

情報開示型自律施工技術基盤の開発状況と今後の展望

(国研) 土木研究所
(国研) 土木研究所
(国研) 土木研究所

○ 遠藤 大輔
山内 元貴
橋本 毅

1. はじめに

建設業界は深刻な人手不足に陥っており、世界規模の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。建設現場における生産性向上のため、国土交通省は2016年度より測量・設計から施工・管理にいたる全てのプロセスにおいて、ICTの活用を前提とした「i-Construction」を推進してきた。その結果、従来（2015年度）と比較して、生産性は17%向上したと報告されている¹⁾。「i-Construction」では、情報取得・伝達手法の効率化、建設機械の操縦支援等を実現してきたが、さらなる生産性向上を目指し、一人のオペレータが複数の建機を同時に運用しながら建設工事を行う自律施工の実現が期待されている。自律施工では、建設機械やシステムが認識した周囲の環境と設計図から、動作を自動かつ適切に計画して工事を行う建設機械やシステムが必要となる。このような自律施工の実現には、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を建設業界へ巻き込んでいくことがキーになると考えられる。しかし、これまで建設業界との拘わりがなかった方々にとって、建機を保有し、それを自動運転が可能となるよう改造し、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、先述した新たな協力者の参入を困難にしている。また、これまでは自律施工の研究開発は、個社での技術開発が主であり、研究開発の重複が業界全体として生じており、費用対効果を得ることが難しい実状がある。この状況を改善するためには自律施工を実現するシステムの協調領域を明確化していくことが重要である旨報告されている²⁾。

このような社会的ニーズに対し、土木研究所先端技術チームでは、効率的に自律施工技術を開発し、広く普及することを目的として、情報開示型の自律施工技術基盤の整備を進めている。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の新規参入が容易になると期待される。本稿では、OPERAの



図-1 OPERA システム構成

開発状況と今後の開発方針や展望について記す。

2. 情報開示型自律施工技術基盤 OPERA

OPERAは、共通制御信号、ミドルウェア、シミュレータ、建設機械および実験フィールドを含む実証試験環境により構成されており、自律施工や遠隔操縦等の新技術開発において、シミュレータをベースにしたソフトウェア開発が可能であることに加え、その開発物を修正せずに実機に接続して検証することが可能である。図-1にOPERAのシステム構成を模式的に示す。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、図-2に示す通り、異なるハードウェアでも同様に制御が可能となるようハードウェアを抽象化し、機械間相互の連携性を向上させる建設機械の共通制御信号を提案する。提案する共通制御信号の範囲および内容については、建設工事におけるデータ交換標準に関する国際規格であるISO15143³⁾をベースとして、車両機械の制御特性への依存性の観点から、図-3に示す通り機能ブロックを設定し、油圧ショベルを対象とした制御信号がど

のようにあるべきか検討した。

まず機能ブロックの一つとして、建設機械には油圧制御コントローラ (=油圧アクチュエータを制御する機器) が搭載されており、建設機械の各アクチュエータの逐次的な出力を制御するものとする。これに加え、油圧制御コントローラの上位のコントローラとして車両動作コントローラ (=車体の制御特性を隠蔽した自動運転制御インタフェースを提供し、建設機械の油圧制御コントローラへの指令値を決定する。また、車体に搭載されたセンサ情報を用いた高速なフィードバック制御も担う) が搭載されており、これは車両の質量や油圧系といった制御特性に強く依存するコントローラとした。

以上をまとめて、ISO15143 Part1 に規定されるシステムアーキテクチャにおける『建設機械』に相当すると、ここでは便宜上みなす。車両動作コントローラは、ISO15143 Part1 に規定される上位システムである『オペレーションシステム』に相当する機能ブロック中の動作計画プランナ (=施工管理システムが決定する作業タスクに応じ、建設機械の動作を計画し、車両動作コントローラへ指令を与える) と通信し、動作計画プランナが出力する車両動作指令に従った建設機械の制御を行いながら、車体センサ情報を伝達する。動作計画プランナは、同じオペレーションシステム内の上位システムである施工管理システム (=例えば、3D 図面から、対象エリアの掘削範囲、深さを計画するソフトウェア) と通信をする。動作計画プランナは、車両の制御特性への依存性が小さい機能ブロックである。図-3 中において、一般的に非公開又は非設定となっている動作計画プランナ、車両動作コントローラ、油圧制御コントローラ間の通信 (C1、C2、D1、D2) を対象として、共通制御信号の検討結果を ISO15143 Part2 に規定されるデータ辞書に相当する一覧表にまとめた。なお、ここでは便宜上、車両動作コントローラと動作計画プランナを、それぞれ『建設機械』『オペレーションシステム』の境界として記述しているが、自律施工システムの実装上は、車両動作コントローラが建設機械上に存在することは要件ではなく、逆に動作計画プランナの実体が建設機械の中にあっても良い、ということをおこわしておく。

