

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 -

前田 龍一 (九州大学), ○高野 智也 (九州大学), 松本 耕平 (九州大学),
中嶋 一斗 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

ROS2-TMS for Construction: CPS platform for earthwork sites - Experiment of CPS visualization using 360-degree camera stream -

Ryuichi MAEDA (Kyushu University), ○ Tomoya KOUNO (Kyushu University),

Kohei MATSUMOTO (Kyushu University), Kazuto NAKASHIMA (Kyushu University),

and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract: This study proposes ROS2-TMS for Construction, a cyber-physical system designed to improve the efficiency and safety of earthwork operations. This system collects on-site environmental information and visualizes it in VR. In this paper, 360-degree camera images are added as new environmental information, and its usefulness is verified through earthwork experiments.

1. 緒言

厚生労働省の労働災害発生状況についての調査^[1]によると、休業 4 日以上死傷者数は、長期的には減少傾向にあるが、近年は増加傾向にあり、平成 14 年以降で過去最高を記録している。特に土木建設業における死亡者数は、全業種内で最大の約 36% を記録^[2]し、より一層の改善が求められている。一方、土工作業の効率化については IT 技術を活用した施工管理システム^[3]が開発されているものの、安全性の向上に直接的に寄与するまでには至っていない。

これに対して我々はこれまでに、土工作業効率化と安全性向上を同時に実現するシステムとして、土工現場用 Cyber-Physical System (CPS) プラットフォーム ROS2-TMS for Construction を第 1 報^[4]で提案している。CPS とは、物理世界とサイバー空間が相互に連動し、動作するように構成されたシステムのことである (図 1)。ROS2-TMS for Construction では、土工現場に設置したセンサから収集された環境情報をデータベースに保存する。保存された環境情報は、サイバー空間でのシミュレーションなどに活用され、計画されたロボットの動作などが物理世界へフィードバックされる。加えて、VR による可視化インタフェースを用いることで、保存された環境情報を高い没入感で確認できる。

しかし、第 1 報にて提案したシステム (以降「旧システム」と表記) では、収集した環境情報は 3D モデルとして VR インタフェースで確認可能であるが、仮想環境での確認であり、実際の現場の様子を具体的に把握することは困難だった。また、過去の土工作業中に取得された環境情報のみによる動作確認しか行っておらず、土工作業中でのリアルタイムな動作は未確認である。

そこで本研究では、環境情報として新しく 360 度カメラ映像を追加することで、現場のより具体的な様子を VR インタフェースから確認できるようにし、また、

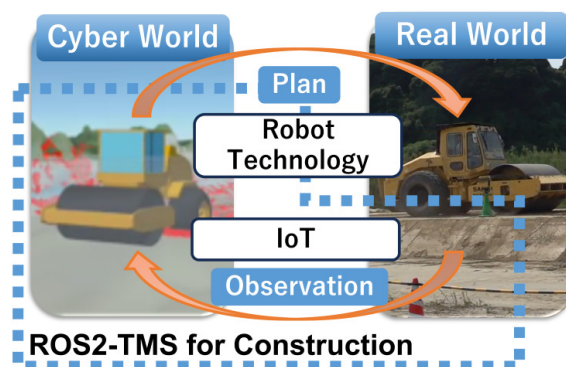


Fig.1 Concept of Cyber-Physical System and ROS2-TMS for Construction. The section outlined by the dotted line shows the latest version of ROS2-TMS for Construction.

実環境での運用を見据えて、九州大学屋外実験場 (図 2) において、土工作業中でのリアルタイムな動作確認実験を行った。

2. ROS2-TMS for Construction

2.1 概要

図 3 に ROS2-TMS for Construction のアーキテクチャ図を示す。本システムは ROS2^[5] を用いて開発されており、TMS_SD, TMS_SS, TMS_SP モジュール群でセンサから受け取ったデータを処理し、TMS_DB を介してデータベースに保存する。そして、保存されたデータは利用者やシミュレータからの要求 (TMS_UR) に応じて TMS_DB でデータベースから取得され、利用者やシミュレータに渡される。

また、本システムでは VR による環境情報の可視化インタフェースが開発されており、データベースに蓄えられている環境情報を高い没入感で確認できる。

2.2 環境情報

本研究では、以下の環境情報を扱った。



Fig.2 Bird's-eye view of the environmental site in Kyushu University.

