

42. 自律施工における協調領域の提案と自律施工技術基盤の開発

(国研) 土木研究所 ○ 山内 元貴
(国研) 土木研究所 遠藤 大輔
(国研) 土木研究所 橋本 毅
(国研) 土木研究所 山口 崇

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。今後、さらなる人材不足が進み、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。国土交通省においては、2016年度より、建設現場における生産性向上に向けて、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」の導入を進めている。「i-Construction」におけるICT土工では、ドローン等を用いた写真測量による3次元計測や、建設機械の位置情報と設計値を建機オペレータに表示するマシニングアセスメント、部分的な油圧アクチュエータ制御が組み込まれたマシンコントロール等の先進的な技術が建設現場に導入され、2018年の生産性向上指標は8.9%¹⁾と向上してきている。

操縦サポート、情報伝達効率を駆使した「i-Construction」から、さらなる生産性向上を目指すためには、建設工事の自動化、無人化が必要である。そのためには、ロボット、AI等の先進的な技術を積極的に導入できる環境、システム、法令等の整備や協調領域の明確化が重要である²⁾。

無人化施工やICT施工に対応するため、建設機械にIMUやGNSS等のセンサ、油圧系の開閉用の電磁弁を搭載し、建設機械の電子制御が可能となってきた。例えば、マシンコントロールは、基本的な操作は建機オペレータが行いつつ、取り付けられたセンサの情報からブルドーザのブレード高さ位置や油圧ショベルのバケットの高さ位置を推定し、リアルタイムでそれらの動作を制御している。しかしながら、従来のマシンコントロールなど、建設機械の制御に関わるシステムは、建設機械メーカーや測量機器メーカーにより独自に最適化されており、異なるメーカー間でのセンサの相互利用は基本的に不可能であり、システムの再利用性は乏しい。

一方で、建設機械メーカーや大学等により、ハードウェアの依存を減らし、ソフトウェアの再利用性を向上させる取り組みがなされている。例えば、CATERPILLER社による機体全体が電子制御化さ

れた「デジタルプラットフォーム」、Baidu社らによる「autonomous excavator system」³⁾、オウル大学ラウノ教授らによる「SmartBooms project」⁴⁾などがある。

しかしながら、依然として異なる建設機械メーカー間の機種を統合して制御するシステムは存在しない。大規模な建設現場が単一のメーカーのみで工事が実施されることは少なく、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枠組み、システム(建設機械との通信における協調領域の設定)が必要である。

そこで、本研究では、ハードウェアの抽象化を図り、機体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。

さらに、研究の重複(重複投資)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て、土木研究所が保有する建設機械、環境、シミュレータを含めた建設機械自律施工プラットフォーム(以下、自律施工技術基盤)を開発する。本稿では、油圧ショベルの共通化した制御信号案および開発した自律施工技術基盤を紹介する。

2. 建設機械制御信号の共通化

建設工事におけるデータ交換標準に関する規格としてISO15143⁵⁾が存在する。現時点では、Part1からPart3まで規定されており、Part1では、本規格の適用範囲およびシステム構成、システム・アーキテクチャが定義されており、Part2ではデータ交換手段としてデータ辞書とスキーマが提供されている。

このシステム・アーキテクチャを参考として、建設機械を自動化する上で必要となるシステム構成、機能ブロックおよび機能ブロックのインターフェースについて検討し、油圧ショベルにおける土砂の掘削積込動作における、制御信号案を提案する。

2.1 検討対象システムの論理構成

ISO15143 Part1のシステム・アーキテクチャにおけるオペレーションシステム、建設機械について、車両の制御特性への依存性の観点から、機能ブロックを割り当て、検討対象システムを分析した。各

システムおよび機能ブロックの概要について、図1および表1,2に示す。

自動制御コントローラは、車両の質量や油圧系といった制御特性に強く依存する機能ブロックとした。一方で、施工コントローラは、作業計画から建設機械の動作計画に変換する車両の制御特性への依存性が小さい機能ブロックとした。

2.2 制御信号の整理と共通化

各機能ブロック間のインターフェースについて、インターフェース上で送受信する制御信号を検討し、共通化すべき制御信号を整理した(表3)。本研究では、施工コントローラと自動制御コントローラ間の通信C1, C2について、油圧ショベルの制御信号リストを検討した。

車両動作指令の制御信号C1は、制御対象の装置である作業機部、旋回部、走行部となる。これらの装置を制御するための信号は、車両特性や構造に強く依存しないものとした。一方で、車両情報の制御信号C2は、車体の作業状況を把握するために必要となる情報である。これらの情報は、車種依存/車体センサー依存のデータを含まないものとした。

