

自律施工の技術開発促進に向けたDXの取組み ～自律施工技術基盤“OPERA”の紹介～

遠藤大輔・山内元貴・鈴木裕敬・橋本 毅

1. はじめに

建設業界は深刻な人手不足にあり、少子高齢化の潮流を受け、労働力不足は今後さらに加速すると見込まれる。こうした背景の下、国土交通省は「インフラ分野のDXアクションプラン」を策定しており、その柱の一つとして現場作業の遠隔化・自動化・自律化を掲げている。一人のオペレータが複数の自動化された建機を同時に運用しながら建設工事を行う自律施工では、高速無線通信やロボティクス、AI等の先進的な技術を有する新たな協力者と建設業界との協力が不可欠である。しかし、これまで建設業界と関りがなかった方々にとって、建機を外部機器からの制御が可能となるよう改造した上で保有し、開発成果物の検証の為にフィールドを確保する、といったことは容易ではなく、新たな協力者の参入を困難にしている。

このような問題に対し、土木研究所では、建設業界外からの参入を促すことを目的として、誰もが利用可能な自律施工技術基盤の整備を進めている¹⁾。OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy) と名付けられた、このオープンなプラットフォームを活用することで、開発成果物の再利用性を高めることに加え、研究・投資の重複回避や先進的な技術を有する大学やベンチャー企業等との協力が容易になると期待される。結果として、自律施工の技術課題に取り組む人材が国内に増え、将来的な国際競争力の確保につながると期待できる。本稿では、OPERAの開発状況と今後の開発方針や展望について記す。

2. オープンプラットフォームOPERA

OPERAは、自律施工を実現するための研究開発環境と捉えることができ、ユーザーが研究開発をしたい対象（例として、建機の自動運転ソフト



図-1 OPERAのシステム構成

ウェア、シミュレーションモデル、建機ハードウェア等)へ注力できるようにするための枠組みである。要素としては共通制御信号、ミドルウェア、シミュレータ、実機および試験場を含む実証試験環境により構成される(図-1)。以降の小節では、各構成要素について詳細を記す。

2.1 共通制御信号

開発するシステムの再利用性を確保することは、開発の費用対効果を向上するために重要である。加えて、自律施工を推し進めるためには、異なるメーカーの異なる機種を横断的に制御できることが望ましい。土木研究所では、異なる建機でも同様に制御が可能となるよう、外部装置から建機を動作させる際の統一的な通信インターフェースとなる、共通制御信号を提案している。詳細は、土木研究所先端技術チーム HP²⁾にて公開中であり、この共通制御信号に基づいて、OPERA が包括する各種の通信を対応させている。

2.2 ミドルウェア

自律分散系のシステムインテグレーションが容易となるよう、ソフトウェアの機能単位であるプロセス間の通信をサポートするミドルウェアとして、ROS(Robot Operating System³⁾)を採用している。