ここでは、例として表-1 に共通制御信号の一部を示す。共通制御信号の詳細は、土木研究所先端技術チーム HP⁴⁾にて公開している。

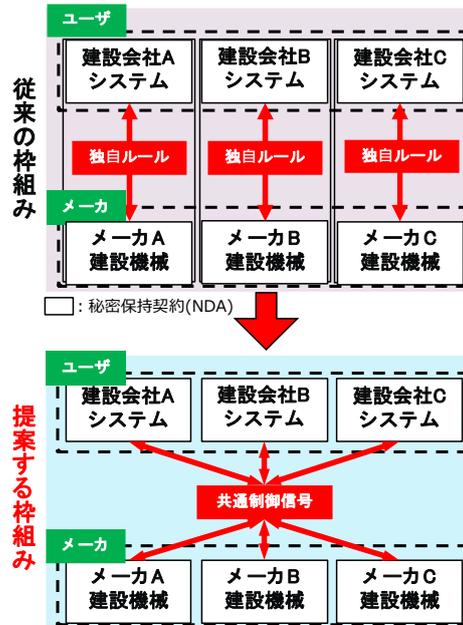


図-2 提案する制御信号共通化による期待

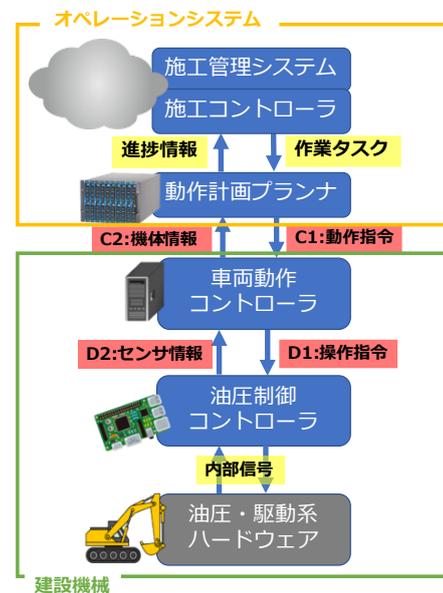


図-3 自律施工のための機能ブロック 図 4)

表-1 共通制御信号 (原案) の一部

区分	動作指令名	制御パラメータ名	内容
C1	刃先制御目標	目標位置	バケット刃先位置(X,Y,Z)
		目標姿勢	バケット刃先姿勢 (Quaternion)
		移動速度	刃先目標位置・姿勢への移動速度
C2	機械稼働状態	燃料残量	燃料容積残量
		原動機回転速度	原動機の回転速度
D1	操作レバー入力	ブーム	ブームレバー入力
		ブーム動作方向	ブームの動作方向入力
D2	センサ情報	車体姿勢ロール	上部旋回体のロール角度
		車体姿勢ピッチ	上部旋回体のピッチ角度

2.2 ミドルウェア

自律施工を実現するための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に、ROS(Robot Operating System)⁹⁾を採用することとした。これにより、ハードウェアの抽象化、および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ため、開発成果物の再利用性を確保し易い。また、自律ロボット用に多数の実績がある既存ライブラリ群を、自律施工用に効率的に転用していくことが可能になると期待できる。

2.3 シミュレータ

自律施工ソフトウェアの開発を行う上で、実機や実環境と並行してシミュレータでの開発を行うことにより、研究開発の効率化が期待できる。OPERA では実機と同様に、共通制御信号に対応したシミュレータを提供する。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 Unity⁶⁾上に、Nvidia PhysX⁷⁾ (図-4。以下、PhysX 版) および AGX Dynamics⁸⁾ (図-5。以下、AGX 版) の2種類の物理エンジンを用いて、以下の機能を実現している。

