

土工現場用CPSプラットフォーム ROS2-TMS FOR CONSTRUCTION の開発

－ 第 9 報 土砂改良作業への適用事例 －

○ 高野 智也^{*1}, 笠原 侑一郎^{*1*4}, 秋成 光太^{*1}, 八條 貴誉^{*2}, 木村 駿介^{*2},
深瀬 勇太郎^{*2}, 宮下 裕貴^{*2}, 横島 喬^{*2}, 遠藤 大輔^{*3}, 阿部 太郎^{*3},
橋本 毅^{*3}, 永谷 圭司^{*5}, 山内 元貴^{*3}, 倉爪 亮^{*6}

ROS2-TMS for Construction: CPS platform for earthwork sites

-- Case studies of applications in soil improvement work --

Tomoya Kouno^{*1}, Yuichiro Kasahara^{*1*4}, Kota Akinari^{*1}, Takayoshi Hachijo^{*2},
Shunsuke Kimura^{*2}, Yutaro Fukase^{*2}, Yuki Miyashita^{*2}, Takashi Yokoshima^{*2}, Taro Abe^{*3},
Daisuke Endo^{*3}, Takeshi Hashimoto^{*3}, Keiji Nagatani^{*4}, Genki Yamauchi^{*3}, Ryo Kurazume^{*5}

^{*1} 九州大学大学院, システム情報科学府,
Kyushu University, Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering

^{*2} 清水建設株式会社 技術研究所, Shimizu Corporation Institute of Technology

^{*3} 国立研究開発法人 土木研究所, 技術推進本部 先端技術チーム,
Public Works Research Institute,
Construction Technology Research Department Advanced Technology Research Team

^{*4} 筑波大学大学院, 理工情報生命学術院,
University of Tsukuba, Graduate School of Science and Technology

^{*5} 筑波大学, システム情報系,
University of Tsukuba, Institute of Systems and Information Engineering

^{*6} 九州大学大学院, システム情報科学研究院,
Kyushu University, Faculty of Information Science and Electrical Engineering

我々は、土木研究所が開発を進める自律施工基盤 OPERA を用いた、土工現場向けサイバーフィジカルシステム ROS2-TMS for Construction を開発している。本論文では、本システムの現場導入例として、バックホウによる土砂改良作業における粘性土のホッパーへの積み込み作業を自動化した。実験の結果、動的に掘削位置を決定しつつ、1 時間以上の連続動作を実現した。

Key Words : 自律化施工, 自動施工技術基盤 OPERA, デジタルツイン, i-Construction2.0

1. はじめに

厚生労働省の発表する令和 5 年労働災害発生状況の分析等によると、業種別死者数において建設業は全産業で最多であり、その中でも土木工事業が約 4 割を占める。また、建設業就業者数は減少傾向にある一方で、今後 10 年間でインフラの老朽化が急速に進行すると予測されており、人手不足が懸念される。

これらの課題に対し、我々は土工作业における効率化と安全性向上を同時に満たすシステムとして土工現場用 Cyber Physical System (CPS) プラットフォーム ROS2-TMS for Construction⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を開発している。ROS2-TMS for Construction では、「環境情報構造化」の考えに基づき、施工現場や建設機械に設置されたセンサから土工環境の様々な情報を収集、記録する。この収集された環境情報と施工計画に基づいて、土工ロボットや建設機械に動作指令を与え、自律施工を実現

する。

しかし、一般に建設機械の多くは制御信号を含む内部仕様が非公開である場合が多く、ユーザ側から建設機械を電子制御および ROS2 に対応させることは困難である。そこで、土木研究所により建設機械の制御信号の共通化と自律施工技術開発のためのプラットフォームである Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy (OPERA) の開発が進められている⁽⁶⁾。OPERA には、電子制御対応型建設機械およびシミュレータが含まれており、共通制御信号を用いて実機を制御できる。加えて、OPERA はミドルウェアとして ROS/ROS2 を利用しているため、OPERA 上で開発されたアプリケーションと ROS/ROS2 通信を利用して接続可能である。

本論文では、ROS2-TMS for Construction と OPERA を連携した現場導入の例として、土砂改良作業におけ

る, ZX200 (日立建機) をベースとした OPERA 対応型バックホウ (以降, 「ZX200」) により粘性土をホッパーに積み込む作業の自動化の結果を報告する. 現場に設置した 3D-LiDAR により, 掘削位置を動的に決定しつつ, 連続動作の実証を行った.

