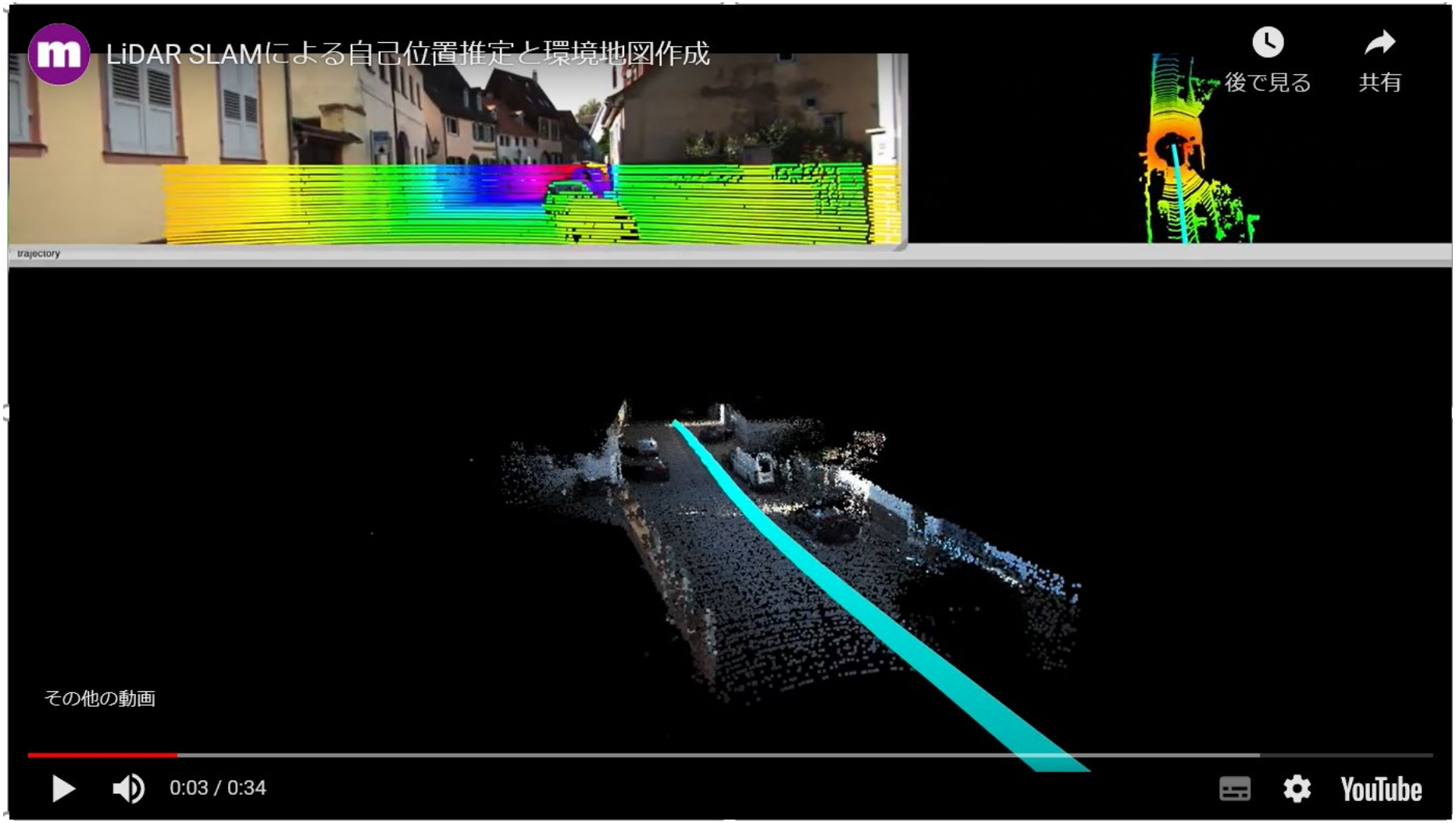
SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）について

SLAM/建設現場でググると・・・

- トンネル坑内で建機の自動運転実現／ＳＬＡＭ技術で位置情報把握
- AR技術を用いた大規模建設現場での3次元位置情報の取得に成功

- **地図がある場合，厳密にはSLAMとは呼ばない.**
  → 多くの場合，SLAM技術と述べられている.

SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）について

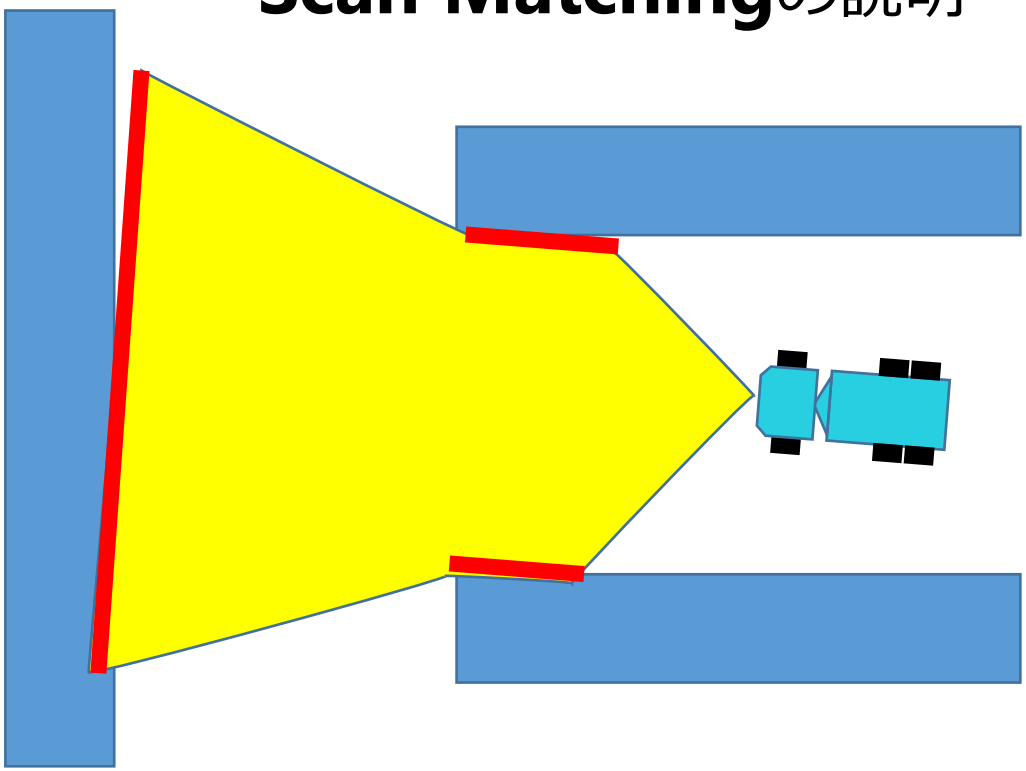


https://www.youtube.com/watch?v=bxIjVrqeT14&t=1s

動きながら地図を作る．（予め地図があれば，地図を作る必要はない．）

Scan matchingによる位置修正

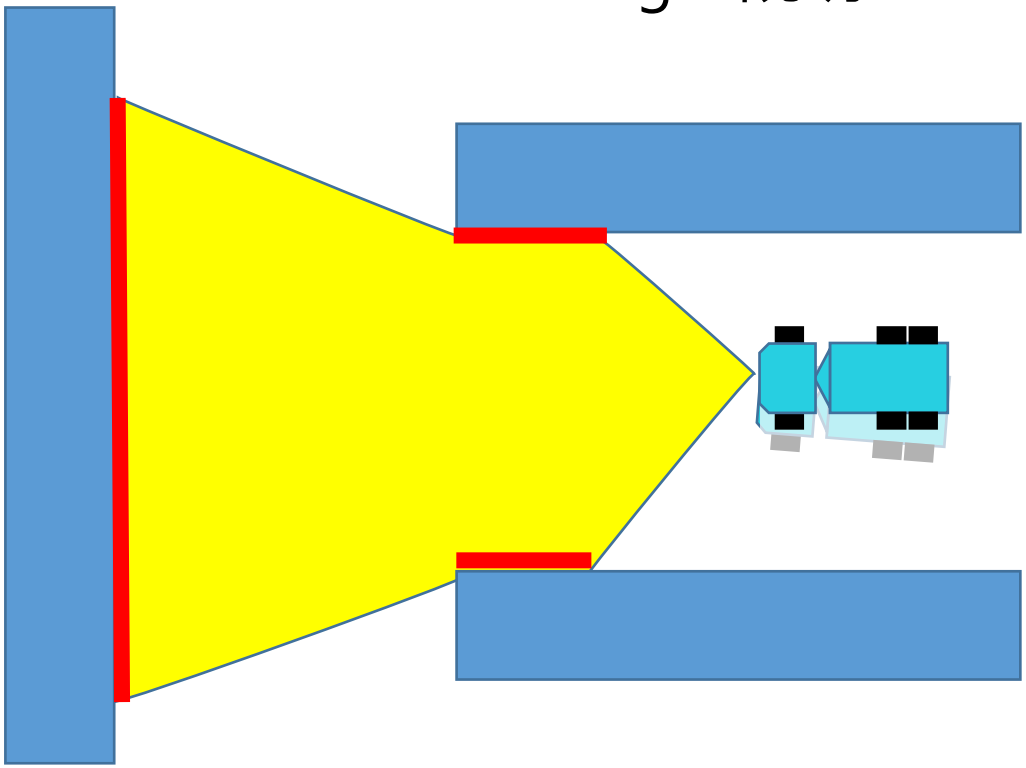
Scan Matchingの説明



車両にレーザ距離センサが搭載されていて,
環境の地図が分かっている場合・・・

Scan matchingによる位置修正

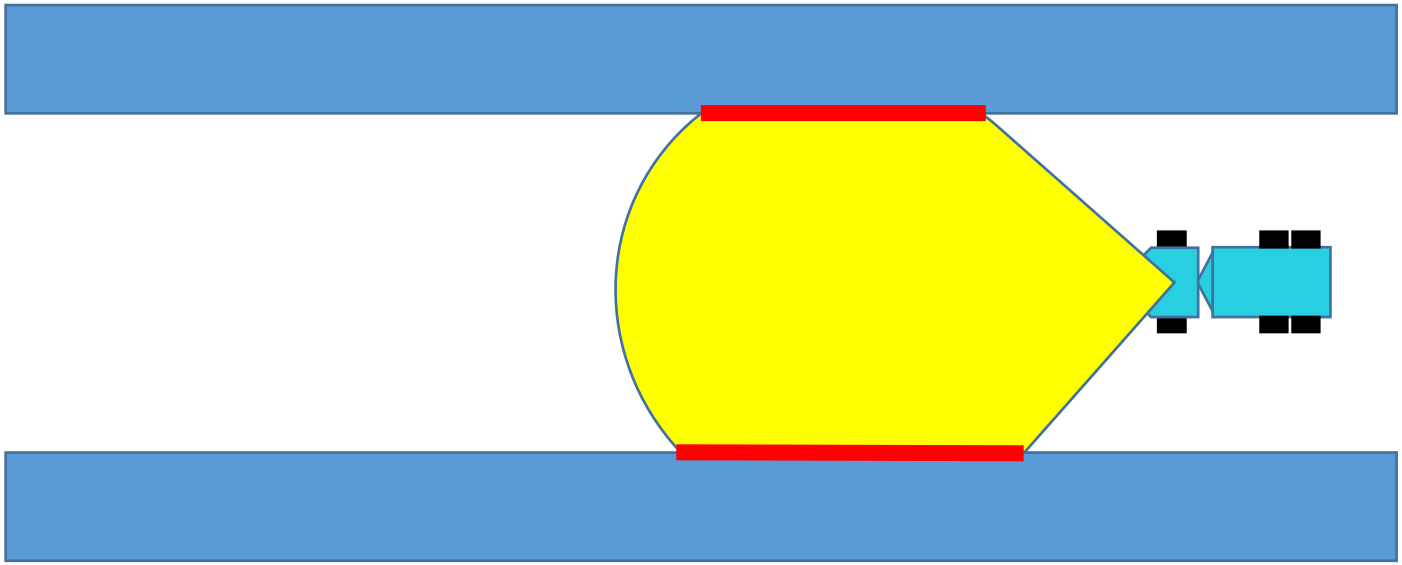
Scan Matchingの説明



車両にレーザ距離センサが搭載されていて,
環境の地図が分かっている場合・・・
自己位置を修正することができる.

