

土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発 -第5報 没入感 VR インターフェース OperaSimVR の開発-

○秋成 光太 (九州大学), 笠原 侑一郎 (九州大学), 高野 智也 (九州大学),
松本 耕平 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

Development of CPS platform ROS2-TMS for Construction for earthwork sites - OperaSimVR: Immersive VR interface for OperaSim -

○ Kota AKINARI (Kyushu University), Yuichiro KASAHARA (Kyushu University),
Tomoya KOUNO (Kyushu University), Kohei MASTUMOTO (Kyushu University),
and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract: We are developing a Cyber Physical System (CPS) platform for earthwork sites, ROS2-TMS for Construction. In this paper, as part of ROS2-TMS for Construction, we introduce an immersive VR interface named OperaSimVR based on OperaSim, an OPERA simulator developed by the Public Works Research Institute, for confirming environmental information of earthwork sites in cyberspace.

1. 緒言

建設業界においては近年、少子高齢化による就業者の高齢化や減少といった問題があり、土工現場での作業の効率化が求められる。加えて、労働災害を減少させる取り組みも求められている。これらの解決策として、我々は土工現場用 Cyber Physical System(CPS)プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発を行っている。CPS とは実空間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。ROS2-TMS for Construction 開発の第1報^[1]では地形や建機の位置といった環境情報を実空間の土工現場に提供するために、土工現場をサイバー空間上に作成した可視化インターフェースの開発を行った。第1報のシステムでは、土工現場の重機の位置・姿勢情報を、環境に複数設置した 3D LiDAR で収集し、独自に開発したシミュレータで重機の動作を再現するものであった。今回、これを土木研究所が開発を進めている自律施工技術基盤 OPERA の公式シミュレータである OperaSim をもとに、実機からの位置・姿勢情報を用いてサイバー空間上の建設機械のモデルが動作するように変更し、実空間の建設機械とサイバー空間上の建設機械のモデルが相互に連動して動作する没入感 VR インターフェース OperaSimVR を開発した。本稿では、このシステムの詳細と、実機と接続して行った実験に関して報告する。

2. ROS2-TMS for Construction

ROS2-TMS for Construction のアーキテクチャ図を Fig.1 に示す。ROS2-TMS for Construction は、土工現場用のサイバーフィジカルシステムである。施工の効率化を目的とし、土工現場において現場や建機に設置したセンサーからの環境情報をデータベース上に保管・管理する。また、この環境情報を用いて建機の制御を行う。以下では各モジュールについて簡単に述べる。

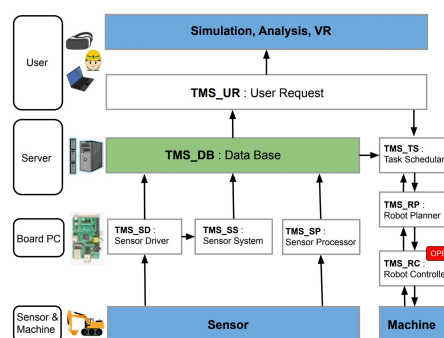


Fig. 1 Architecture of ROS2-TMS for Construction.

- tms_db
環境情報やタスクの情報の保存・管理を行うデータベースである。
- tms_sd
センサからの情報の処理を行い、tms.ss に渡す。
- tms_sp
センサからの情報の処理を行い、tms.db に渡す。
- tms.ss
tms.sd から受け取ったセンサからの情報を、より高次の情報に変換し、tms.db に渡す。
- tms.ts
tms.ur からのタスク命令を、サブタスクに分割し、tms.rp に渡す。
- tms.rp
tms.rp から受け取ったサブタスクを適切に実行するために、建機の動作を計画する。
- tms.rc
tms.rp から受け取った計画通りに建機が動作するように建機を制御する。
- tms.ur
ユーザーからのタスク命令を受取り、tms.ts に渡す。ユーザーへは、tms.db から受け取った環境情

