

災害現場や建設現場に活用される ロボット技術と今後の展望

東京大学大学院 工学系研究学科

特任教授 永谷圭司



Contents:

- **自己紹介／ロボットの定義**
- 土工建設現場に活用されるロボット技術
- 災害現場に活用されるロボット技術
- 今後の展望

自己紹介

1968年 誕生

1982年

1988年 筑波大学入学

1991年 知能ロボット研究室に所属

1997年 博士（工学）取得

1997年 Carnegie Mellon Univ.（ポスドク）

1999年 岡山大学 講師

2001年

2005年 東北大学 大学院 工学研究科 准教授

2011年

2015年 未来科学技術共同研究センター 准教授

2017年 東京大学 客員大講座 准教授（併任）

2019年 東京大学 i-Conシステム学寄付講座 特任教授



永谷のこれまでの研究

移動ロボットの経路計画
未知環境探索
移動マニピュレータによるドア開け

2001年 9月11日

レスキューロボット
惑星探査ロボット（徐々に屋外へ）

2011年 3月11日

原発建屋内調査ロボット Quince
火山調査ロボット
飛行ロボット（ドローン関連）
プラント点検ロボット

無人建設機械：フジタ社会連携講座
i-Constructionシステム学寄付講座



タスクオリエンテッドアプローチ



プラネタリローバー Dune

ロボットとは？

ロボット

- チェコ語（ラポート）
労働もしくは強制労働（チャペック R.U.R.）
- ロボットとは、人間の構造を模倣した、
人間の仕事を肩代わりする機械
- 入力（センサ） → 判断（コンピュータ） →
出力（アクチュエータ）
- **ロボットに明確な定義はありません。**

産業用ロボット



日本工業規格（JIS）の「JIS B 0134」

産業用マニピュレーティングロボット：「自動制御によるマニピュレーション機能または移動機能を持ち、各種の作業をプログラムにより実行でき、産業に使用される機械」

ロボットの定義の例

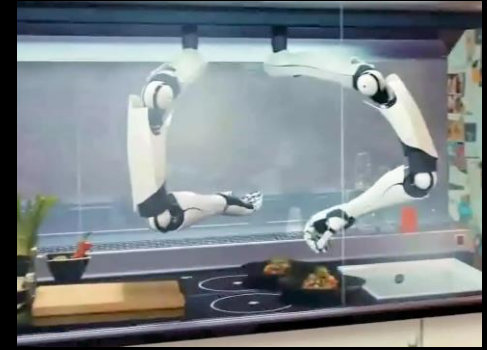


50年前

現在

50年後

ロボットの定義の例



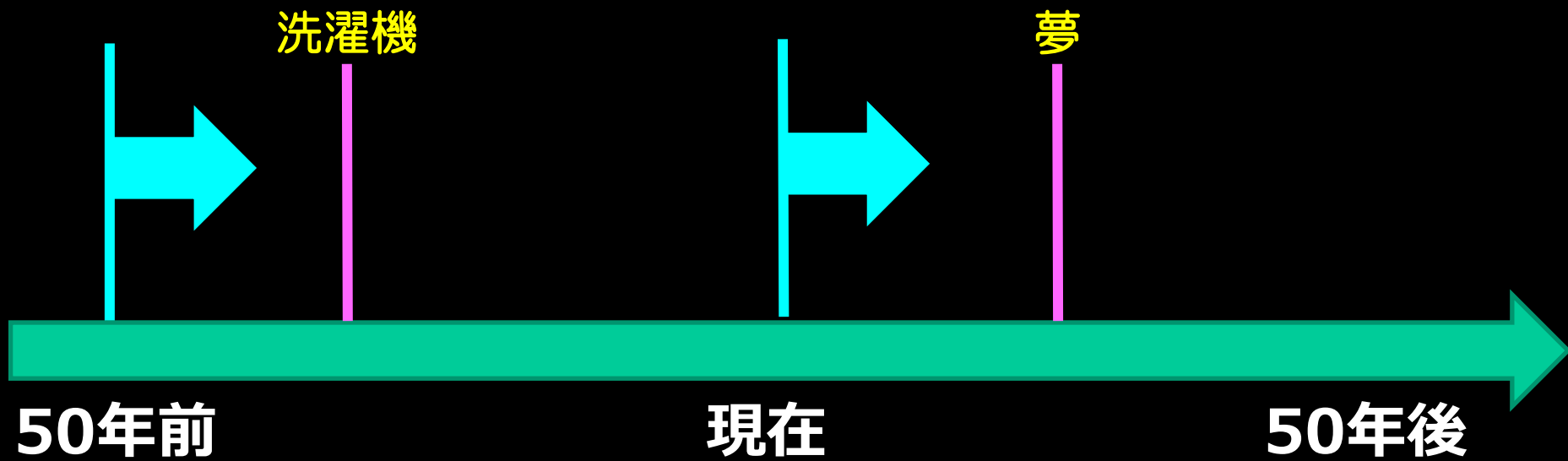
50年前

現在

50年後

ロボットの定義の例

夢の実現の一手手前

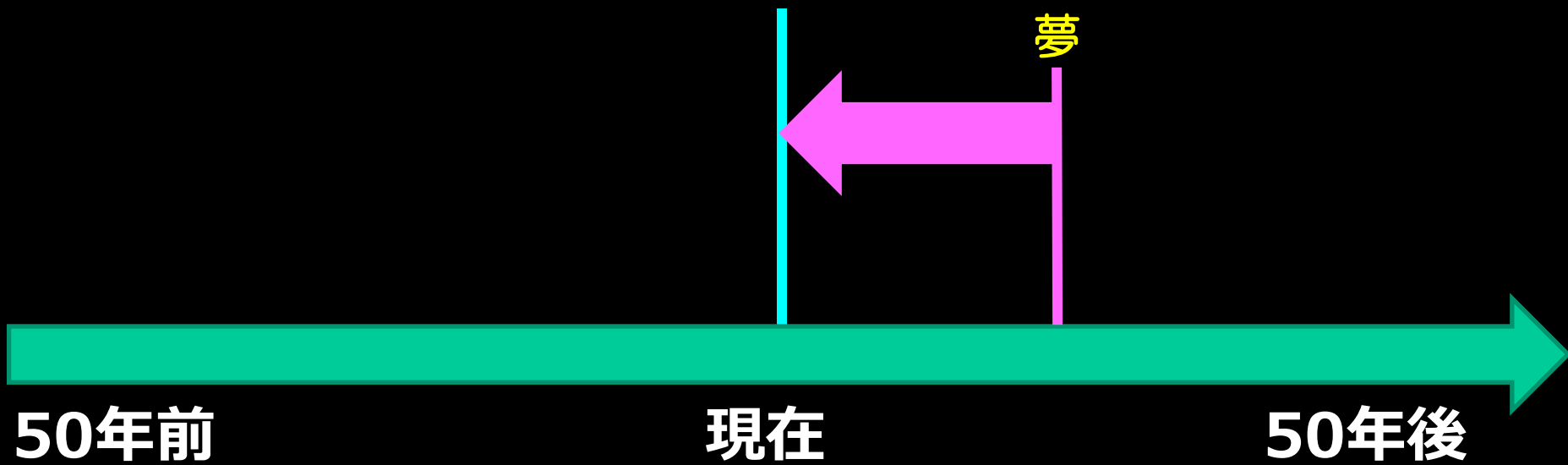


ロボット工学とは？

目的達成学

ロボット技術とは？

目的を達成するための技術





大規模地震災害，火山災害，風水害といった**極限環境**での状況把握や応急復旧は必須

→ **目的達成型 Field Robotics**

Contents:

- 自己紹介／ロボットの定義
- **土工建設現場に活用されるロボット技術**
- 災害現場に活用されるロボット技術
- 今後の展望

生産性向上のための技術

マシンガイダンス

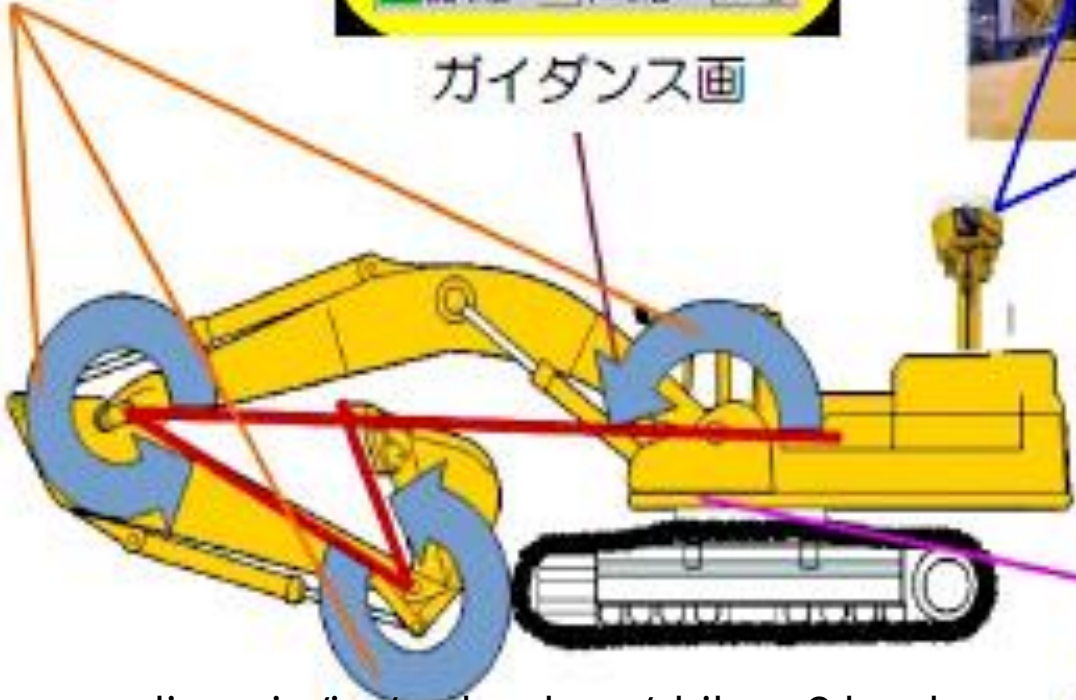
ガイダンス画面で掘削位置を指示

チルトセンサ



ガイダンス画

GNSS



傾斜センサー

生産性向上のための技術

マシンガイダンス

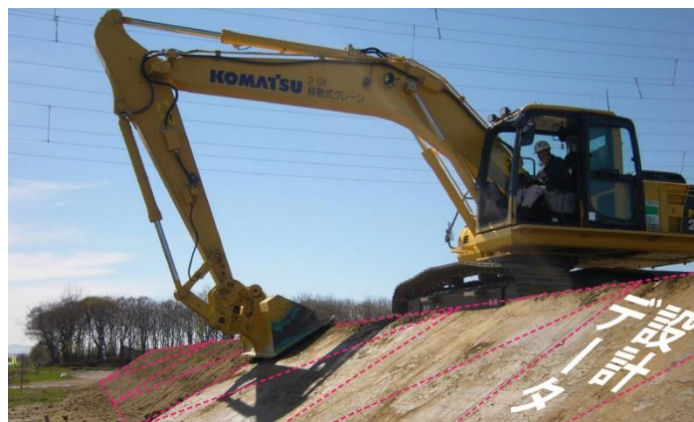
GNSS情報をベースに目標動作を提示

マシンコントロール

GNSS情報をベースに目標動作をサポート



<https://construction.trimble.com/>



<http://www.iwasakinete.co.jp>

マシンコントロールとは？

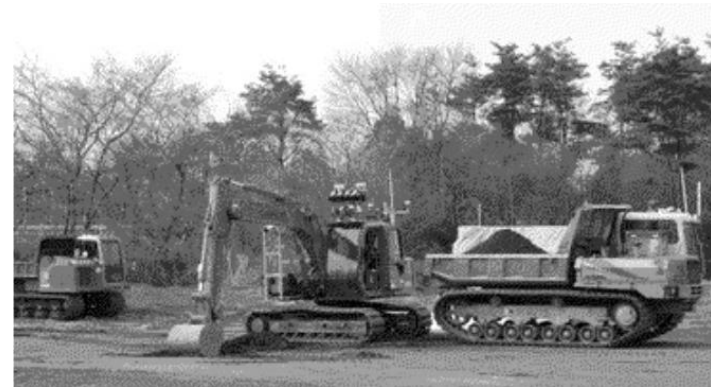


マシンガイダンスを元にブルドーザのブレードの高さ制御を行うことで初心者でも高精度の施工を実現

<https://www.sumitomokenki.co.jp/ict/excavator/index.html>

自動掘削

土木研究所：設計情報として施工すべき形状の三次元情報を与え，施工時には，各時点の出来形形状を三次元的に計測しつつ，掘削するバケットを制御して作業を実施



山元 弘 他, SICE論文集, 2012

大成建設株式会社：Cat 320単独による土砂掘削・積込作業の自動化および有人ダンプトラックとの連携作業について動作を検証し、円滑な作業が実施できることを確認



<https://www.taisei.co.jp/>, 2019

クワッドアクセル (鹿島建設)



A⁴CSEL

(クワッドアクセル)

Automated
Autonomous
Advanced
Accelerated
Construction system for
Safety
Efficiency and
Liability

