

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 —

ROS2-TMS for Construction: CPS platform for earthwork sites
-Cooperation with OPERA, an autonomous construction technology platform-

| | | |
|---------------|----|--------------|
| 柴田航志 (九州大学) | ○学 | 高野智也 (九州大学) |
| 笠原侑一郎 (九州大学) | 正 | 井塚智也 (九州大学) |
| 学 前田龍一 (九州大学) | 正 | 松本耕平 (九州大学) |
| 木村駿介 (清水建設) | | 深瀬勇太郎 (清水建設) |
| 横島喬 (清水建設) | | 山内元貴 (土木研究所) |
| 遠藤大輔 (土木研究所) | | 橋本毅 (土木研究所) |
| 正 倉爪亮 (九州大学) | | |

Koshi SHIBATA, Kyushu University, shibata@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Tomoya KOUNO, Kyushu University, kouno@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Yuichiro KASAHARA, Kyushu University, kasahara.yuichiro.res@gmail.com
Tomoya ITSUKA, Kyushu University, itsuka@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Ryuichi MAEDA, Kyushu University, maeda@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Kohei MATSUMOTO, Kyushu University, matsumoto@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Shunsuke KIMURA, Shimizu Corporation
Yutaro FUKASE, Shimizu Corporation
Takashi YOKOSHIMA, Shimizu Corporation
Genki YAMAUCHI, Public Work Research Institute (PWRI)
Daisuke ENDO, Public Work Research Institute (PWRI)
Takeshi HASHIMOTO, Public Work Research Institute (PWRI)
Ryo KURAZUME, Kyushu University, kurazume@ait.kyushu-u.ac.jp

This paper presents an interface of ROS2-TMS for Construction, a cyber-physical system designed to improve the efficiency and safety in earthwork, for an OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy) compatible backhoe. We focused on the excavation and loading operations of earth and sand and confirmed that the proposed system performs these operations appropriately on an actual OPERA-compatible backhoe.

Key Words: 建設ロボット・建設機械, Robot Operating System(ROS), Cyber Physical System

1 緒言

厚生労働省の調査 [1] によると、建設業における労働災害による休業 4 日以上での死傷者数は長期的には減少傾向にあるが、令和 4 年度では死亡者数が全産業中最多となっている。建設業労働災害防止協会の調査 [2] によると、建設機械・クレーン等災害による死亡災害は、建設業における死亡者数全体の 38.2% を占めるため、建設機械による死亡災害の防止は急務といえる。また、建設業就業者数は減少傾向にあり、就業者の高齢化も進行しているため、将来的に生産性の低下が懸念される。

以上の課題に対して、本研究では、土工作業における安全性と生産性の向上を実現するシステムとして、土工現場用サイバーフィジカルシステム (CPS) プラットフォーム ROS2-TMS for Construction [3],[4],[5],[6] の開発を進めている。ROS2-TMS for Construction では、施工現場や建設機械に設置されたセンサから収集された環境情報の蓄積・管理が可能である。また、施工計画と収集された環境情報に基づいて、ロボットおよび電子制御対応型建設機械に動作指令を与えることで自律施工の実現を目指している。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为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。

一方で、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 [7]。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。

そこで、ROS2-TMS for Construction において OPERA 対応型建設機械を利用するためのインターフェースの役割を果たす TMS_IF_for_OPERA モジュールの開発に取り組む。本稿では特に、OPERA 対応型バックホウを使用するために開発した ROS2 ノードについて述べる。また、開発した ROS2 ノードを用いて ROS2-TMS for Construction と OPERA を連携させ、OPERA 対応型バックホウを実環境上で自律動作可能であることを確認した実証実験について報告する。

2 ROS2-TMS for Construction

2.1 概要

ROS2-TMS for Construction は、土工現場向けサイバーフィジカルシステムであり、現場および建設機械に設置されたセンサにより取得された環境情報を蓄積・管理し、施工の安全性・生産性の向上を図っている。ここで、ROS2-TMS for Construction の構成を Fig.1 に示す。以下に、ROS2-TMS for Construction の構成要素である各モジュールの説明を記す。

Database (TMS.DB)

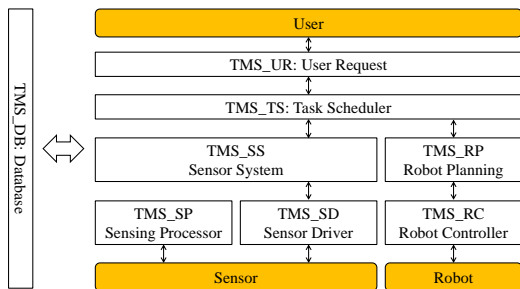


Fig.1 Architecture of ROS2-TMS for Construction.

