

# 自律施工の促進と普及を目的とした 自律施工技術基盤 OPERA の提案

山内元貴・遠藤大輔・鈴木裕敬

建設業における生産性を向上させる一つ的手段として、人ではなく建設機械やシステムが環境を認識し、機械の行動を計画して自律的に工事を行う、自律施工技術の開発、普及が期待されている。本稿では、効率的に自律施工技術を開発し、広く活用することを目的として土木研究所にて開発を進める自律施工技術基盤 OPERA に関する取り組みについて紹介する。

キーワード：自律施工、自律施工技術基盤 OPERA、建設機械

## 1. はじめに

建設業において、高度な技能、豊富な経験を有する労働者の高齢化によるリタイアとともに若年労働者の離職による人材不足の深刻化が懸念されている。これにより今後、建設業における生産性の大幅な低下が危惧されている。建設現場における生産性向上を目的として、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事業プロセスにおいて、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<sup>1)</sup>。「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。さらなる生産性向上を目指し、少ない作業員で建設工事を行うことが可能な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、動作を計画して工事を行う建設機械やシステムが必要である。このような自律施工の実現には、ロボット、AI等の先進的な技術を建設業界に積極的に導入できる環境、システムや協調領域の明確化が重要であると報告されている<sup>2)</sup>。

そこで、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、自律施工技術基盤 OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy) の整備を進めてきた。OPERA 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となると期待される。本稿では、

OPERA の概要について述べる。

## 2. 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、自動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開発が可能であることに加えて、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。

### (1) 共通制御信号

建設業界では、個社による技術開発が主流であり、個々の施工業者、機械メーカーによる研究開発の重複が発生している。しかしながら、大規模な建設現場が単一のメーカーの建設機械のみで工事が完結することは少



図-1 OPERA システム構成

なく、かつ開発したシステムの再利用性を考慮すると、自律施工を押し進めるためには、異なるメーカーの異なる機種を横断的に制御できるシステムが必要である。

土木研究所では、そのシステムとして、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、機械間の連携性を向上させることを可能とす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、建設工事におけるデータ交換標準に関する規格であるISO15143<sup>3)</sup>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(図中のブロック)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。

まず前提として、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

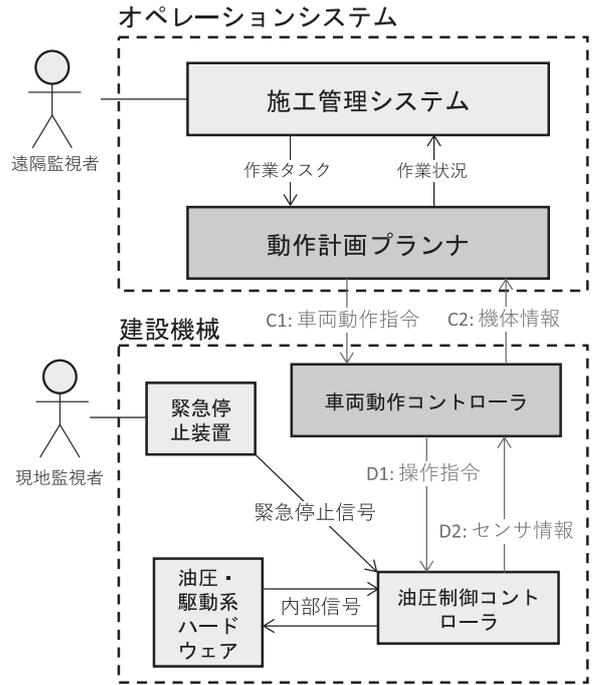


図-3 自律施工のための機能ブロック<sup>4)</sup>

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(=施工内容に応じて、建設機械の動作を計画し、建設機械へ指令を与える)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。共通制御信号の詳細は、土木研究所先端技術チームHP<sup>4)</sup>にて公開している。