2. ROS2-TMS for Construction

2.1 概要

ROS2-TMS for Construction とは, Fig.1 の概念に基づく CPS プラットフォームであり, 以下の流れを繰り返すことで施工現場の管理を行う.

1. 施工現場や建設機械に設置されたセンサからの環境情報を収集する (Measure).
2. 収集したセンサデータをもとにサイバー空間上に工事現場を構築し, 現場の状態を分析した上で, 建設機械が次にとるべき動作を計画する (Analyze, Plan).
3. 動作計画を実現するための動作指令を計算し, これを建設機械へと入力する (Control).

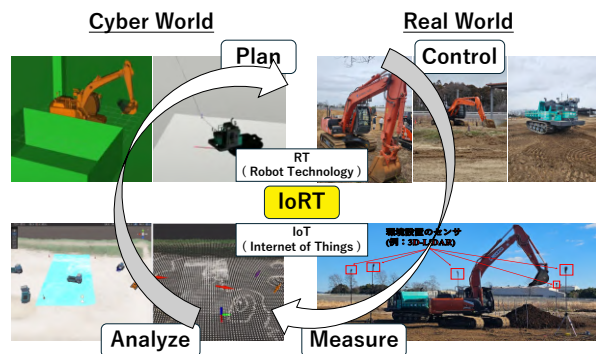


Fig. 1 Cyber Physical System at Construction site

また, ROS2-TMS for Construction は Fig.2 に示すアーキテクチャを持つ. 各々の機能は以下に示すようにモジュール化されており, これらが相互に連携することでシステムを形成する.

- **Database (TMS_DB)**

データベースへの書き込み・書き出し機能を担う.

- **User Request (TMS_UR)**

ユーザとのインタフェース機能を担う.

- **Task Scheduler (TMS_TS)**

施工の管理機能を担う.

- **Robot Planning (TMS_RP)**

建設機械の動作計画を行う (本研究においては, OPERA が当たる).

- **Robot Controller Module (TMS_RC)**

建設機械に送る指令を計算する (本研究においては, OPERA が当たる).

- **Sensing Processing (TMS_SP)**

センサデータをもとにセンシング処理を行う.

- **Sensor Driver (TMS_SD)**

センサデータを TMS_DB に送る.

- **Sensor System (TMS_SS)**

センサデータを整形し, TMS_DB に送る.

ROS2-TMS for Construction のより詳細な説明は, 文献の 参照されたい.

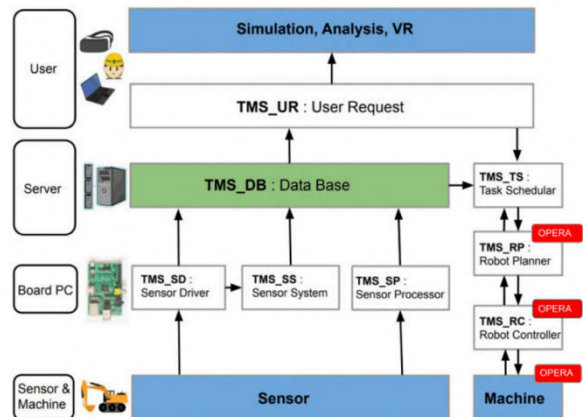


Fig. 2 The architecture of ROS2-TMS for Construction

2.2 Task Scheduler (TMS_TS)

TMS_TS は, 施工の管理を行う. タスクの構成・実行には, Behavior tree を利用しており, タスクの一連の流れをツリー状のタスク列として表現する. タスク列の例を Fig.3 に示す (図中番号は処理順) が, タスク列はサブタスクノードと呼ばれるタスクを構成する最小単位のノードを複数個繋げた構造をしている.