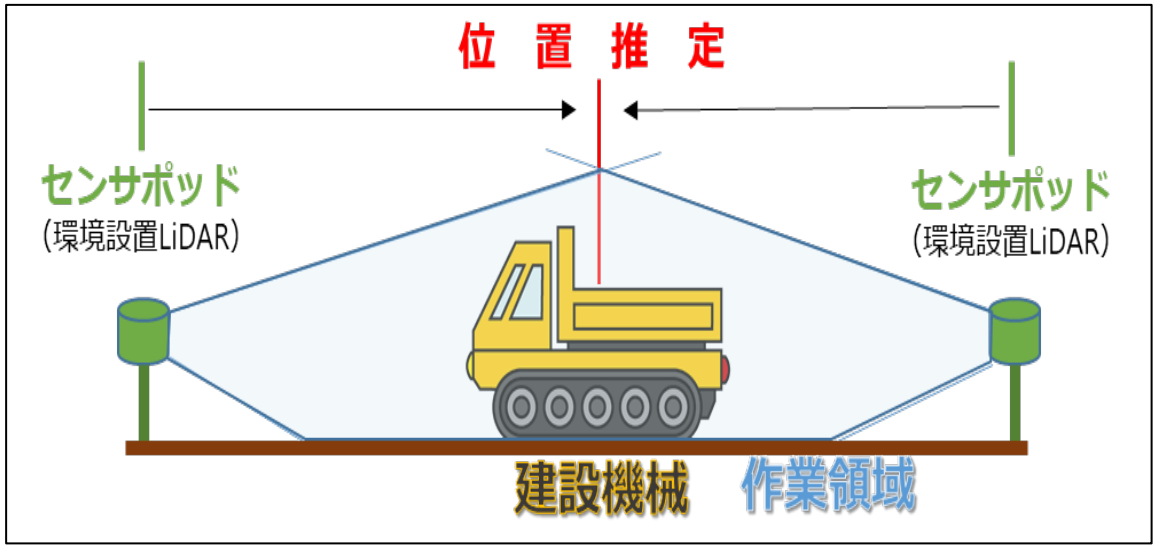
SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）の難しいところ

Scan Matchingが失敗する例



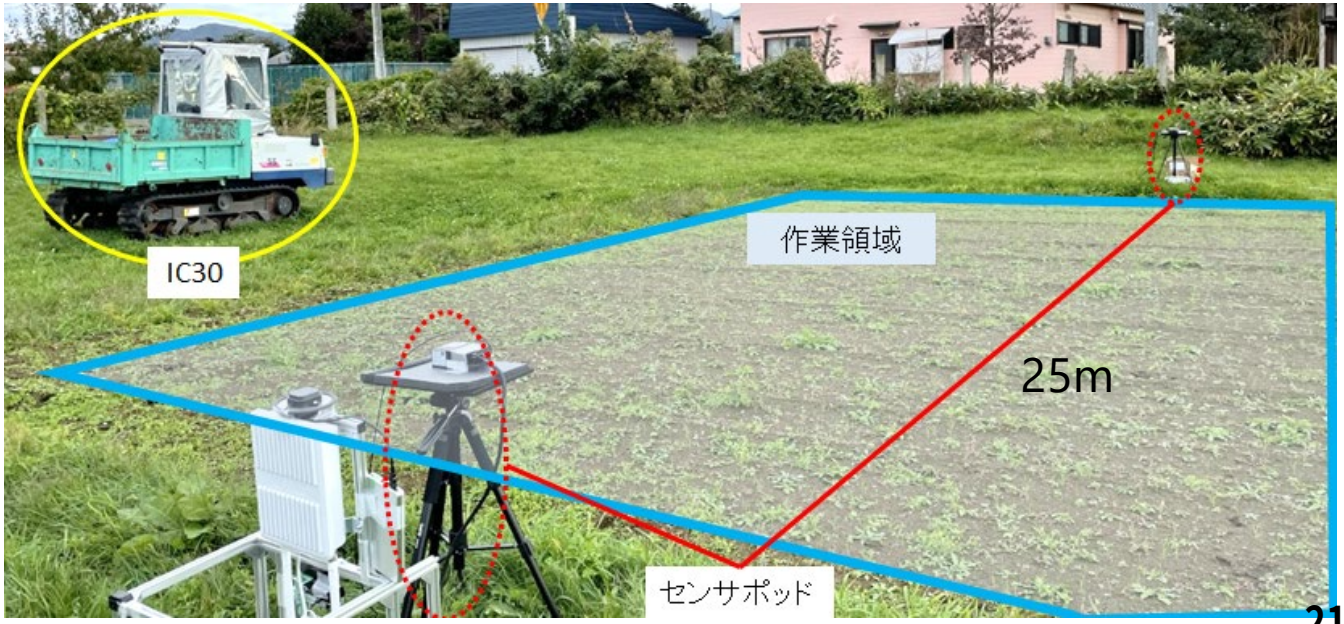
- **SLAMによって○○ができるようになった.**
  → **環境依存**であることをしっかりと認識しておく.
  （上手くいくときは，上手く行く．）
  （Structure from Motion も基本は同じ）

センサポッドを活用したロボットの位置推定（担当：弘前大学）



概念図

圃場でのセンサポッド配置

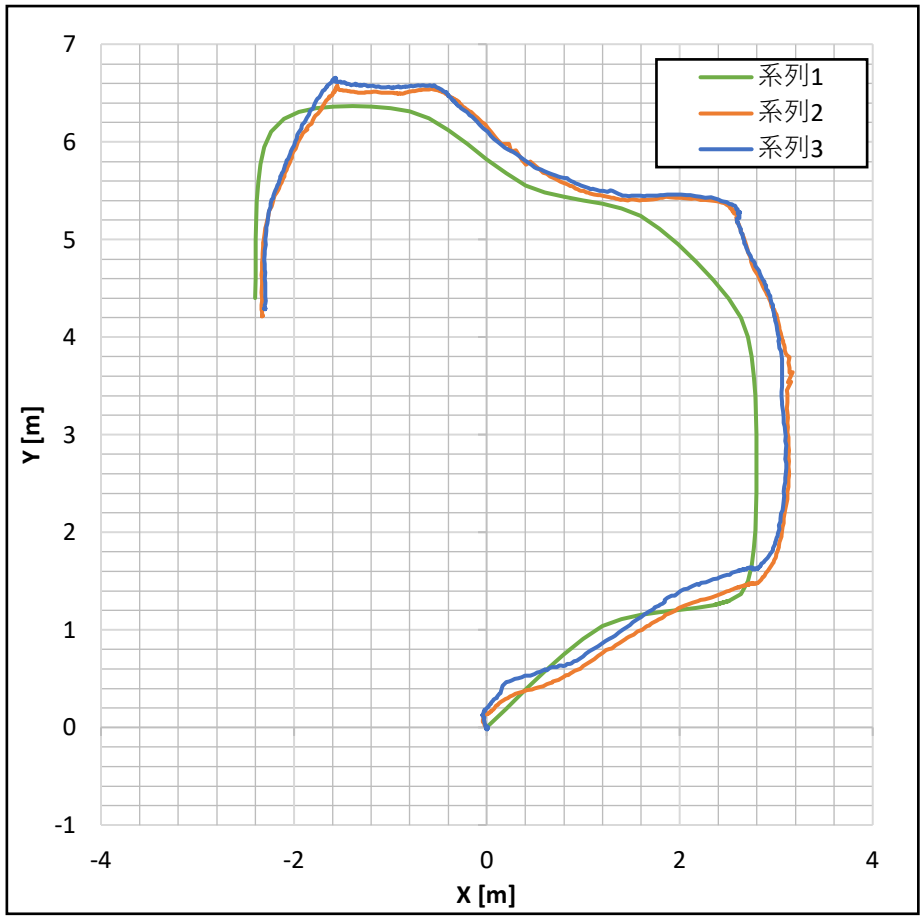


CAFE Project
で行っている
研究開発

センサポッドを活用したロボットの位置推定（担当：弘前大学）

2022-04-11実施

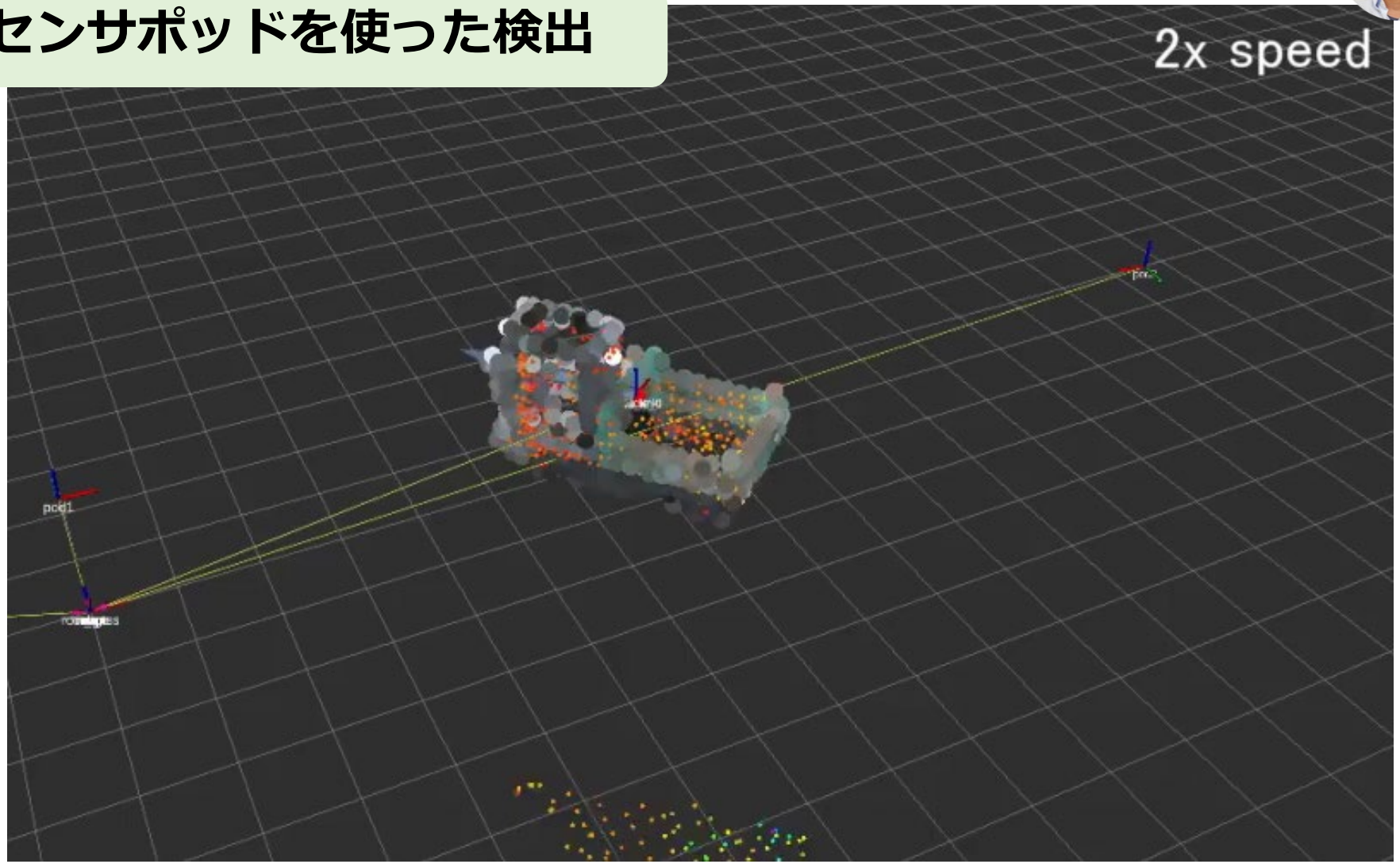
PurePursuitによる追従制御



項目	平均精度	分散
XY方向[m]	0.065	0.056
Yaw角[deg]	0.598	0.647
経路[m]	**0.198**	**0.117**

センサポッドを活用したロボットの位置推定（担当：弘前大学）

センサポッドを使った検出



建機を中心に２人が回る．歩行者か，モノかの判別はしていない．

「己を知ること」のまとめ

- GNSSはとても有用，最近は安価.
- GNSSに頼りすぎない → 冗長Systemは重要.
- SLAMはとても賢そう.
- SLAMを信じすぎない → 冗長Systemは重要.