東大のプロジェクトの紹介

埋設物損傷回避プロジェクト

国土交通省建設助成「地中レーダーによる地下埋設物データベースの構築と油圧ショベルによる掘削時の埋設物損傷回避動作の実現」（2019年～2020年度）

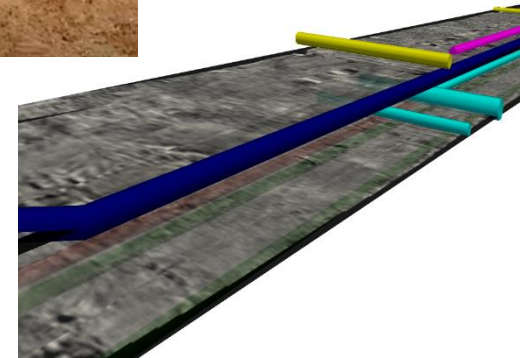


土木工事における埋設管損傷は周辺地域に及ぼす危険性や社会的影響が大きい。



地中レーダ探査
3次元位置取得

データベースに
情報を蓄積



衝突回避掘削
動作を実行

埋設物損傷回避動作の概要

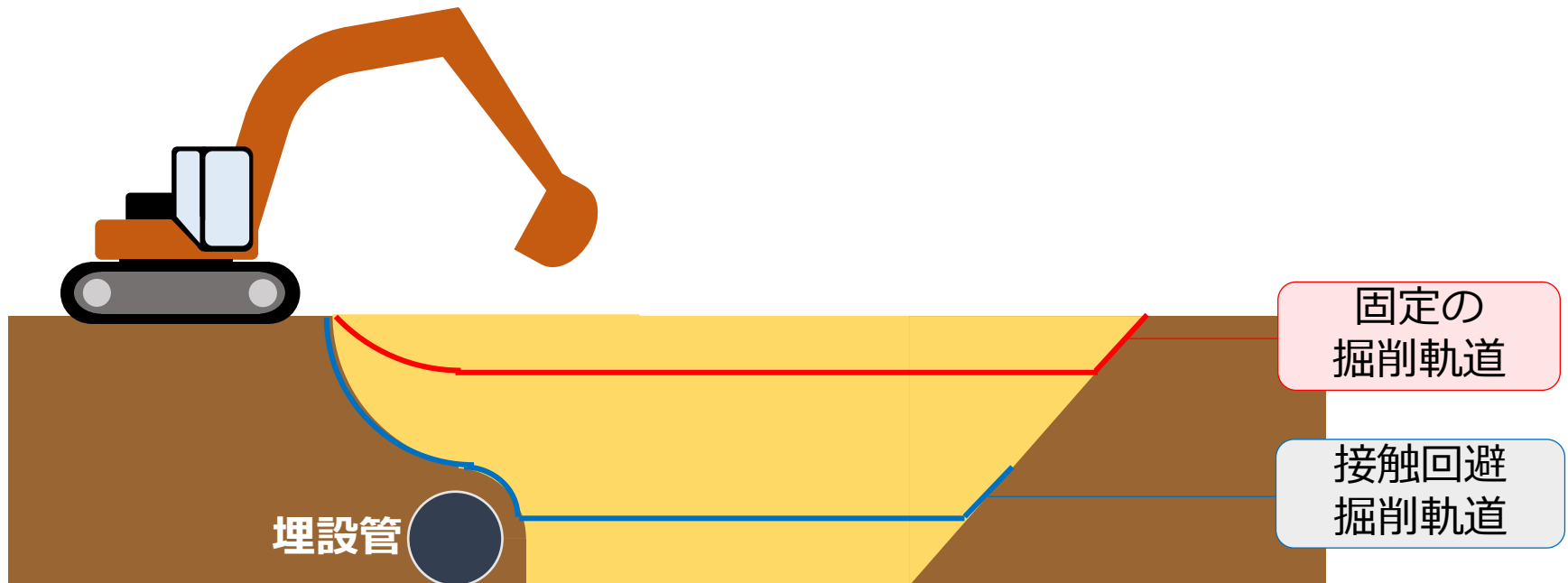
- 掘削軌道生成手法の流れ

- ①掘削箇所における障害物の有無を判定

- ②(障害物がない場合)指定した掘削深さ以内で形状で固定の軌道を生成

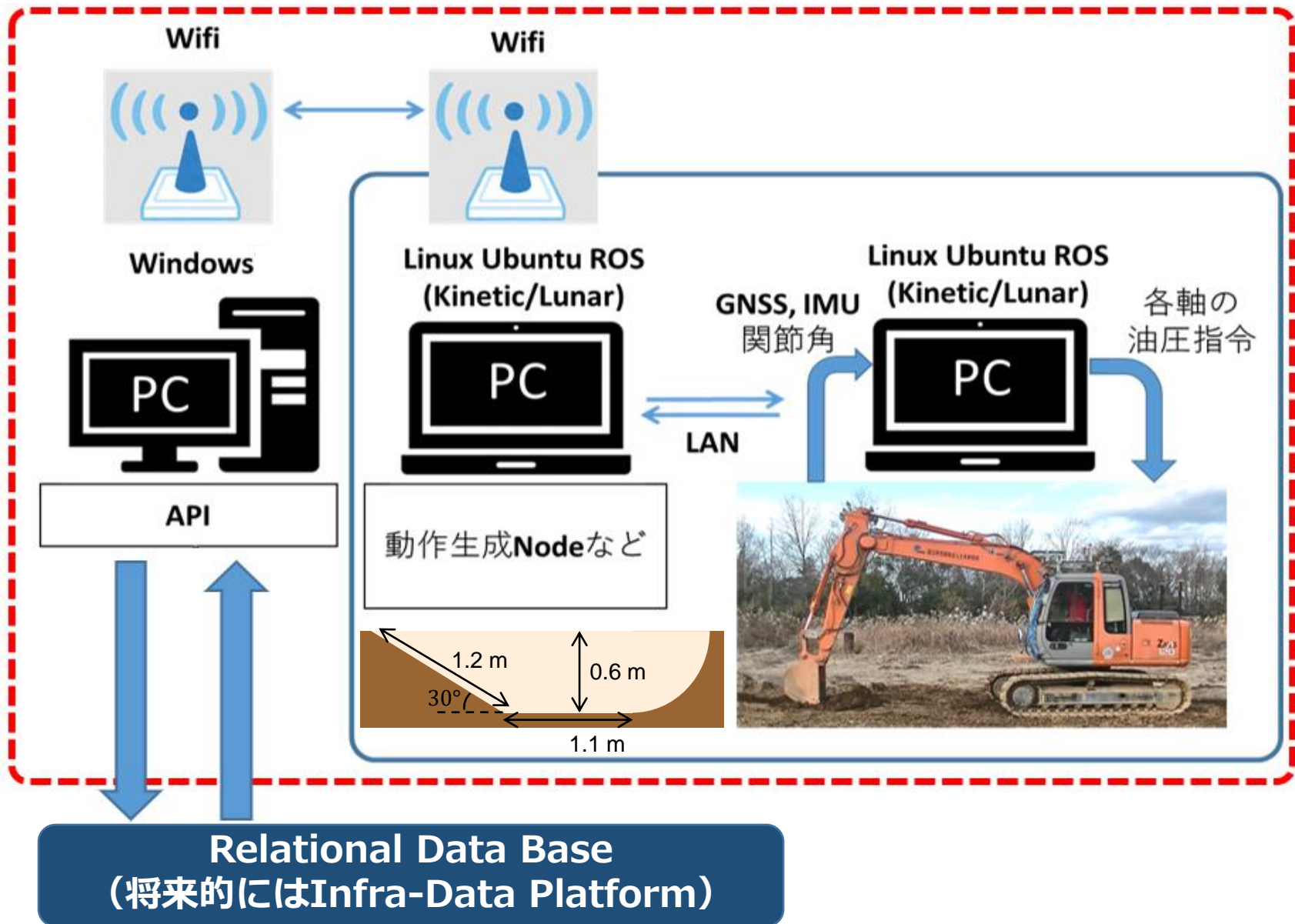
(障害物がある場合)埋設管から指定したマージンの円周上を通過する軌道を生成

- ③最下点に達するまで①と②を繰り返す、全ての掘削軌道を生成



掘削時のバケット先端の軌道

土木研究所におけるデモンストレーション



土木研究所におけるデモンストレーション



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

土木研究所におけるデモンストレーション

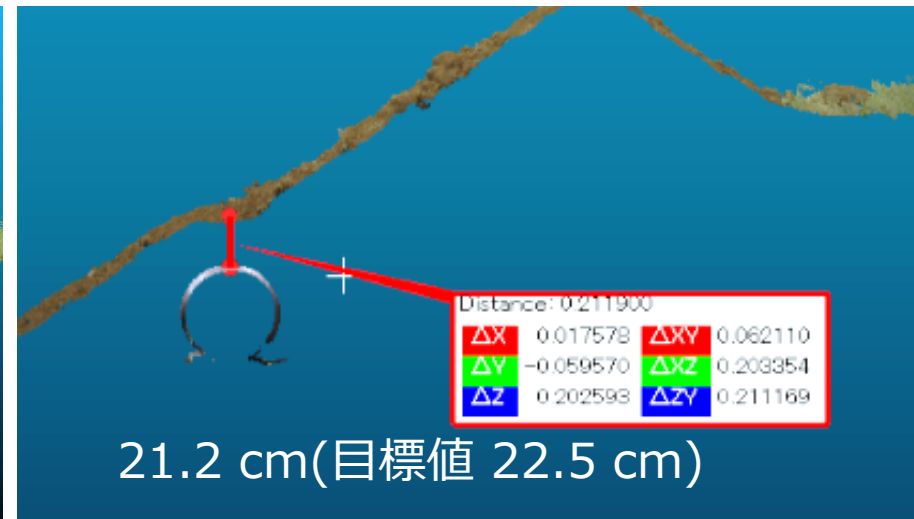
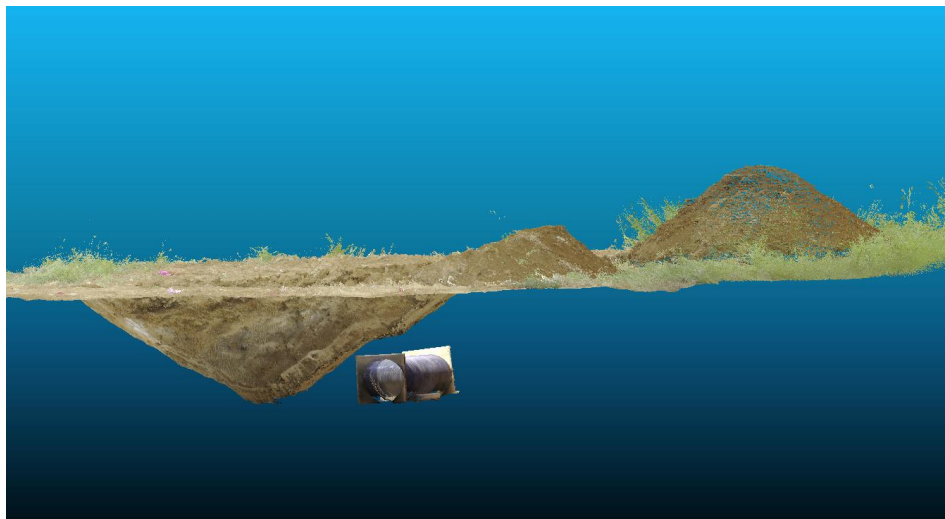


左上：掘削後の俯瞰図

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

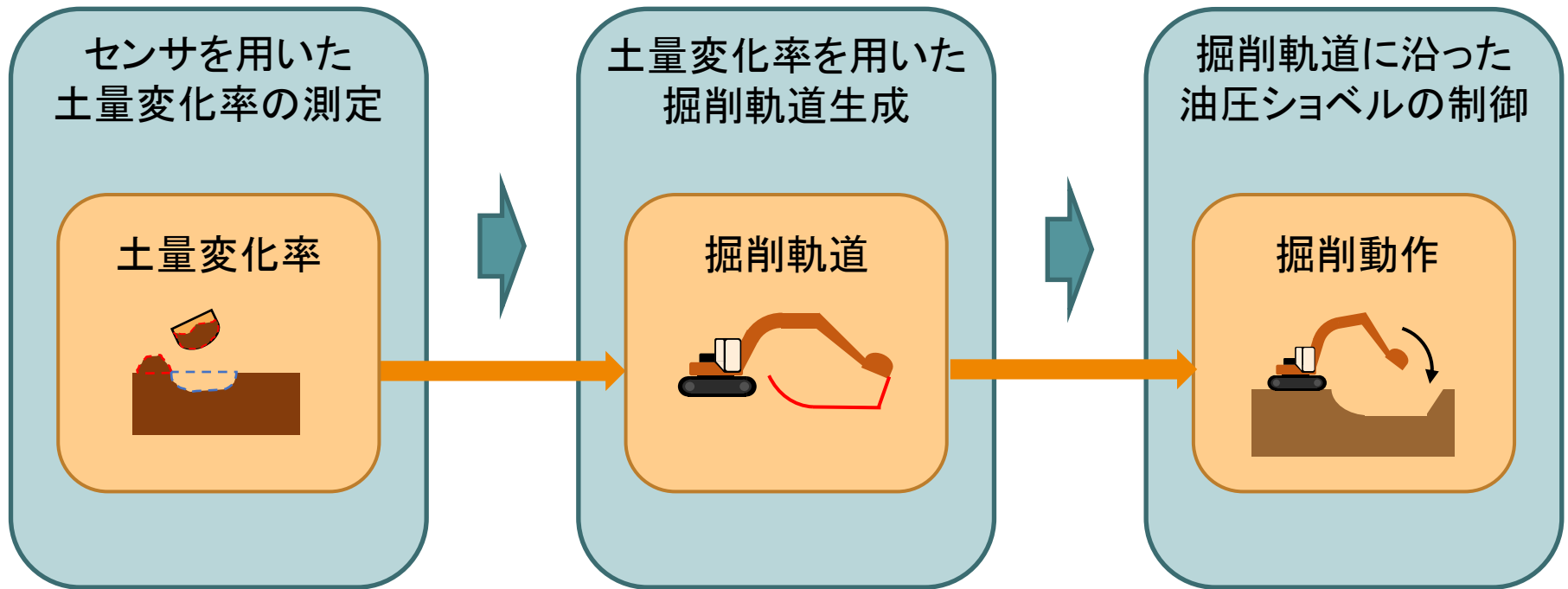
(Leica Geosystems)



21.2 cm(目標値 22.5 cm)

土の状態を考慮した効率的な自動掘削

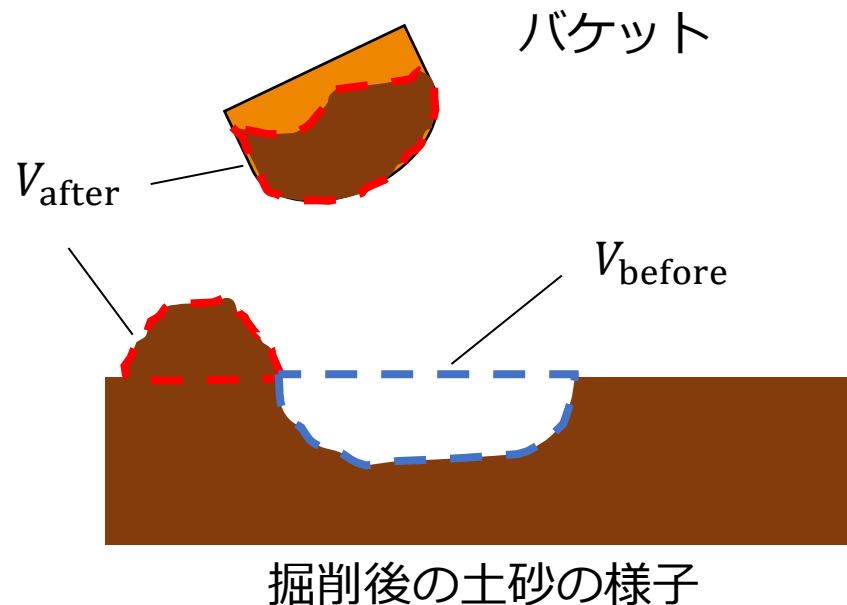
未知の土砂に対しても効率的な掘削を行うことが可能な
油圧ショベルによる自動掘削手法の提案



土質の情報を考慮した掘削軌道生成

土量変化率 k を考慮して、掘削効率が高い軌道を生成

- 土量変化率 $k = \frac{V_{\text{after}}}{V_{\text{before}}}$ … 掘削後の土砂の体積
… 掘削前の土砂の体積
- 土砂の締固めの度合い、膨らみを示す指標



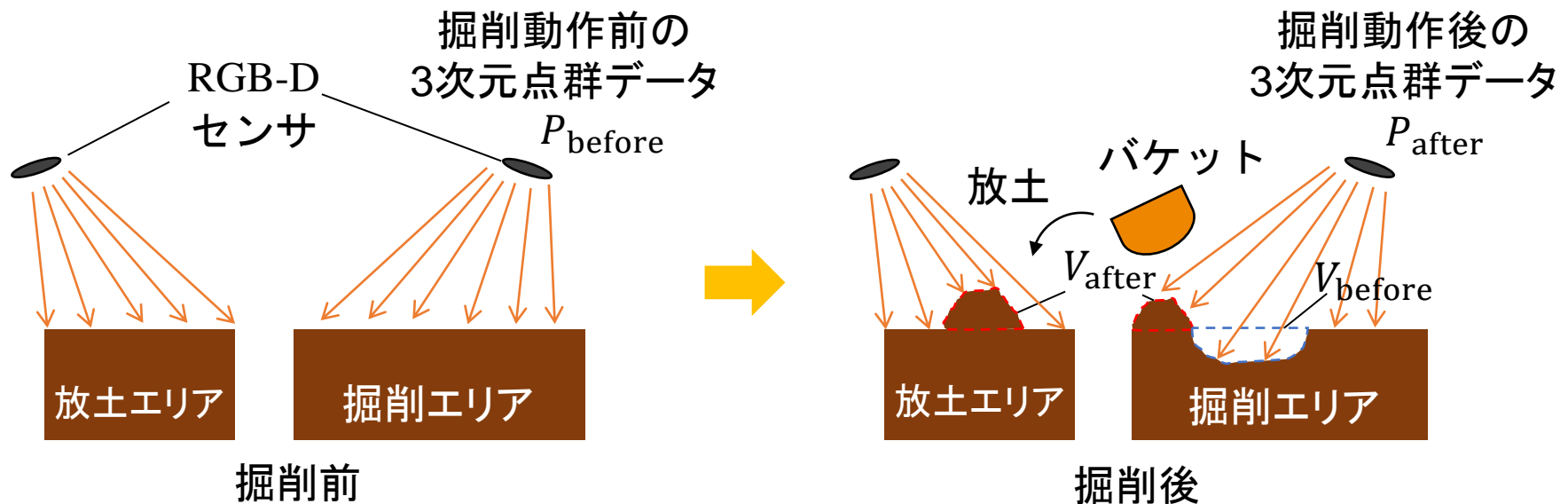
RGB-Dセンサによる掘削量の計測

掘削動作前後の掘削量の計測

- 掘削・放土エリアの掘削・放土前後の点群をRGB-Dセンサで取得
- 点群の差分を取ることで、土砂の掘削前の体積と掘削後の体積を算出



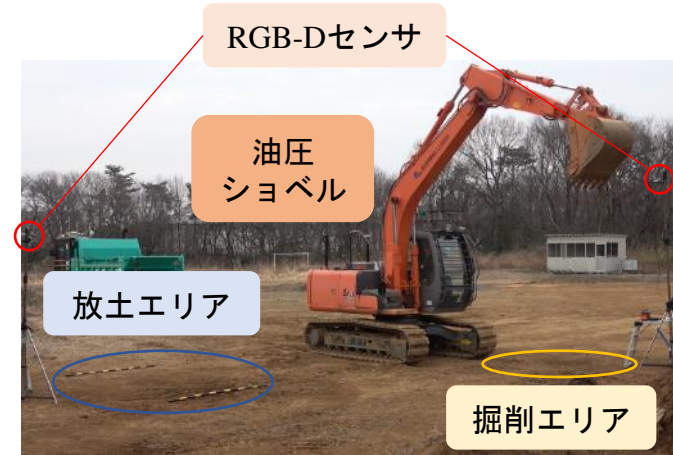
Intel RealSense
Depth Camera D435



RGB-Dセンサによる掘削量の計測

掘削動作前後の掘削量の計測

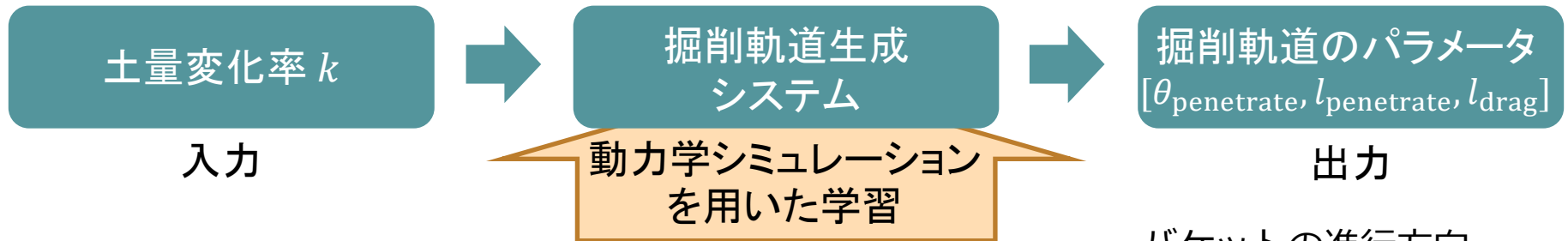
- 状態の異なる地面を実際に掘削
- 体積と土量変化率を算出



	$V_{\text{before}} [m^3]$	$V_{\text{after}} [m^3]$	土量変化率 k
条件1 圧縮された土砂	 0.4552	 0.6619	1.4540
条件2 圧縮が緩和された土砂	 0.5081	 0.5926	1.1663