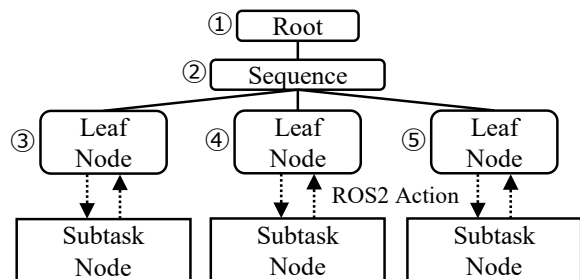


Fig. 3 An example of task sequence using behavior tree

3. 自律施工技術基盤 OPERA

自律施工技術基盤 OPERA は, 土木研究所先端技術チームにより開発が進められている自律施工技術の開発

を促進するためのオープンプラットフォームである。OPERA のシステム構成を Fig. 4 に示す。OPREA は、共通制御信号、実環境（電子制御対応型建設機械と実験フィールド）、シミュレータ（バーチャル建設機械とバーチャル実験フィールド）、ミドルウェア（ROS/ROS2）、自己位置推定等のアプリケーションから構成される。OPERA には、電子制御対応型建設機械と実験フィールドおよびそれらのシミュレータも含まれており、OPERA 上に実装したアプリケーションの動作検証に利用できる。

本論文では、ZX200 を操作する ROS2 パッケージ群「zx200_ros2⁽⁸⁾」を用いている。

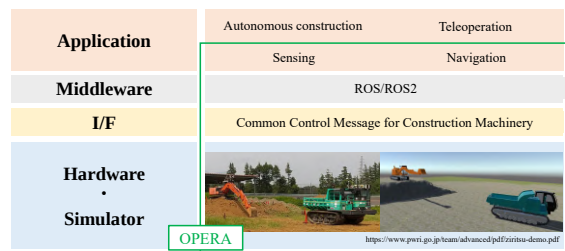


Fig. 4 Architecture of OPERA

4. バックホウによる掘削・放土サブタスク

我々はこれまで、ZX200 と IC120（クローラダンプ）を用いた土砂の掘削・積載・運搬・放土作業の自動化に成功している⁽⁴⁾。この作業では、ROS2-TMS for Construction から ZX200 に対するマニピュレーション動作指令として、Table 1 に示す 3 種類のサブタスク⁽²⁾を使用していた。しかし今回対象とする作業では、長時間の連続動作が求められることから、これらの動作に対し、掘削動作の計画のみを行うサブタスクの導入と、搭乗操作によるバックホウの動作を踏まえた Excavate, Release サブタスクの改良を行った。

Table. 1 Manipulation subtasks for ZX200⁽²⁾

名称	動作
ChangePose	目標姿勢まで動作させる。
Excavate	土山の掘削動作を行う。
Release	土を放つ動作を行う。

4.1 Excavate_Plan サブタスクの導入

従来の Excavate サブタスクでは、動作計画と実行が一体化しており、動作計画の失敗と動作中の異常を区別できず、計画失敗による再計画が行えなかった。そこで、動作時の異常でなく到達不可能な掘削位置指令により動作計画に失敗した場合には、その失敗をタス

クの管理を行う Behavior tree に伝え、掘削位置を変更して再計画を行うように、動作計画のみを行うサブタスクを導入した。

4.2 Excavate サブタスクの改良

土山の掘削動作を行う Excavate サブタスクは、パラメータとして、掘削位置を受け取るが、従来の Excavate サブタスク⁽²⁾⁽⁴⁾では以下の動作を行うことで、掘削動作を実現していた。

- 与えられた掘削位置に対して、
 - 高さ方向（z 方向）に +0.5 [m]の位置に、
 - バケットを開いた状態で、
 - 刃先を動作させる。
- バケットを閉じる向きに動作させる。

この動作の場合、掘削する土山の形状によって、掘削量が少なくなる。

そこで、オペレーターによる搭乗操作でのバックホウの動作を踏まえ、以下のような動作に改良した。これにより、土山の形状によらず、掬い上げるような掘削動作を実現し、掘削量を安定させることが出来る。

- 与えられた掘削位置に対して、バックホウの正面に対して、
 - 水平面（xy 平面）で +0.5 [m],
 - 高さ方向（z 方向）に -0.5 [m]の位置に、
 - 刃先を地面に向ける角度で、
 - 刃先を動作させる。
- アームとバケットを閉じる向きに動作させる。