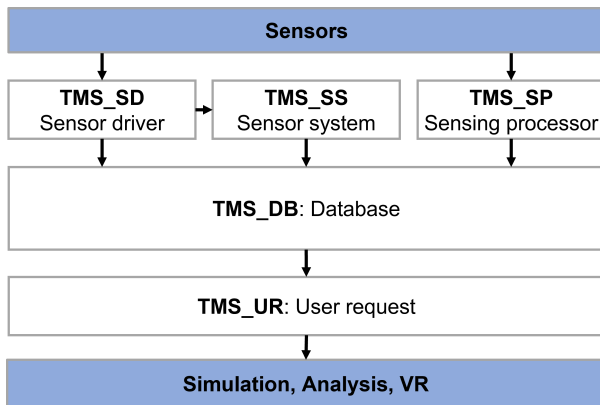


Fig.3 Architecture of ROS2-TMS for Construction.

- 建設機械の位置・姿勢情報
- 静的地形情報
- 360 度カメラ映像情報

2.2.1 360 度カメラ映像情報

旧システムを用いた VR インタフェースによる 3D モデルの表示では、現場の具体的な様子を直接的に把握することは困難という課題があった。そこで本研究では、360 度カメラ映像を追加することで、より具体的な現場の様子を確認可能とした。建設機械の位置と地形の大まかな状態や、カメラから離れた場所などはこれまでの 3D モデル表示を用いて確認し、より詳細を確認したい場所の様子は 360 度カメラ映像で確認するなど活用が想定される。

2.2.2 環境情報位置合わせ用 GUI ツール

旧システムでは、各環境情報の原点が異なっていたため、保存データの利用者が位置合わせを行う必要があり、保存データのユースケースが増える際に位置合わせの手間を考慮する必要があった。そこで本研究では、環境情報を保存する前に位置合わせを行うための GUI ツール（図 4）を開発した。本 GUI ツールでは ROS2 の座標変換ライブラリである TF を用いている。スライダを調節することで座標を変換し、座標変換後の環境情報を ROS2 の 3D 視覚化ツールである Rviz2 で確認しながら位置合わせを行う。

3. センサポッド

本研究では、360 度カメラ映像情報取得用に、土木工事における地盤剛性評価・安全管理のためのセンサポッド^[6]を 4 台使用した。センサポッドとは、土工現場で使われる三角コーンに GNSS アンテナ、3D LiDAR、カメラ、PC、バッテリーなどを搭載し、搭載したセンサで周囲の環境情報を収集するものである。

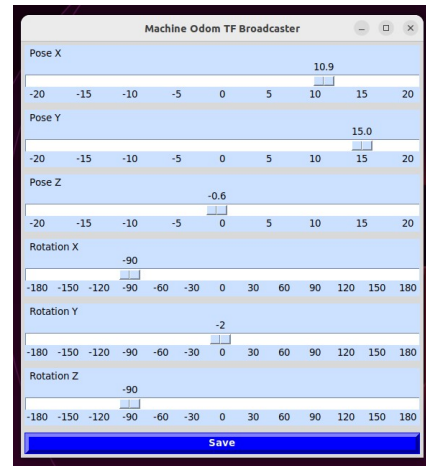


Fig.4 GUI tool for coordinate transformation.