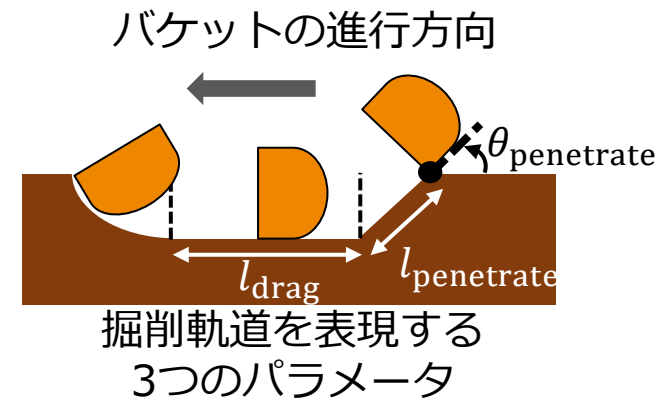
土質の情報を考慮した掘削軌道生成

掘削軌道生成システム



学習の方法

- シミュレータ内で地面の密度を変える
- 各条件下での掘削効率が高い掘削軌道を遺伝的アルゴリズムで学習
- 掘削効率 $e = \frac{V_d}{E}$... 掘削量
... 消費エネルギー



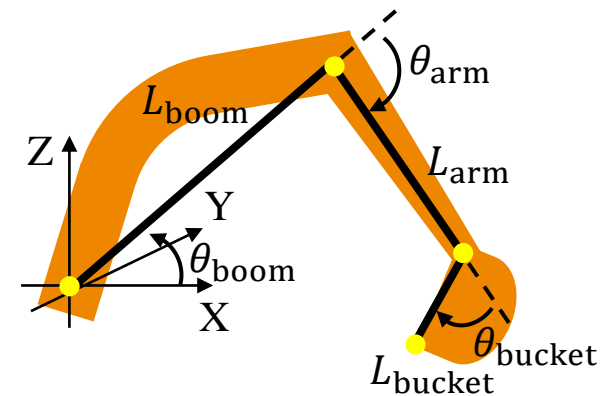
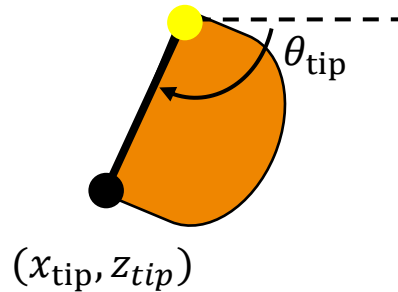
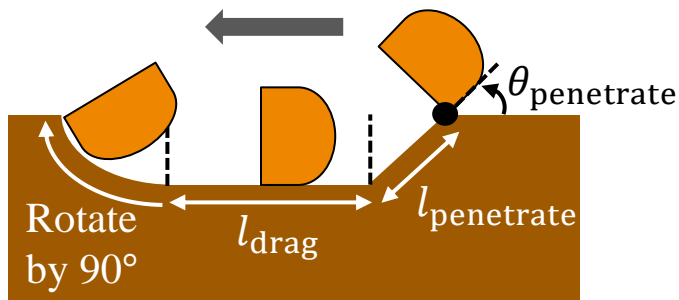
土質の情報を考慮した掘削軌道生成

掘削軌道のパラメータから実際の掘削動作までの流れ

掘削軌道のパラメータ
[$\theta_{penetrate}$, $l_{penetrate}$, l_{drag}]

バケット先端の位置姿勢
[x_{tip} , z_{tip} , θ_{tip}]

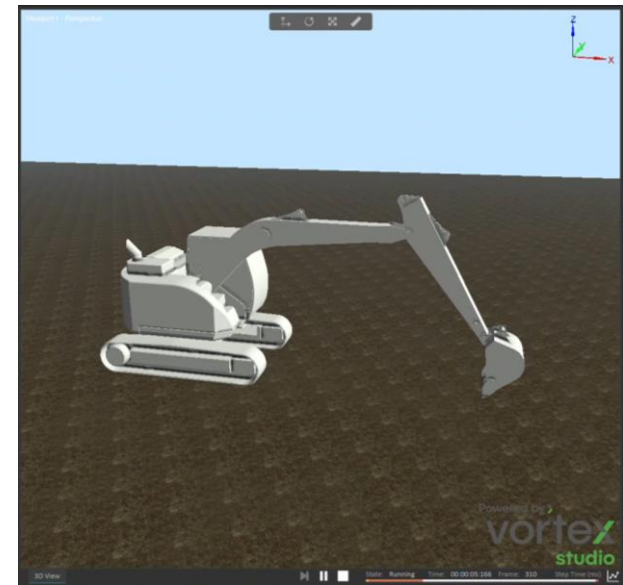
油圧ショベルの各関節角
[θ_{boom} , θ_{arm} , θ_{bucket}]



土質の情報を考慮した掘削軌道生成

実験

- 動力学シミュレータ: Vortex Studio

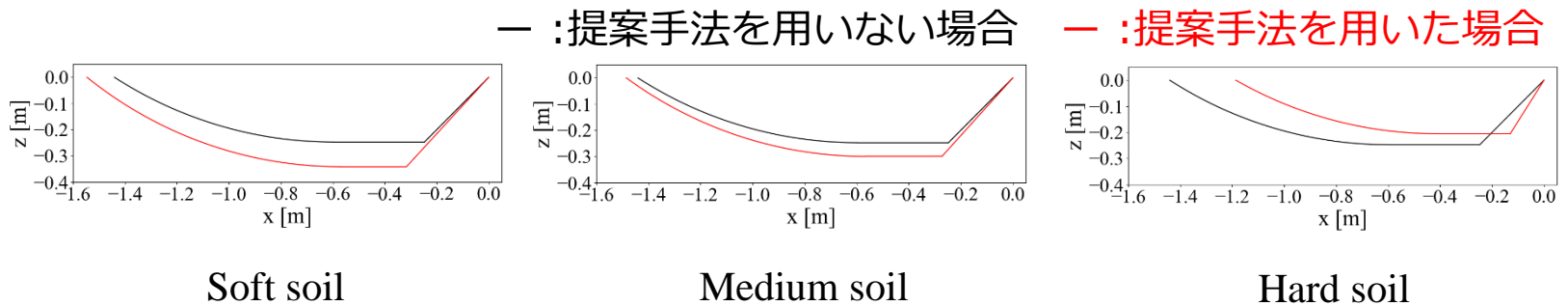
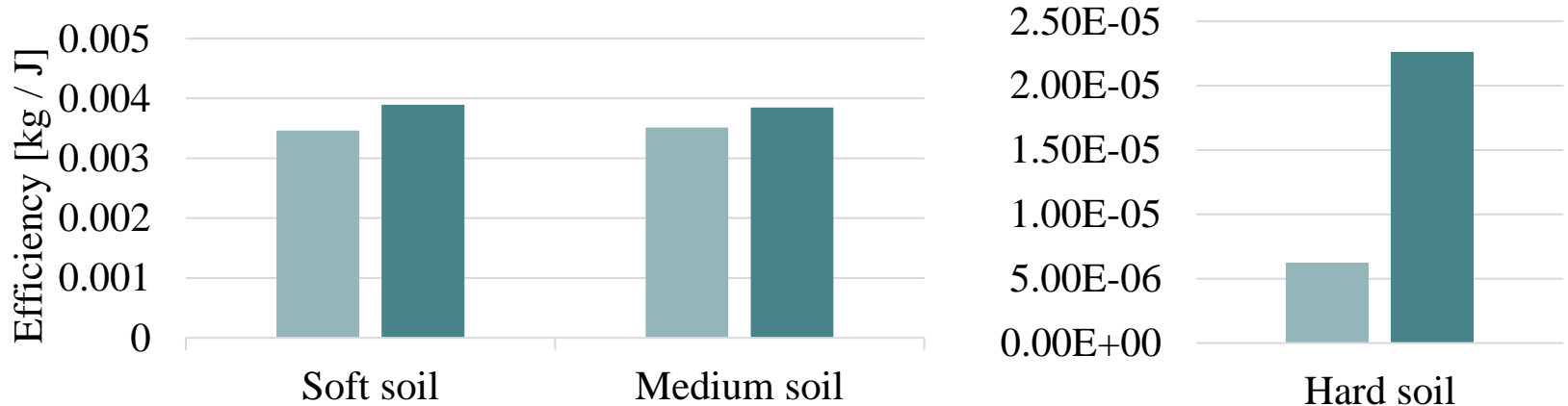


土質の情報を考慮した掘削軌道生成

実験

● 実験結果

■ : 提案手法を用いない場合 ■ : 提案手法を用いた場合



▶ 提案手法により、土砂の条件ごとに掘削軌道が変化、掘削効率が向上



自動化レベルの話

自動化レベルについて（土木研）

Level	油圧ショベル自動化：内容	自動運転	自動運転：内容
0	自動化なし	自動化なし	運転自動化なし
1	「移動」「掘削」「旋回」「放土」動作の 個別自動化 . 場所や動作は人が指示.	運転支援	運転支援 （縦方向または横方向の車両運動制御を持続的に実行.）
2	「移動」「掘削」「旋回」「放土」 一連動作の自動化 . 場所や動作は人が指示.	部分運転 自動化	運転支援（縦方向／横方向の車両運動制御を持続的に実行.） 対象物の検知は人間.
3	「移動」「掘削」「旋回」「放土」一連動作の自動化. 場所や動作も 機械（システム） が判断し実行.	条件付 運転自動化	運転支援：縦方向／横方向の車両運動制御を持続的に実行. 基本的にシステムが対応. 緊急時には人間が操作.
4	トラブルシューティング も機械が判断し実行	運転自動化	全てシステムが対応.
5	・・・	限定解除	場所の 限定解除.

参照：橋本他，建設ロボットシンポ，2019

自動化レベルについて（土木研）

Level	油圧ショベル自動化：内容	自動運転	自動運転：内容
0	自動化なし	自動化なし	運転自動化なし
1	「移動」「掘削」「旋回」 「放土」動作の 個別自動化 . 場所や動作は人が指示.	運転支援	 マシンコントロール
2	「移動」「掘削」「旋回」 「放土」 一連動作の自動化 . 場所や動作は人が指示.	部分運転 自動化	
3	「移動」「掘削」「旋回」 「放土」一連動作の自動化. 場所や動作も 機械（システム） が判断し実行.	条件付 運転自動化	 完全自動土工
4	トラブルシューティング も 機械が判断し実行	運転自動化	
5	...	限定解除	場所の 限定解除.

参照：橋本他，建設ロボットシンポ，2019

まとめ：個人的展望

- **土工関連**の自動化のために現状で足りない技術
 - 移動機構 (Locomotion) **土工については十分**
 - 位置推定 (Localization) **GNSSだけでは不十分**
 - 環境認識 (Sensing) **作業を行う際の環境認識は十分でない**
 - 動作計画 (Planning) **非常に大変**
- 様々な現場に適用した後、現場からのフィードバックが重要

Contents:

- 自己紹介／ロボットの定義
- 土工建設現場に活用されるロボット技術
- **災害現場に活用されるロボット技術**
- 今後の展望

無人化施工

地震や洪水など
の自然災害



建設機械を用い
た応急復旧作業

2016年4月16日 南阿蘇村 立野大規模斜面崩壊)





**映像利用：
カメラ設置が不可欠**





ケーブルでエネルギーを送る有線給電システム

特徴：

- ・ 長時間飛行
 - ・ 安全性
- ・ 安定した着陸
 - ・ 張力調整
 - ・ 自律飛行



映像評価実験（土木研究所）

対象

通常業務で建設機械に搭乗する オペ 10名
(1日1人×10日間)

映像

- 車載カメラのみ
- 通常の遠隔操縦用外部カメラ
- UAVからの空撮

評価

作業時間

オペレータの視線

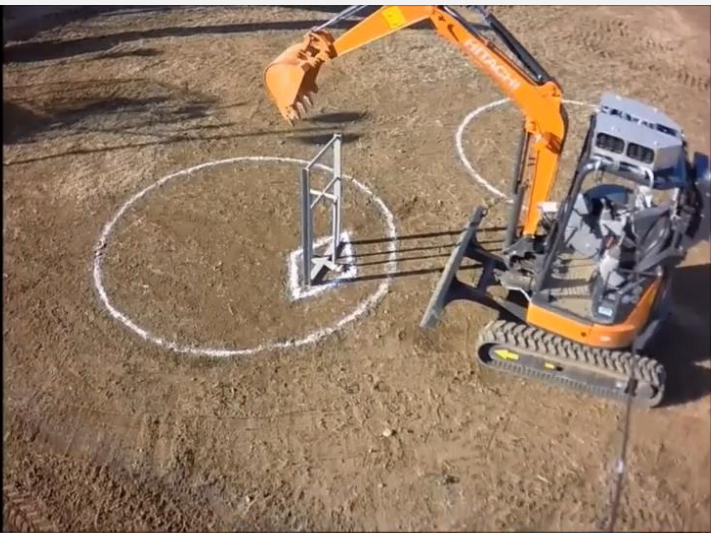
アンケート・疲労度



実験の概要 2倍速



Problem: Work efficiency... 50% down, typically



← UAV's view



↑ Fixed camera



← Front camera's view

無人建機の遠隔操作について

直接目視による操縦

→ 基本的に状況が理解可能

無線画像による操縦

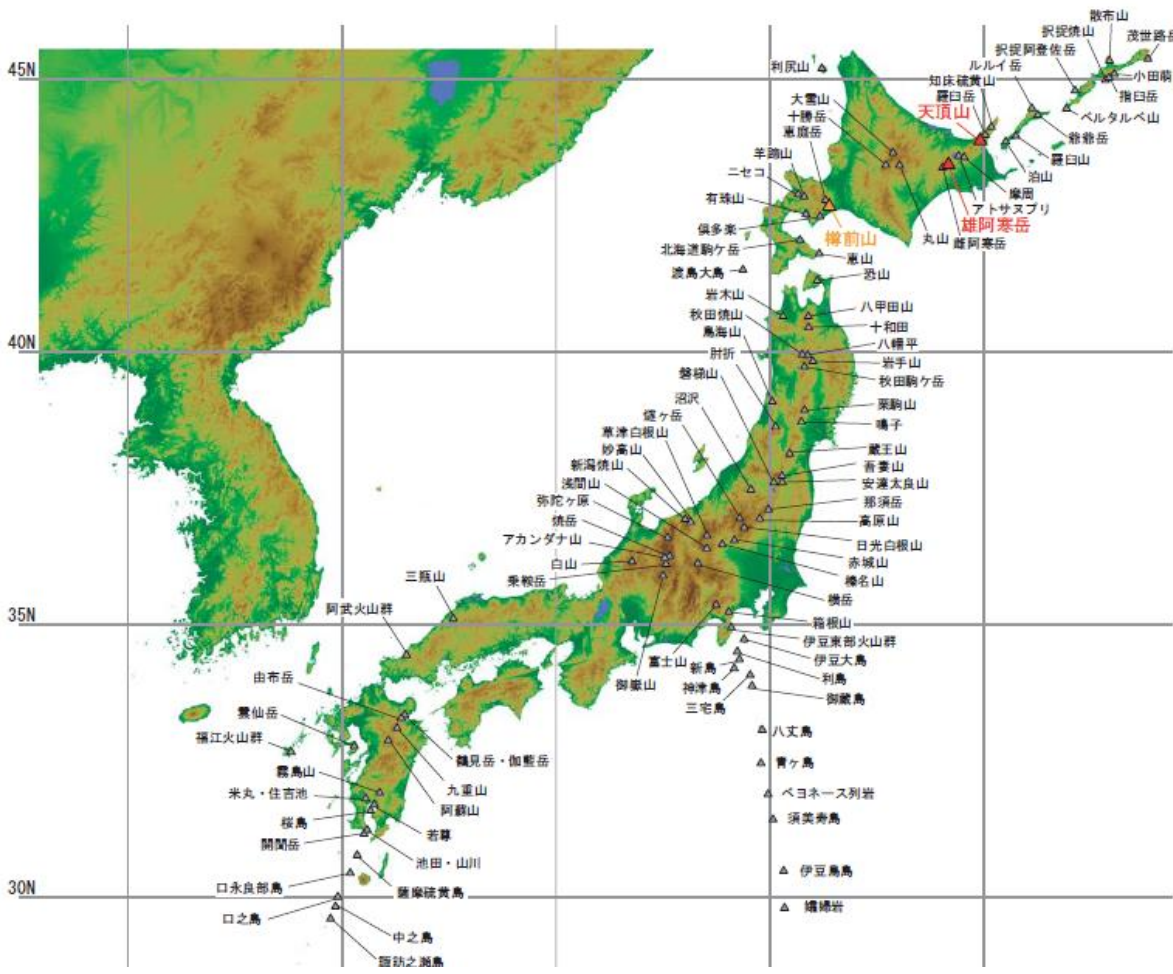
→ カメラが取得した映像を元に操作

↓
[作業効率... 50% down.
プレゼンスをどのように向上させるか？
部分的に自律性を入れる？

自宅から無人建機が操作できるように. . .