C1, C2の制御信号一覧を表-4, 5に示す。

緊急停止機能は、搭乗者が存在しない自律施工において非常に重要である。よって、自動で作業をする建設機械を停止するためには、外部から無線等による緊急停止制御信号E1により、確実に停止させることが望ましい。また、通信途絶や故障時のふるまいを想定すると、ISO13850(機械類の安全性—非常停止—設計原則)などの機能安全規格に準拠した装置からの入力と、機能安全規格に準拠した建設機器の緊急停止機能で高信頼に実現されるべきである。

表-1 システム構成

システム	機能概要
オペレーションシステム	施工計画に対応した各建設機械の作業計画に従って、各建設機械に対して、作業指示を行う。建設機械の作業状況及び施工結果の管理も行う。
建設機械	動作指令に応じて稼働し、自動制御の際に必要な車体センサを備えた建設機械。

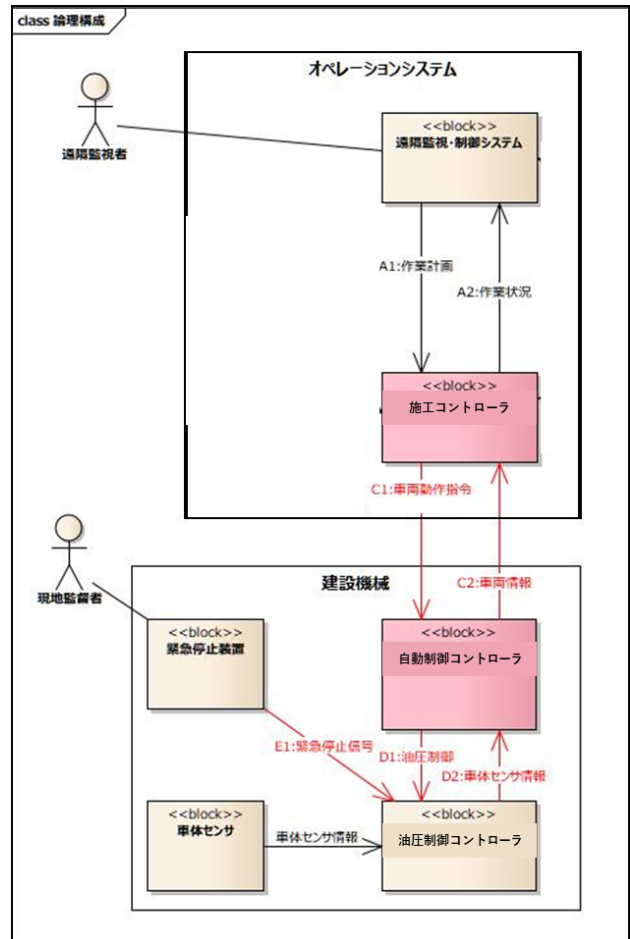


図-1 機能ブロック間の制御信号

表-2 システムの機能割り当て

機能ブロック	機能概要
・オペレーションシステム	
遠隔監視・制御システム	複数の建設機械を統括管理する。各建設機械に対して作業指示を行い、作業状況、施工結果の管理を行う。
施工コントローラ	建設機械の施工内容に応じて、建設機械の動作計画を行い、自動制御コントローラを介して建設機械の自動運転制御を行う。
・建設機械	
自動制御コントローラ	施工コントローラに対して、車体の制御特性を隠蔽した自動運転制御インターフェースを提供し、建設機械の油圧制御を行う。車体センサの情報を用いた高速なフィードバック制御も行う。
油圧制御コントローラ	電動化した油圧弁等を、自動制御コントローラからの指令に基づき、油圧アクチュエータを駆動する。
車体センサ	車体の位置や姿勢、油圧等を計測するセンサ。
緊急停止装置	外部から建設機械を停止させる装置。

表-3 機能ブロック間の制御信号

No.	送信元	送信先	制御信号の概要
C1	②	③	[車両動作指令]車両の構造や制御特性を隠蔽して、一般化した車両制御の信号.
C2	③	②	[車両情報]車体センサの構成やセンサ固有の情報を隠蔽して、一般化した車体情報の信号.
D1	③	④	[油圧制御指令]車両の構造や特性に応じた油圧制御が可能な信号.
D2	④	③	[車体センサ情報]車体センサから取得した車体情報の信号.
E1	⑤	④	[緊急停止信号]緊急停止装置の入力信号.