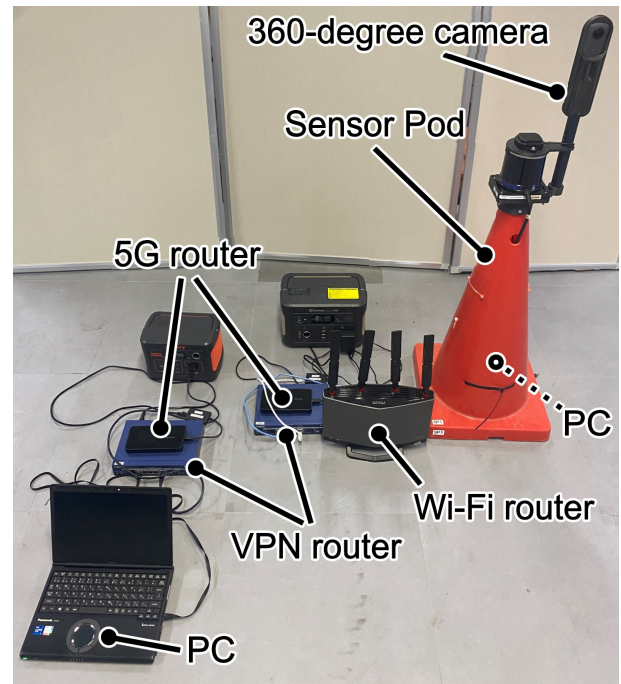


Fig.5 System configuration of a Sensor Pod.

3.1 システム構成

システムの構成図を図 5 に示す。360 度カメラ (Theta V, 株式会社リコー) を搭載するセンサポッドは、無線 (実験時は、1 台が有線) で、WiFi ルータ (WXR-6000AX12S, 株式会社バッファロー) を介して通信する。さらに、5G ルータ (Wi-Fi STATION SH-54C, 株式会社 NTT ドコモ), VPN ルータ (RTX830, ヤマハ株式会社) を用いて、ROS2-TMS for Construction と接続する。センサポッドは、内蔵のバッテリー駆動で PC (NUC, インテル株式会社) によって制御され、ROS2 通信を用いてカメラ映像情報を送信する。また、ここで用いた 5G 電波は図 6 の九州大学伊都キャンパス内の基地局から発射される。

3.2 ネットワーク構成

ネットワークの構成図を図 7 に示す。センサポッドは、株式会社 NTT ドコモの 5G SA と MEC ダイレクト^[7]を用いたネットワークで、ROS2-TMS for Construction

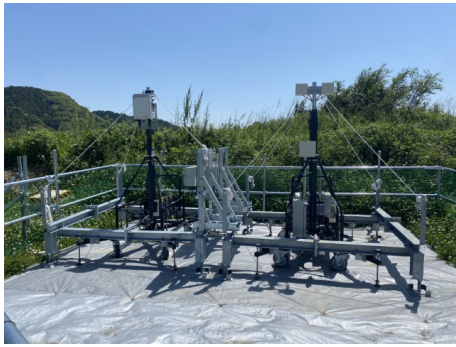


Fig.6 Base station of 5G radio waves.