火山災害調査ロボット

活火山: 1万年以内に噴火した/噴火しそうな火山



活火山は
世界にいくつ?

日本にいくつ?

火山災害：土石流災害にフォーカス

- 火山弾
- 火山灰
- 火砕流
- 溶岩流
- **土石流**



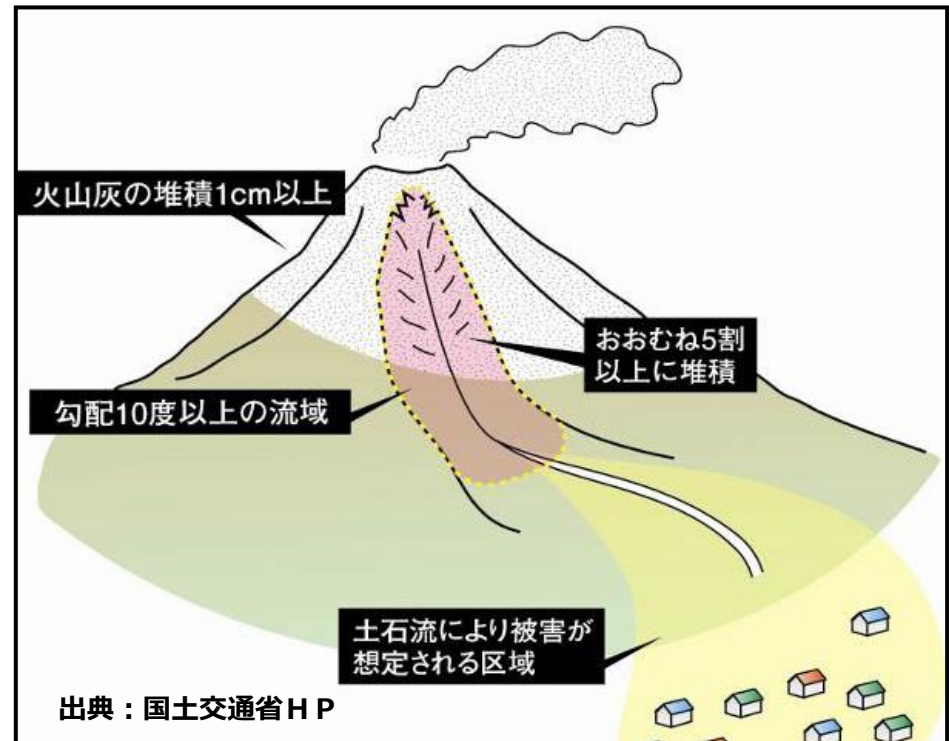


Debris flow

背景：土砂災害防止法

- 大規模土砂災害により、国土交通省が調査を行なうことを義務付け（土砂災害防止法：H23年に改正）
- 火山噴火に起因する土石流が対象（1cm以上の降灰等が堆積した場合 かつ 約10戸以上の人家に被害）

降灰範囲と被害
範囲を精度良く
迅速に知りたい



土石流予測に必要な情報は？

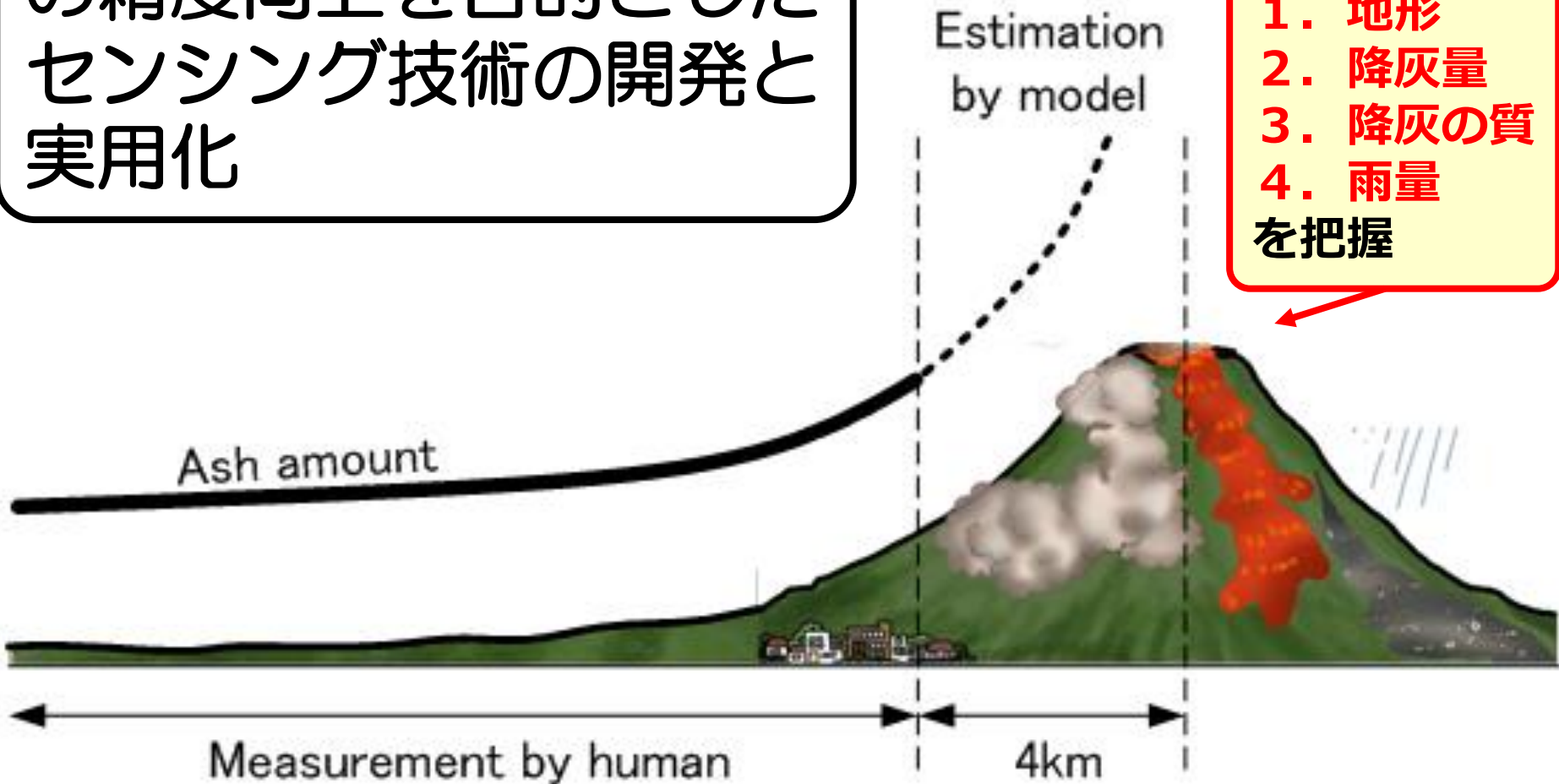
1. 地形形状
2. 降灰量
3. 火山灰の性質
4. 雨量



研究開発の目的

土石流シミュレーション
の精度向上を目的とした
センシング技術の開発と
実用化

立入制限域内
1. 地形
2. 降灰量
3. 降灰の質
4. 雨量
を把握



NEDO Project (2014-2017)



画像・地形データの取得



サンプリング

透水試験



リアルタイム災害データベース



研究開発体制

国際航業株式会社

- 降灰量推定技術の開発
- 透水性・雨量計測技術
- 土石流シミュレータの開発

東北大学

- 地表調査技術の研究開発
- 各種デバイスの提案と開発

フィールド試験での検証

株式会社イームズラボ

- ドローンの機能開発
- 無線通信技術の開発
- デバイス技術の開発

工学院大学

- 無線通信に関する基礎技術

立入制限域内の

1. 地形

2. 降灰量




3. 降灰の質

4. 雨量

を把握



土石流シミュレーションの
精度向上

Name	Zion QC730	Zion CH940	LAB6106
Overview			
Weight including batteries [kg]	4.5	5.4	6.4
Interaxis of motors [mm]	730	940	1060
Propeller size [mm (inch)]	457 (18)	457 (18)	508 (20)
Height [mm]	255	514	410
Number of motors	4	6	6
Motor size [mm]	58	58	61
Motor spec [KV]	340	340	310
ESC spec [V (A)]	22.2 (40)	22.2 (40)	22.2 (50)
Number of battery	1	2	2
Battery type	2014 40min 2.0kg	2015 20min 5.0kg	2018 50min 7.0kg
Spec of battery [V (mAh)]			
Controller			
GPS			
Wind resistance [m/s]			
Maximum flight time [min] (without additional payload)			
Loadable weight [kg] (without batteries)			



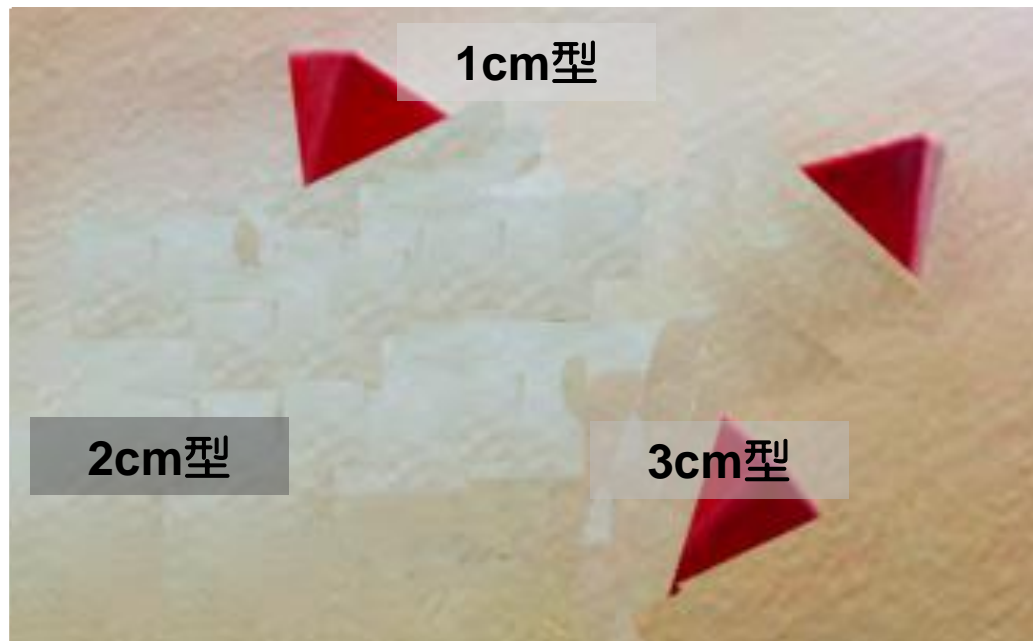
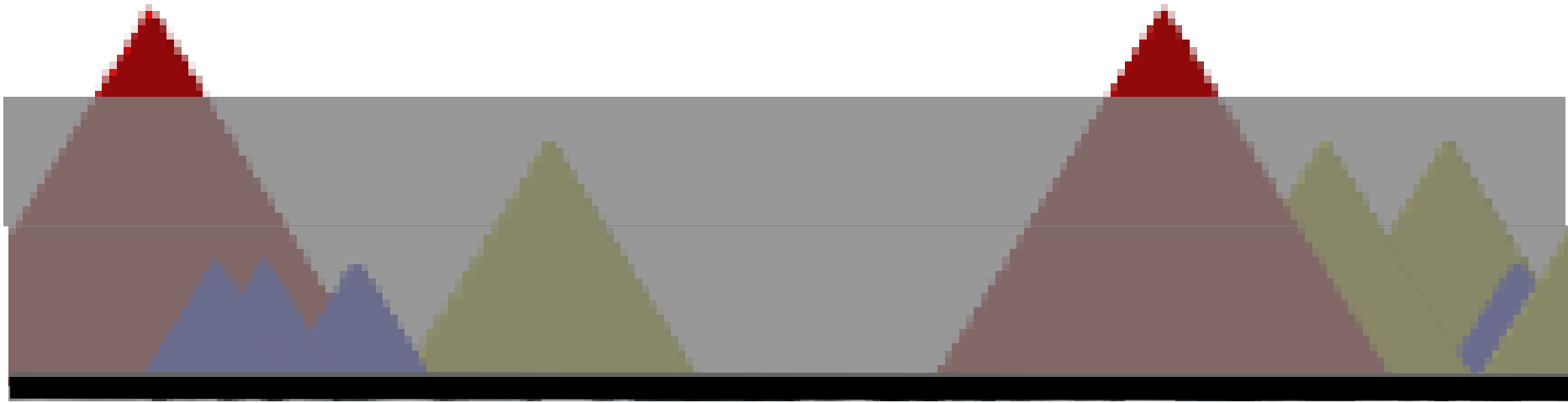
立入制限域内の

1. 地形
 2. 降灰量
 3. 降灰の質
 4. 雨量
- を把握



土石流シミュレーションの
精度向上

降灰厚測定のアイデア





1cm:赤、2cm:黄色 (参考 大型10cm:赤、白 15cm:黄色)