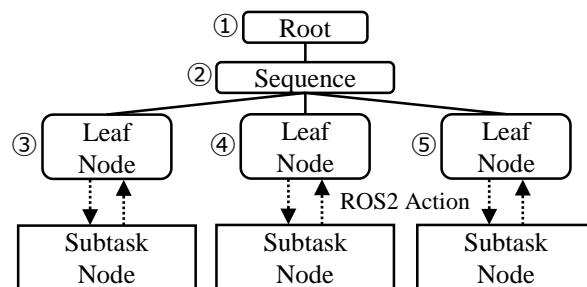


Fig.2 An example of a task raw.

ROS2-TMSにて扱う環境情報およびタスク情報を管理するデータサーバである。

User Request (TMS_UR)

ユーザからタスクの要求を受け取り、TMS_TSへタスクの実行を指示する。

Task Scheduler (TMS_TS)

TMS_URから渡されたタスクを、作業の最小単位であるサブタスクに分割し実行する。

Sensor System (TMS_SS)

センサの計測値をより高次の環境情報へ変換しTMS_DBに保存する。

Sensor Driver (TMS_SD)

センサを動作させ、得られた計測値をTMS_SSに送信する。

Sensing Processor (TMS_SP)

センサの計測値を適切に処理し、TMS_DBに保存する。

Robot Planning (TMS_RP)

ロボットの動作に必要なサブタスクを実行するために、ロボットの動作を計画する。

Robot controller (TMS_RC)

計画された動作を実現するためにロボットを制御する。

2.2 TMS_TS

後述するTMS_IF_for_OPERAは、TMS_TSとOPERAを接続するモジュールであるため、特にTMS_TSについて説明する。TMS_TSでは、タスクの構成・実行にBehavior treeを利用して、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[5]。タスク列の例をFig. 2に示す。Fig. 2におけるSequenceノードは、自身の子孫について深さ優先探索を行い、優先度の高い順にノードを実行する。リーフノードは、サブタスクノードに、サブタスクを実行する建設機械の識別子およびサブタスクの実行に必要なデータが格納されたレコードの名称を送信する。サブタスクノードは、リーフノードから受け取った情報を元に、TMS_RPへサブタスクの実行に必要な動作計画を依頼する。各ノード間の通信はROS2アクションを利用しており、各ノードの実行状況をより上位のノードに伝達可能なため、サブタスクの進捗を把握・管理できる。なお、本研究では、TMS_IF_for_OPERAが、TMS_RPの代わりにサブタスクノードからROS2アクションを受け取り、OPERAに指令を出す。

3 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. 3に示す。OPERA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。

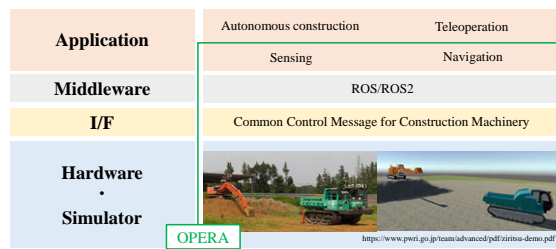


Fig.3 Architecture of OPERA.

3.1 zx200_ros2

zx200_ros2[8]は、ZX200（日立建機）をベースとしたOPERA対応型バックホウ（以降、単に「ZX200」と表記）を実環境及びシミュレータ上で動作させるためのROS2パッケージ群である。OPERAでは、ZX200の動作計画・制御にMoveIt[9]を利用しており、旋回部、ブーム関節、アーム関節、バケット関節の動作計画・実行が可能となっている。実環境にてZX200を動作させる際のノード構成をFig. 4に示す。

4 TMS_IF_for_OPERA

TMS_IF_for_OPERAは、ROS2-TMS for ConstructionとOPERAを連携するためのノード群から成るモジュールである。本章では、TMS_IF_for_OPERAがROS2-TMS for ConstructionとOPERAを接続する方法について説明する。