【表中の番号の意味】

- ①：遠隔監視・制御システム
- ②：施工コントローラ
- ③：自動制御コントローラ
- ④：油圧制御コントローラ
- ⑤：緊急停止装置

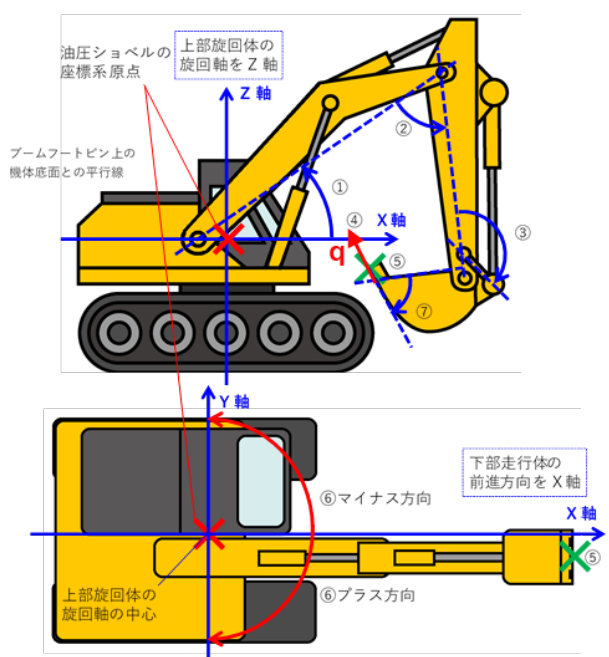


図-2 油圧ショベルの座標系、位置の定義

3. 自律施工技術基盤の開発

提案する自律施工技術基盤の概要を図3に示す。共通化された制御信号に対応した建設機械、ミドルウェア、シミュレータ、実験フィールド(図中赤点線内)が本基盤の対象とする領域である。本基盤の上に、実際の施工で利用するアプリケーションを構築することを想定している。

ミドルウェアには、Robot Operating System(ROS)⁶⁾

表-4 車両動作指令の制御信号一覧

	制御パラメータ	制御パラメータの概要
作業機操作設定	目標位置	図-2 ⑤の位置(X, Y, Z)
	目標姿勢	図-2 ④の姿勢(q:クォータニオン)
	移動速度	目標位置、目標姿勢への移動速度
作業機操作指令	動作指示	作業機操作の開始/停止指令
上部旋回操作設定	目標角度	下部走行体に対する旋回体の目標角度
	回転速度	旋回体の回転速度
上部旋回操作指令	動作指示	上部旋回操作の開始/停止指令
走行設定	目標速度	油圧ショベル走行時の目標速度
	目標角速度	油圧ショベル走行時の目標角速度
走行指令	動作指示	走行の開始/停止指令

表-5 車両情報の制御信号一覧

制御信号	制御パラメータ	制御パラメータの概要
作業機作業状態通知	ブーム角度	図-2の①の角度
	アーム角度	図-2の②の角度
	バケット角度	図-2の③の角度
作業機動作完了通知	作業機操作完了	作業機操作の完了通知
	作業機停止完了	作業機停止の完了通知
上部旋回作業状態通知	上部旋回体角度	図-2の⑥の角度
上部旋回動作完了通知	上部旋回操作完了	上部旋回操作の完了通知
	上部旋回停止完了	上部旋回停止の完了通知
走行状態通知	車両速度	油圧ショベル走行速度
	車両角速度	油圧ショベル走行角速度
車両稼働状態通知	燃料残量	油圧ショベルの燃料残量
	油温	作動油の温度
	エンジン回転数	油圧ショベルのエンジン回転数
	緊急停止状態	緊急停止中かどうかの状態

を採用し、分散処理、ロボット用ライブラリの活用を容易としている。本基盤では、ROSを管理している団体や大学、研究機関等が公開しているパッケージに加えて、建設機械向けに必要な独自のパッケージを開発した。

2022年8月現在では、本技術基盤を、土木研究所が保有する日立建機製ZX120(12t級油圧ショベル)