2.3 シミュレータ

OPERAでは実機同様に、共通制御信号に対応

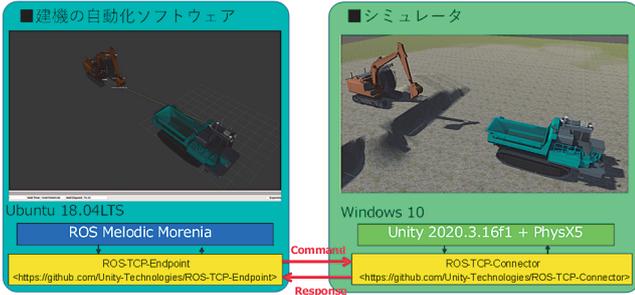


図-2 シミュレータ (PhysX版) とROSとの通信接続

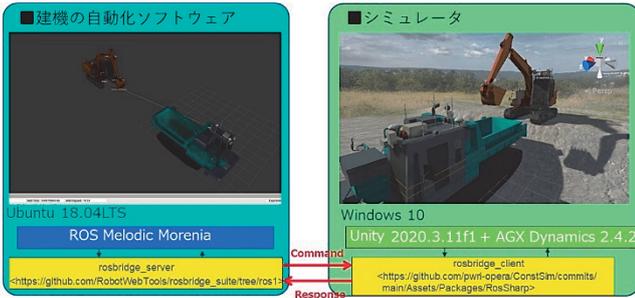


図-3 シミュレータ (AGX版) とROSとの通信接続

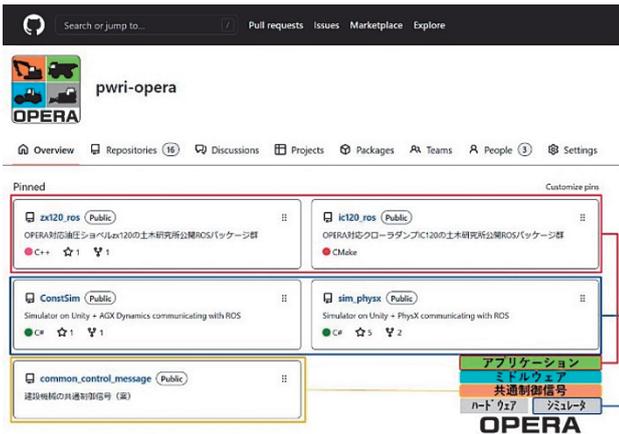


図-4 OPERAのGitHub公開パッケージ⁹⁾

したインターフェースを有するシミュレータを提供する。このため、シミュレータ上で開発された自律制御ソフトウェアは、ソースコードを変更することなく実機上で動作・検証が可能である。提供するシミュレータは、ゲーム開発に広く利用されるUnity⁴⁾上に、物理エンジンとしてNVIDIA PhysX⁵⁾を用いたもの(図-2。以下「PhysX版」という。)およびAGX Dynamics⁶⁾を用いたもの(図-3。以下「AGX版」という。)の2種類ものを開発している。AGX版には土砂モデル(土の挙動を再現する計算モデル)や土砂と建機との力学的な相互作用を演算するライブラリがある一方で、PhysX版にはそのような機能は存在しないため、既往技術として公開されている土砂のモデル化技術⁷⁾を参考とし、独自に簡易的な実装を施し

ている。この理由は、PhysX版はUnityのライセンスさえ有していれば、追加費用は生じない一方で、AGX Dynamicsは有償のソフトウェアであることによる。シミュレータの利用者が土砂の挙動の正確性、計算の高速性といった必要となる性能面と費用面から検討し、PhysX版とAGX版のどちらを用いるか選択できるように配慮している。2022年11月時点では、Unity上に簡素な地形モデル、および油圧ショベルとクローラダンプのシミュレーション用のモデルを作成し、GitHub上にApache License 2.0⁸⁾に基づきプロジェクトを公開している⁹⁾(図-4)。

2.4 実証試験環境

自律施工のための開発成果物の実証を行うため、OPERAでは実機と試験場を提供する。本節ではこれらの2022年11月時点の整備状況を記す。

2.4.1 実機

OPERAが提供する建機の実機として、油圧ショベル(12t級)とクローラダンプトラック(11t積)をそれぞれ1台、土木研究所にて保有している。図-5にこれらの概観とシステム構成の略図を示す。自動化のために後付けしたシステムは類似しており、緯度・経度・高度・方位情報を計測するRTK-GNSSコンパス、各軸の回転量を計測するエンコーダ(油圧ショベルはスイング軸、ブーム軸、アーム軸、バケット軸、クローラダンプは左右クローラ)、車体と荷台の姿勢計測用の6軸IMUがそれぞれ搭載されている。また、各建機には動作計画プランナや車両動作コントローラ等を実装可能な車載PCが搭載されている。アプリケーション等の開発成果物はこの車載PC或いはこの車載PCと通信が可能なシステムを追加することで、実機動作の検証ができる。加えて、各建機にはメッシュWiFi型の無線機が搭載されており、各車載PCは、メッシュWiFi経由で他の車載PCや管制室と通信する。なお両建機ともに、このメッシュWiFiとは独立した特小無線通信経路で、可搬式の操作盤を用いて遠隔操縦および非常時の緊急停止が可能である。