- (1) 建設機械の諸々の物理パラメータを設定ファイルから読み込み、建設機械の物理的な挙動をシミュレータ内で計算
- (2) 土砂の物理的な挙動をシミュレータ内で計算
- (3) 汎用の PC にて、実時間で計算
- (4) 実機用に開発したソフトウェアをソースコードの変更せずに、シミュレータ上で動作
- (5) 上記(1)~(4)の結果を視覚的に提示

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、公開されている土砂モデル⁹⁾を参考として、独自に簡易的な実装を施している。PhysX 版は Unity のライセンスさえ有していれば、追加費用は発生しない。他方、AGX Dynamics は有償のソフトウェアである。シミュレータの利用者が土砂モデルの正確性、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している。

2022年8月時点では、Unity上に建設DX実験フィールドの簡素な地形モデル、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Unityプロジェクト一式を公開している¹⁰⁾(図-6)。各建設機械のモデルは、走行系の並進速度と旋回速度、作業機各軸の角度指令、および荷台の角度指令をミドルウェアから受信し、その物理挙動をシミュレータ上で計算した上で、掘削

による地形(土砂)の変形や粒子化、粒子化した土砂の運搬、粒子化した土砂の地形への一体化といった一連の現象を視覚的にユーザーへ3D表示することが可能である。

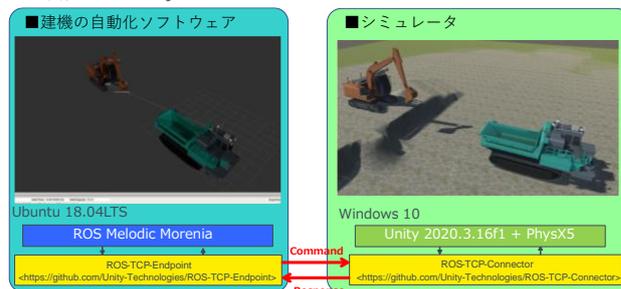


図-4 シミュレータ (PhysX 版) と ROS との連携



図-5 シミュレータ (AGX 版) と ROS との連携

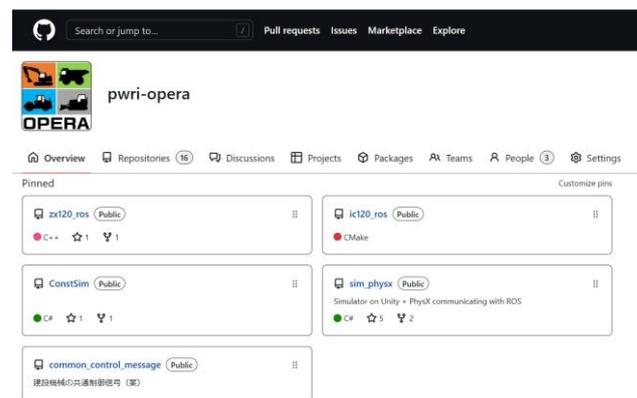


図-6 OPERA の公開パッケージ¹⁰⁾

2.4 実証試験環境

前述した共通制御信号およびミドルウェアに基づいて作成した機能モジュールおよびアプリケーションの実証試験を行うためのツールとして、OPERAでは実機と実環境を提供する。本節ではこれらについて、2022年8月末時点の整備状況を記す。

OPERAが提供する建設機械の実機として、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-7にこれらの概観とシステム構成の略図を示す。各建設機械共に、RTK-GNSSコンパスが搭載されており、緯度・経度・高度に加え、方位情報を計測できる。これに加え、油圧ショベルには旋回部と作業機(ブーム軸、アーム軸、バケット軸)の各軸にアブソリュート

エンコーダを取り付けてあり、角度を取得できる。また、キャビンの側方には 6 軸 IMU が搭載されており、車体の姿勢を計測できる。なお、油圧ショベルについては、各クローラの回転数を取得するセンサは未実装である。一方でクローラダンプには、左右のクローラそれぞれにロータリエンコーダを取り付けており、クローラの回転量を計測できる。また、6 軸 IMU が荷台およびキャビンに取り付けられており、荷台の傾きや車体の姿勢を計測できる。

各建設機械には動作計画プランナから出力された信号を受け取り、建設機械の動作を制御するコントローラが車載 PC 上に実装されている。この PC が図-3 における「車両動作コントローラ」に相当し、外部制御インターフェースを介して「油圧制御コントローラ」と通信を行い、建設機械の各アクチュエータを制御する。加えて、各建設機械にはメッシュ WiFi 型のアクセスポイントが搭載されており、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、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や非常時の緊急停止が両建設機械ともに可能である。

