

建設機械施工における研究・評価プラットフォームに関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：先端技術チーム

研究担当者：森川博邦、山口崇、橋本毅、山内元貴、遠藤大輔、鈴木裕敬

【要旨】

建設業において、労働人口減少による生産性の大幅な低下が危惧されている。生産性を向上させる一つの手段として、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、自律施工の実現、普及が期待されている。この自律施工技術の研究・開発を効率的に推進するためには、ロボット、AI等の先進的な技術が積極的に導入可能であり、さらに協調領域の明確化がなされている、オープンな開発環境を整備することが重要である。そこで本研究では、効率的な自律施工技術研究開発の実現を目的として、オープンな開発環境を提供する自律施工技術基盤 OPERA を提案する。

キーワード：自律施工、自律施工技術基盤 OPERA、建設機械、シミュレータ、共通制御信号

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% 向上したり、「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可能であり、さらに協調領域の明確化がなされていることが重要であると報告されている²⁾。

そこで、本研究では、効率的な自律施工技術開発の実現を目的として、自律施工技術基盤 OPERA（Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy）を提案する。OPERA を活用することにより、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の容易化が期待できる。本稿では、開発した自律施工技術基盤 OPERA の概要について述べ、OPERA の周知と普及を目的として実施した自律施工デモンストラクションについて報告する。

2. 自律施工技術基盤 OPERA⁵⁾

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。



図-1 OPERA システム構成

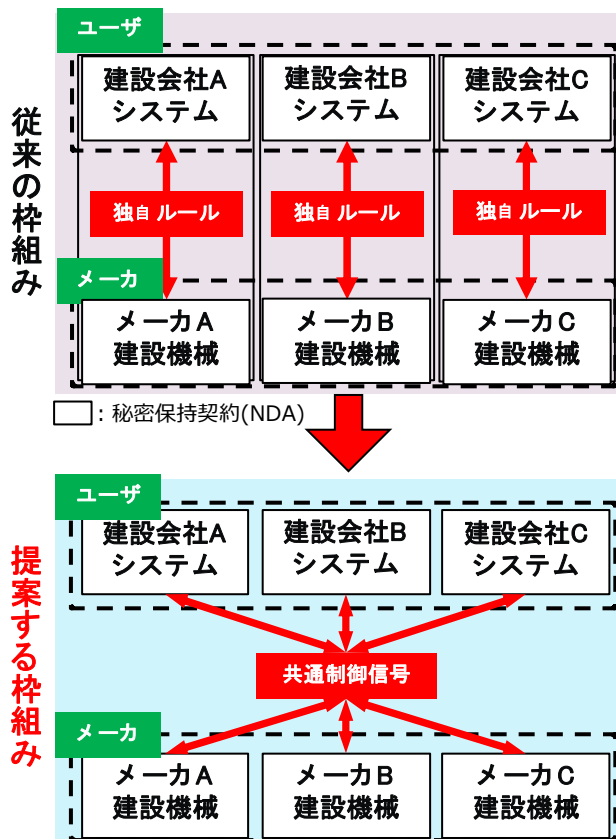


図-2 提案する制御信号共通化のイメージ

2.1 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、大規模な建設現場において単一メーカーの建設機械のみで工事が完結することは少なく、かつ開発したシステムの再利用性を考慮すると、自律施工の普及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システムが必要である。

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3つの機能ブロック(「油圧制御コントローラ」「車両動作コントローラ」「動作計画プランナ」)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

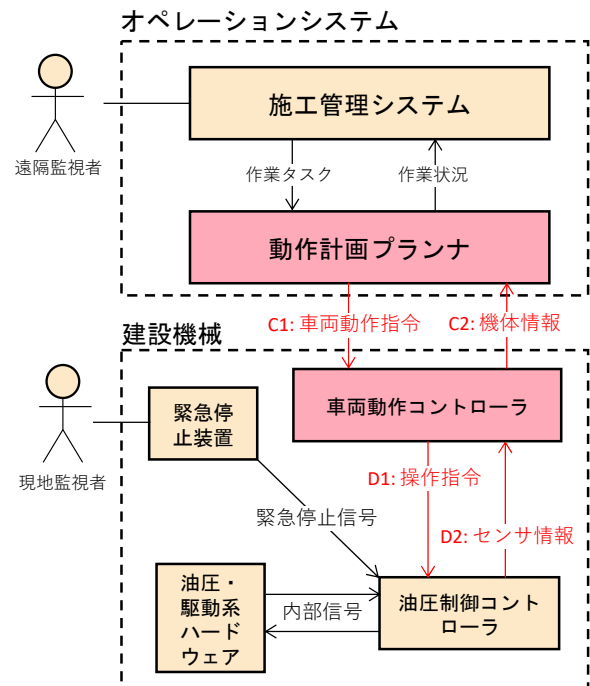


図-3 自律施工のための機能ブロック図[4]

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。ここでは、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。

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モジュール間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。

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) 実機用に開発され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) 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[5]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。

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ソフトウェア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路で、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。

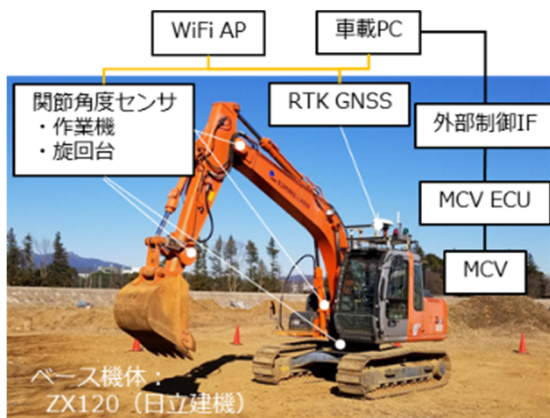


図-2 建設機械システム構成

土工フィールドは、約 2.6 万 m² の敷地面積を有しており、併設するヤード内にある約 1500 m³ 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. 自律施工デモンストレーション⁶⁾