降灰無し
赤、黄色とも視認



降灰1cm
黄色だけ視認



降灰2cm
大型のみ視認

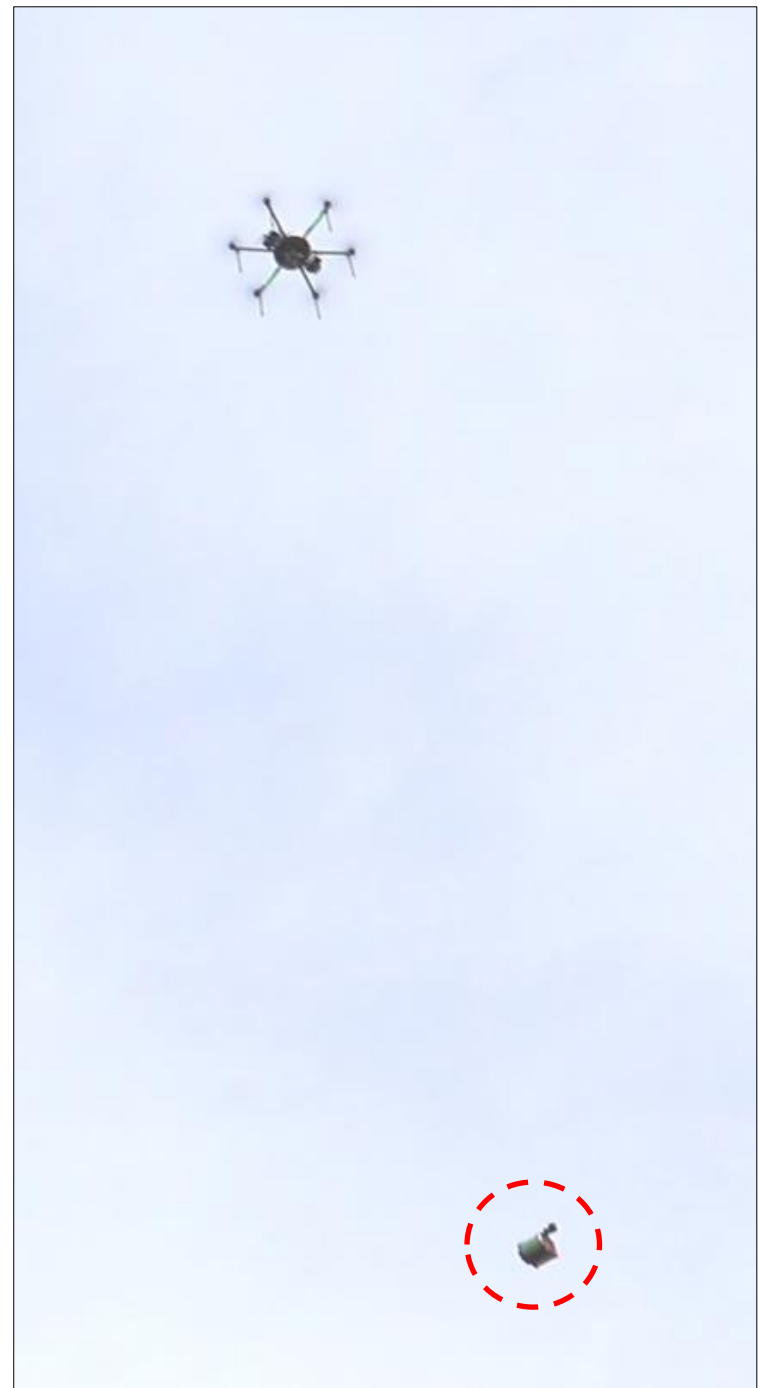
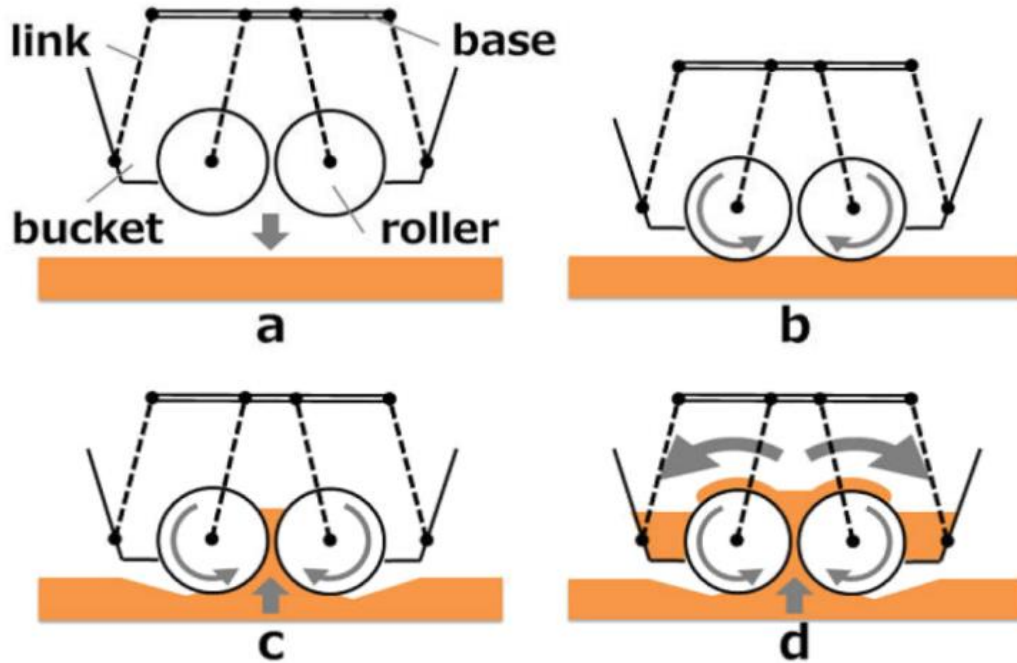
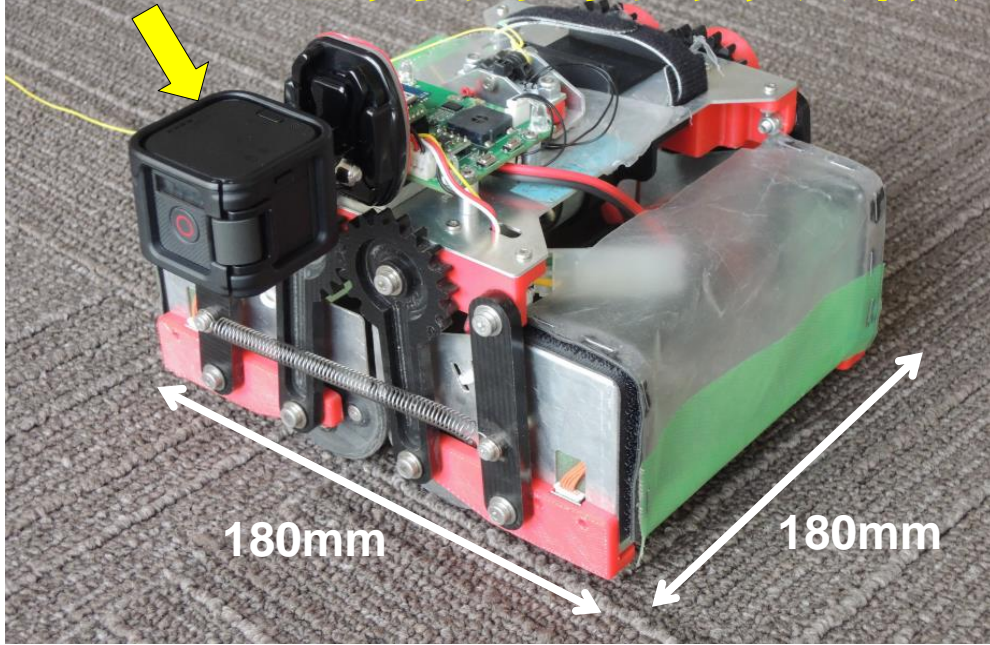
立入制限域内の

1. 地形
 2. 降灰量
 3. 降灰の質
 4. 雨量
- を把握



土石流シミュレーションの
精度向上

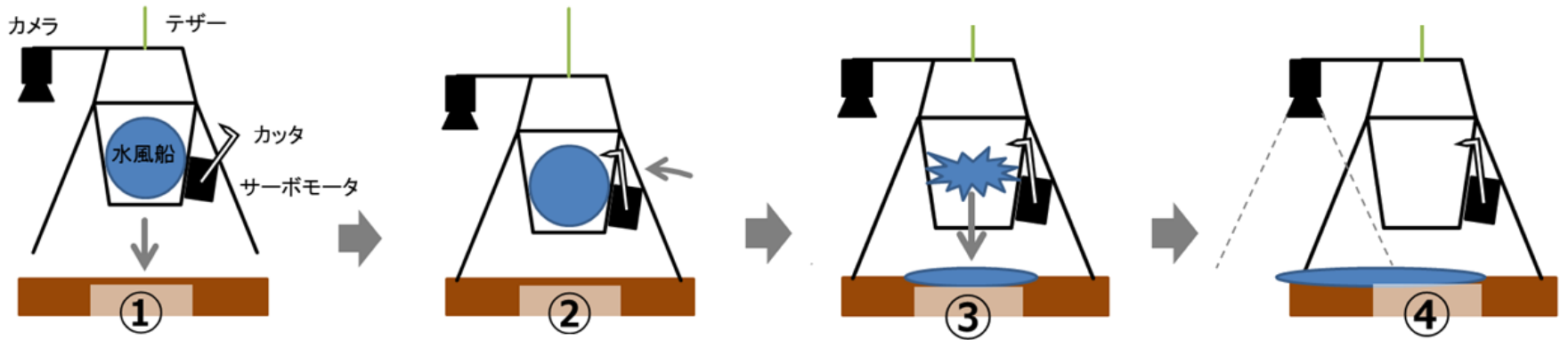
GoPro 土砂サンプリングデバイス





- **100 g 程度**の火山灰が採取可能.
- 細粒～粗粒の幅広い粒度の火山灰を採取可能.
- デバイス搭載カメラとマイクロスコープにより, **迅速に土砂の概略粒度を把握**することが可能.





**MUAVを用いてデバイスを対象区域に運搬。
着地を検知して散水し，土壤表面流を搭載したカメラで確認。**





透水係数 $6.31 \times 10^{-4} \text{m/sec}$
(現地実験後、室内透水試験を実施)



透水係数 $1.34 \times 10^{-5} \text{m/sec}$
(現地実験後、室内透水試験を実施)

- 表面流確認デバイスの画像から、火山灰の粒度に応じ、その**表面痕跡が大きく異なる**ことを確認できた。
- 傾斜地（ 15° ）程度の表面流を2回の散水により確認できる表面流確認デバイスの**動作を確認**できた。