さらに OPERA では、茨城県つくば市の土木研究所および国土技術政策総合研究所内に整備した建設 DX 実験フィールドの土工フィールド（図-8）を試験場として提供する。土工フィールドは、約 2.6 万 m² の敷地面積があり、併設するヤード内にある約 1500 m³ の土砂材料を用いて、試験施工が可能である。また、土工フィールド内には、遠隔操縦や自律施工の管制用の建屋があり、実験用の電源や PC、インターネット回線や RTK-GNSS の基準局といったインフラ設備を有している。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 8 月時点での現状を記した。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、建機メーカーをはじめとした関連企業との共同研究を通じて、原案やスコープそのものの改定を必要に応じて行う予定である。このような建設機械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」のスキーム（図-9）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」¹¹⁾の一部に相当するため、今後は上記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、本共通制御信号の規格化について、同 WG より提言される見込みである。

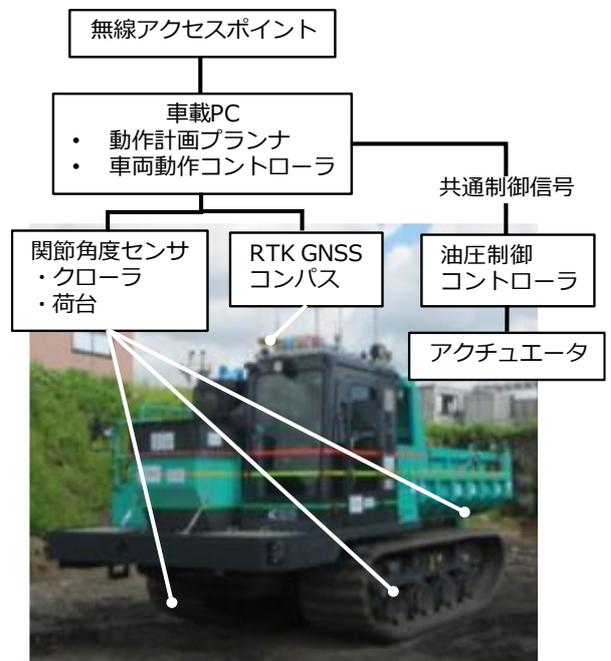
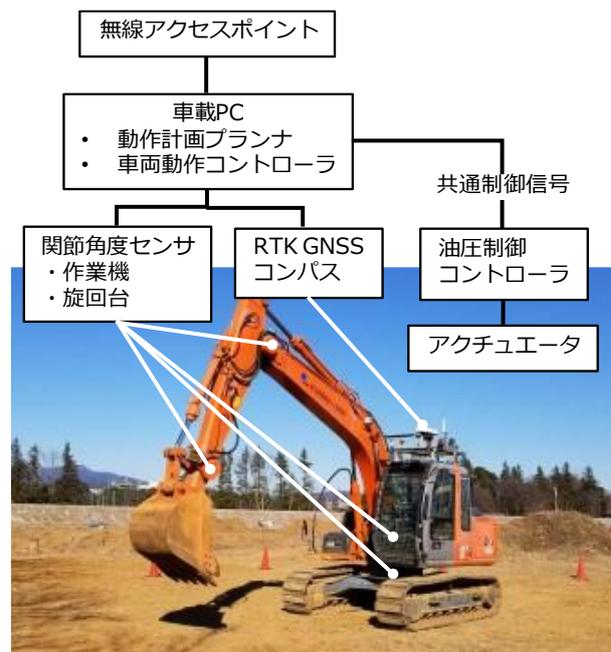


図-7 OPERA が公開する建設機械



図-8 土工フィールド

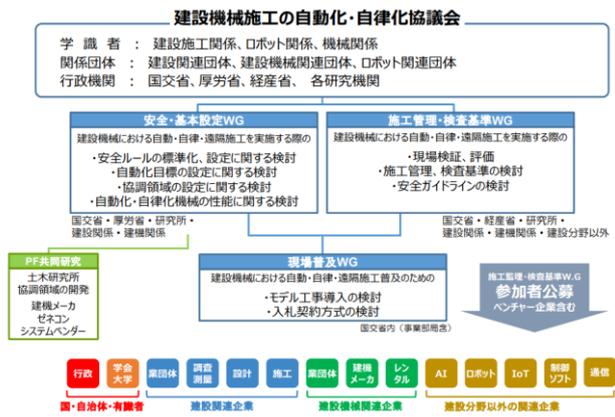


図-9 建設機械施工の自動化・自律化協議会⁸⁾

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 をもって開発を終了し、2025 年 5 月に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、ROS2¹²⁾が公開されており、当面はメジャーアップデートを伴いながら開発・保守が継続される見込み（表-2）であるため、OPERA のミドルウェアについても今後は基本的に ROS2 を採用していく計画である。