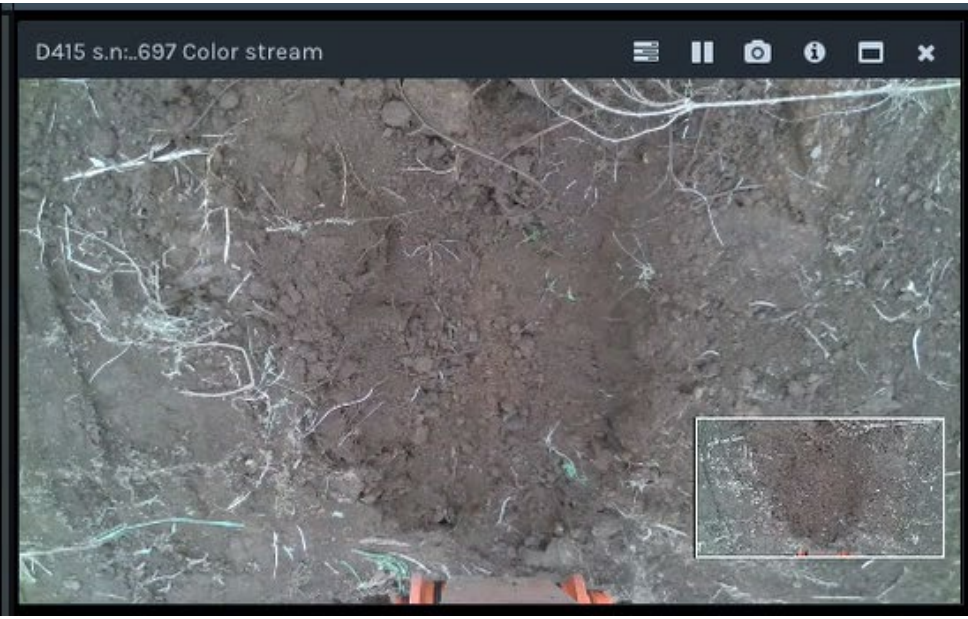
環境を理解すること
(Sensing & Mapping)