サンプリングデバイスによる概略粒度評価
表面流確認デバイスによる表面流確認



マトリクスで評価

表面流 \ 粒度	細粒主体		粗粒主体 (砂分以上)
	より細粒	細粒	
クレータ状		-	樽前、霧島 等
不定形	阿蘇、三宅等	桜島 等	-

より危険



シミュレーションには特性の類似した
火山灰のパラメータを採用

立入制限域内の

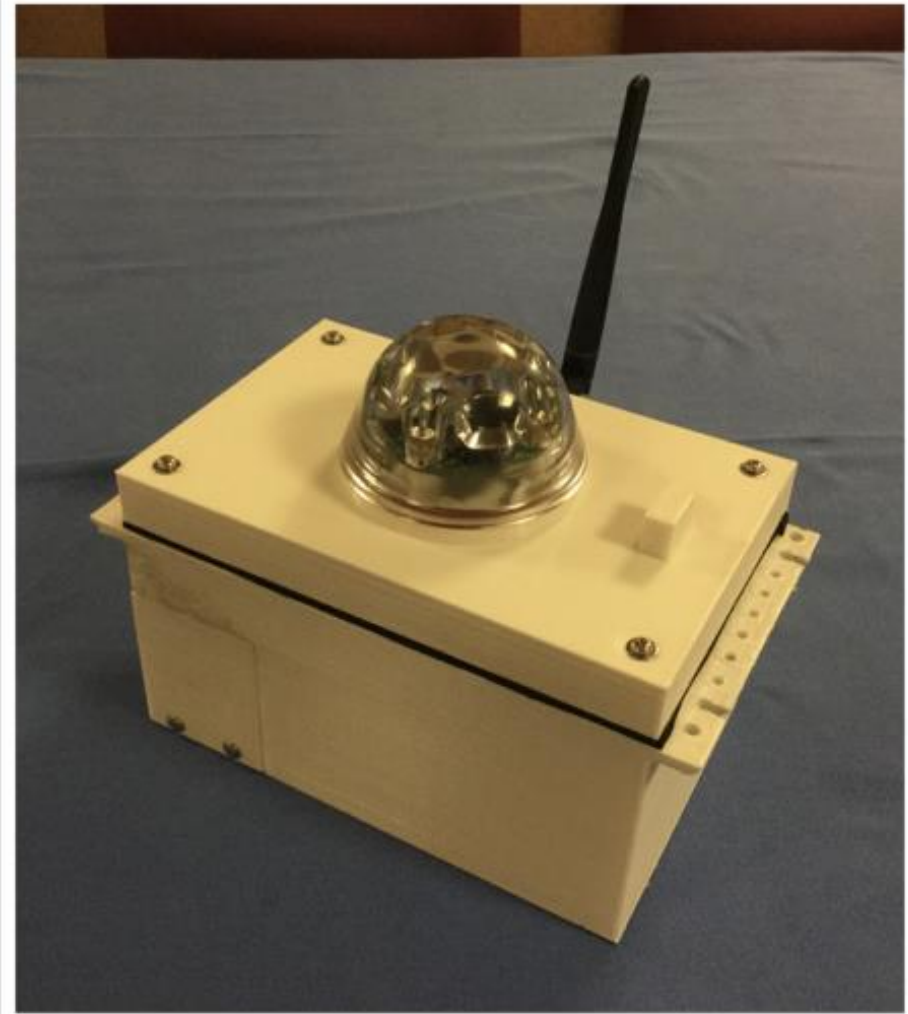
1. 地形
 2. 降灰量
 3. 降灰の質
 4. 雨量
- を把握

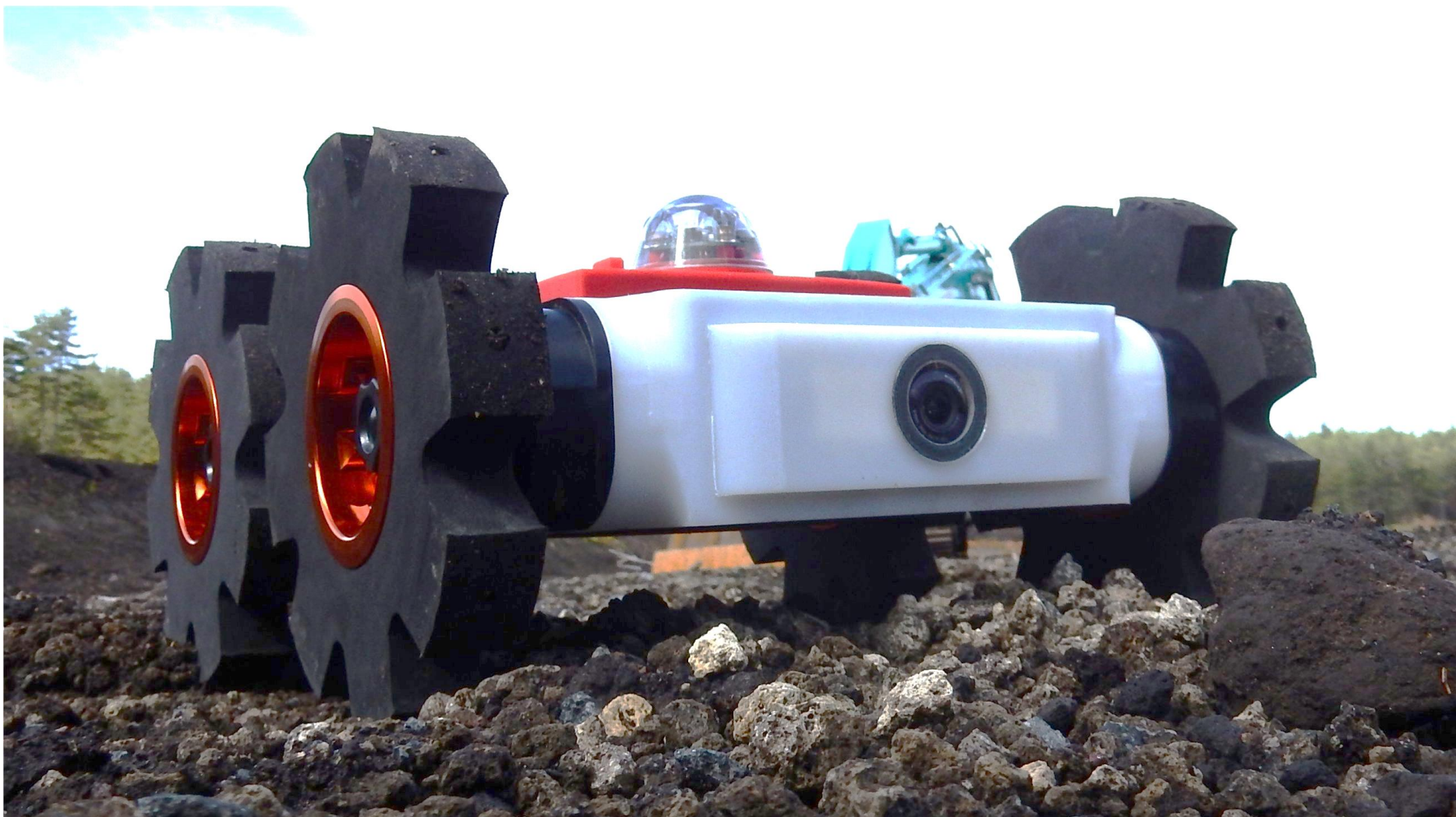


土石流シミュレーションの
精度向上

降雨センサは、雨量を計測するとともに、気圧変動や雷の発生頻度データも計測し、降雨イベントの規模などを総合的に評価する事を目的する。

- 光学式雨量センサ
- 簡易型雷センサ
- MEMS気圧センサ





新型CLOVER： 480x380x220 mm, 4.6 kg（簡易防水タイプ）
ドローンで運搬，雨量センサ1週間稼働，1週間後に回収

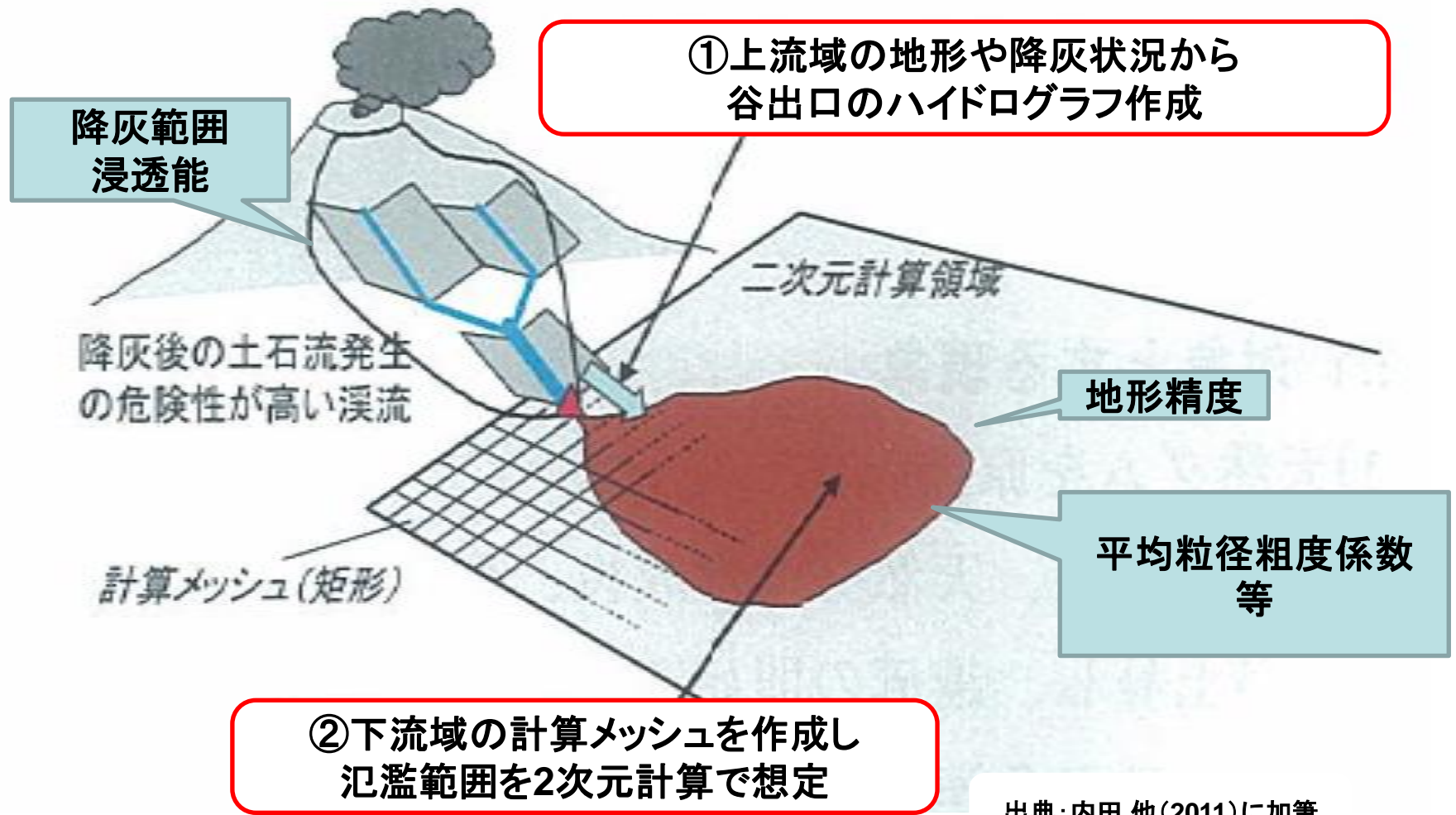


立入制限域内の

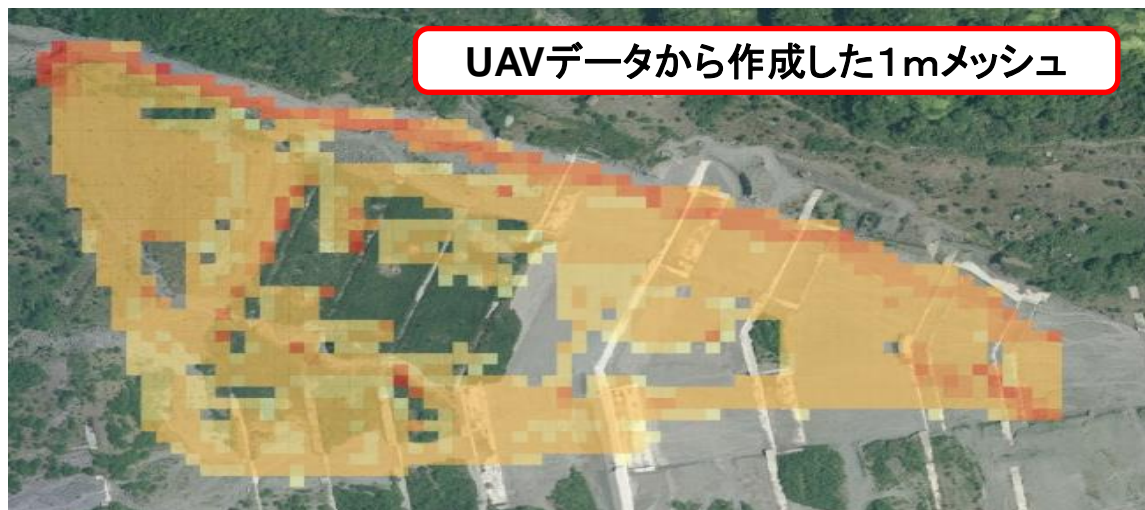
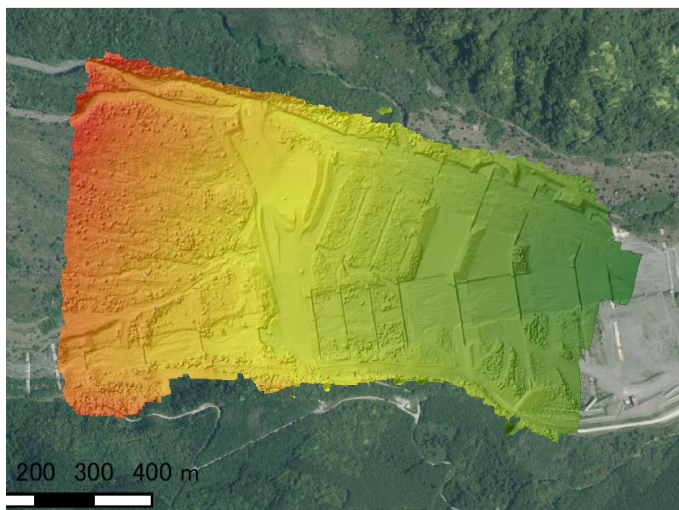
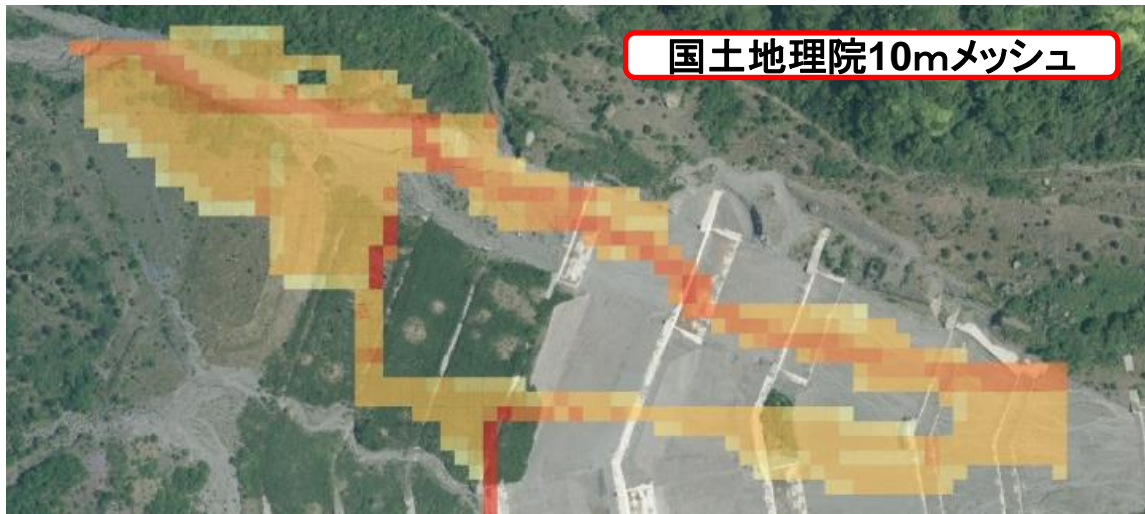
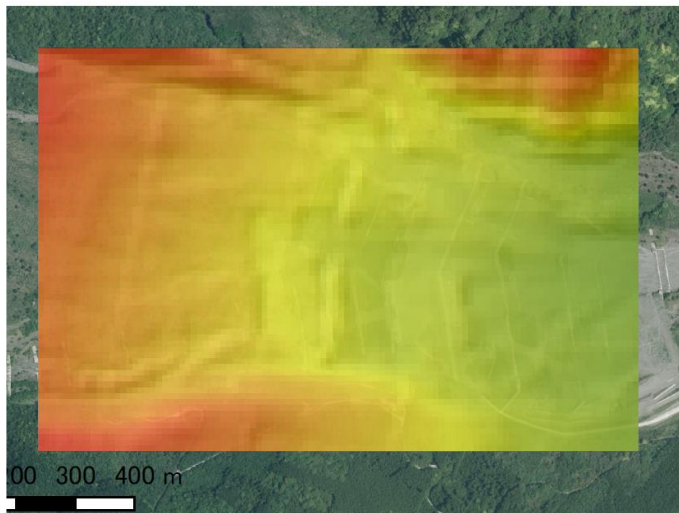
1. 地形
 2. 降灰量
 3. 降灰の質
 4. 雨量
- を把握



土石流シミュレーションの
精度向上

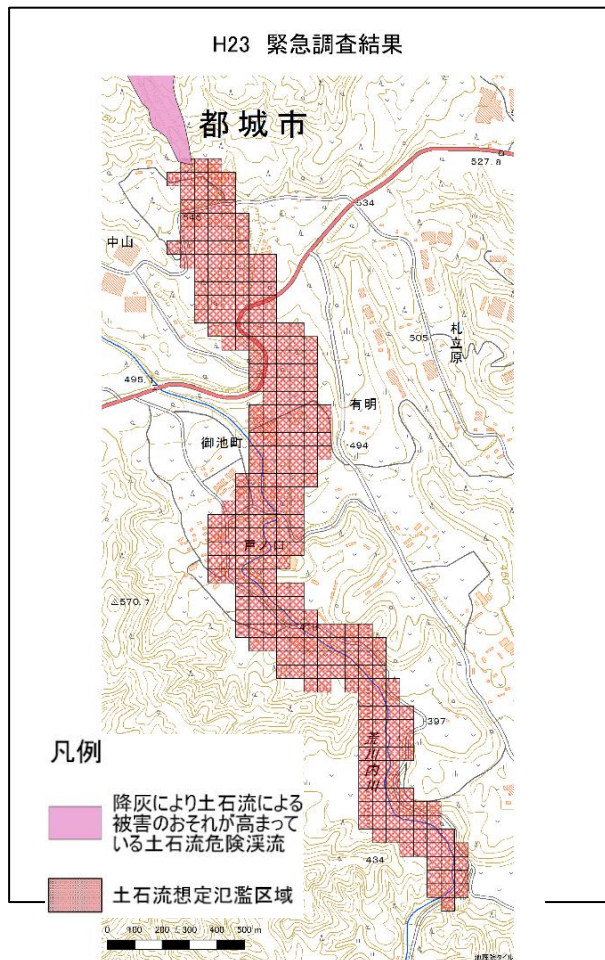


出典:内田,他(2011)に加筆



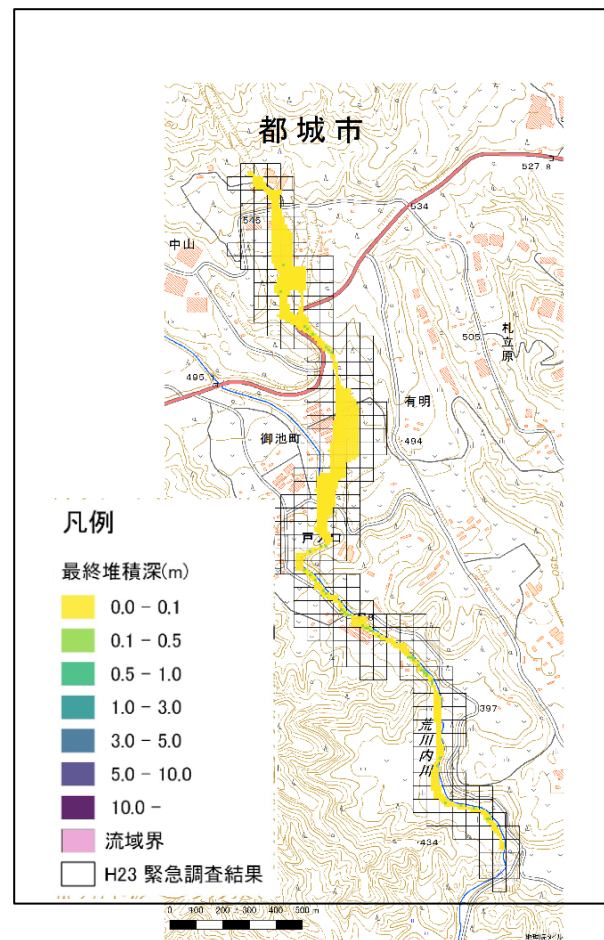
[H23年霧島新燃岳]

既存シミュレーション結果：50mメッシュ



出典：国土交通省HP

取得データから細かいメッシュが作成できた場合
【10mメッシュの場合】



リアルタイムの現地地形を反映したより細かい地形精度のシミュレーションが可能



Lessons learned:

Importance of on-site experiments



Mt. Asama



Mt. Mihara



Sakurajima

Lessons learned:

Importance of on-site experiments



Mt. Asama



Mt. Mihara



Sakurajima

浅間山にとって一般的な災害はあっても、
火山にとって一般的な災害はない。



一般化が求められていない。

Lessons learned:

Importance of on-site experiments



Mt. Asama



Mt. Mihara



Sakurajima

問題は、そのほとんどがフィールドテストで
発覚する。(スケール, 通信の問題, 環境のタ
フネス.)

Contents:

- 自己紹介／ロボットの定義
- 土工建設現場に活用されるロボット技術
- 災害現場に活用されるロボット技術
- **今後の展望**

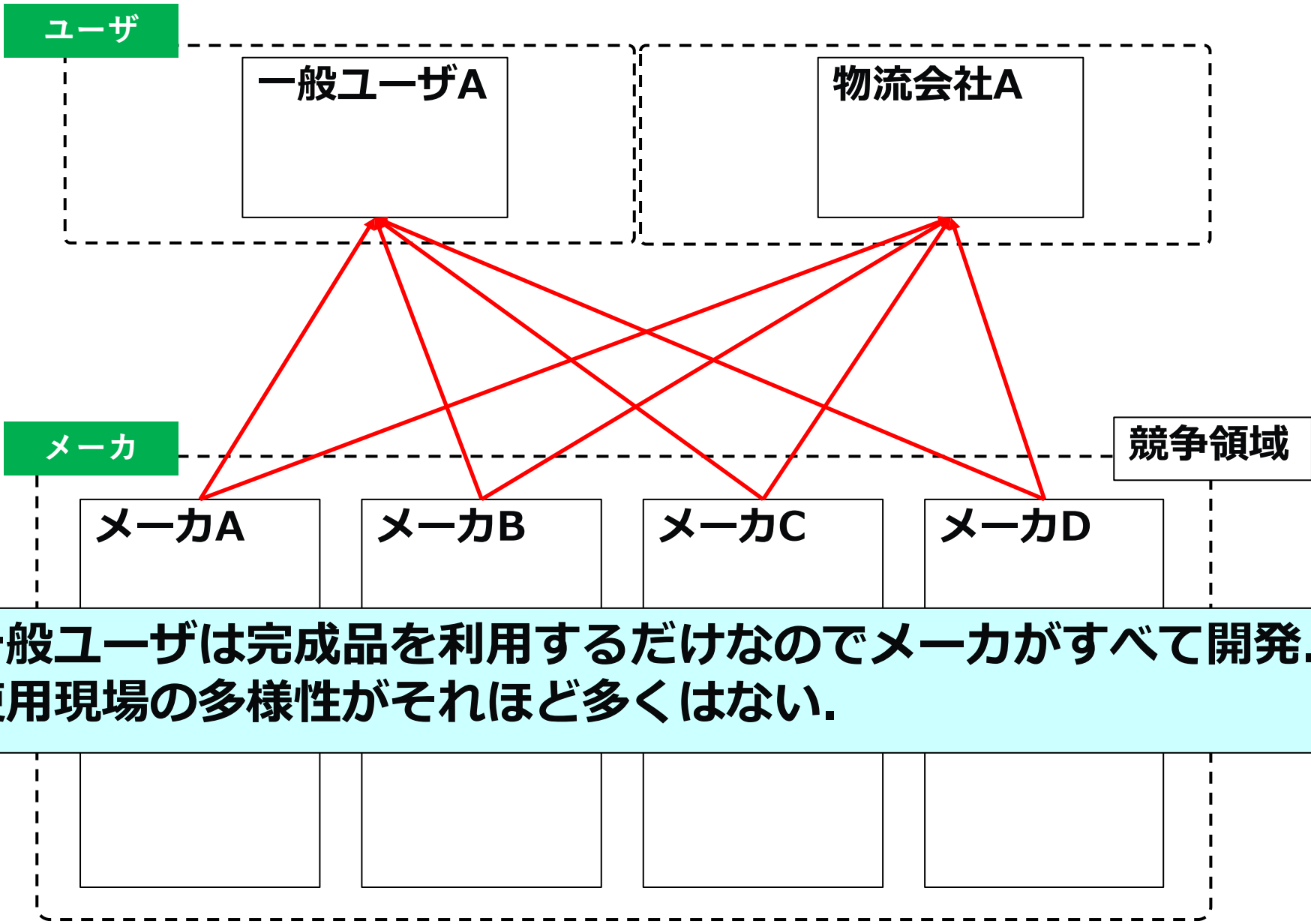
オープンプラットフォーム

自動化レベルについて（土木研）

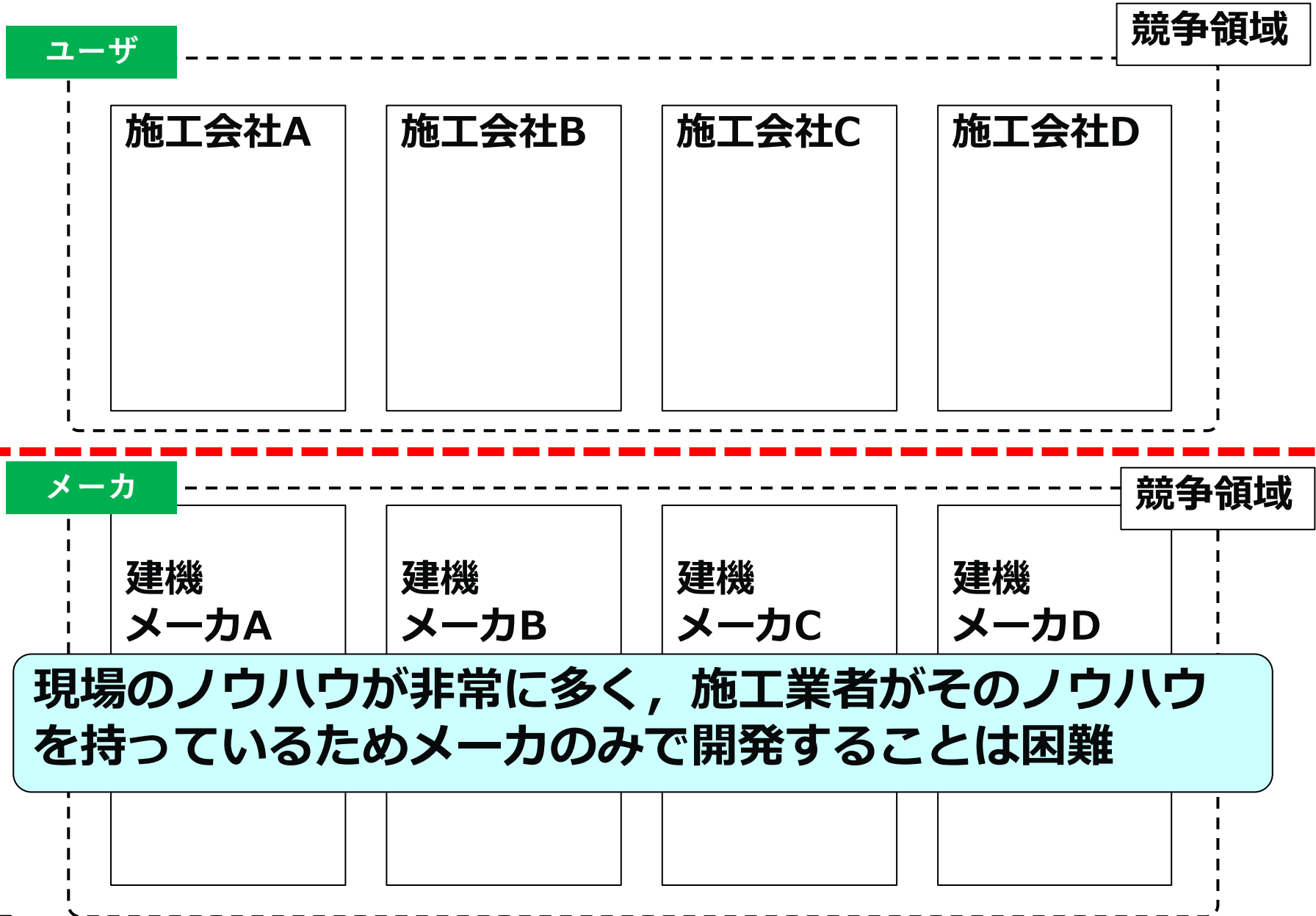
Level	油圧ショベル自動化：内容	自動運転	自動運転：内容
0	自動化なし	自動化なし	運転自動化なし
1	「移動」「掘削」「旋回」「放土」動作の 個別自動化 . 場所や動作は人が指示.	運転支援	運転支援 （縦方向または横方向の車両運動制御を持続的に実行.）
2	「移動」「掘削」「旋回」「放土」 一連動作の自動化 . 場所や動作は人が指示.	部分運転 自動化	運転支援（縦方向／横方向の車両運動制御を持続的に実行.） 対象物の検知は人間.
3	「移動」「掘削」「旋回」「放土」一連動作の自動化. 場所や動作も 機械（システム） が判断し実行.	条件付 運転自動化	運転支援：縦方向／横方向の車両運動制御を持続的に実行. 基本的にシステムが対応. 緊急時には人間が操作.
4	トラブルシューティング も機械が判断し実行	運転自動化	全てシステムが対応.
5	・・・	限定解除	場所の 限定解除.

参照：橋本他，建設ロボットシンポ，2019

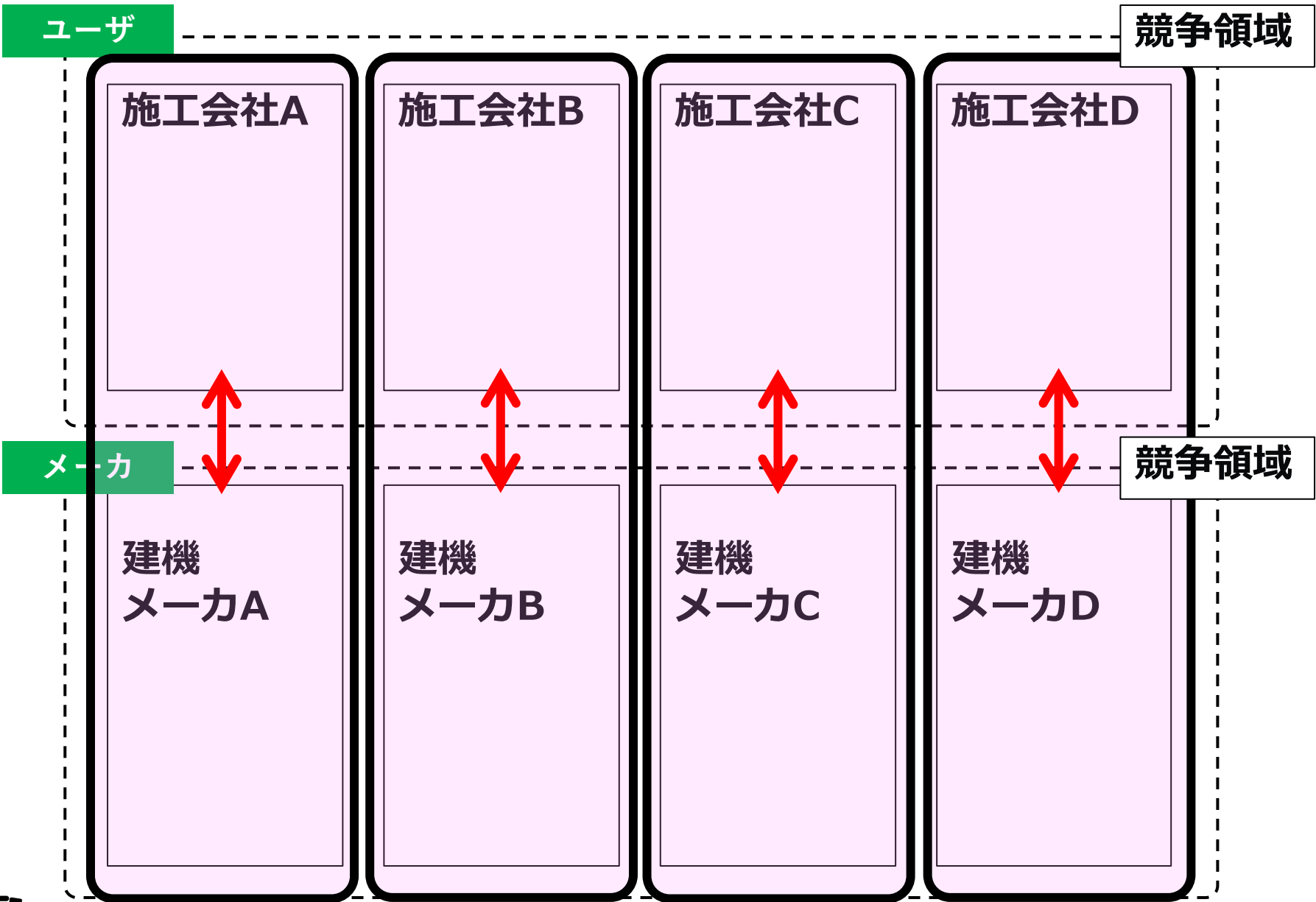
自動運転の開発（参考）



建設施工の研究開発の現状



建設施工の研究開発の現状



建設施工の研究開発の現状

ユーザ

競争領域

[施工業者側の課題]

- 建機メーカーが異なると開発もやり直す必要がある。
- **あるメーカー単独で現場を構成することはできない。**
- ロボット技術やAI技術などの参入が必要・・・
→ 同一技術の再発明を行ってしまう。