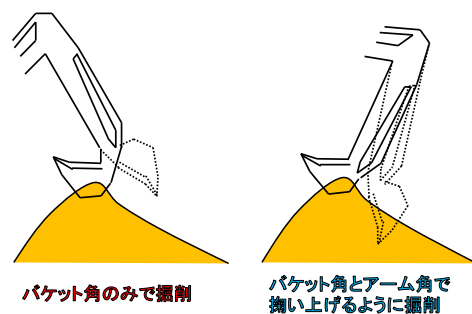


Fig. 5 Improvement of the excavate subtask

4.3 Release サブタスクの改良

クローラダンプへの積み込みなどの放土動作を行う Release サブタスクは、パラメータとして、放土動作終了時のバケット角を指定するが、従来の Release サブタスク⁽²⁾⁽⁴⁾では以下の動作を行うことで、放土動作を実現していた（タスク列には、この動作の前に放土位置

に土を抱えたまま、動作させる ChangePose サブタスクが含まれる)。

1. バケット角を指定角度まで動作させる。

この動作の場合、土を放るような動作となってしまう、指定位置以外にも、その周辺に多くの土を放ってしまう動作となる。そこで、以下のような動作に改良することにより、Fig. 6 のように指定位置のみに土を放つことを可能にした。

1. バケットの刃先を地面に向ける角度まで、バケット角のみをバケットを開く向きに動作させる。
2. アーム角とバケット角を同時に開く方向に動作させる。

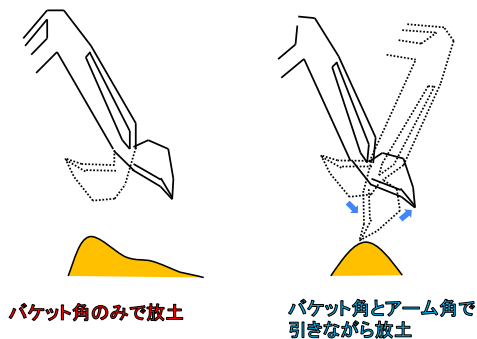


Fig. 6 Improvement of the release subtask

5. 土砂改良作業への導入実験

5.1 現場環境

Fig. 7 に示す土砂改良現場において、現場導入を行った。この現場では、粘性土と砂質土を 0.29:0.71 の割合で混ぜることにより、土砂改良を行い、改良土を別の現場へ運搬する一連の作業を、複数台のバックホウとダンプが協調して行っている。Fig. 7 中の a において粘性土、b において砂質土をそれぞれのバックホウがホッパーに入れ、それぞれの土がベルトコンベアにより運ばれることで、c において改良土が作られる。この時、それぞれの土の割合は、ベルトコンベアの手速によって制御されており、効率良く作業を行うためには、ホッパーに土がなくならないように制御する必要がある。

5.2 実験概要

今回の現場適用では、a において粘性土をホッパーに入れる役割を持つバックホウの自動化を行った。全体の動きとしては以下の通りである。

- ZX200 は土山から粘性土をすくい、ホッパーに投入する。
- 土砂を積載したダンプが非同期で土山に粘性土を供給する (その都度安全のため、ZX200 を静止させる)。土砂をかき集め、整える作業は、別のバックホウを用いて、搭乗操作で行った。
- 上記 2 つにより、土山の位置、形状はその都度変化するため、3D-LiDAR を用いて掘削する位置をその都度適応的に調整する。

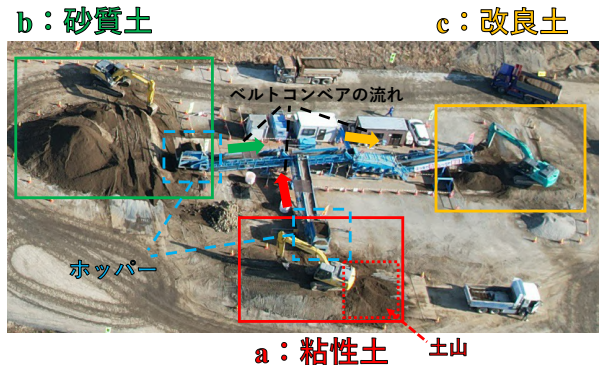


Fig. 7 View of a soil improvement site

5.3 土山形状の認識と動的な掘削計画⁽⁹⁾

本実験において、Fig. 8 に示すように 3D-LiDAR (HAP, LIVOX) を 2 台設置することで、Fig. 9 に示す土山形状の認識を行い、掘削すべき位置を動的にバックホウに与えている。この時、バックホウの届きうる位置を考慮し、球形でクロップした範囲から高さマップを作成し、天頂部を掘削位置として算出している。