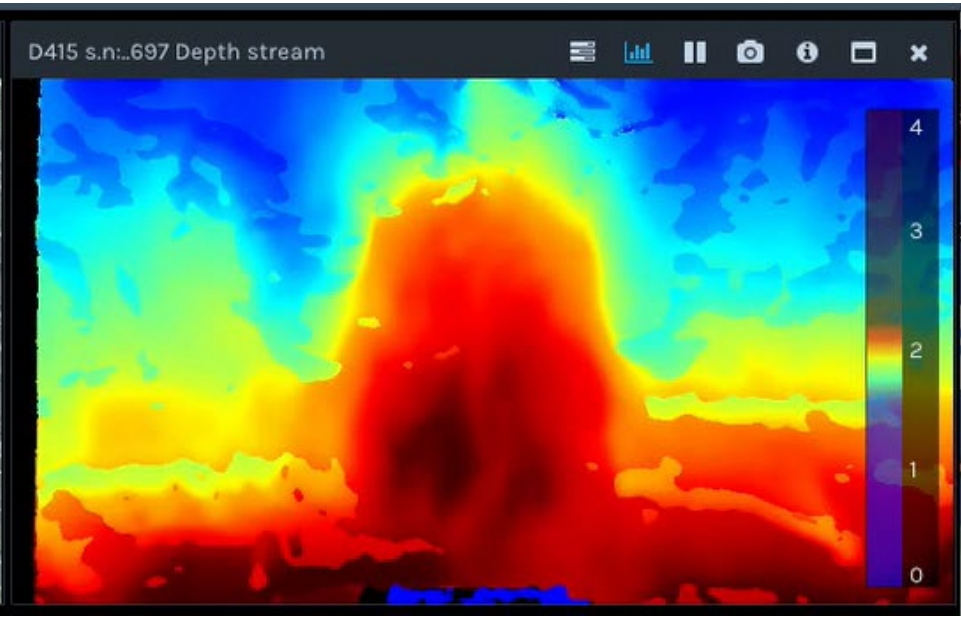
三次元環境の構築技術

SfM（Structure from Motion）による三次元構築

できていること

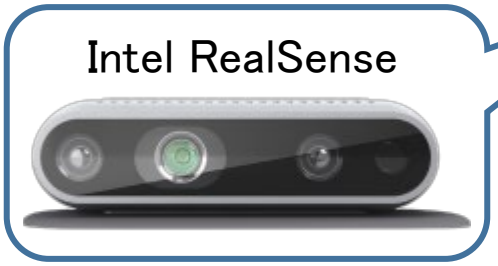
RGB-Dによる地盤形状取得





↑ RGB画像

↑ Depth画像
青→緑→黄→赤→黒
近い　→　遠い



バケットが見える位置にRealSenseを設置

ほぼできていること

地盤の調査技術

振動ローラ加速度応答法（αシステム／CCVなど）

https://www.rexse.com/category/machine-control/rexseroller/option.html

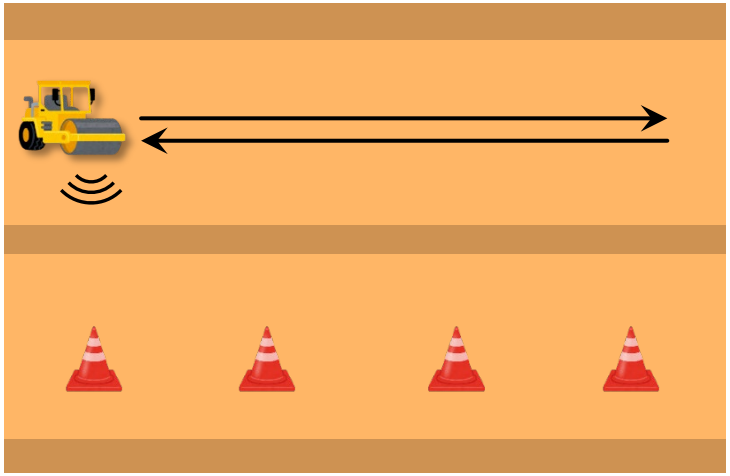
RI測定

微量のRI（放射性同位元素）を利用して土中の湿潤密度（含水比）や含水量を測定する機器

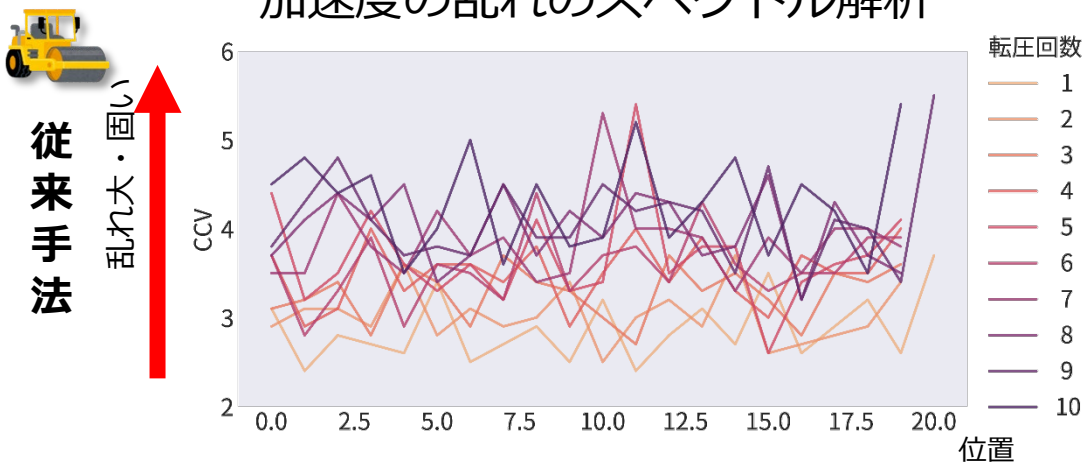
できていること

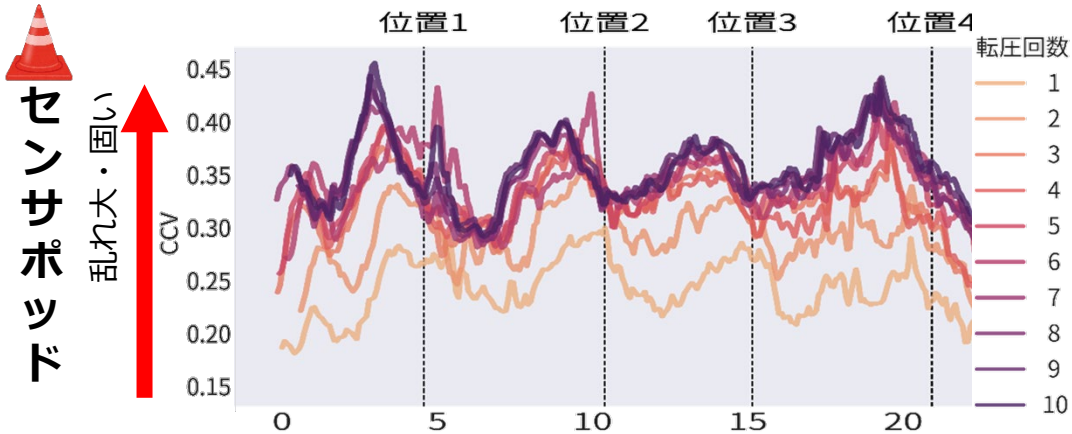
センサポッドによる環境情報の収集（九州大 倉爪PI）

③　地盤の推定　振動解析で走行安全性を推定



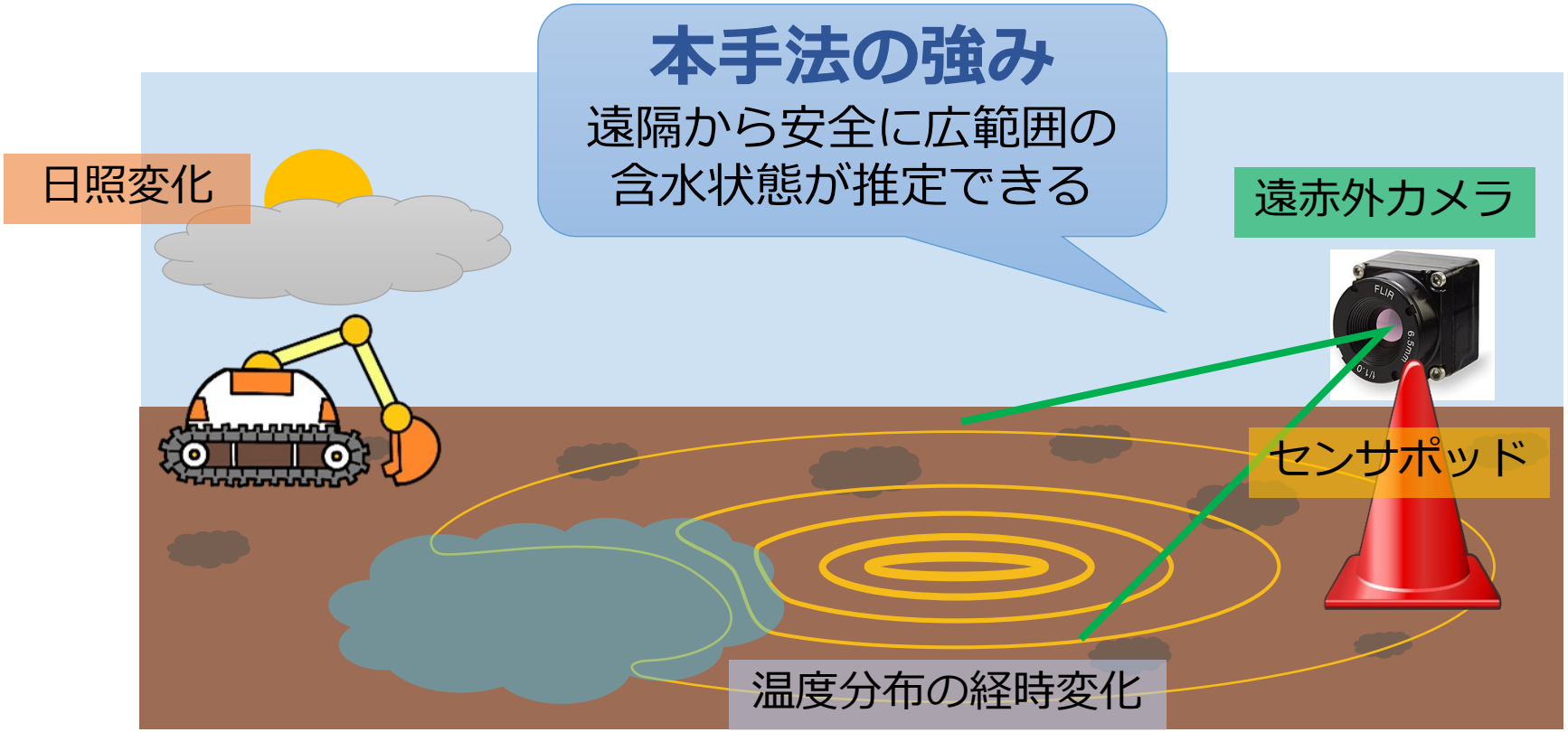
加速度の乱れのスペクトル解析





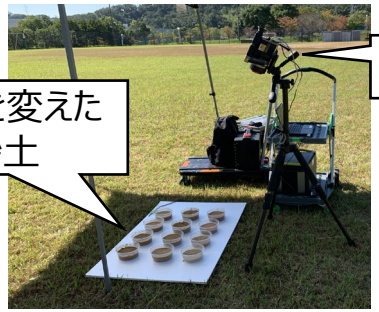
遠赤外カメラによる非接触広範囲の地盤状態推定（向川PI）

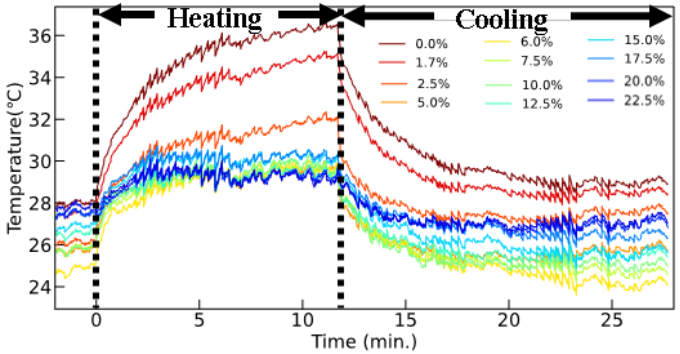
- 日照などの環境変動による温度分布の経時変化から土壌の含水状態を推定
- 競合相手：接触型計測（電気インピーダンスや振動）



遠赤外カメラによる非接触広範囲の地盤状態推定（向川PI）

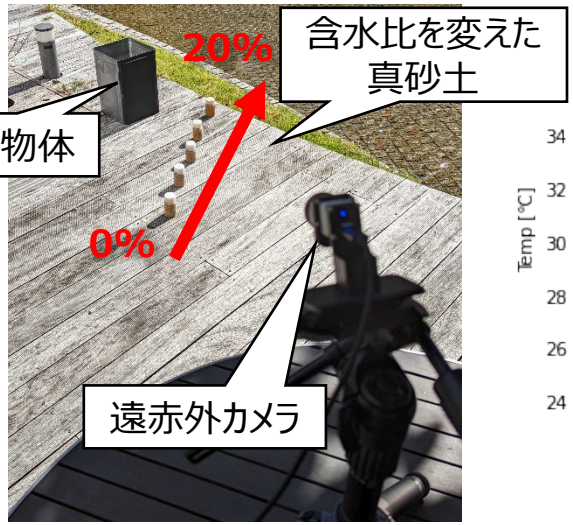
- **加熱・冷却による温度変化と含水状態の関係**
  - 比較的単純な環境変動では含水状態推定に成功

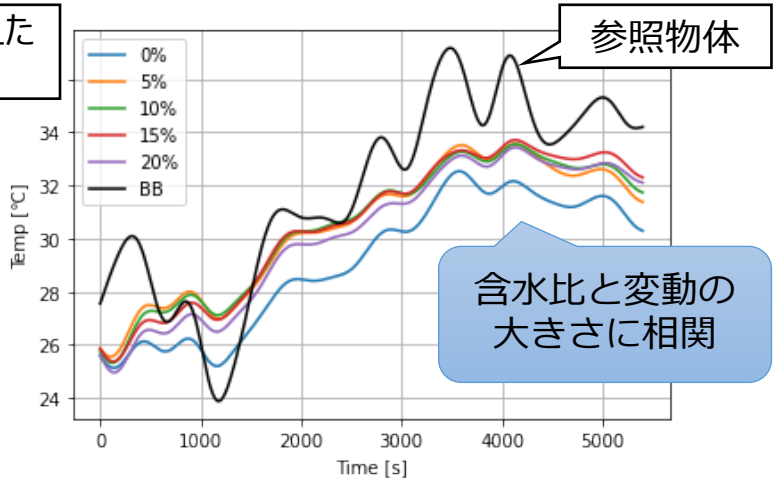




- **参照物体を用いた環境変動推定**
  - 参照物体との比較による含水状態推定の可能性

参照物体：表面に黒体スプレーを塗布した金属缶

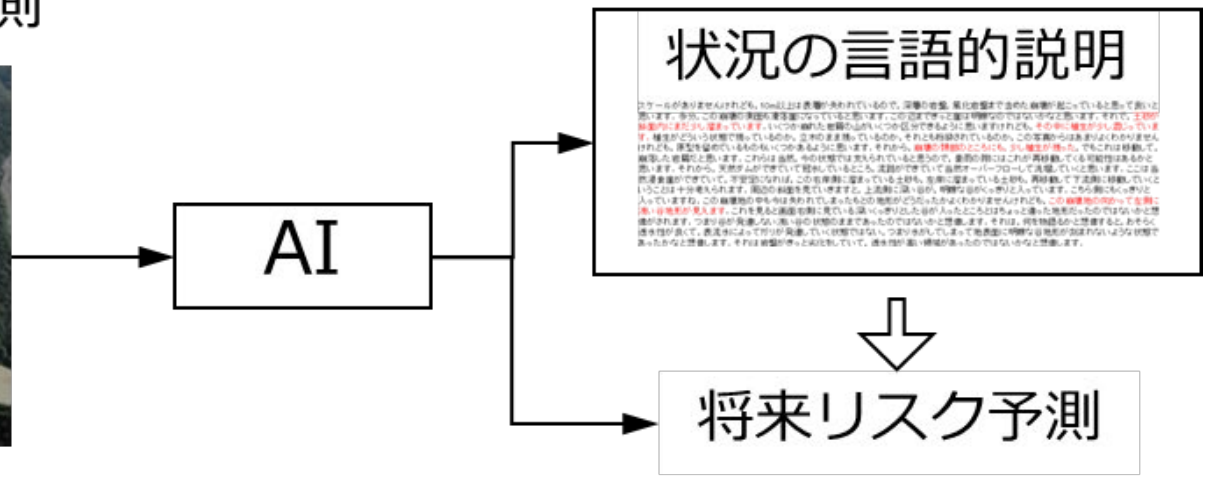




Sensing Data解析：過去災害に対する適用と検証（全PI）

- 理化学研究所が開発したAIフレームワークを過去の災害に対して適用し，その妥当性を検証するために，本年度は，地上インフラ構造物ならびに自然災害環境を対象に，土木工学分野における取得データの言語化で人間と同等の性能を実現できていることを確認する．また，概念間関係性モデルを構築し，技術的判断を行うことが可能なシステムを構築する．
- **中核技術：画像キャプション生成(image captioning)**

例）地滑り評価・予測



Sensing Data解析：過去災害に対する適用と検証（全PI）

画像キャプション生成によるリスク予測（橋梁点検）

1. Cracking detected on the bottom of the slab.
2. Lime detected on the bottom of the slab.

(g)

1. Exposed rebar detected on the main girder.
2. Spalling concrete detected on the main girder.

(h)

1. Cracking detected on the main girder.
2. Lime detected on the main girder.

(i)

1. Corrosion detected on the bearing.
2. Corrosion detected on the anchor bolt.
3. Missing anchor bolt detected.

(j)

1. Cracking detected on the base mortar.
2. Corrosion detected on the bearing.

(k)

1. Corrosion detected on the drainage pipe.
2. Lime detected on the bottom of the slab.
3. Leaking detected at the bottom of the slab.

(l)

Sensing Data解析：PINNによる対象環境未来予測（西尾PI）

PINN=Physics informed neural network

- 地盤データ取得は高コスト
- 多数の物理式が連成
- スケール巨大（数百m）

→ モデル化・データ収集
計算コストに課題
機械学習を合わせる手法
の有効性が期待される

既存アプローチ①

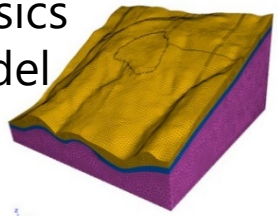
Data assimilation
逆解析、ベイズ推定、カルマンフィルタ　etc.

Actual site

Data acquisition
変位, 振動, etc.

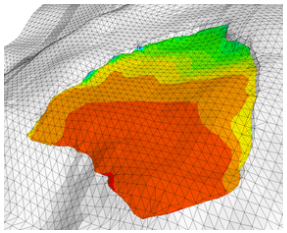
実際に近いモデルへ

Physics model



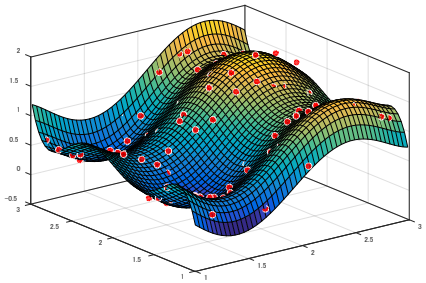
Input
- 天然ダム水位
- 物性変化
・・・

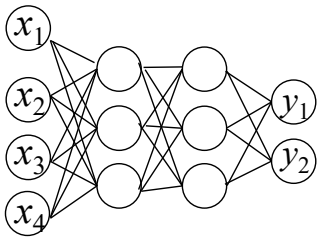
Output



少ない解析回数

Surrogate model = trained Input-Output





応答曲面
ガウス過程回帰
NN, DL　etc.

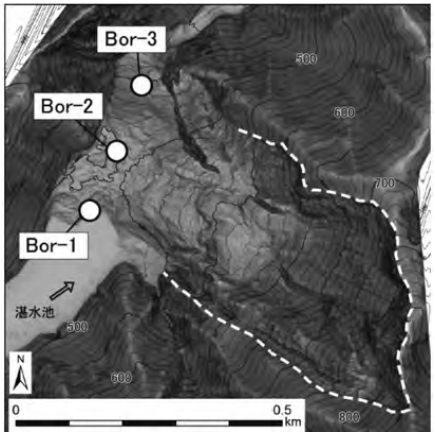
既存アプローチ②

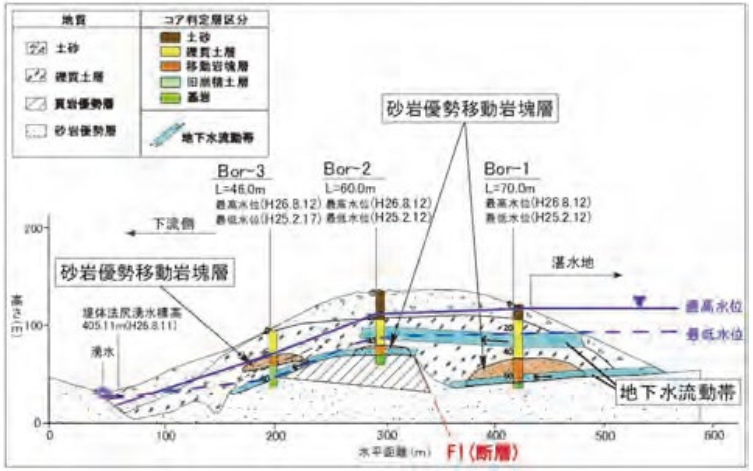
Sensing Data解析：PINNによる対象環境未来予測（西尾PI）

- 過去の災害現場で調査された情報（天然ダムの形状計測、地盤調査、水位データなど）を参考として、仮想現場デジタルツインとなる物理モデルを作成（地盤の弾塑性ー水連成解析モデル）
- 数値データを作成してPINNを学習、模擬計測データを作成してPINNによる物性値や地下水位推定への検証に用いる

モデル現場

H23年9月台風12号時に発生した奈良県長殿地区
河道閉塞現場の平面図と地質縦断図
桜井ら, 砂防学会誌, Vol. 68, No. 3, pp. 21-30, 2015





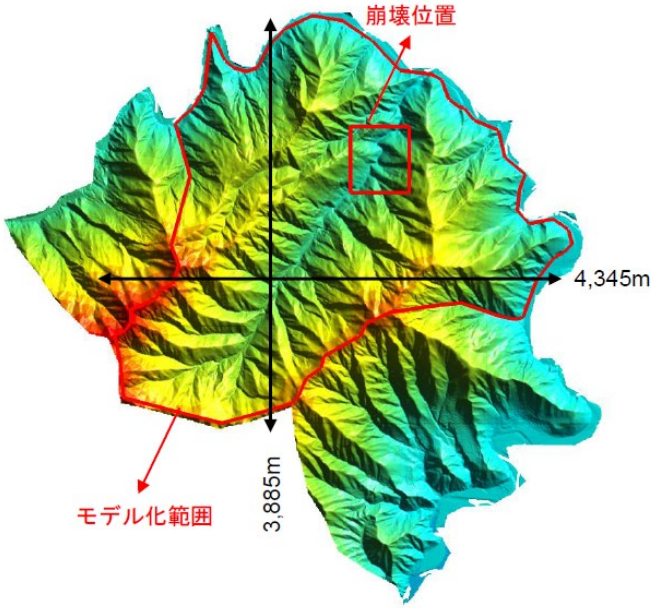


図 2-2　モデル化した範囲

「環境を知ること」のまとめ

- 三次元点群や画像処理はご存じの通り.
- 地盤情報を取得することは重要.　（難しい.　）
- データから診断を行う言語AIに期待.
- データから予測を行うPINN（AI）に期待.