メーカー

競争領域

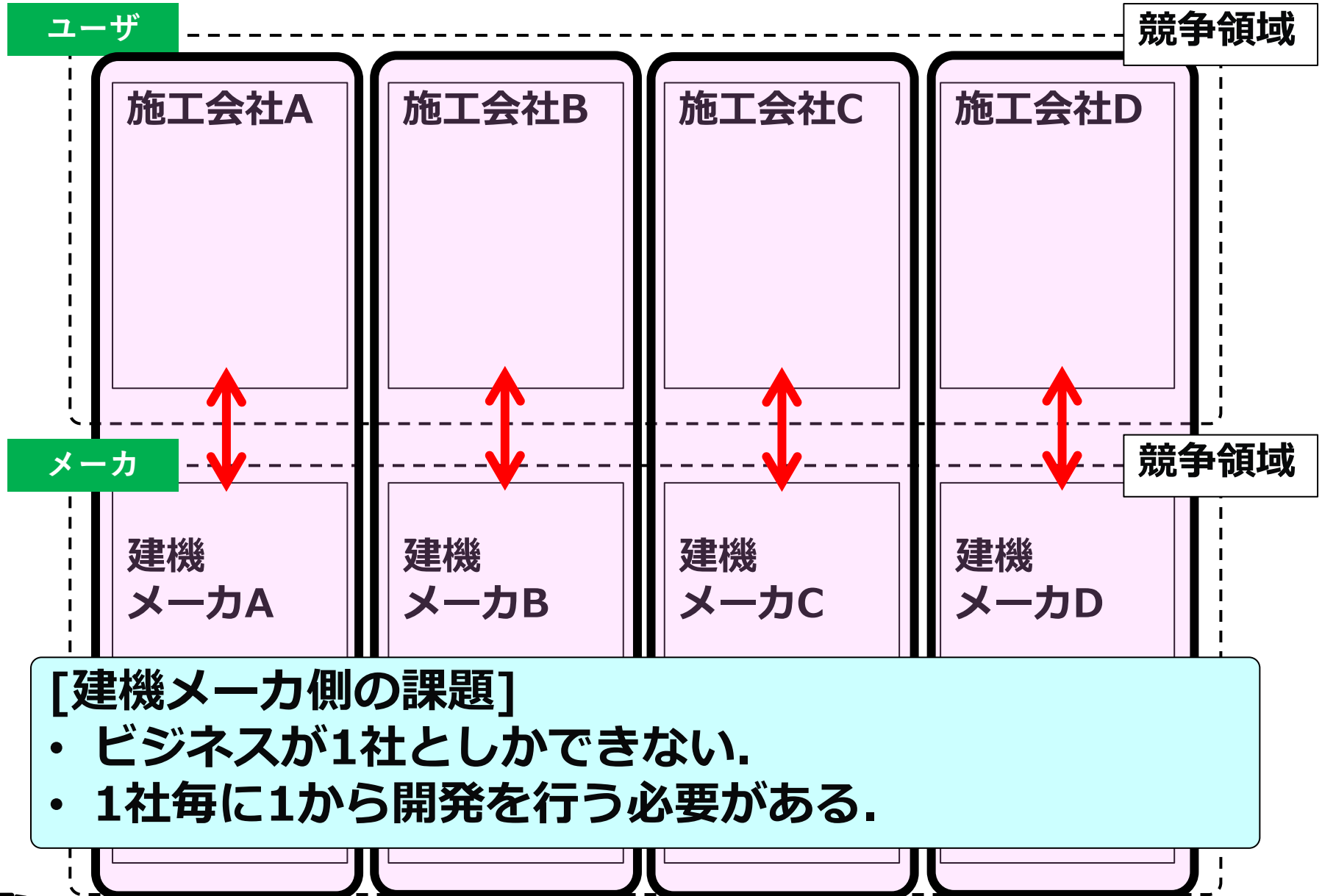
建機
メーカーA

建機
メーカーB

建機
メーカーC

建機
メーカーD

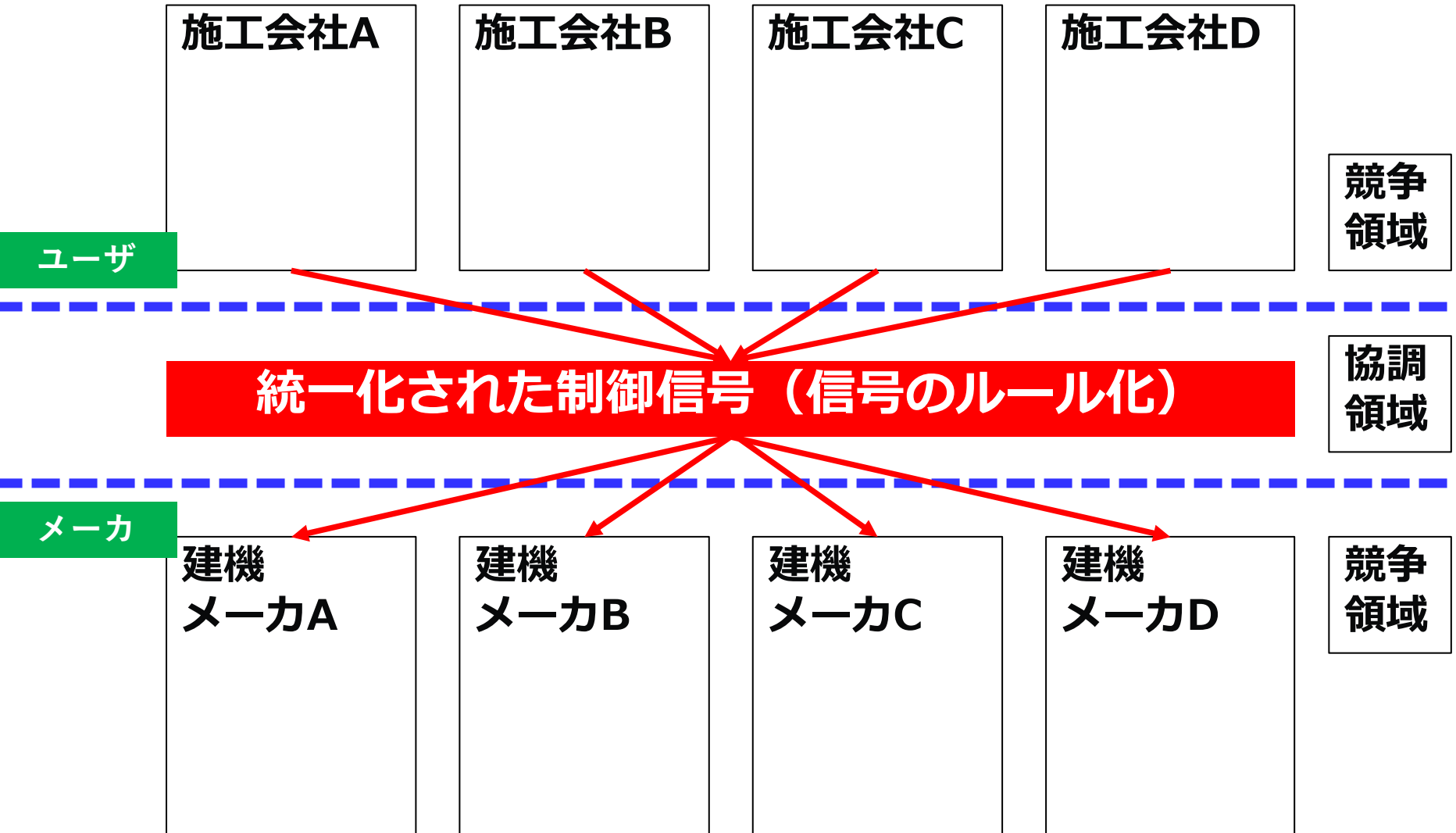
建設施工の研究開発の現状



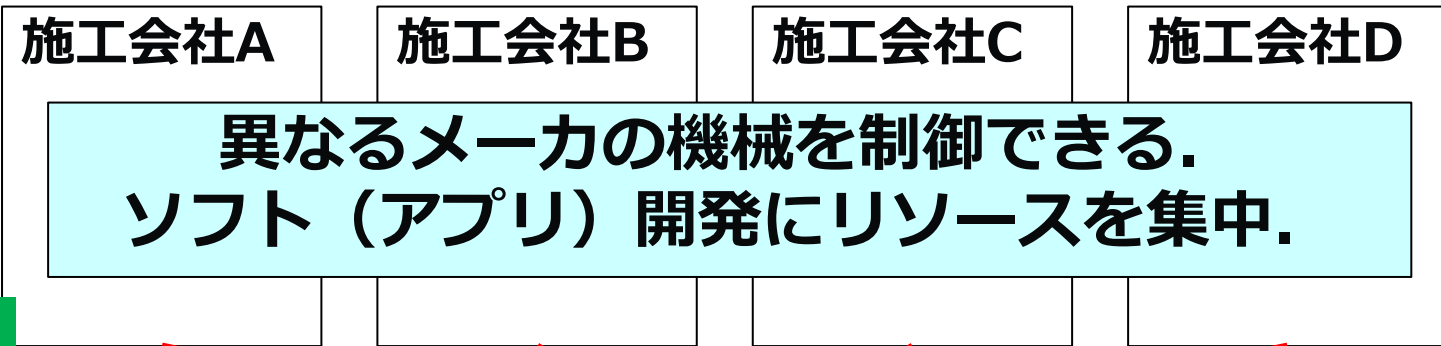
[建機メーカー側の課題]

- ビジネスが1社としかできない.
- 1社毎に1から開発を行う必要がある.

建設機械用標準プラットフォームによる自動化



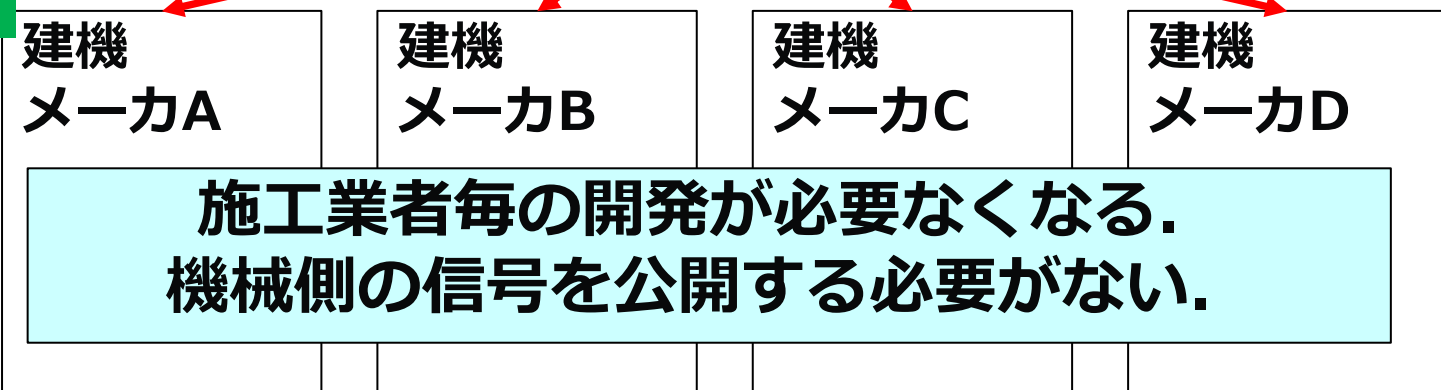
建設機械用標準プラットフォームによる自動化



競争領域



協調領域



競争領域



建設機械用標準プラットフォームの実装

インフラデータプラットフォーム (3D デジタルモデル)

施工データ 施工データ

遠隔操縦
アプリ

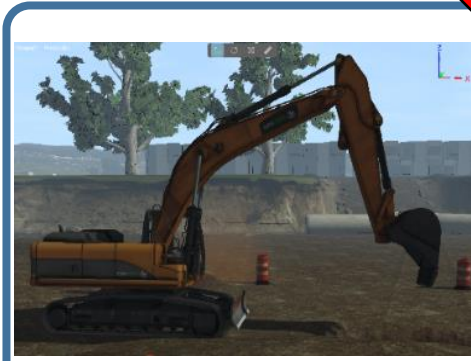
自律動作
アプリ

センシング
アプリ

協調動作
アプリ

センサ
データ

ROS (Robot Operating System)



Virtual 建機制御
Virtualセンサ入力
Virtual GNSS入力
土壌Simulation

バーチャル建機

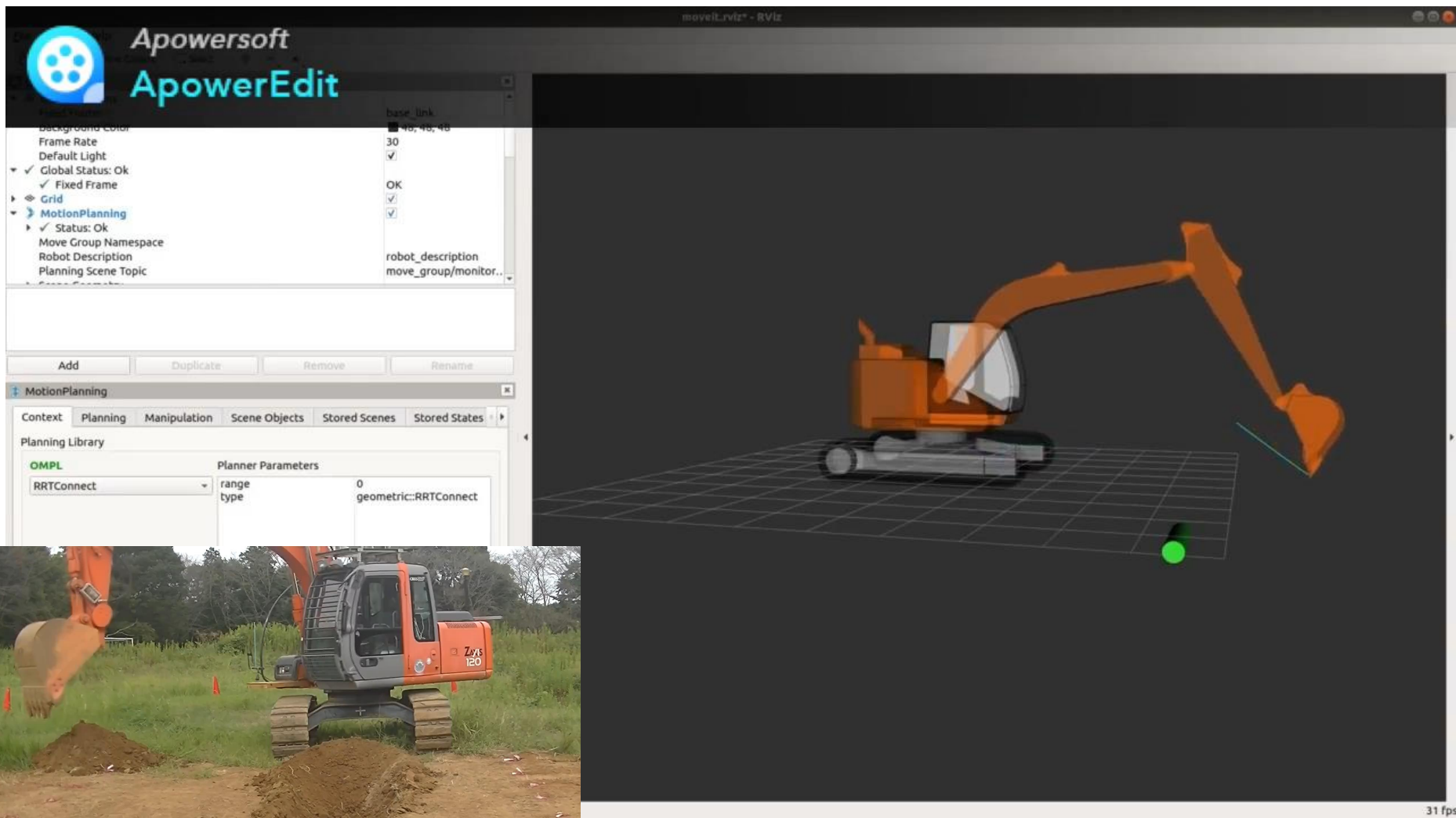


建機制御
センサ情報入力
GNSS入力
環境情報取得

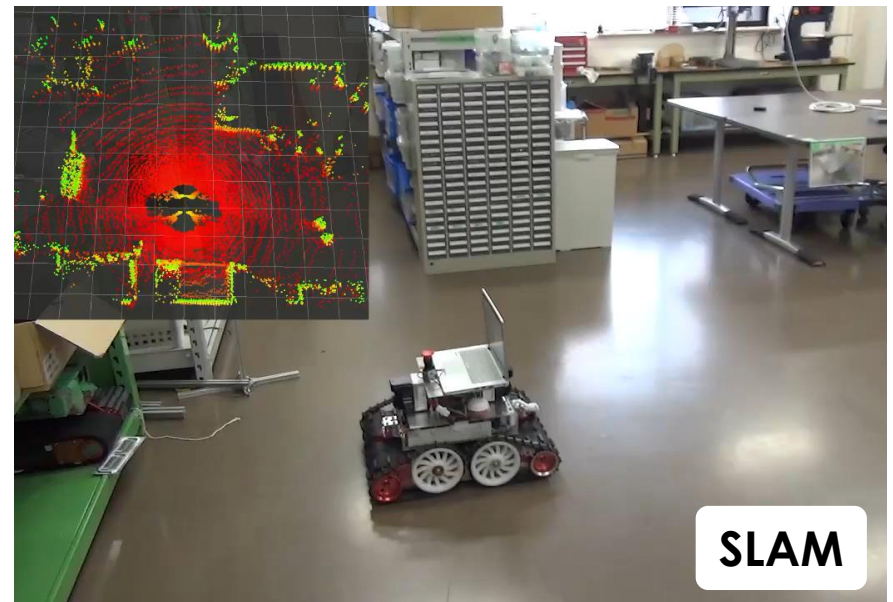
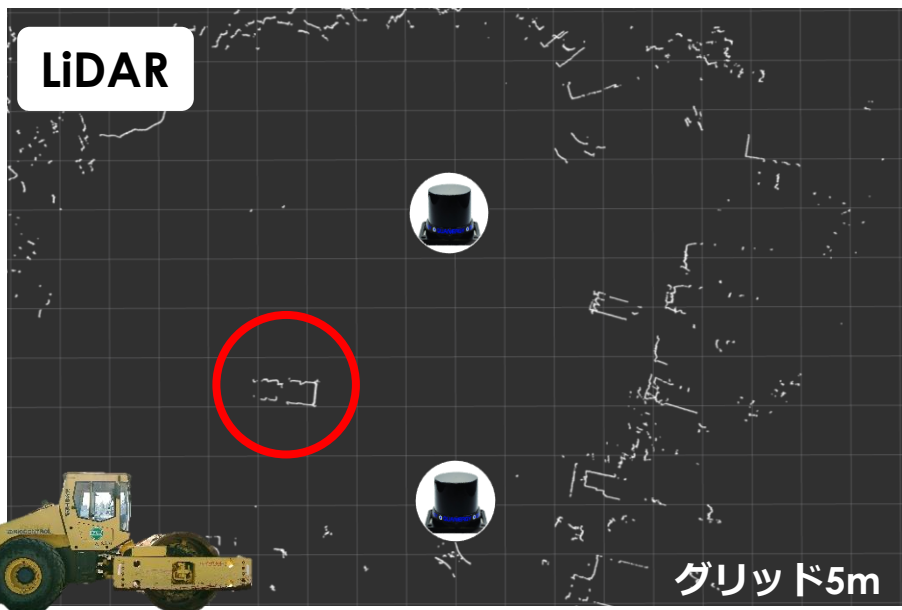
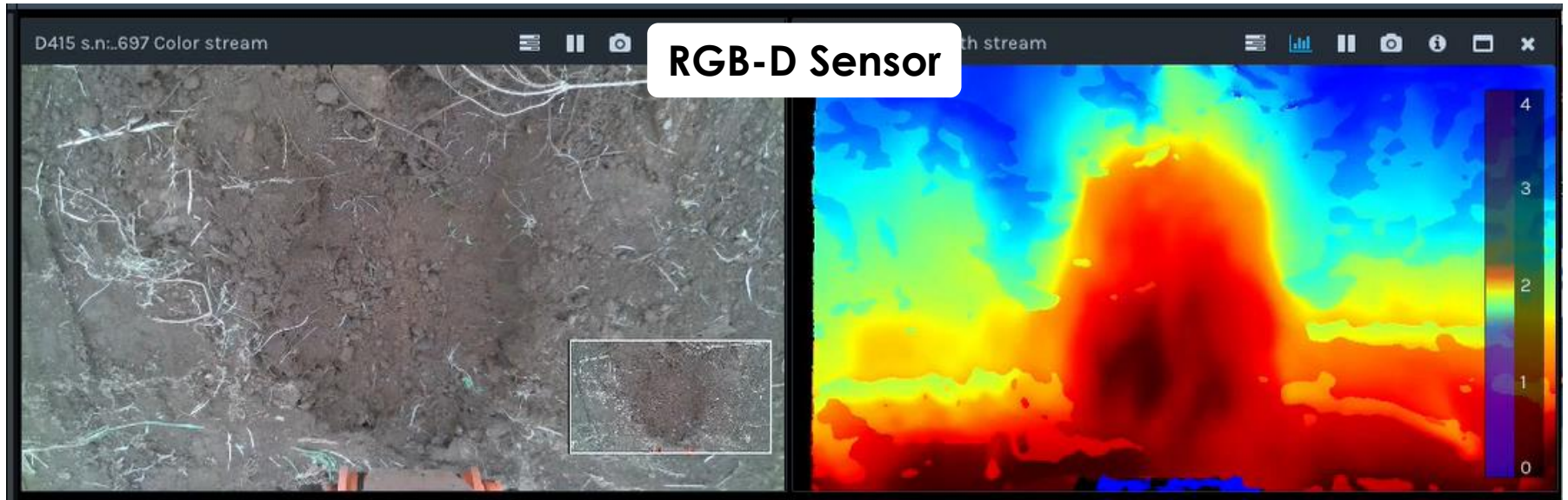
Open Platform 建機



Movelitを用いて掘削軌道生成と制御を実装



様々なセンサやアルゴリズムが比較的容易に利用可能



建機の自動化：

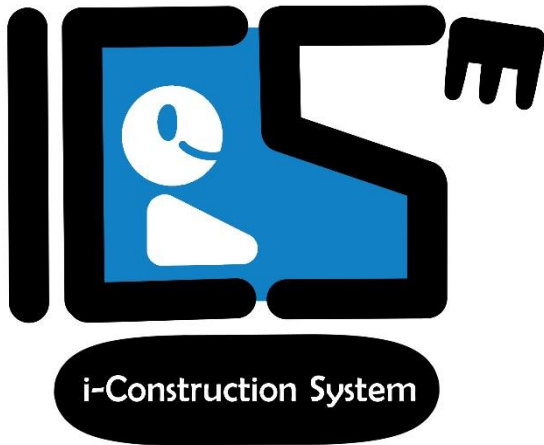
- **地盤の情報を考慮した土工**
- **自己位置推定の頑強化**
- **状況変化に臨機応変に対応する自律性**

災害対応：

- **対応可能な災害を増やしていくこと**
- **開発した機器の運用試験を継続**
- **環境変化に臨機応変に対応可能な設計**

発表内容

- **自己紹介／ロボットの定義**
- **土工建設現場に活用されるロボット技術**
- **災害現場に活用されるロボット技術**
- **今後の展望**



keiji@ieee.org