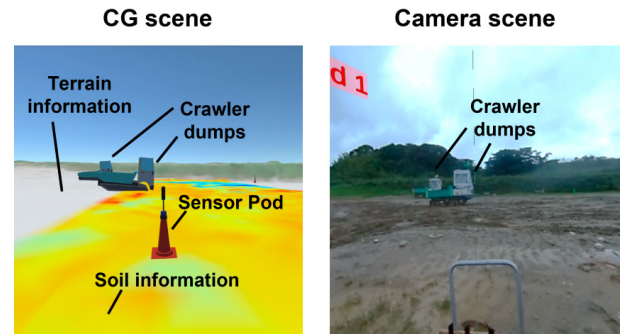


Fig.8 CG and camera images displayed on VR interface

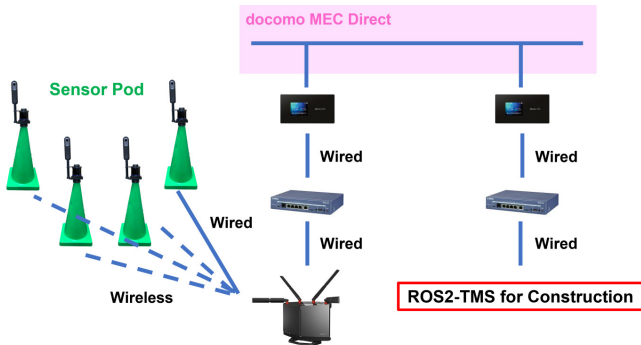


Fig.7 Network configuration of Sensor Pods.

と接続され、双方に VPN ルータを設置することにより、VPN 接続を行う。5G には NSA (Non-Stand Alone) 方式と SA (Stand Alone) 方式が存在する。NSA 方式は 4G と 5G 両方の電波を利用する必要があるのに対し、SA 方式では、5G 電波のみでの通信が可能のため、より高速な通信を実現する。また、MEC ダイレクトとは、接続端末と MEC 基盤を直結して通信経路を最適化することで、低遅延・高セキュリティ通信を実現するサービスである。これらを利用することで、通信の大幅な高速化を図っている。

しかし、この構成ではサブネットが異なるため、二点間での ROS2 通信が不可能である。そこで、ROS2 通信に用いられている FASTDDS^[8] の Discovery Server^[9] の機能を用い、異なるサブネット間での ROS2 通信を実現した。

4. VR による可視化インタフェース

旧システムと同様に、インタフェース開発には Unity を用いた。一方、旧システムと異なる点は、360 度カメラ映像表示用のシーンを追加したことである。これにより、本システムは以下 2 つのシーンを持つ (図 8)。

- **CG シーン**：静的地形のメッシュオブジェクトや建設機械の 3D モデルが描画されるシーン
- **カメラシーン**：360 度カメラ映像が描画されるシーン

4.1 ROS-TCP-Endpoint

ROS と Unity アプリケーション (VR インタフェース) 間の通信には ROS-TCP-Endpoint パッケージ^[10] を用いている。例として、本パッケージによる ROS と Unity アプリケーションのトピック通信の流れを図 9 に示す。

本パッケージにより、ROS と Unity アプリケーション

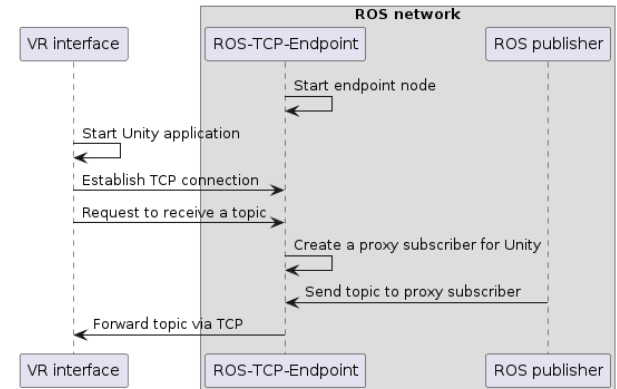


Fig.9 Sequence diagram of communication between ROS and Unity application.

ン間での通信が可能であるが、一度 Unity アプリケーションからの要求によって立ち上げられたノードは、エンドポイントノードが終了するまで起動状態が続く仕様である。これにより、カメラシーンと CG シーンが切り替わる際にそれぞれのシーン用に立ち上げられたノードの起動状態が継続されるため、センサポッド 4 台分の 360 度カメラ映像トピックと、CG シーン用のトピック通信によるネットワーク負荷増大を招く。