5.4 施工計画に基づくタスク列

今回の現場適用において、遵守すべき事項として、以下のような項目が挙げられる。

- ホッパーに放土を行う際、ホッパーの中の土量によって、放土のタイミングを変える必要がある。
- 安全性の観点から、ダンプトラック及び、搭乗操作のバックホウが ZX200 の旋回半径の中で動く場合には、動作を停止する必要がある。

これらの施工計画に基づき、以下のようなシーケンスに基づくタスクを Fig.10 に示す Behavior Tree で作成し、自動化を行った。またタスク内で利用しているフラグについては以下の通りである。

- 施工フラグ：施工の継続を管理する。
- 掘削フラグ：掘削動作の実行を管理する。

- 放土フラグ：放土動作の実行を管理する。
- バケット内積載フラグ：バケット内の土の積載を管理する。

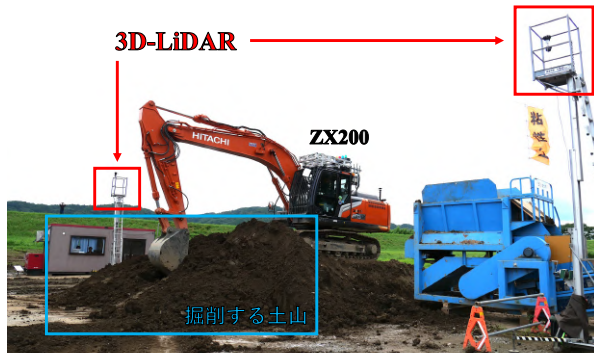


Fig. 8 View of the 3D-LiDAR setup

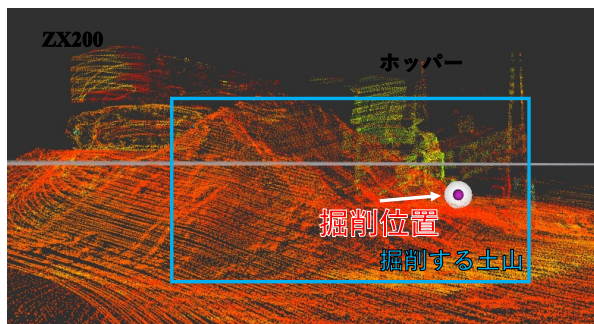


Fig. 9 Detection of soil mound and estimation of apex position

5.5 障害物を考慮した軌道計画

本実験において、静的な障害物として、ホッパーを避けるように軌道計画を行う必要がある。そこで、Fig. 11 のように障害物として設定して MoveIt 2⁽¹⁰⁾ により軌道計画を行うことで、ホッパーを避けながら動作させた。

5.6 実験結果

動作の様子を Fig. 12 に示す。実験の結果、動的に掘削位置を変更しつつ、1 時間の連続動作を実現することに成功した。この連続稼働 1 時間を含め、当日の作業時間の 5 時間に対し、掘削数量は 84t、体積数量に表すと 44.76 m³ となった。掘削から放土までの 1 サイクルあたりの動作時間は約 90 秒であったため、1 度も止まらず動いたときの理想的な掘削数量は 262.71t となる。また、人間が搭乗操作して掘削する目標掘削数量は、割合の多い砂質土で 923t (実作業時間 5 時間) であることと、自動化の強みである 24 時間作業を行うことができることを考慮すると、理想的な動作と仮定して、安全性を十分に考慮した現在の速度で 1 日で人間の約 1.3 倍の掘削数量を積み込むことができることを実証した。

さらに、4 章で改良した掘削・放土動作も意図通りの動作を実現することができた。

5.7 考察

今回の現場適用においては、安全性を十分に考慮し、動作速度を関節角によるが、平均で 0.2 rad/s としているため、約 75 秒と 1 サイクルの時間が長くなった。これを早めることにより、より効率の良い作業を実現できる。

また、4.2, 4.3 節で紹介したサブタスクの中の 1 つ 1 つの動作はそれぞれでゴール判定を行うため、その間で短時間のラグが存在する。これをシームレスに繋げることで効率性の向上を見込める。