表-2 ROS/ROS2 のディストリビューション

ROS			ROS2		
Distribution	Release	EOL	Distribution	Release	EOL
Jade Turtle	2015.5	2017.5	Dashing Diademata	2019.5	2021.5
Kinetic Kame	2016.5	2021.4	Eloquent Elusor	2019.11	2020.11
Lunar Loggerhead	2017.5	2019.5	Foxy Fitzroy	2020.6	2023.5
Melodic Morenia	2018.5	2023.5	Galactic Geochelone	2021.5	2022.11
Noetic Ninjemys	2020.5	2025.5	Humble Hawksbill	2022.5	2027.5
備考: Noetic Ninjemys にて開発を終了			備考: Humble Hawksbill 以降も開発を継続		

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、3.4 節に後述するように、OPERA が提供する建機についても拡充していく計画であるため、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、リアルタイムで動作可能な建機の台数は1~2台程度が限界であることが判っている。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ル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

対応建機については、2.4 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・締固めの機械土工の自律化技術開発が可能となる。

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増設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
 - ③ ネットワーク監視カメラの整備
 - ④ 場内アナウンス用のスピーカの設置
 - ⑤ 外部ネットワークからのアクセシビリティ
- 必要なものについて補足すると、上記の①は、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ったものである。また、⑤は本土工フィールドおよび建機のネットワーク設備へ、土木研究所の外部からもアクセス可能な手段を確保する。これにより、各建機の遠隔操縦をインターネット経由で行うことや、あるいは外部のクラウドシステムを活用することも可能としていく予定である。ただし、本稿執筆時点では、十分なレベルのセキュリティを担保できる具体的なネットワーク構成は確定しておらず、セキュリティポリシーの見直しを含め、関係各所と継続的な協議が要る状況であることを付記させていただく。

4 おわりに

本稿では、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の新規参入を促すことを目的として、土木研究所先端技術チームで整備を進め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 のミドルウェアおよびシミュレータについては、GitHub にて公開している。OPERA は誰でも利用が可能であり、構成要素の全て又は一部を、利用者の目的に合わせて活用いただける。実際に利用した方からのフィードバックは大変貴重であると捉えており、OPERA に対する質問や改善要望は、GitHub の issue 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 の利便性向上のための継続的なサイクルを実現していくことが、今後の取組みの主幹となる。

参考文献

- 1) i-Construction推進コンソーシアム 第7回企画委員会資料
「i-Constructionの取組状況について」
https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/06.7_kikaku_siryou6.pdf (2022/8/18参照)
- 2) 一般社団法人日本建設業連合会 土木工事技術委員会
土木情報技術部会 情報利用技術専門部会:建設業のための
ロボットに関する調査, 建設マネジメント技術, pp47-
51, 2020 年 11 月号
- 3) ISO 15143-1:2010, Earth-moving machinery and mobile road
construction machinery -- Worksite data exchange -- Part 1:
System architecture
- 4) 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 HP : 建設機械の共通制御信号 (案),
<https://www.pwri.go.jp/team/advanced/papers.html>
(参照2022-8-18)
- 5) Open Source Robotics Foundation: ROS, <https://www.ros.org/>,
(参照 2022-8-18)
- 6) 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> (参照2022-8-29)
- 7)NVIDIA.DEVELOPER:PhysX,
<https://developer.nvidia.com/physx-sdk> (参照2022-8-29)
- 8) Algorix: AGX Dynamics, <https://www.algoryx.se/agx-dynamics/> (参照2022-8-29)
- 9) Daniel, H., et al:“Real-Time Mud Simulation for Virtual
Environments”, ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D
Graphics and Games, i3D 2018
- 10) GitHub: pwri-opera, <https://github.com/pwri-opera> (参照
2022-8-29)
- 11) 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 (参照2022-8-19)
- 12) ROS2 Documentation: Humble,
<https://docs.ros.org/en/humble/>, (参照 2022-8-18)