報を提供する。

本研究のシステムでは、ドローンや重機に取り付けた GNSS, IMU, 角度センサなどから、地形や重機の位置、姿勢などの環境情報を受け取り、これを基にサイバー空間上に土工現場、および重機の動作を再現し、ユーザーに提供する。

3. 没入感 VR インターフェース OperaSimVR

3.1 OperaSim について

OperaSim は、土木研究所が Unity 上に物理エンジン PhysX, AGX を利用して開発した自律施工技術基盤 OPERA の公式シミュレータである。OperaSim では、OPERA 対応の実機と同様に ROS2 の node を立ち上げ、ROS-TCP-Endpoint により操作 PC と接続する。その後、操作 PC からの操作指令 topic を受信すると、シミュレータ上の重機のモデルが重力や摩擦などの影響を計算して動作する。また、実機同様に位置情報や関節角の情報をフィードバックとして送信する。

3.2 OperaSimVR の可視化機能

開発した OperaSimVR では、Opera 対応の実機の重機から ROS2 の topic として受信した位置情報や関節角の情報を用いて、重機のモデルの位置や関節角が実機と連動して動作するように OperaSim を拡張した。これにより、実機の動作を OperaSim 上から見る事ができる。

具体的に、OperaSim は、元々実機のシミュレータであるため、OperaSim 上の重機のモデルは、クローラの回転角度やアームの関節角指令値の ROS2 の topic を受信して、実機のように重力や摩擦の演算を行って動作する (標準モード)。そこで、この重機のモデルが実機からの実際の位置や関節角の情報の topic を受信し、それを真値として動作するモード (再生モード) を新たに追加した。さらに Unity の VR 用のアセットを使って VR で没入して実機の動作を見ることが出来るようにした。このシステムでは、カメラの位置は自由に設定できることから、カメラを重機のモデルの運転席の位置へと移動させ、重機と連動して動くことで、重機の運転席に搭乗しているような映像を VR で見ることが出来る。更に実際の重機を動作させる土工現場の地形データを使って、PhysX や AGX などの物理エンジンによりシミュレータの地面を変形させることで、重機を含めた実際の土工現場の様子をサイバー空間上に作成できる。さらに、サイバー空間の土工現場を自由に俯瞰して見ることも可能であり、実際の土工現場では近づくことのできない動作中の重機の周囲や崩落の恐れのある地盤の付近の様子も確認可能である。

システム内の重機のモデルが取得している情報は以下の2つである。

- 位置情報
実機がフィードバックとして送信しているグローバル座標 (平面直角座標) 系における車両の中心姿勢位置 (座標と回転) の topic を受信して、システム上のモデルの位置と回転を変更する。
- 関節角情報
実機がフィードバックとして送信している各関節の角度の topic を受信して、システム上のモデルの姿勢を変更する。油圧ショベル (zx200, 日立建機)

では、スウィング、ブーム、アーム、バケットを実機の関節角情報をもとに動作させる。

実機と操作 PC, OperaSimVR を接続したシステムにおける情報の送受信の様子を Fig. 2 に示す。このシステムを使用する際には、重機操作用の PC で実機操作の node と ROS-TCP-Endpoint を立ち上げて、OperaSimVR を実行する PC と接続して、Air link でシステムと VR ゴーグルを接続して、実機からの情報を VR ゴーグルに出力する。VR ゴーグルを接続せずに使用することも可能であり、この場合はシステムを実行する PC でサイバー空間上の土工現場を俯瞰して見ることが可能である。

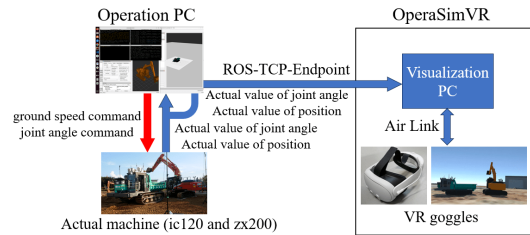


Fig. 2 Connection between actual machine, Operation PC and OperaSimVR.