2.4.2 試験場

OPERAでは、茨城県つくば市に整備した建設DX実験フィールドの土工フィールドを試験場として提供する(図-6)。これは、約2.6万m²の敷地面積を有し、試験施工が可能である。また、土

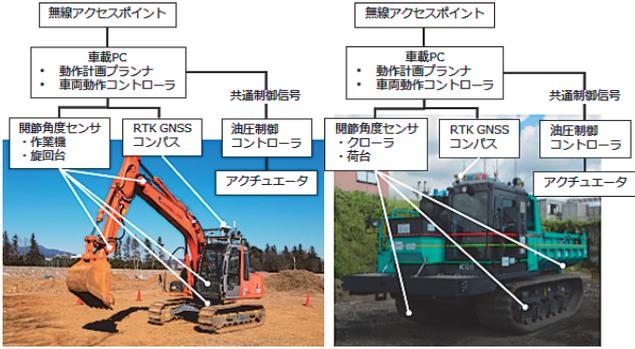


図-5 OPERAが提供する建機

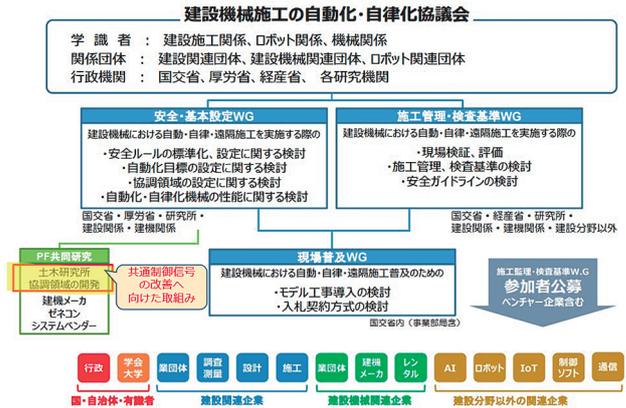


図-7 建設機械施工の自動化・自律化協議会¹⁰⁾



図-6 OPERAが提供する試験場

工フィールド内には遠隔操作室とエンジニアリングセンターの2つの建屋があり、実験用の電源やPC、インターネット回線やRTK-GNSSの基準局、建機の格納庫といったインフラを有している。さらに土工フィールド全体をカバーする、3台のメッシュWiFiおよび2台のローカル5Gの基地局アンテナが常設されている。

3. OPERAの今後の開発方針

前章では、OPERAの各構成要素の2022年11月時点での整備状況を記した。本章では、各構成要素の今後の開発方針を示す。

3.1 共通制御信号の改善

公開中の原案を基に、建機メーカーとの共同研究を通じて、原案やスコップそのものの改定を必要に応じて行う予定である。このような建機の制御信号の共通化は、国土交通省が設立した「建設機械施工の自動化・自律化協議会¹⁰⁾」のスキーム(図-7)における安全・基本設定WGの検討項目である「協調領域の設定に関する検討」の一部に相当するため、今後は本共同研究で改定した原案

を同WGへ提出し、WGにて審議・検討していくとともに、規格化について、同WGより提言される見込みである。

3.2 ミドルウェアの変更

2.2節に記したように、OPERAのミドルウェアにはROSを採用しているが、ROSは現行の最新版であるNoetic Ninjemysをもって、2025年5月に開発・保守サポートを終了することが、開発元であるOpen Roboticsより公表されている。ROSの後継として、ROS2¹¹⁾が公開されており、当面はメジャーアップデートを伴う開発・保守が継続される見込みであるため、OPERAのミドルウェアについても今後はROS2を採用する計画である。

3.3 シミュレータの拡張

3.2節に記したように、今後はミドルウェアにROS2を採用するが、ROS2ではプロセス間通信の仕組みが根本的に変更されるため、シミュレータもこれに対応させていく方針である。