土工作业が行われる現場はネットワーク制約のあるケースが多いため、本課題の解決は特に重要である。そこで本課題解決に向けて、以下 2 つに取り組んだ。

1. ROS-TCP-Endpoint を CG シーン用とカメラシーン用で 2 つ起動
2. シーン切り替え時の TCP コネクションの切断をトリガーに、ROS-TCP-Endpoint で立ち上げられたノード削除

図 10 に、これらの改善によるネットワーク使用量の変化を示す。カメラシーン起動時には、改善前と改善後ともに 360 度カメラ映像を受信するためのノードが立ち上がり、トピックの送受信が行われるため、ネットワーク使用量が増大しているのが分かる。カメラシーン終了時に注目すると、改善前はカメラシーンを終了してもネットワーク使用量に変化はなく、360 度カメラ映像トピックがネットワークに使用量をかけ続けてしまっている。しかし、改善後はカメラシーン終了のタイミングで 360 度カメラ映像受信用のノードが削除されるので、ネットワーク負荷を大きく下げられていることが分かる。

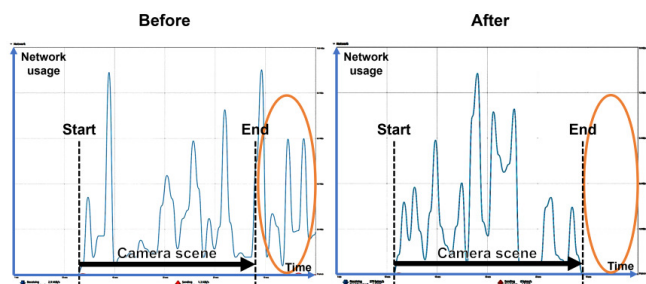


Fig.10 Changes of network traffic by the system improvement.

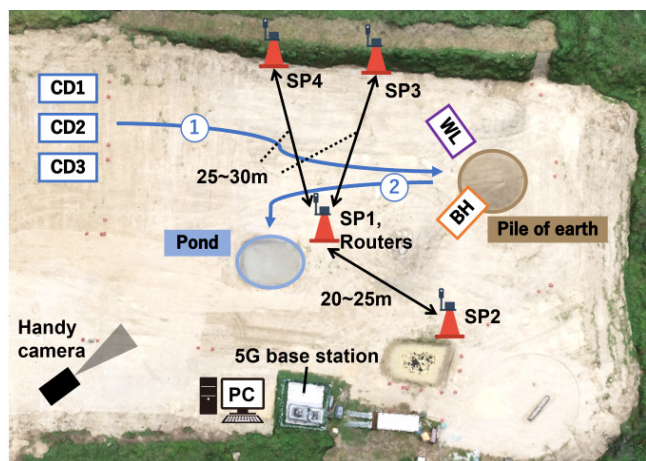


Fig.11 Experimental environment.

5. 実験

複数台の建設機械による土山の掘削と運搬作業を対象に、本システムの VR インタフェースの CG シーンとカメラシーン両方において、現場の様子がリアルタイムに反映されているかを確認した。VR ゴーグルには Meta Quest Pro (Meta Platforms, Inc.) を使用した。

5.1 実験環境

図 2 に示す九州大学の屋外実験場で実験を行った。使用した建設機械は以下の通りである。

- クローラダンプ (CD) 3 台
- バックホウ (BH) 1 台
- ホイールローダ (WL) 1 台

図 11 は、センサポッド (SP) の配置と土工作業の流れを示したものである。基本的な作業の流れを以下に示す。

1. クローラダンプが土山まで進み、ホイールローダもしくはバックホウによって掘削された土を荷台に積む。
2. 受け取った土を中央の池に運び、降ろす。

ROS2-TMS for Construction は 5G 基地局の隣で稼働させた。図 7 で示した、センサポッド側の Wi-Fi ルータ、VPN ルータ、5G ルータは SP1 の隣に配置した。ROS2-TMS for Construction 側の VPN ルータと 5G ルータは、ROS2-TMS for Construction を動作させている PC の隣に配置した。また、実験現場の静的な地形は、あらかじめドローンを用いて計測した。なお、実験の記録として、現実世界での土工作業の様子はハンディカメラで録画した。

