

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

山内元貴・遠藤大輔・鈴木裕敬・橋本 毅

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が大幅に低下することが危惧されている。2016年度より国土交通省は建設現場における生産性向上へ向け、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」を推進しており、従来(2015年度)と比較して、生産性は17%向上した¹⁾。「i-Construction」では、情報取得・伝達手法の効率化、建設機械操縦サポート等を可能としてきた。ここからさらなる生産性向上を目指し、第5次社会資本整備重点計画の重点目標5「インフラ分野のDX」を推進するために、少ない作業場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等から、動作を計画して工事を行う必要がある。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言われている²⁾。

本稿では、効率的に自律施工技術を開発し、広く活用するために必要となる協調領域の提案および協調領域を含む自律施工技術開発基盤(仮称)OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy)の整備に関する土木研究所技術推進本部先端技術チームの取り組みについて紹介する。

2. 協調領域の提案

2.1 建設機械の制御信号における協調領域の設定

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

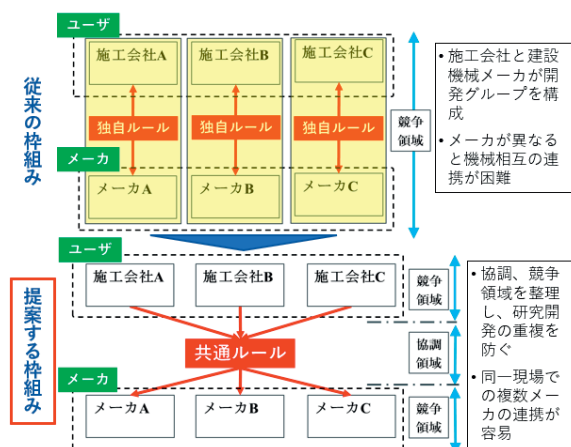


図-1 自律施工技術開発における協調領域の設定

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建設機械メーカーの機種のみで工事が実施されることは少なく、かつ開発したソフトウェアの再利用性を考慮すると、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非常に重要である。

そのシステムとして、図-1に示す通り、異なるハードウェアでも外部装置等から同様に制御が可能となるハードウェアの抽象化を図り、機械間の連携性を向上させることを可能とする、協調領域としての建設機械の共通制御信号を提案する。

2.2 共通制御信号

建設工事におけるデータ交換標準を定めたISO 15143³⁾をベースとして、建設機械の制御特性への依存性の観点から、図-2に示す通り機能モジュール（図中の青ブロック）を検討し、油圧シヨベルを対象とした共通制御信号を整理した。

ここでは、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。油圧制御コントローラには、上位のコントローラとして自動制御コントローラ(=車体の制御特性を隠蔽した自動運転制御イン

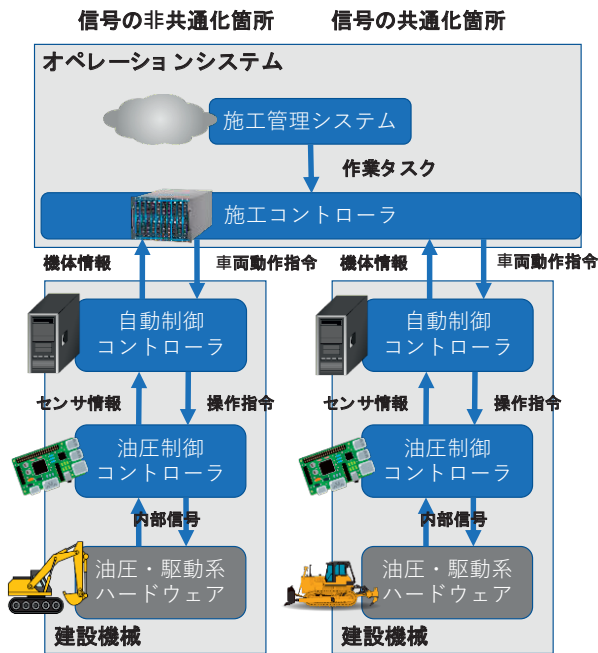


図-2 制御信号の共通化箇所（協調領域）

タフェースを提供し、建設機械の油圧制御を行う。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、ISO 15143 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。自動制御コントローラは、ISO 15143 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施工コントローラ（＝施工内容に応じて、建設機械の動作を計画し、指令を与える）と通信し、施工コントローラ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、車体センサ情報および制御状況を伝達する。施工コントローラは、同じオペレーションシステム内の上位システムであるアプリケーションソフトウェア（＝例えば、3次元図面から、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。施工コントローラは、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。一般的に非公開又は非設定となっている図-2中の各コントローラ間の信号について、ISO 15143 Part2に規定されるデータ辞書に相当するデータの一覧表を作成し、土木研究所先端技術チームのウェブページ (<https://www.pwri.go.jp/team/advanced/papers>、