また、次節に後述するように、提供する建機を拡充する計画であるため、シミュレータが提供する各種の建機モデルについても同様に拡充する。加えて、現在のシミュレータは単一のPC上で動作させる前提で設計しており、PCのスペックに依存するが、リアルタイムで動作可能な建機の台数は数台程度が限界と考えている。一方で実際の工事現場は、より台数が多いケースが大半であることを考慮すると、こういったユースケースに対応できることが望ましい。そこで、大規模な工事現場をシミュレート可能となるよう、シミュレータのスケーラビリティを向上することを目指し、ハードウェア/ソフトウェアの両面から、アーキテクチャレベルの再設計と効果の検証をしていく

計画である。

3.4 実証試験環境の拡充

まず対応建機については、2.4.1節に記した2機に加え、油圧ショベル（20t級）、ブルドーザ（9t級）、振動ローラ（機種クラス未定）を順次追加する計画である。これにより、従来可能であった掘削積込み・運搬に加え、敷均し・締固めを含めた機械土工全般の自律化技術開発が可能となる。

次に、土工フィールドについては、各種のインフラ整備を進める。具体的には、以下のようなものを追加整備していく計画である。

- ① メッシュWiFiの無線機の増設
- ② 建機の給油施設の設置
- ③ ネットワーク監視カメラの増設
- ④ 場内アナウンス用のスピーカの設置

上記①について補足すると、メッシュWiFiの通信可能エリアを拡大することに加え、無線通信品質のさらなる安定化を狙う。

4. おわりに

本稿では、研究・投資の重複回避や先進技術を有する大学やベンチャー企業等の新規参入を促すことを目的として整備を進めている自律施工技術基盤OPERAについて、現状と今後の開発方針を紹介した。OPERAは、構成要素の全て又は一部を、利用者の目的に合わせて誰でも任意に活用いただくことができる。Apache License 2.0⁸⁾を基にGitHub上に公開しているOPERAのアプリケーションおよびシミュレータに関しては、利用者からのフィードバックが大変貴重であると捉えており、OPERAに対する質問や要望を、GitHubのIssuesやメール等を通じて土木研究所先端技術

チームへご連絡いただければ幸甚である。これらに応える形で、OPERAの利便性向上の継続的サイクルを実現していくことが、今後の取組みの中核となる。

謝 辞

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

参考文献

- 1) 山内元貴、遠藤大輔、鈴木裕敬、橋本毅、「自律施工における協調領域の提案と自律施工技術基盤(仮称)OPERAの開発」、土木技術資料、第64巻、第1号、pp54~57、2022
- 2) 土木研究所技術推進本部先端技術チーム資料「建設機械の共通制御信号(案)」、<https://www.pwri.go.jp/team/advanced/pdf/seigyosinougou.pdf>
- 3) Open Source Robotics Foundation: ROS, <https://www.ros.org/>
- 4) Unity:リアルタイムコンテンツ制作を担う世界をリードするプラットフォーム、<https://unity.com/ja/>
- 5) NVIDIA.DEVELOPER:PhysX, <https://developer.nvidia.com/physx-sdk>
- 6) Algorix: AGX Dynamics, <https://www.algorix.se/agx-dynamics/>
- 7) Daniel Holtz, Adam Galarneau “Real-Time Mud Simulation for Virtual Environments”, ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D 2018
- 8) APACHE LICENSE, VERSION 2.0, <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>
- 9) GitHub: pwri-opera, <https://github.com/pwri-opera/>
- 10) 国土交通省HP:建設機械施工の自動化・自律化技術、https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000049.html
- 11) ROS2 Documentation: Humble, <https://docs.ros.org/en/humble/>

遠藤大輔



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 専門研
究員、博士(工学)
Dr. ENDO Daisuke

山内元貴



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 研
究員、博士(工学)
Dr. YAMAUCHI Genki

鈴木裕敬



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 研
究員、博士(工学)
Dr. SUZUKI Hiroataka

橋本 毅



土木研究所技術推進本部
先端技術チーム 主
任研究員、博士(工学)
Dr. HASHIMOTO Takeshi