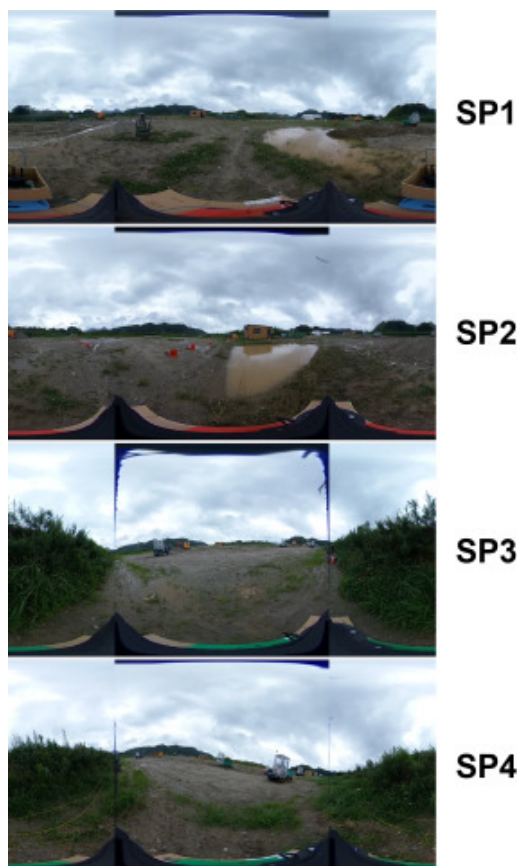


Fig.12 Images captured by 360-degree cameras mounted on Sensor Pods.

5.2 結果

図 12 に、各センサポッドに搭載した 360 度カメラから送信された画像をセンサポッド制御用 PC に表示した様子を示す。この画像より、すべてのセンサポッドと制御用 PC 間で正常に通信できることを確認した。

次に、図 13 に VR インタフェースに表示された CG シーンと SP1 でのカメラシーン、そしてハンディカメラで録画された土工作業の様子を示す。CG シーンについては、静的地形のメッシュオブジェクトとリアルタイムな建設機械の位置・姿勢を反映した建設機械の 3D モデルを表示できていることを確認した。また、図 14 のように、CG シーン内を自由に移動し、センサポッドを選択してカメラシーンに切り替えることで様々な視点から土工作業の様子を確認できた。しかし、バックホウとホイールローダによる土山の掘削や、クローラダンプが土を降ろす様子を CG シーンから確認することができないため、現在の作業の詳細な様子を読み取るのは難しかった。カメラシーンについては、約 1 秒間の遅延や画質の粗さはあるものの、表示自体は問題ないことを確認した。また、CG シーンからは読み取れなかったバックホウとホイールローダによる土山の掘削と、クローラダンプが土を降ろす様子を確認することができた。