3.3 OperaSimVR の操縦機能

今後、自律化施工の際には、イレギュラー (想定外) な事象が発生することも考えられ、重機を個別に動かして対応する必要も生じる。そこでこのシステムを用いて VR のコントローラーで実際の重機を操縦してイレギュラーな事象へ対応することを試みている。その前段階として、開発した可視化ツールとは別に標準モードの OperaSim を立ち上げ、OperaSim 内の重機のモデルに VR のコントローラーで動作指令を topic として送信することで操縦可能とした。このシステムでは、OperaSimVR は、VR のコントローラーの入力を OperaSim 内で受け取って重機のモデルを操縦するための topic を送信する。この時、重機のモデルの運転席に搭乗しているような映像を VR で見ながら操作するため、実際の重機が動作しているのを重機の運転席から眺めているような映像を VR で見ることが出来る。この操縦シミュレータ機能で操縦できる動作は以下の操作である。

- 対地速度指令 (移動指令)
VR のコントローラーの操作に応じて OperaSim の重機のモデルを動作させるための topic を送信して、システム上のモデルの位置を移動する。
- 関節の角度指令
VR のコントローラーの操作に応じて OperaSim の重機のモデルを動作させるための topic を送信して、システム上のモデルの姿勢を変更する。クローラダンプの場合は、荷台の角度を操縦できる。油圧ショベルの場合は、スウィング、ブーム、アーム、バケットを操縦できる。

クローラダンプに関しては、第2段階として開発した OperaSimVR と標準モードの OperaSim とを接続して操縦することを試みた。OperaSimVR から VR のコントローラーの入力に応じて標準モードの OperaSim の重機のモデルを動作させるための topic を送信する。これを

重機のモデルを操作するための node を立ち上げた PC で受け取り、標準モードの OperaSim 内の重機のモデルの位置を移動させる。そして、標準モードの OperaSim から位置情報を受信して OperaSimVR の重機のモデルの位置を移動する。この時の OperaSimVR と実機役の OperaSim, ROS2 の node を立ち上げた PC の接続の様子を Fig.3 に示す。このシステムを使用する際には、操作作用の PC で操作作用の node と ROS-TCP-Endpoint を立ち上げて、OperaSimVR を実行する PC と接続して、Air link でシステムと VR ゴーグルを接続する。Fig.4 は、今回開発した OperaSimVR と標準モードの OperaSim とを接続し、クローラダンプ (ic120, 加藤製作所) のモデルを操縦しているときの OperaSimVR と標準モードの OperaSim の様子である。

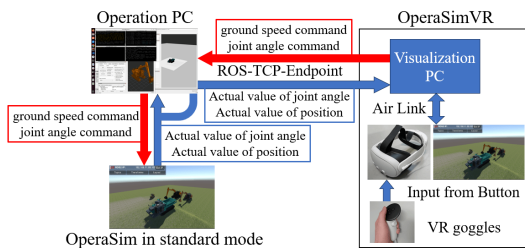


Fig. 3 Connection between OperaSim in standard mode, Operation PC and OperaSimVR.

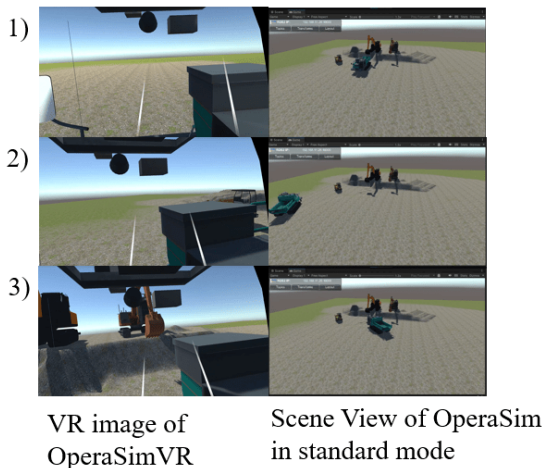


Fig. 4 Control of crawler dump(ic120) from OperaSimVR by connecting OperaSimVR to OperaSim in standard mode, which acts the actual machine.