動作を行うこと
(Motion Planning & Control)

マシンコントロール

https://www.youtube.com/watch?v=Ao8fNmQSLRE

GNSS情報と施工計画を用いてブルドーザの排土板の高さ制御を行うことで高精度の施工を実現

できていること

埋設管接触を回避する掘削について

左上：埋設前の埋設管の位置に関する真値の測定

左下：埋設後のレーダ測定の様子

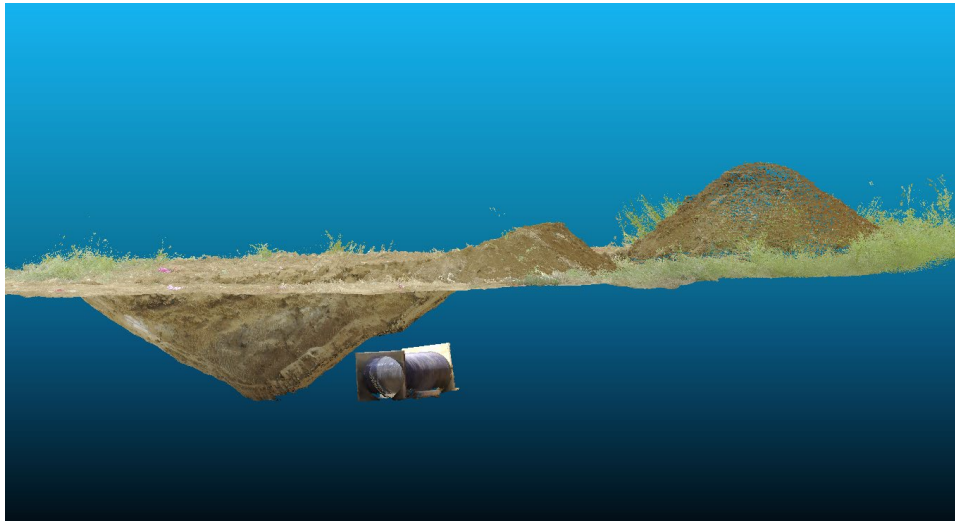
右上：掘削時の動画

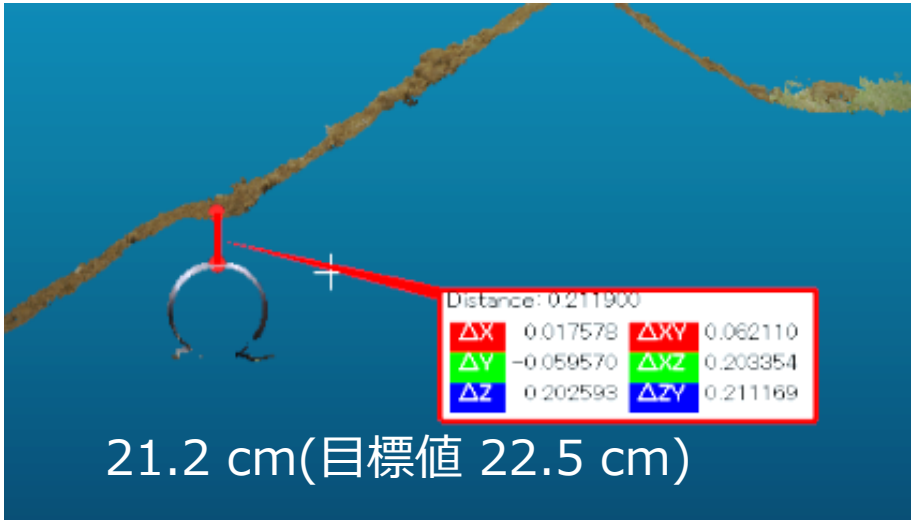
埋設管接触を回避する掘削について

左上：掘削後の俯瞰図

左下：埋設前に取得した埋設管点群を地中に表示したもの

右下：掘削面と埋設管上部の距離測定



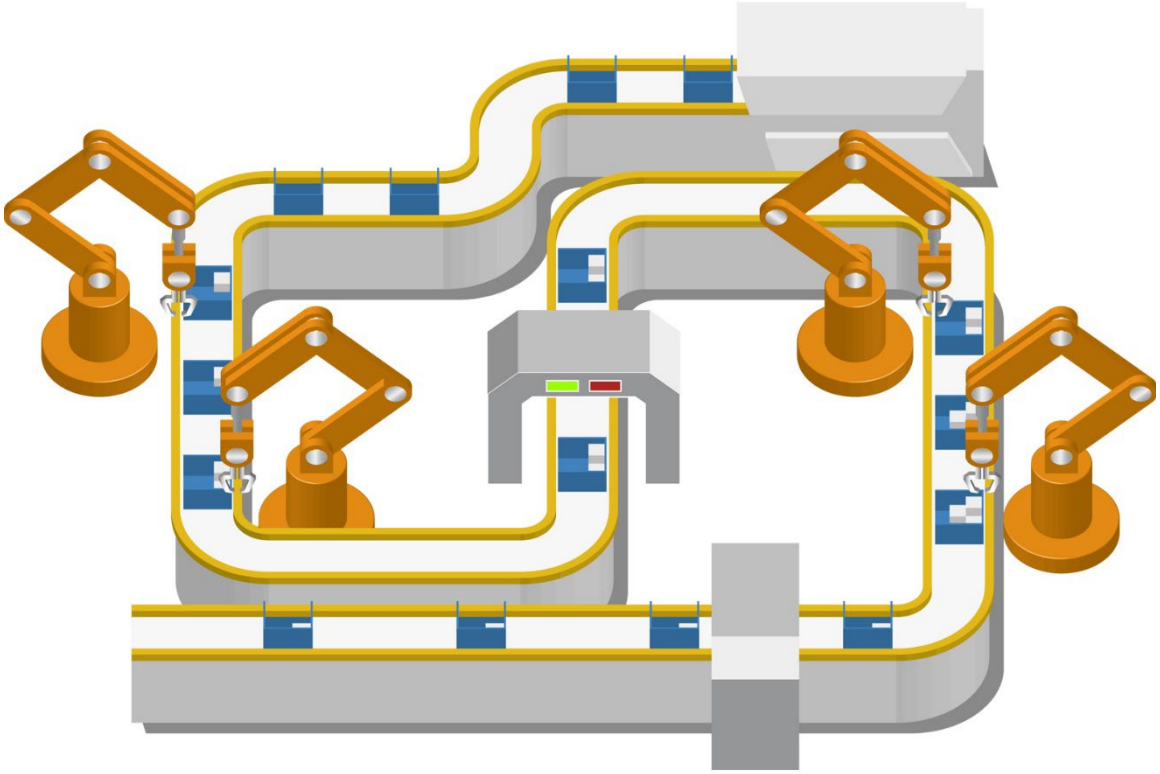


フィールドロボットシステム構築の難しさ

現在主流のアプローチ：

← 閉じた設計

- **場面**を想定してロボットハードウエアを設計
- **場面**を想定してソフトウエアを設計
- 現場では，**場面**に応じた最適作業計画を立案
- 状況をセンシングし，**ロバスト**に作業を実施



フィールドロボットシステム構築の難しさ

現在主流のアプローチ：

← 閉じた設計

- **場面**を想定してロボットハードウエアを設計
- **場面**を想定してソフトウエアを設計
- 現場では，**場面**に応じた最適作業計画を立案
- 状況をセンシングし，**ロバスト**に作業を実施

現在主流のアプローチで上手くいかない例：フィールドロボット

- **あらゆる場面**を想定してハードウエアを設計（大型化）
- **あらゆる場面**を想定したソフトウエアを設計（想定の発散）
- 現場では，**様々な状況**に応じた作業計画を立案（状況把握が鍵）
- 環境をセンシングし，**ロバスト**に作業を実施（センシング能力の限界）

← 閉じた設計では破綻

フィールドロボットシステム構築の難しさ

対象とする環境の問題：

環境に対する境界条件を設計段階で予め予測することができない（**環境の未知性**が非常に大きい）．

→ 設計問題が閉じていない
（「**不良設定問題**」になっている）

⬇

臨機応変に対応するロボットシステム

（開いた設計）

開いた設計による協働AIロボットの設計

Closed Design

Boundary conditions ≒ Target environment

Design phase: **Optimal solution**

Applying phase: **Optimal solution**

Open Design

Boundary conditions are not explicit

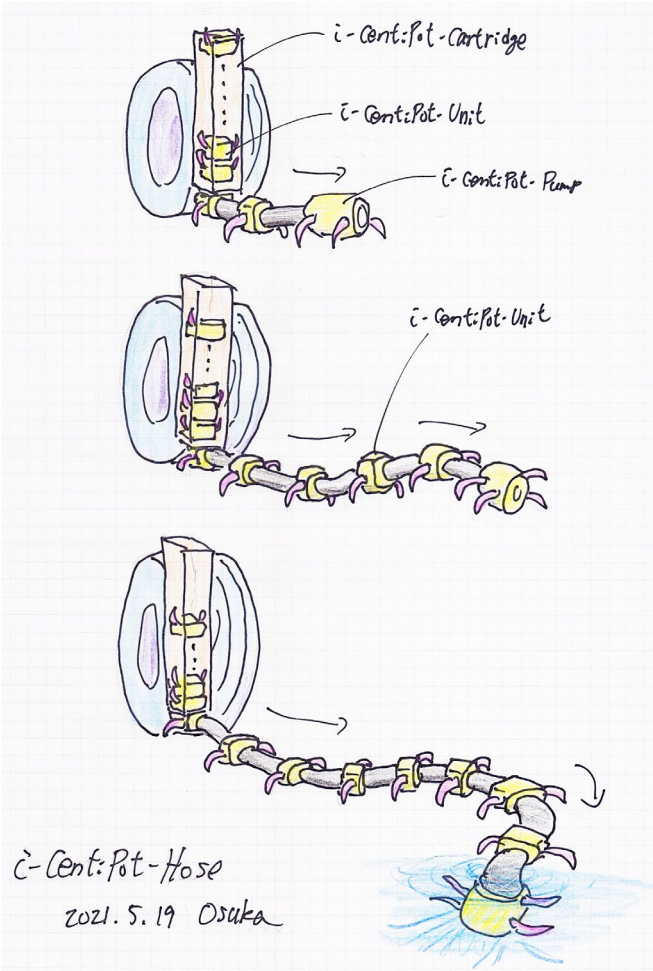
Deemed Optimal solution

Sense of implicit control

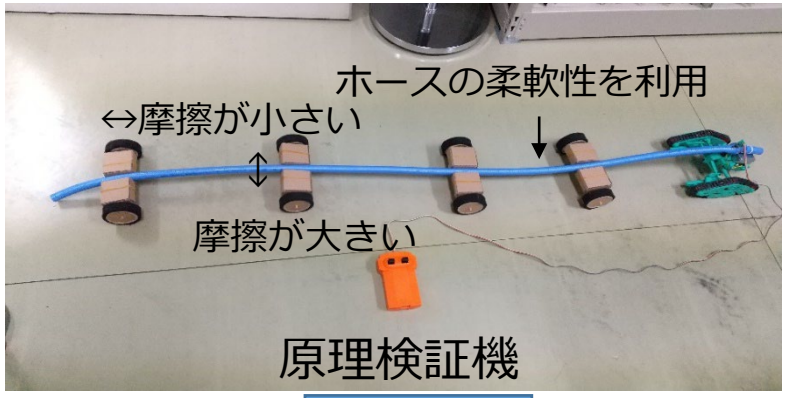
Reasonable Solution | Reasonable Solution | … | Reasonable Solution