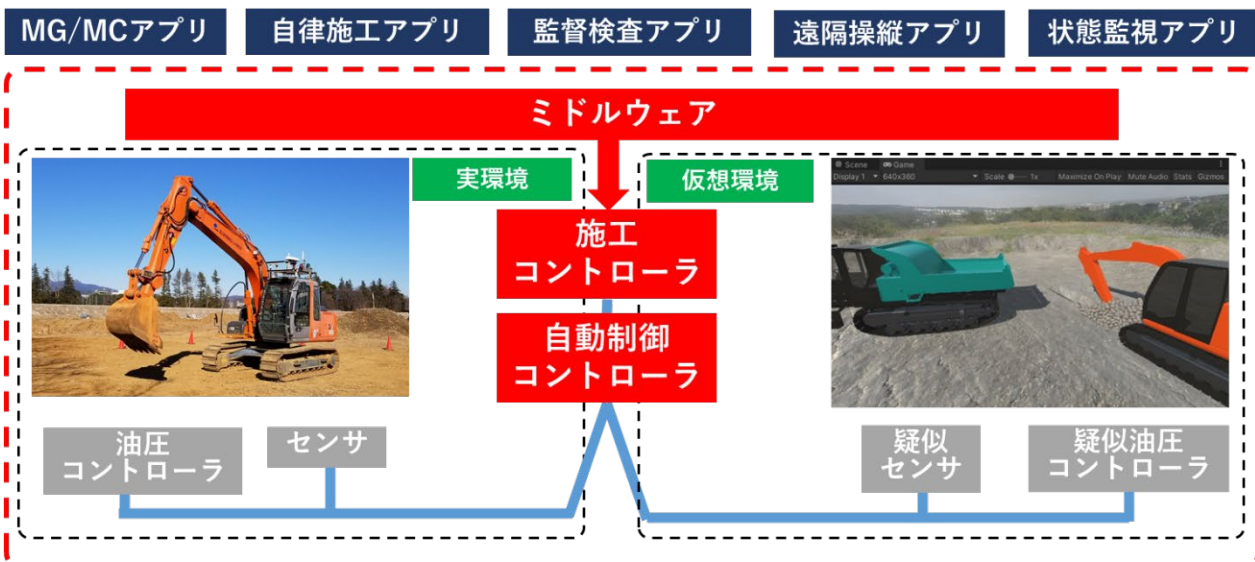


図3 自律施工技術基盤の概要

に構築した（図-3左）。ZX120に設置した日立建機製の遠隔装置の有線入力端子と組込コンピュータを接続し、組込コンピュータ上で操作指令から操作信号に変換し、遠隔装置へ入力するシステムを開発し、制御信号入力とした。また、自動運転時は、有線端子とコンピュータを接続し操作信号が入力されているため、遠隔操作の非常停止回路が無効となる。そこで、別系統の特定小電力無線を利用した非常停止回路を機体に搭載し、想定外の動作時にエンジン回転を停止させるシステムを有している。機体姿勢の推定のため、ZX120のブーム、アーム、バケットの関節回転部にダナハー製アブソリュートエンコーダAC58を搭載し、車体本体にはNovatron製IMU G2を取り付けた。機体の位置および方位角推定のため、キャビン上部にHemisphere製RTK-GNSSコンパスV500を搭載した。

シミュレータ(図-3右)は、Unity上に構築し、物理エンジンにAGX Dynamicsを利用した。AGX Dynamicsによる最適化された部分的な粒子計算により、掘削、運搬時の土砂の挙動まで含めたリアルタイム土砂シミュレーションが可能である。

4. まとめ

自律施工における協調領域として、建設機械の制御インターフェースに注目し、ISO 15143をベースとして、施工コントローラと自動制御コントローラ間について、複数メーカー・複数機種油圧シヨベルを共通化したインターフェースで施工コントローラから制御可能とする制御信号リストを提案した。

今回の検討の対象外とした、自律制御コントローラと油圧コントローラ間のインターフェース定義については、建設機械の油圧制御の機構や制御特性を熟知している建設機械メーカー等の協力・賛

同が必須である。既に先行しているJ1939-71等の規格等を参考に共通化を今後検証する必要がある。

また、開発した自律施工技術基盤の構成について紹介した。今後は、プラットフォームや土工フィールドを活用し、技術の検証・評価や技術競技会などを行っていく予定である

参考文献

- 1) i-Construction推進コンソーシアム 第6回企画委員会資料-4, https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/pdf/04.6_kikaku_siryou4.pdf, (2021/9アクセス)
- 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) L. Zhang, et al. : An autonomous excavator system for material loading tasks, Science Robotics, Vol. 6, Issue 55, 2021
- 4) Heikkilä, R., et al. : Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform, Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vol. 36. IAARC Publications, 2019
- 5) ISO 15143-1:2010, Earth-moving machinery and mobile road construction machinery -- Worksite data exchange -- Part 1: System architecture
- 6) ROS: <https://www.ros.org/>