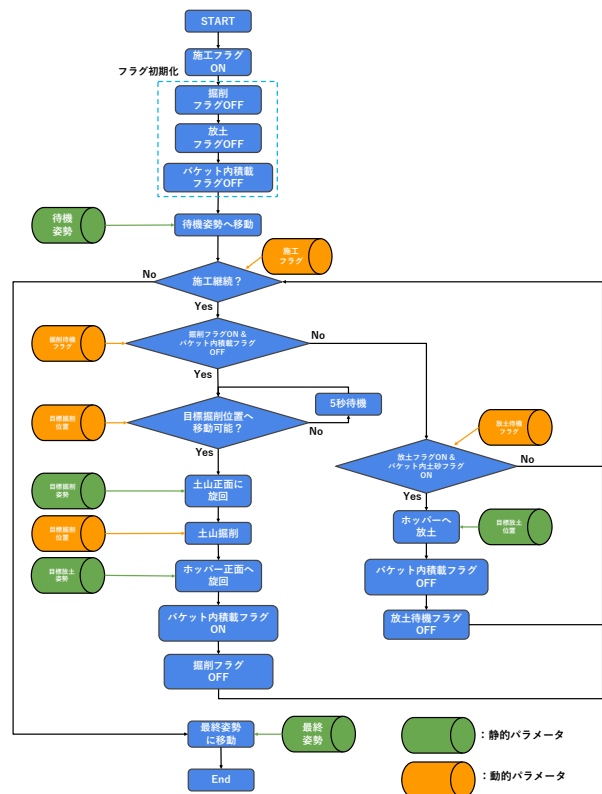


Fig. 10 Task sequence based on construction plan

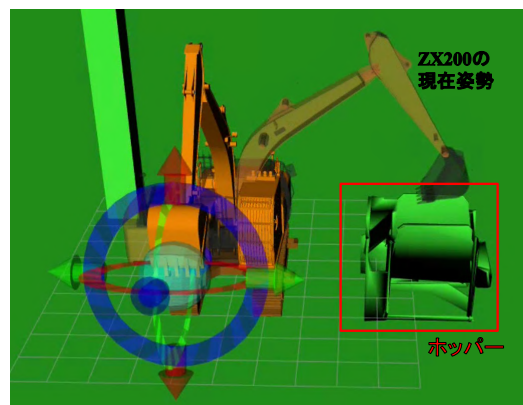


Fig. 11 Trajectory planning considering an obstacle

6. おわりに

本論文では、ROS2-TMS for Construction と OPERA を連携した初の現場導入として、土砂改良作業における、ZX200 により粘性土をホッパーに積み込む作業の自動化を行った。現場に設置した 3D-LiDAR により、掘削位置を動的に決定しつつ、1 時間の連続動作の実証に成功した。

今後、今回の実験では自動化していないが、土をかき集めて整える作業のサブタスクを追加することで、完全自動化した状態での現場適用を目指す。また、掘削、放土動作において、搭乗操作によるバックホウの動作の詳細な解析、オペレータの意見を取り入れ、より効率的な動作の実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187 (研究推進法人: 土木研究所) によって実施されました。

参考文献

- (1) 笠原 侑一郎, 井塚 智也, 柴田 航志, 前田 龍一, 高野 智也, 松本 耕平, 木村 駿介, 深瀬 勇太郎, 横島 喬, 山内 元貴, 遠藤 大輔, 橋本 毅, 倉爪 亮, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発- 第 3 報 タスク管理機構の実装”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2024, pp. 2A1-B05., 2024.
- (2) 柴田 航志, 高野 智也, 笠原 侑一郎, 井塚 智也, 前田 龍一, 松本 耕平, 木村 駿介, 深瀬 勇太郎, 横島 喬, 山内 元貴, 遠藤 大輔, 橋本 毅, 倉爪 亮, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発- 第 4 報 自律施工技術基盤 OPERA との連携”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2024, pp. 2A1-B06., 2024.
- (3) Yuichiro Kasahara, Tomoya Itsuka, Koshi Shibata, Tomoya Kouno, Ryuichi Maeda, Kohei Matsumoto, Shunsuke Kimura, Yutaro Fukase, Takashi Yokoshima, Genki Yamauchi, Daisuke Endo, Takeshi Hashimoto, and Ryo Kurazume, “Task management system for construction machinery using the open platform OPERA”, IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication, pp. 1929-1936., 2024.
- (4) 笠原 侑一郎, 高野 智也, 秋成 光太, 佐野 紀子, 八條 貴誉, 木村 駿介, 宮下 裕貴, 深瀬 勇太郎, 横島 喬, 阿部 太郎, 山内 元貴, 遠藤 大輔, 橋本 毅, 永谷 圭司, 倉爪 亮, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発-第 7 報 バックホウ・クローラダンプと複数 3D LiDAR による土砂の掘削・積載・運搬・放土作業の自動化”, 日本機械学