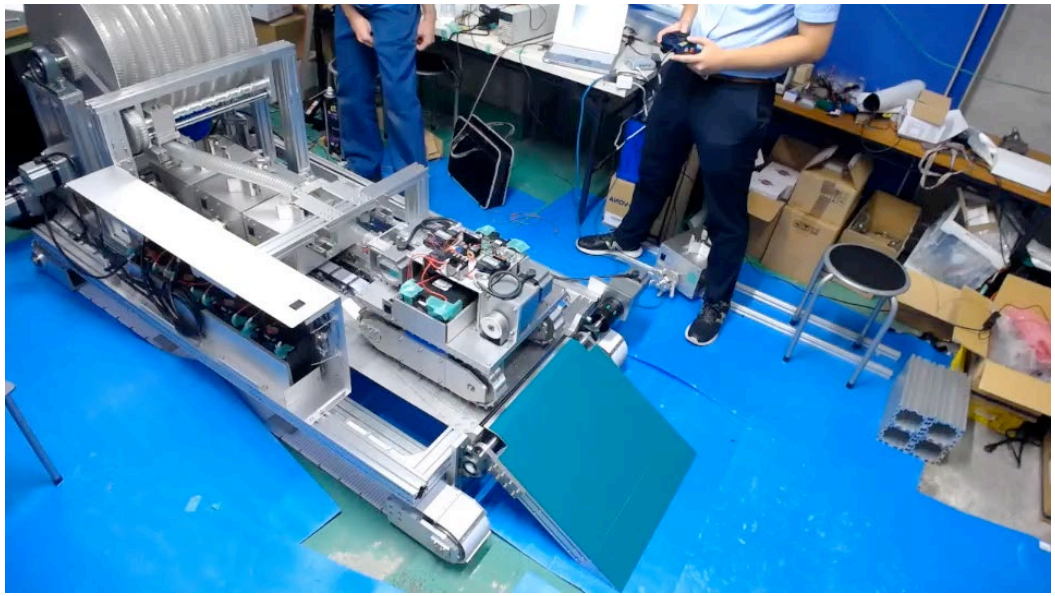
ヘテロ, 軽量, 柔らかさ, 冗長, 複数台協調

開いた設計による排水ホースの展開機構 i-CentiPot-Hose（大須賀PI）



コンセプト（妄想）



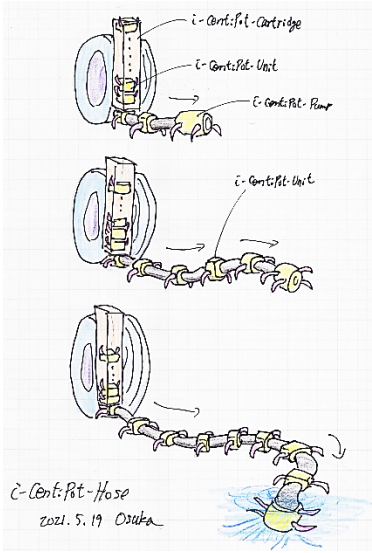


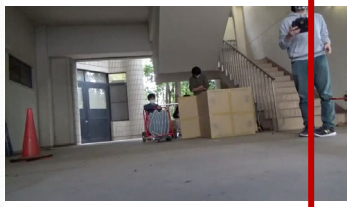
開いた設計による排水ホースの展開機構 i-CentiPot-Hose（大須賀PI）