ROS2-TMS for Constructionでは、TMS_URにてユーザからタスクの要求を受け取り、TMS_TSにてタスクを、作業の最小単位であるサブタスクに分割し、実行する。サブタスクを実行する際、まず、サブタスクノードからTMS_RPにそのサブタスクの実行に必要な情報がROS2アクションゴールとして渡され、TMS_RPにてロボットの動作計画が行われる。そして、計画された動作はTMS_RCに伝達され、ロボットが制御される。ここで、各ロボットごとに定義されるモジュールはTMS_RP以下のモジュールであり、OPERAには、TMS_RPの一部とTMS_RCの機能が含まれる。よって、ROS2-TMS for ConstructionとOPERAを連携するために、サブタスクノードとOPERAを接続するノードを開発した。以降、このノードをインターフェースノードと呼ぶ。

インターフェースノードの機能を説明するために、サブタスクノードの出力とOPERAへの入力について考える。サブタスクノードは、ROS2アクションゴールとしてTMS_RPにロボットの動作計画に必要な情報を渡す。そこで、インターフェースノードは、ROS2アクションサーバとして、サブタスクノードからゴールを受け取るようにした。特にZX200は、OPERAにおいてMoveItを用いて動作計画・実行が行われる。そのため、ZX200が実行するサブタスクに対応するインターフェースノードは、move_group_interfaceとして実装し、ZX200の目標姿勢の設定とその目標姿勢に至るまでの動作計画・実行を可能とした。

後述する実証実験では、ZX200をROS2-TMS for Constructionにて使用するために、サブタスクノードとROS2アクション通信を行うことで入力を受け取り、move_group_interfaceとして

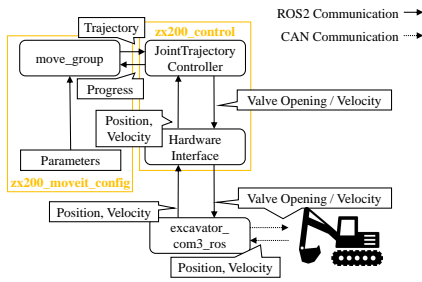


Fig.4 Node architecture when running ZX200 in a real environment.

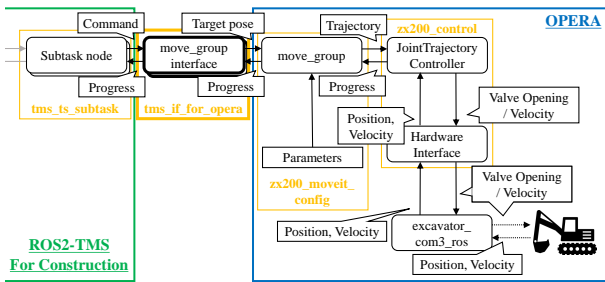


Fig.5 Node architecture when ROS2-TMS for Construction uses OPERA.

ZX200 に指令を送るインターフェースノードを設計・開発した。ROS2-TMS for Construction にて ZX200 を使用する際のノード構成を Fig. 5 に示す。なお、インターフェースノードはサブタスクごとに存在し、各インターフェースノードは tms_if_for_opera パッケージにて実装されている。

サブタスクノードとインターフェースノード間の通信は ROS2 アクションを用いて行われるため、サブタスクノードは、サブタスクの進捗状況をインターフェースノードから ROS2 アクションフィードバックの形で受け取ることが可能である。また、インターフェースノードが move_group.interface として ZX200 の動作の計画・実行を move_group ノードに要請した際、その実行結果は、要請に使用する関数の返値から把握可能であり、ROS2 アクションリザルトとしてサブタスクノードにその成否を伝達できる。そして、サブタスクノードに伝達されたサブタスクの成否は、サブタスクを管理する上位のノードに伝達されるため、ROS2-TMS for Construction と OPERA を連携させる場合でもサブタスクの実行状況の管理が可能である。

5 実証実験

本節では、ROS2-TMS for Construction と OPERA を連携させ、OPERA 対応型バックホウ ZX200 を自律動作可能であることを確認するために実施した実証実験について説明する。本実験では、バックホウを用いた施工における基本的な作業の一つである土砂の掘削積込作業をタスクとして想定した