5.3 考察

本研究では、カメラシーンの追加によって、CG シーンで確認するのが難しかった掘削作業の様子を確認できるようになった。しかし、長時間の土工作業で地形

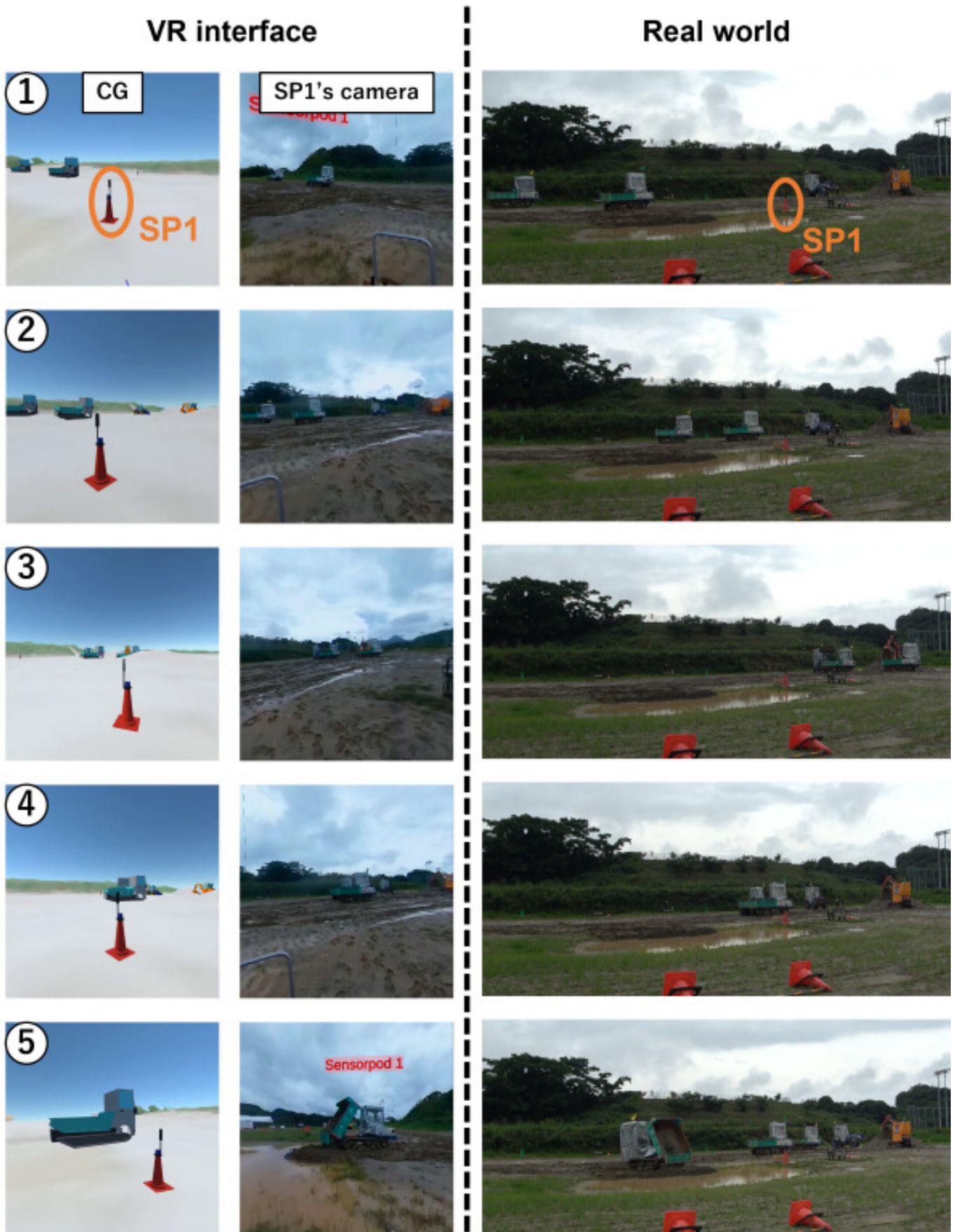


Fig.13 Comparison of images displayed on the VR interface and the real site during the earthwork operation.