提案した OPERA について、自律施工技術の開発者や利用者に周知するべく、2021 年 11 月に土木研究所内で自律施工デモンストレーションを行った。

デモンストレーションでは、油圧ショベル、クローラダンプの 2 機種を用いた掘削・積み込み・運搬作業を行った。作業の大まかな流れは以下の通りである。

- ① 油圧ショベルによる掘削、ダンプの積み込み位置への移動

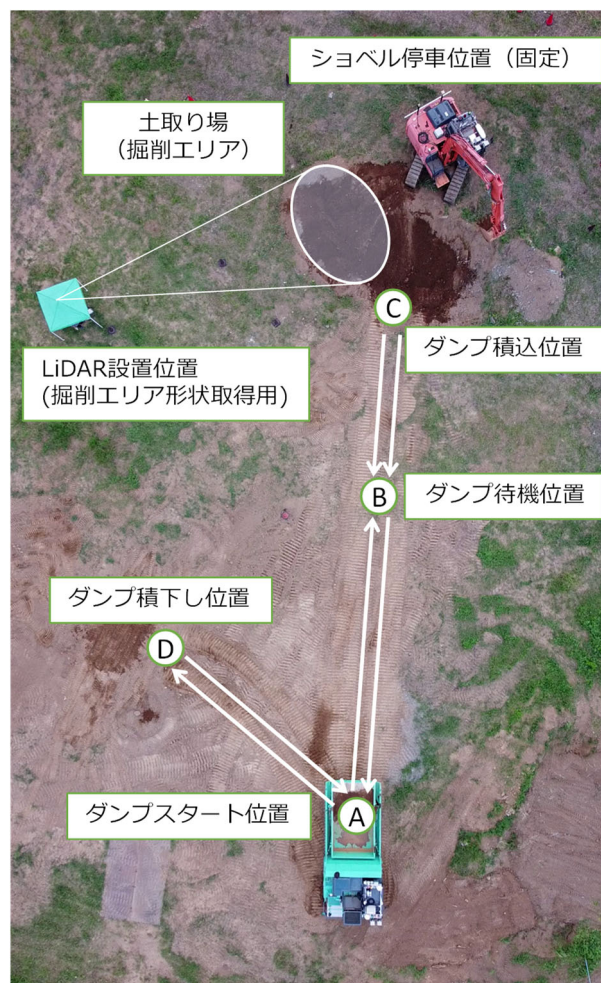


図-3 自律施工デモンストレーション概要

- ② 油圧ショベルが掘削した土砂のクローラダンプへの積み込み
- ③ クローラダンプの目標位置への移動、積み下ろし
- ④ ①～③の繰り返し

油圧ショベルの掘削軌道は、地表面形状を基に決定される。地表面は環境側に設置された LiDAR によって計測され、これにより得られる点群データを基にエレベーションマップを作成する。エレベーションマップの高さ情報や、目標掘削量を基に掘削開始時・終了時の刃先位置・姿勢を決定し、これらを満たすための動作計画が行われる⁷⁾。動作計画に添った動作が行われるように各関節角度が制御され、掘削作業が実現される。なお、動作計画には MoveIt、関節角度の制御には pid などの ROS 汎用ライブラリを活用している。

他方クローラダンプには、事前にウェイポイントが与えられ、目標とした位置・姿勢に車両が移動するように経路生成が行われる。経路に沿って建設機械が図-5 中の C 点に移動すると積み込みが規定回数行われ、目標位置 (D 点) にて積み下ろしする。本機体の制御



図-4 自律施工デモンストレーションの様子
 についても汎用ライブラリである `move_base` や `pid` 等
 が活用されている。

本デモンストレーションには、建設会社、建機メー
 カ、システム開発ベンダー、大学、研究機関等から 3
 日間で 157 名が参加された。参加者から多くの質問や
 意見があり、今後の取り組みを進めていくうえで、意
 義のある機会となった (図-6)。

4. まとめ

本研究では、自律施工技術の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、自律施工技術基盤 OPERA を
 提案した。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得
 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) 国土交通省 : 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
- 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>
 (2022/06/07 参照)
- 5) 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 2022 年 1 月号, 54/57 (2022)
- 6) 鈴木裕敬, 山内元貴, 遠藤大輔, 橋本毅 : 自律施工技術
 開発促進に向けた土木研究所の取り組み, 計測と制御,
 Vol.61, No.9 (印刷中)
- 7) 遠藤大輔, 山内元貴, 鈴木裕敬, 橋本毅 : 3次元点群
 データを基にした油圧ショベルの掘削動作制御の実装,
 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022 論文集,
 (2022)

OPEN PLATFORM FOR CONSTRUCTION TECHNOLOGY RESEARCH AND DEVELOPMENT

Research Period: FY2018-2021

Research Team: Advanced Technology Research Team,
Construction Technology Research Group

Author: MORIKAWA Hirokuni

YAMAGUCHI Takashi

HASHIMOTO Takeshi

YAMAUCHI Genki

ENDO Daisuke

SUZUKI Hiroataka

There is a concern that construction productivity will decrease due to the declining working population in near future.

To improve productivity, an autonomous construction is expected. However, autonomous construction technology has not been widespread, and we think one of the factors is that R&D for autonomous systems was carried out in a closed environment. In this research, we propose the autonomous construction technology platform OPERA, which provides an open development framework.

Keywords: Autonomous construction, OPERA, Open Platform, Construction machinery, Common control rules