表-1 共通制御信号案の例

信号区分	パラメータ	パラメータ概要
刃先位置 制御設定	目標位置	バケット刃先の位置
	目標姿勢	バケット刃先の姿勢
	移動速度	バケット刃先の移動速度
走行設定	目標並進速度	車両の並進速度
	目標旋回速度	車両の旋回速度

html)に公開した。ここでは、例として表-1に共通制御信号の一部を示す。

3. 自律施工技術基盤（仮称）OPERA

前章にて、協調領域としての建設機械の共通制御信号について述べた。本章では、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容易とすることを目的とした、誰でもアクセスして利用可能な自律施工技術基盤（仮称）OPERAについて述べる。

3.1 構成要素

土木研究所先端技術チームが提案する自律施工技術基盤（仮称）OPERA は、以下の1)～4) の要素で構成される。

- 1) 共通制御信号
- 2) ミドルウェア
- 3) 実証試験環境
- 4) シミュレータ

図-4に、これらの各要素間の繋がりを模式的に示す。以降の小節では、各構成要素について詳細を記す。

3.2 共通制御信号

前章で述べた共通制御信号に基づいて、（仮称）OPERAが包括する各種の通信を実装する。

3.3 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)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開発および利用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。



図-4 (仮称) OPERAのシステム構成

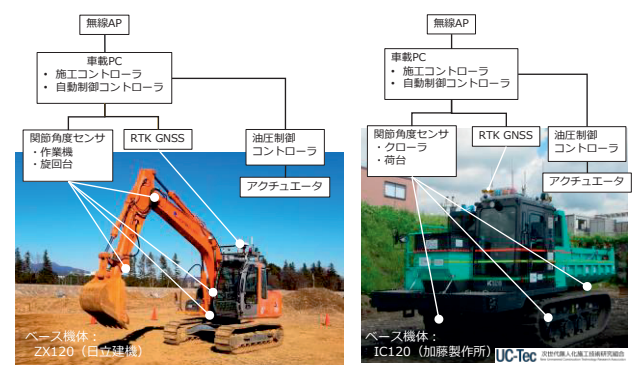


図-5 実機構成

3.4 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、実機と実環境を提供する。本節ではこれらについて、2021年10月時点の整備状況を記す。

3.4.1 実機

(仮称)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-5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。

各建設機械には施工コントローラ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。この車載PCが図-2における「自動制御コントローラ」に相当し、「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の動作をコントロールする。各建設機械には無線アクセスポイン

トが搭載されており、各車載PCは、アクセスポイント経由で他の車載PCや遠隔制御室のPC等と通信することができる。なお、この無線ネットワークとは独立した特小無線通信を用いて、可搬式の操作盤(所謂、ラジコンのコントローラ)を基に、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。

3.4.2 実環境

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利用する(図-6)。約2.6万 m^2 の敷地面積を有する土工フィールドにおいて、併設するヤード内にある約1500 m^3 の土砂材料を用いて、試験施工を実施することが可能である。

また、土工フィールド西側には、遠隔操作室建屋があり、実験用の電源やPC、インターネット回線や無線アクセスポイント、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の北側には、土工フィールド全体をカバーするローカル5Gの基地局アンテナが計2機常設されており、必要に応じて試験における利用が可能となる予定である。

3.5 シミュレータ

自律施工用のソフトウェア開発を行う中で、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。(仮称)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し、シミュレータを基に開発されたソフトウェアは、ソースコードを変更することなく実機上で動作・検証できるようにする。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



▲ 国総研試験走路北ループ内を南側から見た俯瞰図
国土技術政策総合研究所提供

図・6 建設DX実験フィールド概要

PhysX（以下「無償版」という。）およびAGX Dynamics（以下「有償版」という。）の2種類の物理エンジンを用いて、以下の機能を構築した。

- (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) 一般的なハードウェア構成のPCにて、実時間で物理挙動の計算が完了
- (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) 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⁴⁾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。

2021年10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車両モデルを生成した。車両モデルは、走行系の並進速度と旋回速度、バケット先端の軌道の指令値、および荷台の動作

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内部で計算した上で、土砂の掘削や運搬等を行い、これらを視覚的に提示することが可能である。

4. まとめ

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自律施工技術開発への新規参入を促すことを目的として、協調領域としての建設機械の共通制御信号および自律施工技術基盤（仮称）OPERAの紹介を行った。今後、（仮称）OPERAをOSS(Open Source Software)として公開して、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に貢献したり、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、（仮称）OPERAの利便性を継続的に向上させ、自律施工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_siryoku6.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) Daniel, H., et al: "Real-Time Mud Simulation for Virtual Environments", ACM Siggraph Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D 2018

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

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

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 Hiroto

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