4. 実機と OperaSimVR とを接続した動作実験

4.1 実験の概要

土木研究所の実験フィールドにおいて実験を行った。実機は、OPERA 対応の油圧ショベル (zx200, 日立建機) を 1 台と OPERA 対応のクローラダンプ (ic120, 加藤製作所) を 1 台用いた。本実験では、油圧ショベルで土山を掘削し、クローラダンプに積土する動作を繰り返した後、クローラダンプが放土位置まで走行し、積土位置まで戻ってくるという動作を行って、システムの動作の検証を行った。可視化システム上にも同様に油圧ショベルの zx200 のモデルを 1 台とクローラダンプ

の ic120 のモデルを 1 台配置した。今回、油圧ショベルは正確な位置情報を出力しない状態であったため、地形から手動でシステム上の位置を決定した。クローラダンプに関しては、フィールドの基準点の座標を引くことで、GNSS で得られたグローバル座標からマップ座標に変換した。地形に関しても土木研究所の実験フィールドの地形データを取り込んで、可視化システム上に実験フィールドの地形を作成した。地形のフィールド外の部分及び掘削する土山は、PC への負荷を軽減するために省略した。加えて、周囲の建物も作成した。

実験では、2 つの重機を実際に動作させて、OperaSimVR を接続して VR で没入することでシステムの動作の様子を観察した。システム上で重機の運転席に搭乗した様子と実機を動作を比較するために、実機の運転席にカメラを搭載して実験を行った。実機を操作する PC への負荷を軽減するために実機を操作する PC とは別に PC を用意し、ROS ドメイン ID を実機と一致させ、ROS-TCP-Endpoint を立ち上げてシステムと接続した。

4.2 実験の結果

Fig.5~9 に、OperaSimVR で作成した作業時の没入感画像と、カメラで撮影した実環境の様子を示す。Fig.5 は、掘削動作時のシステム内のサイバー空間と実空間の様子である。システム内の重機の位置や zx200 の姿勢を実空間のものと比較すると、位置関係や姿勢がほとんど同じであると分かる。Fig.6~9 は、土山の掘削、積土時の実世界の俯瞰画像、及び zx200 の運転席から見た実世界の画像とシステムの画像、積土位置、放土位置での実世界の俯瞰画像、及び ic120 の運転席から見た実世界の画像とシステムの画像である。地形データが古いものであったことや実機にカメラを固定する際の差異から建物の見え方や地形が異なる点もあったが、サイバー空間と現実空間の建設機械のコクピットから見える景色は、ほぼ同じであった。また、接続時には実機との時間遅れはほとんどなかった。

なおシステムを動作させ、システムと実機と接続すると、没入してサイバー空間内を移動する際に映像が止まるなど、システムの動作が重くなることがあった。これは、地形データを読み込みテクスチャを張り付けたことに加えて、実機からの topic を受信して重機のモデルを動作させる処理を行ったことで、PC 自体の負荷が大きくなったことが原因であると考えられる。また、実機との通信が不安定であり、受信する速度が一定でなかったこともシステムの動作がやや遅くなった原因と考えられる。地形データに関しては、取り込んだデータが現在のものではなく、古いデータであったため現在の地形データとは異なる部分もあった。この技術を実際に現場で使うには、定期的にドローンを飛ばして現場の地形データを更新することでこの問題は解消できると考えられる。

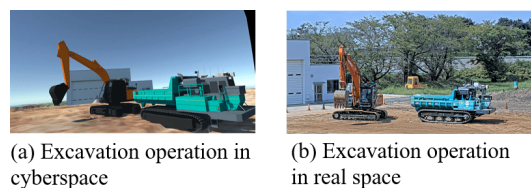


Fig. 5 Excavation operations in cyberspace and real space.