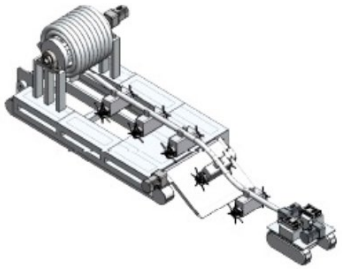
現状の開発段階

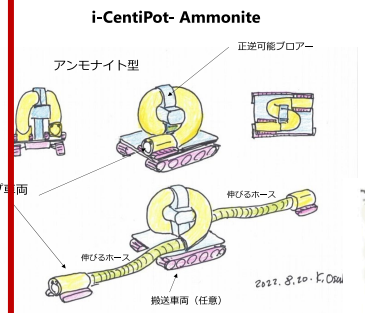
CAFEとの連携を見越した
次のサイクルに着手済み

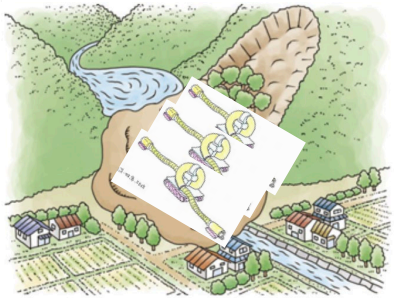
コンセプト　原理検証実験　試作機　小型化，軽量化　次の改善
フィールド試験

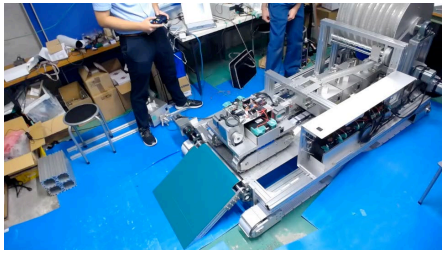


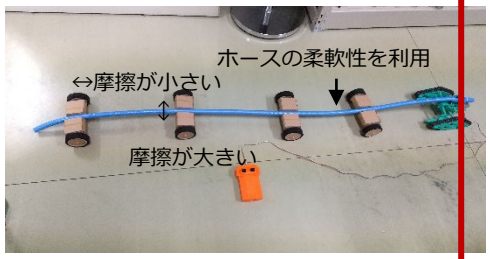


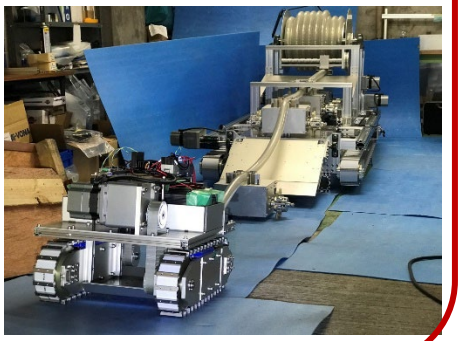


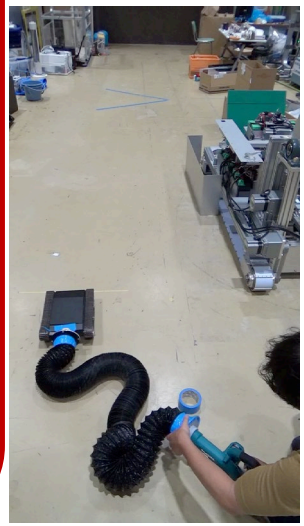












パワーソフトロボット（ゾウ鼻ロボット）（鈴森PI）

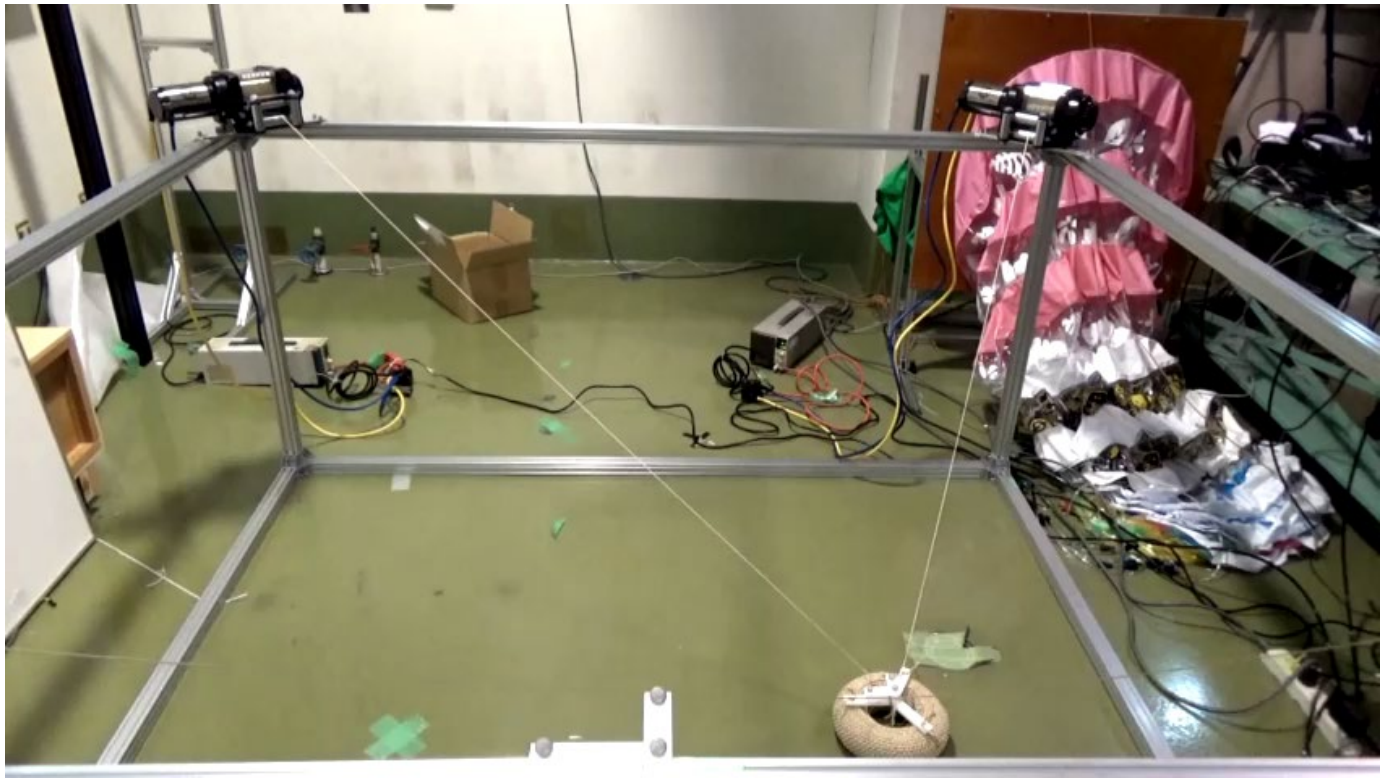
パワーとソフトの両立 →柔軟かつ大出力の把持機構

革新的な土工作業（ Reelbot ）（鈴森PI）

市販電動リールを
エージェント化

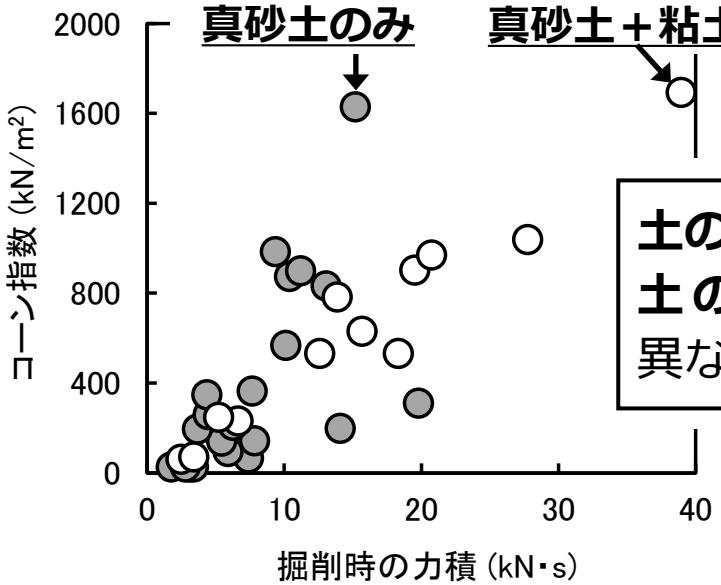
モーションキャプチャを用いたフィードバック制御

空気圧で柔軟変形
するグリッパ

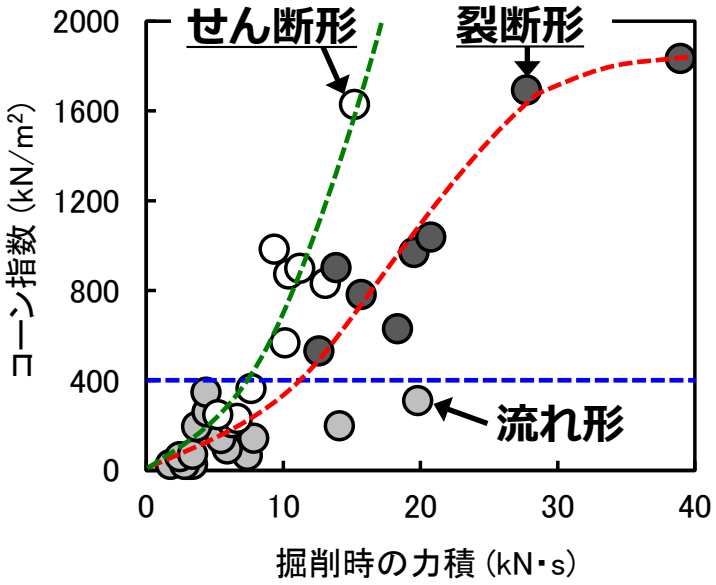


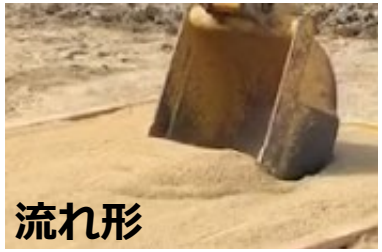
精緻なモデル化を必要とせず，環境との接触を活かしながら
協調動作するAIロボットシステムを目指す

掘削時の情報から地盤を推定（高橋PI）



土の性状によって
土の破壊形態が
異なることに着目





革新的な移動機構（双胴柔軟クローラー）（大須賀PI）

「開いた設計」に基づき，さまざまな環境に対して柔軟になじみながら環境と戦わず自在に進むことができる移動機構を開発

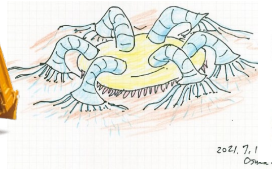
オープンプラットフォーム（橋本PI）

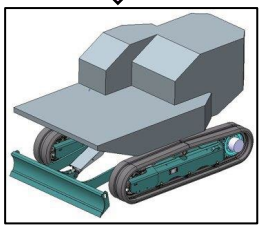
本プロジェクトにて開発されるソフトウェア

- 遠隔操縦ソフト
- 自動運転ソフト
- 施工管理ソフト
- ロボット協調ソフト
- センシングソフト
- 環境認識ソフト

オープンミドルウェア（ROS）

統一された信号のルール





既存の建設機械 | 本プロジェクトにて開発されるハードウェア | シミュレータ

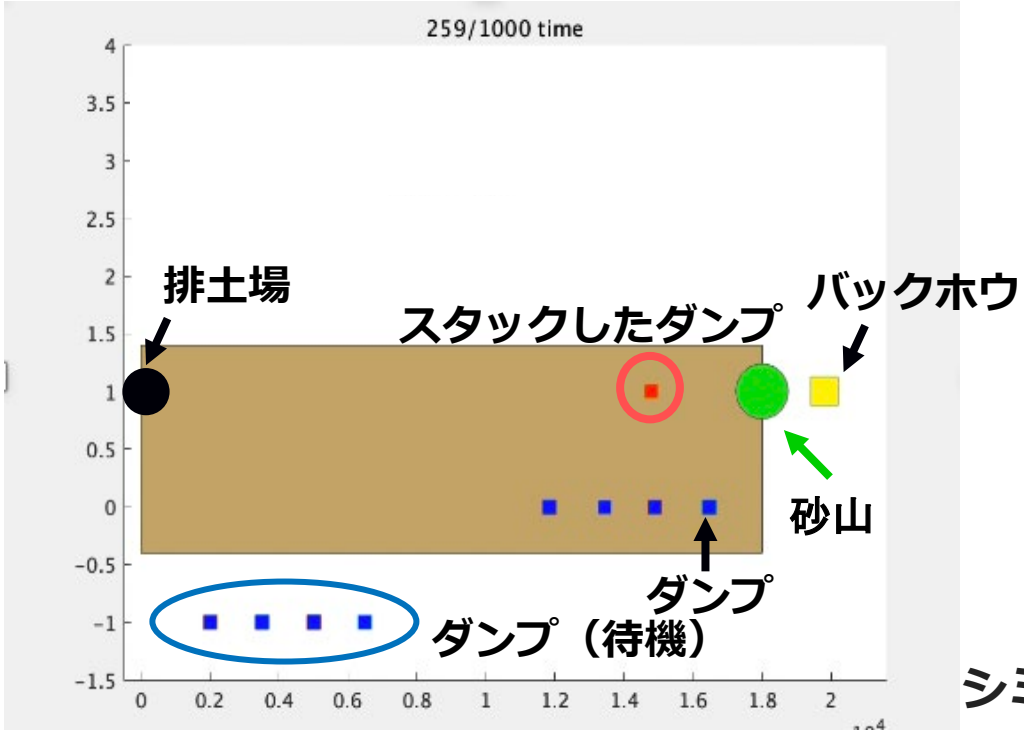
当グループでは，プロジェクト全体の研究を効率化するため、「オープンミドルウェア」と「シミュレータ」を合わせたものをオープンプラットフォームとして開発し公開する

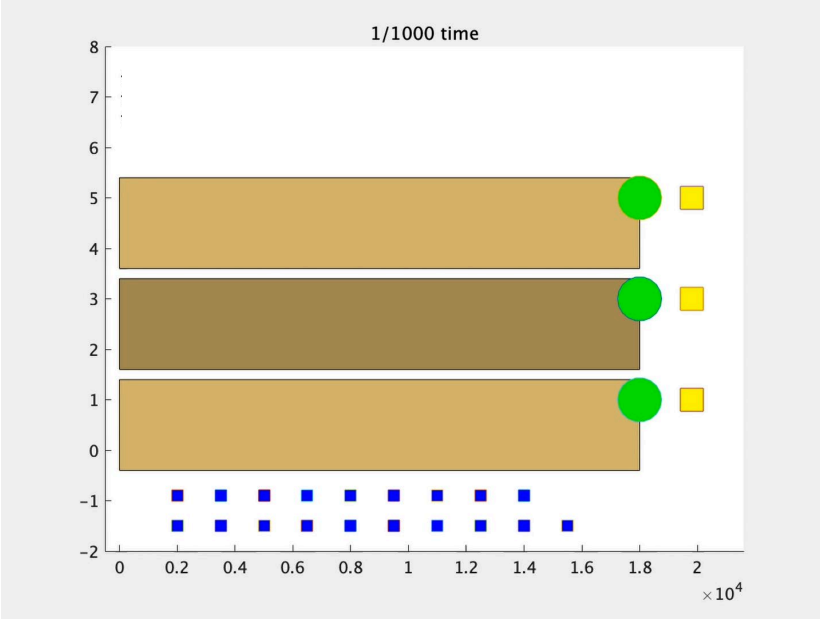
動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現（淺間PI）

結果：

状況変化（ロボット故障，環境変化）において，予測パフォーマンス，実測パフォーマンスに基づいた誤差修正によって，納期に満たしたことを確認 **→提案手法の有効性を確認**