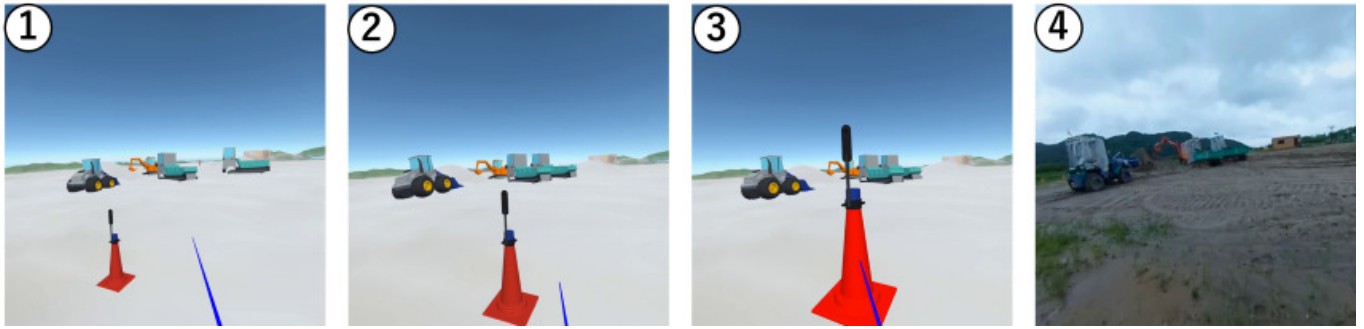


Fig.14 Movement in CG scene and switching to camera scene.

が大きく変化すると、現実と CG シーン間での乖離が大きくなり、頻繁にカメラシーンを確認する必要性が生じる。そのため、今後は現場に設置した 3D LiDAR によって得られる点群データをもとにした静的地形の更新に取り組む。

一方、360 度カメラ映像の遅延は、カメラで撮影された後の H.264 形式のデータをセンサポッド側でデコードし、データサイズの大きい JPEG 形式で ROS2-TMS for Construction, VR インタフェースへ送信していること、つまりネットワークを圧迫していることが原因として考えられる。今後は H.264 形式のデータをセンサポッドからそのまま送信し、カメラ映像の利用者側、すなわち VR インタフェース側でデコード処理することで改善を図る。

6. 結言

本研究で目的としていた、土工作業中のリアルタイムなデータを用いたシステムの動作と、360 度カメラ映像の配信を確認できた。しかし、5.3 節で述べたように、本システムを実際の現場で活用するにはまだ改善すべき点があるため、今後はこれら課題に取り組む。

また、本システムは CPS という点で、物理世界からサイバー空間方向へのやり取りは実現できているが、サイバー空間から物理世界へのやり取りは実現できていない (図 1)。CPS の実現に向けて、今後はサイバー空間からの建設機械の制御を目標とし、新たに TMS_TS (Task Scheduler, 建設機械のタスク計画) モジュールと TMS_RC (Robot Controller, 建設機械の制御) モジュールの開発に取り組む。

謝辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 厚生労働省: 令和 4 年 労働災害発生状況. Accessed on 11.09.2023. URL: <https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/001100029.pdf>.
- [2] 厚生労働省: 令和 4 年労働災害発生状況の分析等. Accessed on 11.09.2023. URL: <https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/001099504.pdf>.
- [3] 株式会社建設システム: デキスパート. Accessed on 11.09.2023. URL: <https://www.kentem.jp/product-service/dekispart/>.
- [4] 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, 1P1-B03, (2023).
- [5] Open Robotics: *ROS2 Documentation: Humble*. Accessed on 19.09.2023. URL: <https://docs.ros.org/en/humble/>.
- [6] 福田健太郎, 中嶋一斗, 玉石祐介, 前田龍一, 松本耕平, 倉爪亮: “土木工事における地盤剛性評価・安全管理のための分散型センサポッドの開発”. ロボティクスシンポジウム講演論文集 28, pp. 187-190, (2023).
- [7] NTT ドコモ: *MEC ダイレクトとは*. Accessed on 10.09.2023. URL: <https://www.mec.docomo.ne.jp/document/docs/mec-direct-ph2/concepts/overview.html>.
- [8] eProsima: *Fast DDS documentation*. Accessed on 10.09.2023. URL: <https://fast-dds.docs.eprosima.com/>.
- [9] eProsima: *Use ROS2 with Fast-DDS Discovery Server*. Accessed on 10.09.2023. URL: https://fast-dds.docs.eprosima.com/en/latest/fastdds/ros2/discovery_server/ros2_discovery_server.html.
- [10] Unity-Technologies: *ROS-TCP-Endpoint*. Accessed on 19.09.2023. URL: <https://github.com/Unity-Technologies/ROS-TCP-Endpoint>.