5.1 実験方法

本実験では、LiDAR を用いて土砂の形状をリアルタイムに計測し、得られた点群を元に目標掘削位置を定め、ZX200 により掘削・積込を行う。なお、土砂場は四方を壁で囲われているとし、ZX200 は初期位置から移動せずに作業機のみを動作させ掘削積込タスクを行うとする。本実験を実施した、土木研究所内の実験フィールドの外観を Fig. 6 に示す。

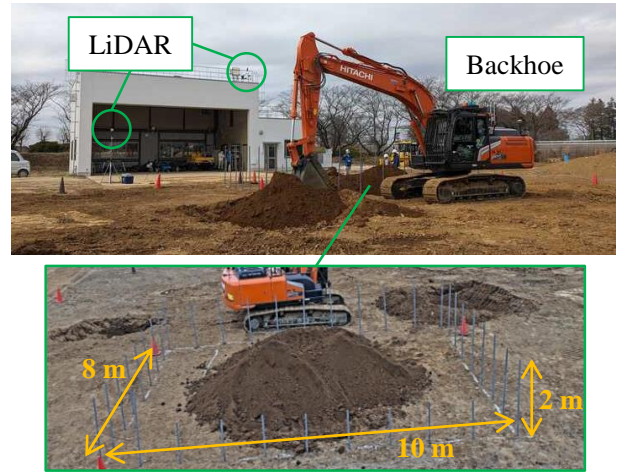


Fig.6 Experimental field in the Public Works Research Institute.

Table 1 Subtasks in the excavation task.

| 名称 | 動作 |
|------------|--------------------|
| ChangePose | バックホウを目標姿勢まで動作させる。 |
| Excavate | 掘削動作を行う。 |
| Release | 積込動作を行う。 |

5.2 サブタスクとタスク列

本実験では土砂の掘削積込タスクを、ChangePose, Excavate, Release の3つのサブタスクから構成されるタスクとした。各サブタスクの概要を Table 1 に記す。なお、本実験に際して各サブタスクに対応するインターフェースノードも併せて実装した。

本実験では、リアルタイムに目標掘削位置が更新されていることを確認するため、以下の一連の動作を複数回反復した。

1. ChangePose：初期姿勢まで動作。
2. Excavate：掘削目標位置まで動作し土砂を掘削。
3. ChangePose：土を保持したまま安全に旋回可能な姿勢まで動作。
4. ChangePose：土を保持したまま旋回。
5. ChangePose：積込動作を行う直前の姿勢まで動作。
6. Release：掘削した土砂を放す。

5.3 実験結果

実験の結果、ChangePose, Excavate, Release サブタスクおよび各サブタスクに対応するインターフェースノードを用いて、ROS2-TMS for Construction から ZX200 に対して動作指令を与え、自律的に土砂の掘削積込タスクが可能であることを確認した。実験の様子を Fig.7 に示す。

Fig. 7 に示す一連の動作を複数回反復したところ、土砂の形状に応じて掘削目標位置を更新し、掘削している様子を確認できた。また、各サブタスクを障害物と衝突することなく実行している様子を確認できた。

5.4 課題

実験の中で2点の課題が見つかった。1点目は掘削を繰り返すと土砂が手前に偏ってしまい、掘削が困難となる点である。対応策として、土砂の形状に応じてバケットで土を押し出す処理を含むタスク列の計画が考えられる。2点目の課題は、バケットに土砂を満杯に積載した状態で旋回動作を行うと、加速・減速時にバケット内の土砂が一部こぼれてしまう点である。搭乗操作時では、掘削後に土砂場中でバケットを小刻みに動かしバケットからあふ

れた土砂を振り落とすことで対応しているため、タスク列に同様の動作を含めることで対処できると考えられる。

6 結言

本稿では、ROS2-TMS for Construction にて OPERA 対応型バックホウを利用するためのインターフェースノードの開発に取り組んだ。特にバックホウによる土砂の掘削積込動作を実現するためのタスク列およびサブタスクを作成し、作成したサブタスクに対応するインターフェースノードを実装した。そして、実装したインターフェースノードを用いて ROS2-TMS for Construction から OPERA 対応型バックホウに指令を与え、土砂の掘削積込動作を自律的に行えることを、実機にて確認した。