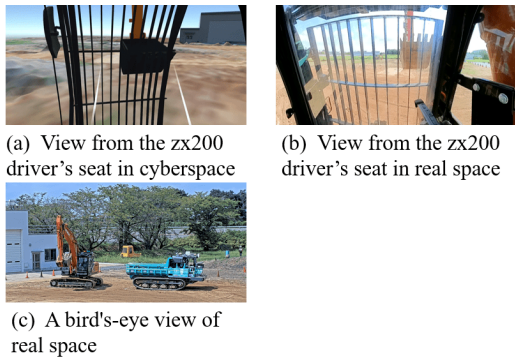


Fig. 6 Views from the zx200 driver's seat in cyberspace and real space during excavation.

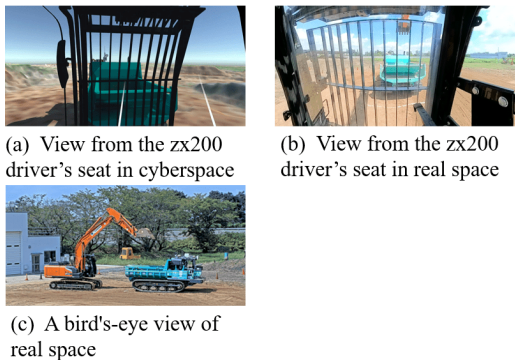


Fig. 7 Views from the zx200 driver's seat in cyberspace and real space during loading.

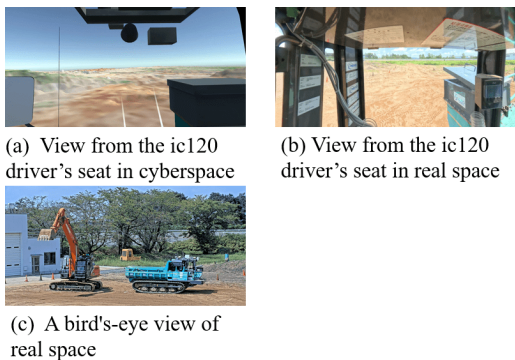


Fig. 8 Views from the ic120 driver's seat in cyberspace and real space during loading.

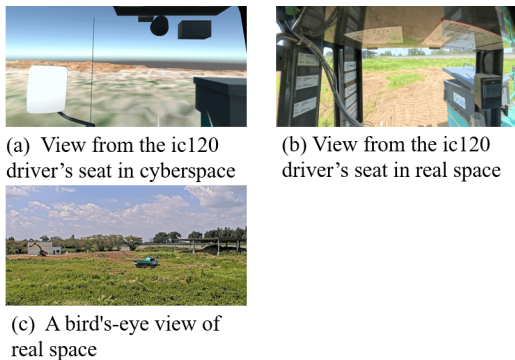


Fig. 9 Views from the ic120 driver's seat in cyberspace and real space during dumping.

5. 結言

本研究では、実機からの位置・姿勢情報を基にサイバー空間上の重機のモデルを動作させ、地形データを取り込むことでサイバー空間上に土工現場を作成し、VRにより没入感高く提示する可視化インターフェース OperaSimVR を開発した。実際の重機と接続して行った実験では、サイバー空間上に作成した実験フィールドと実空間で同じように動作することが確認された。この実験では、処理が重くなってしまうという課題もあった。今後は、実験により判明した課題の解決に加えて、以下に取り組む予定である。

- 実機の VR のコントローラーからの操縦
現時点では、標準モードの OperaSim 内または OperaSimVR から実機役の標準モードの OperaSim を操縦を可能にしたため、これを OperaSimVR と実機と接続して操縦可能にする。
- シミュレータによる動作予測
実機を動作させる前に、VR コントローラーからの指令値により OperaSim を用いて重機と環境の挙動を予測し、安全を確認してから実機を動作させるシステムを開発する。

6. 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] 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.
- [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, 2A1-B06, 2024.5.30-31.
- [3] IRVS, ROS2-TMS FOR CONSTRUCTION, https://github.com/irvs/ros2_tms_for_construction. (アクセス日 09/21/2024).
- [4] 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>. (アクセス日 09/19/2024).