(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

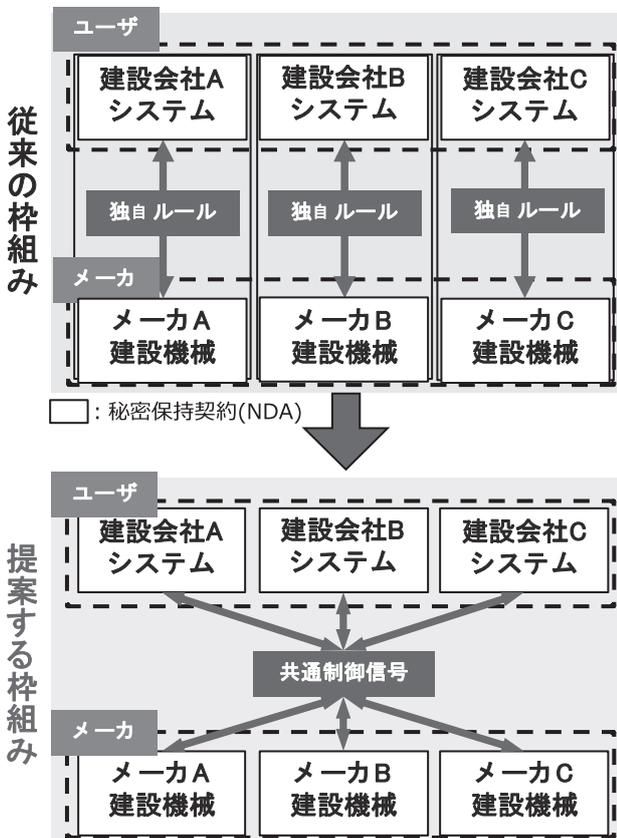


図-2 提案する制御信号共通化のイメージ

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) を採用することとした。これにより、ハードウェアを抽象化して扱うことができ、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、自律施工用に転用することが期待できる。

### (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ている Unity 上に、Nvidia PhysX (以下、無償版) および AGX Dynamics (以下、有償版) 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
- ③一般的な 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を変更せずに、シミュレータ上で動作
- ⑤これらの結果を視覚的に提示

有償版には土砂モデル (土の挙動を再現する計算モデル) がある一方で、無償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<sup>5)</sup>を参考に独自に実装した。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、無償版と有償版を選択できるようにした。

2022年3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を作成し、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上に公開している。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表示することが可

能である。

### (4) 実証試験環境

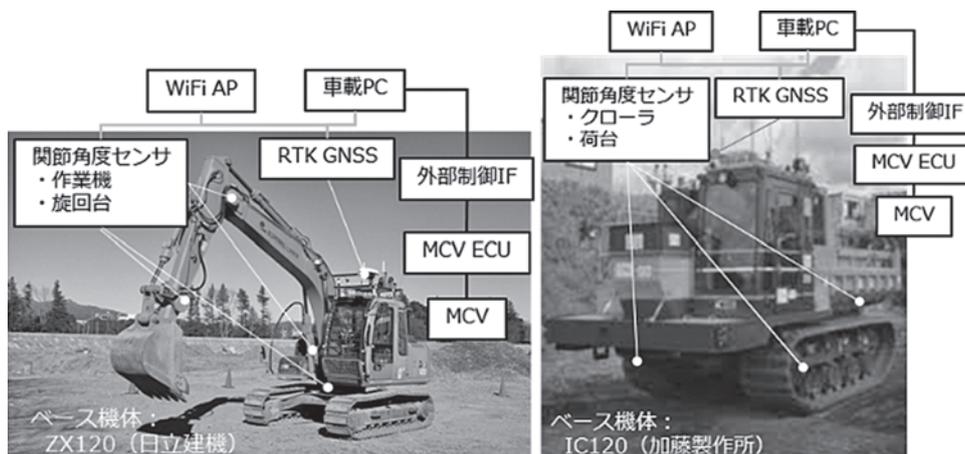
前述した共通制御信号およびミドルウェアに基づいて作成した機能モジュールおよびアプリケーションの実証試験を行うためのツールとして、OPERAでは実機と実環境を提供する。本節ではこれらについて、2022年3月末時点の整備状況を記す。

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—4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、荷台の傾きや車台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。各建設機械にはメッシュWiFi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や遠隔制御室と通信する。なお、このメッシュWiFiとは独立した特小無線通信経由で、可搬式の操作盤を用いて遠隔操作や非常時のための緊急停止が両建設機械ともに可能である。

OPERA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を試験場として提供する。土工フィールドは、約2.6万m<sup>2</sup>の敷地面積を有しており、併設するヤード内にある約1,500m<sup>3</sup>の土砂材料を用いて、模擬工事を実施することが可能である。

また、土工フィールド内には、遠隔操作/自律制御監視用の建屋があり、実験用の電源やPC、インター



図ー4 建設機械システム構成

ネット回線や RTK-GNSS の基地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 のアンテナが常設されている。

### 3. 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。今後、土木研究所内に整備した実機および実験フィールドを活用して、共同研究等により、研究機関やソフトウェアベンダー等が自律施工の実用化、ビジネスチャンスを獲得するための参入障壁を下げることを狙う。さらに、利用者からのフィードバックを得ることで、OPERA の継続的な利便性向上を実現し、自律施工技術の普及拡大に貢献していきたい。



#### 《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](https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/06.7_kikaku_siryou6.pdf)

pdf

2) (一社)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>（2022/06/07 参照）  
 5) Daniel, H., et al: "Real-Time Mud Simulation for Virtual Environments", ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D 2018

#### 【筆者紹介】



山内 元貴（やまうち げんき）  
 土木研究所  
 主任研究員  
 博士（工学）



遠藤 大輔（えんどう だいすけ）  
 土木研究所  
 専門研究員  
 博士（工学）



鈴木 裕敬（すずき ひろたか）  
 土木研究所  
 研究員  
 博士（工学）