MATLAB simulation



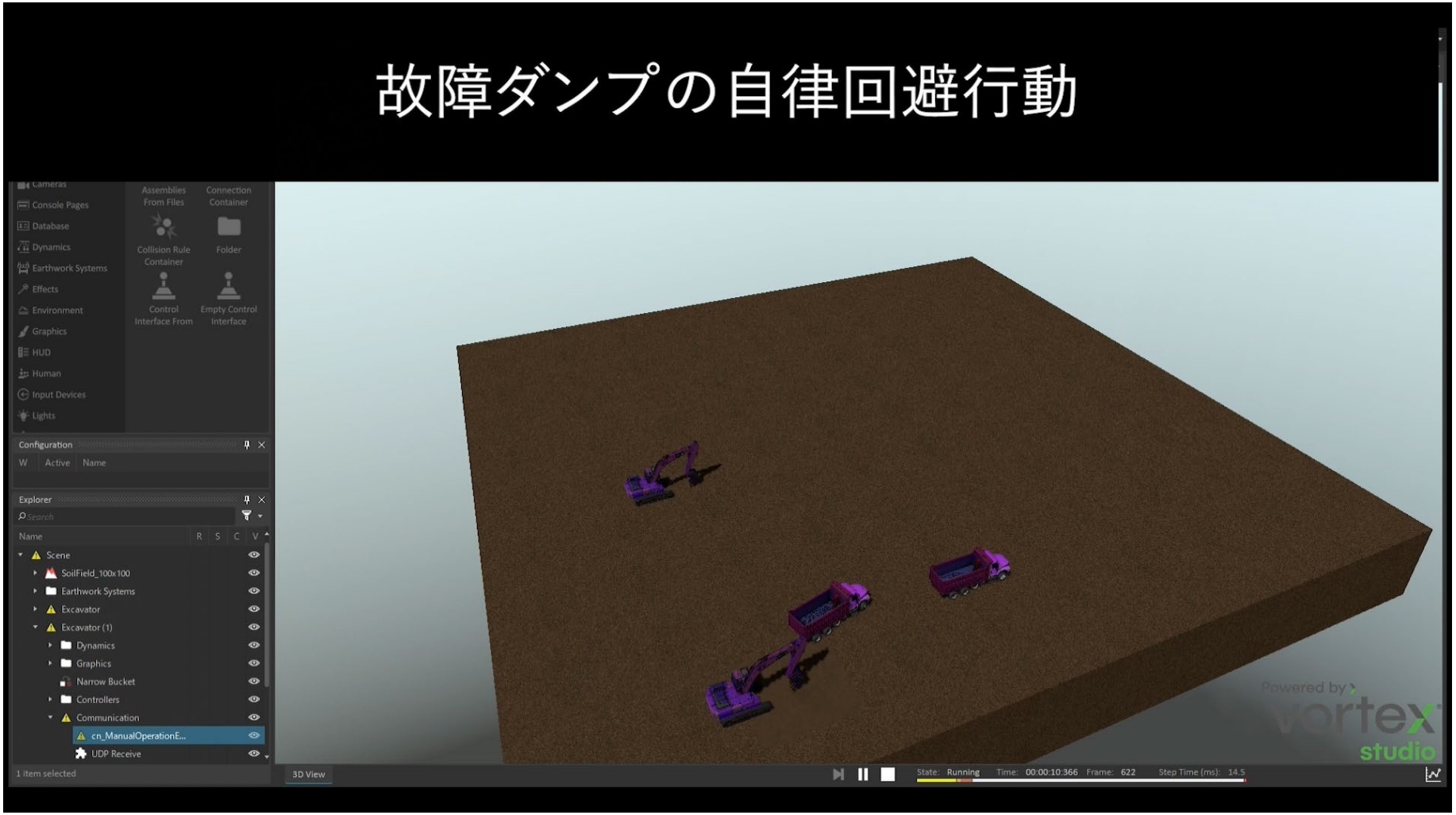


これらのアルゴリズムの検証を
シミュレーション，模型建機，実機で実施

動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現（淺間PI）

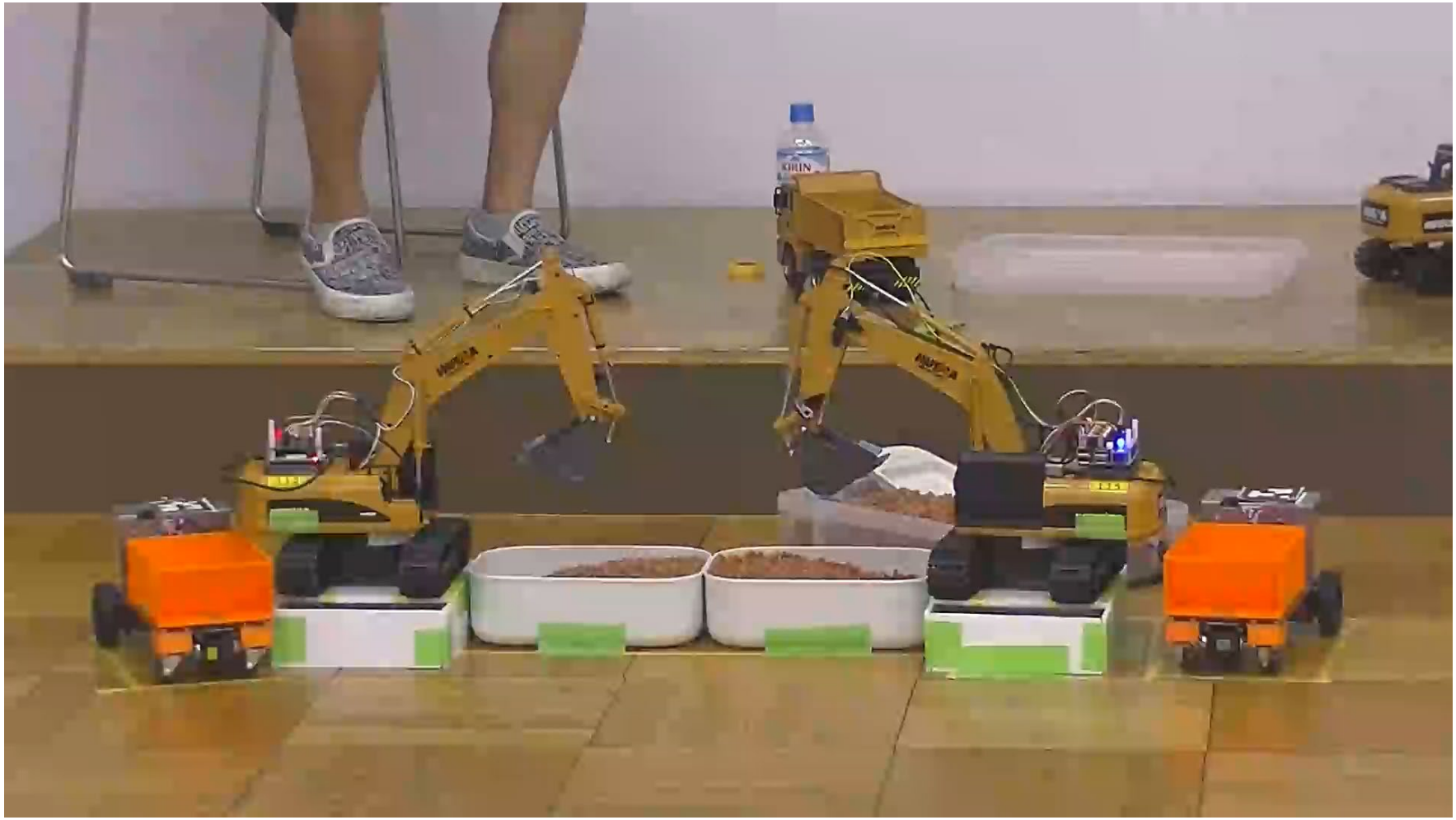
結果：

3Dシミュレーションを用いた10台のロボット群による土砂運搬タスクを実現



動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現（淺間PI）

複数台の模型ロボットおよび遠隔操作を可能とした複数台建設ロボット群の製作完了



自動掘削バックホー模型建機と遠隔操作ダンプの掘削運搬（5倍速）

動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現（竹囲PI）

九州大学の実験場

「動作を行うこと」のまとめ

- 正確な動作を行うことは，比較的できている.
- 臨機応変に対応するロボットシステムを如何に実現するか？
- 複数台ロボットによる協働作業は重要なコア技術.
- 地盤等を考慮した動作を行うことが重要.

おわりに

おわりに・・・ロボット技術にできていること・期待されること

- 己を知ること（Position/Attitude）
- 環境を知ること（Sensing/Data Analysis）
- 動作を行うこと（Motion planning/Control）
- 無線通信について（Wireless Communication）
- 電動化について（Zero Emission）
- 安全について（Safety）

おわりに・・・ロボット技術にできていること・期待されること

- **無線通信について**

今回，自動化に関する話を中心にしたため，無人化施工や無線通信の話が弱かったですが，無線通信の話は重要.

- 単位時間あたりの通信量を上げるためには，周波数を上げることが重要.　（データ圧縮技術も重要ですが.）
  2018年7月の情報通信審議会答申「第5世代移動通信システム(5G)」では、**3.7GHz帯（3.6～4.2GHz）、4.5GHz帯（4.4～4.9GHz）及び28GHz帯（27.0～29.5GHz）**
- 通信距離を上げるためには，空中線電力を上げること，低い周波数を利用することが重要.

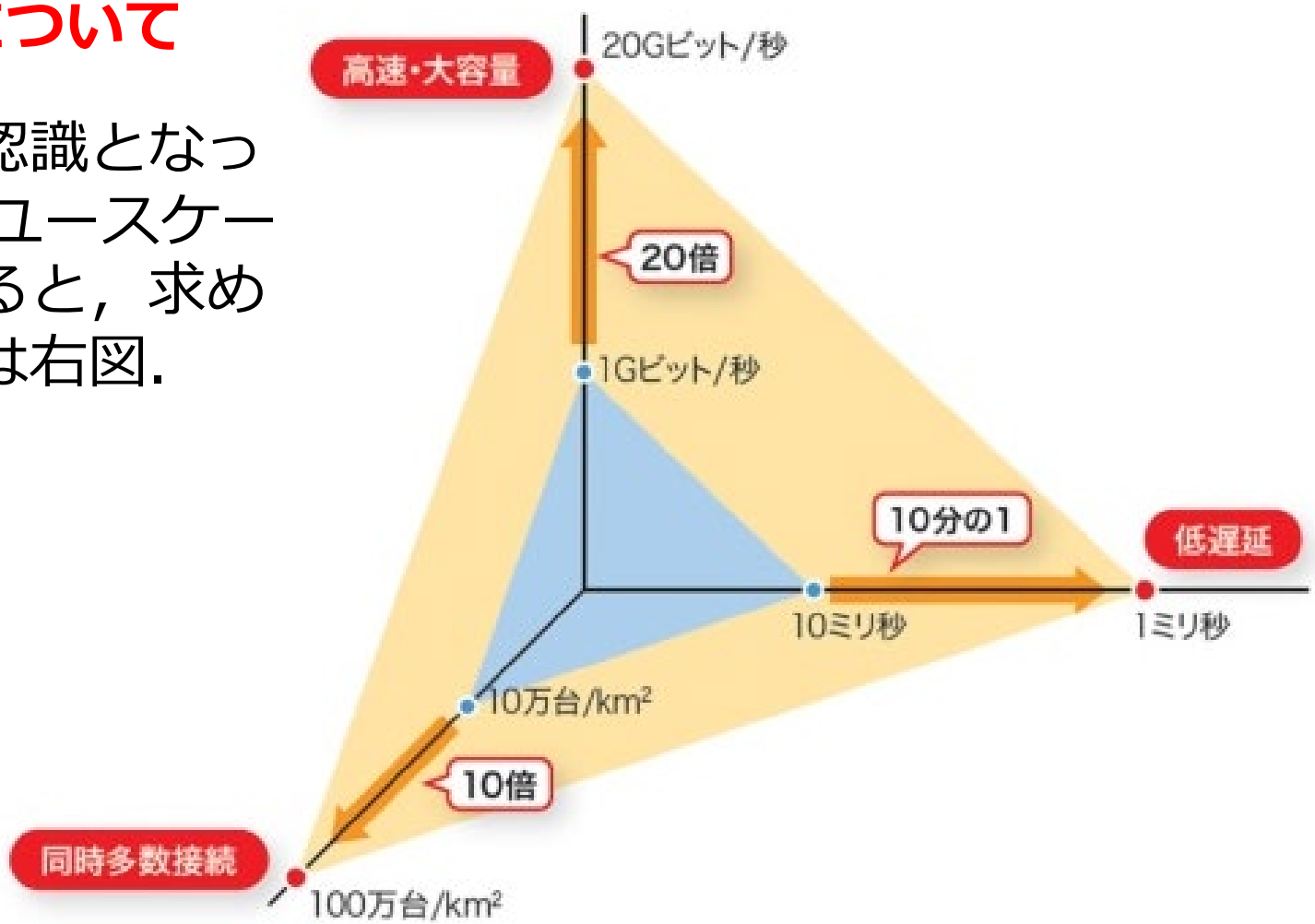
↓

トレードオフ（バランス）が大事

おわりに・・・ロボット技術にできていること・期待されること

- **無線通信について**

世界の共通認識となっている5Gのユースケースを考慮すると，求められる要件は右図.



通信速度は20倍
遅延は10分の1、同時接続数は10倍

おわりに・・・ロボット技術にできていること・期待されること

- 電動化について：Bauma2022

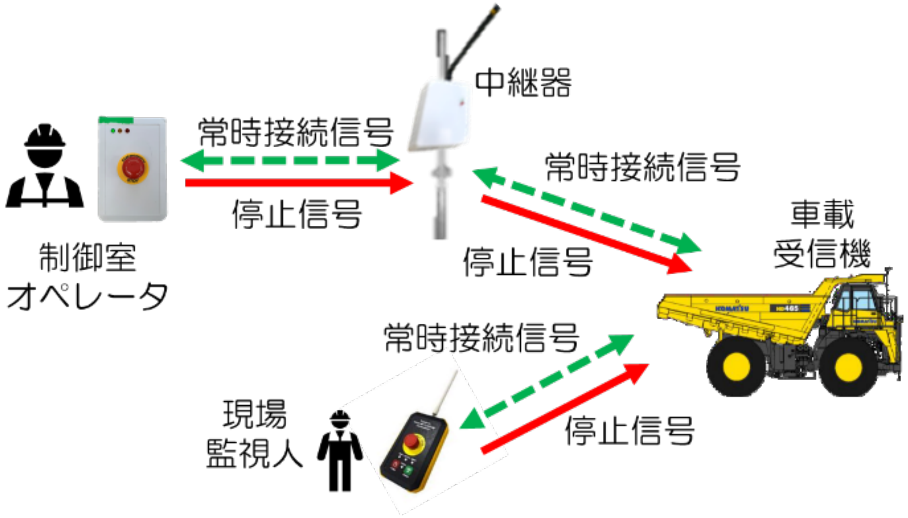
おわりに・・・ロボット技術にできていること・期待されること

- **安全について**

自動化建機に係る機能安全規格に関する検証

建設機械の自動化を普及する上で，自動化建機の安全規準が欲しい.

→ **遠隔緊急停止システムの実装と機能検証**



建設機械施工の自動化・自律化協議会が発足
（2022年3月～）

おわりに・・・ロボット技術にできていること・期待されること

- **安全について**

建設機械施工の自動化・自律化協議会

学　識　者　：　建設施工関係、ロボット関係、機械関係
関係団体　：　建設関連団体、建設機械関連団体、ロボット関連団体
行政機関　：　国交省、厚労省、経産省、　各研究機関

安全・基本設定WG

建設機械における自動・自律・遠隔施工を実施する際の

- 安全ルールの標準化、設定に関する検討
- 自動化目標の設定に関する検討
- 協調領域の設定に関する検討
- 自動化・自律化機械の性能に関する検討

施工管理・検査基準WG

建設機械における自動・自律・遠隔施工を実施する際の

- 現場検証、評価
- 施工管理、検査基準の検討
- 安全ガイドラインの検討

PF共同研究

土木研究所
協調領域の開発

建機メーカ
ゼネコン
システムベンダー

現場普及WG

建設機械における自動・自律・遠隔施工普及のための

- モデル工事導入の検討
- 入札契約方式の検討

施工監理・検査基準W.G
参加者公募
ベンチャー企業含む

国・自治体・有識者：行政、学会大学
建設関連企業：業団体、調査測量、設計、施工
建設機械関連企業：業団体、建機メーカ、レンタル
建設分野以外の関連企業：AI、ロボット、IoT、制御ソフト、通信

i-Construction System

Collaborative
AI
Field robot
Everywhere
Project

keiji@ieee.org