今後は、実証実験の中で見つかった課題への対応と、ROS2-TMS for Construction にて OPERA 対応型クローラダンプを利用するためのインターフェースノードの開発およびバックホウとクローラダンプの協調動作が必要な施工の自律化に取り組む予定である。

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] 厚生労働省. 労働災害発生状況. <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei11/rousai-hassei/>. (アクセス日 05/02/2024).
- [2] 建設業労働災害防止協会. 建設業労働災害防止対策実施事項. https://www.kensaibou.or.jp/public_relations/enforcement_plan/. (アクセス日 05/02/2024).
- [3] 前田龍一, 井塚智也, 倉爪亮. 土工現場用 cps プラットフォーム ros2-tms for construction の開発. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2023, pp. 1P1-B03, 2023.6.28-30.
- [4] 前田龍一, 高野智也, 松本耕平, 中嶋一斗, 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2報 360度カメラ映像を用いた cps 可視化実験-. 第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2023, pp. 1D1-10, 2023.12.14-16.
- [5] 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, 2024.
- [6] IRVS. ROS2-TMS-FOR-CONSTRUCTION. https://github.com/irvs/ros2_tms_for_construction.git. (アクセス日 04/03/2024).
- [7] 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.
- [8] 土木研究所技術推進本部先端技術チーム. pwri-opera. <https://github.com/pwri-opera>. (アクセス日 07/02/2024).
- [9] Ioan A. Sucas and Sachin Chitta. Moveit motion planning framework. <https://moveit.ros.org/>. (アクセス日 07/02/2024).

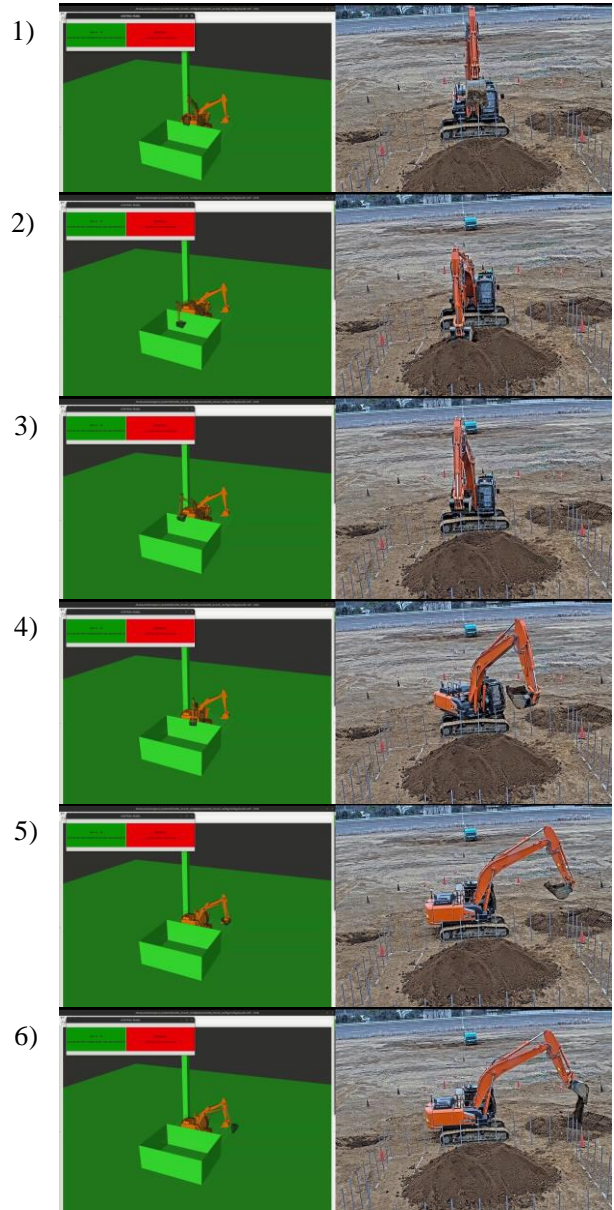


Fig.7 Experiments of autonomous excavation and loading of earth and sand by the backhoe. The left figures show the planned motion on rviz2, and right figures show the actual motions. In the left figure, darker colored backhoe represents the posture immediately before the start of the task, while the lighter colored backhoe represents the current posture.