会ロボティクスメカトロニクス講演会 2025, pp. 1A1-A06., 2025.

- (5) IRVS. ROS2-TMS-FOR-CONSTRUCTION. https://github.com/irvs/ros2_tms_for_construction.git.
- (6) 鈴木裕敬, 山内元貴, 遠藤大輔, 橋本毅. “自律施工技術開発促進に向けた土木研究所の取り組み”. 計測と制御, Vol. 61, No. 9, pp. 651-655, 2022.
- (7) 笠原 侑一郎, 高野 智也, 秋成 光太, 八條 貴誉, 木村 駿介, 深瀬 勇太郎, 宮下 裕貴, 横島 喬, 遠藤 大輔, 阿部 太郎, 橋本 毅, 永谷 圭司, 山内 元貴, 倉爪 亮, “土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発-プラットフォームの概要と適用事例”, 第 23 回建設ロボットシンポジウム, 2025.
- (8) 土木研究所技術推進本部先端技術チーム. pwri-opera · github. <https://github.com/pwri-opera>.
- (9) Takayoshi Hachijo, Yutaro Fukase, Takashi Yokoshima, Yuki Miyashita, Shunsuke Kimura, Masanori Suzuki, Yuichiro Kasahara, Tomoya Kouno, Koshi Shibata, Ryo Kurazume, Daisuke Endo, Genki Yamauchi, Takeshi Hashimoto, “3D Measurement System for Soil Loading by an Autonomous Backhoe using OPERA”, 42nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2025.
- (10) MoveIt Contributors, “MoveIt 2,” Available: <https://moveit.picknik.ai/> (アクセス日 18/08/2025).

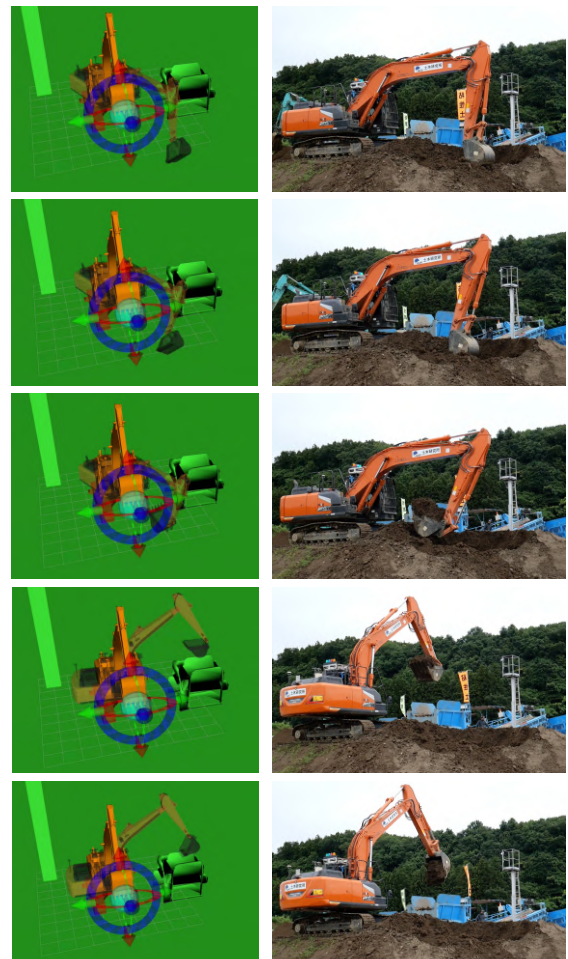


Fig. 12 View of the Experiment