

BIM/CIM・ROS2 を活用した油圧ショベルの自律施工 自動施工計画・管理システムと自律型建機を接続

工 藤 新 一・秋 田 剛・井 村 進 也・山 崎 文 敬

一人で複数台の建設機械をオペレーションでき、省人化による生産性向上を図るとともに、同一のシステムで他の建設機械および様々な現場シーンでも利活用できる汎用性を持った仕組み（BIM/CIM, Robot Operating System2 (ROS2)）を構築することをめざし、油圧ショベルの自律施工を可能とする「自動施工計画・管理システム」を開発した。さらに、「自動施工管理システム」と2台の「自律型油圧ショベル」を無線通信で接続し、土工における自動施工技術の実証試験を行った。本報では、開発したシステムの概要および実証試験の実施内容について紹介する。

キーワード：油圧ショベル、施工計画、施工管理、自律施工、デジタルツイン、BIM/CIM、ROS

1. はじめに

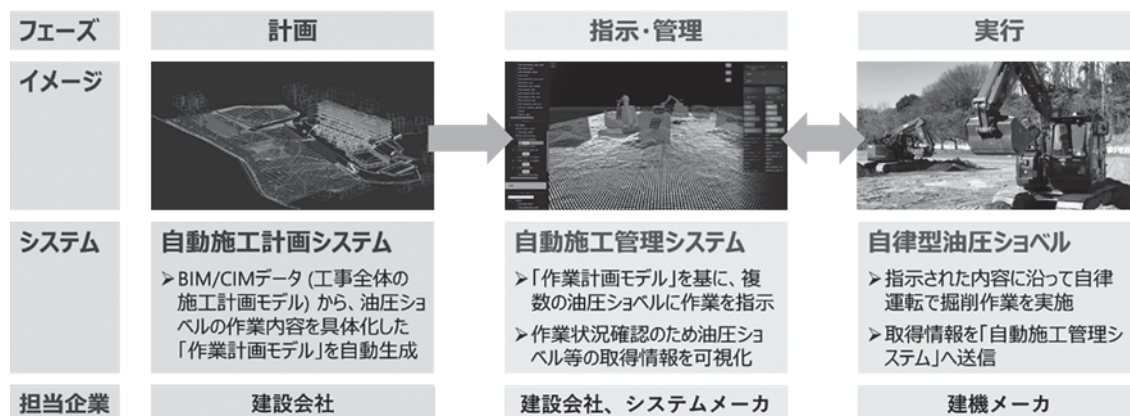
建設業界において、生産年齢人口の減少や高齢化、技能労働者の不足といった問題に対応するため、建設現場の生産性と安全性の向上が求められている。国土交通省においても、これまでの生産性向上の取り組みを加速化し、建設現場における省人化対策に取り組むため、新たに「i-Construction 2.0」を策定するなど建設現場のオートメーション化・省人化による生産性の向上が期待されている。近年、建設機械の遠隔操作システム等で構成される無人化施工技術が開発されており、これにより施工の安全性は向上しているが、生産性の向上にまでは至っていない。

将来の建設現場における生産性向上に向けては、自動化・自律化施工の技術開発も推進されているが、個々の施工会社と建設機械メーカーが各々に研究開発してい

る状況となっている。これでは、単一のメーカーの建設機械かつ、特定の現場条件下での省人化・効率化しか図れない。さらには、開発したシステムを他の建設機械に再利用することができず、開発の重複が発生し多大な開発投資が必要となる。開発の重複をなくし開発投資を抑制するためには、汎用性を持ったシステムの開発が求められる。

また、建設機械の自動化・自律化の技術開発が期待される中、建設機械施工の自動化・自律化協議会において、「自動施工における安全ルール」が審議されるなど安全に係るルールづくりが進められている。

これらを背景に、一人で複数台の建設機械を安全にオペレーションでき、省人化による生産性向上を図るとともに、同一のシステムで他の建設機械および様々な現場シーンでも利活用できる汎用性を持った仕組み（BIM/CIM, Robot Operating System2 (ROS2)）等



図一 システム構成（概念図）および各社の役割分担



写真一 油圧ショベルによる自律運転の実証試験

に対応したシステム)を構築することをめざし、建設会社と建機メーカ、システムメーカが協力し(図一1)、共同で複数台の自律型油圧ショベルを用いた自動施工技術の実証試験を行った(写真一)。

2. システム概要

油圧ショベルによる自律運転を可能とするシステムは、以下の3つのシステムで構成される。

- ・自動施工計画システム(開発担当:建設会社)
- ・自動施工管理システム(開発担当:建設会社, システムメーカ)
- ・自律型油圧ショベル(開発担当:建機メーカ)

本システムの構築・構成にあたっては、上流(施工計画)から下流(自動施工)までデータ・情報をシームレスに繋げ、自動掘削・放土や自動走行などの複数のタスクを組合せ複雑な工程の自動施工を可能とすることを考慮した。さらに、施工効率を最大化するため、自律・自動と遠隔のハイブリッド化を図った。

また、データフォーマットやOSについては、汎用性・拡張性が高く効率的なデータ連携とシステム接続を図り、3次元座標だけでなく施工計画の情報(属性

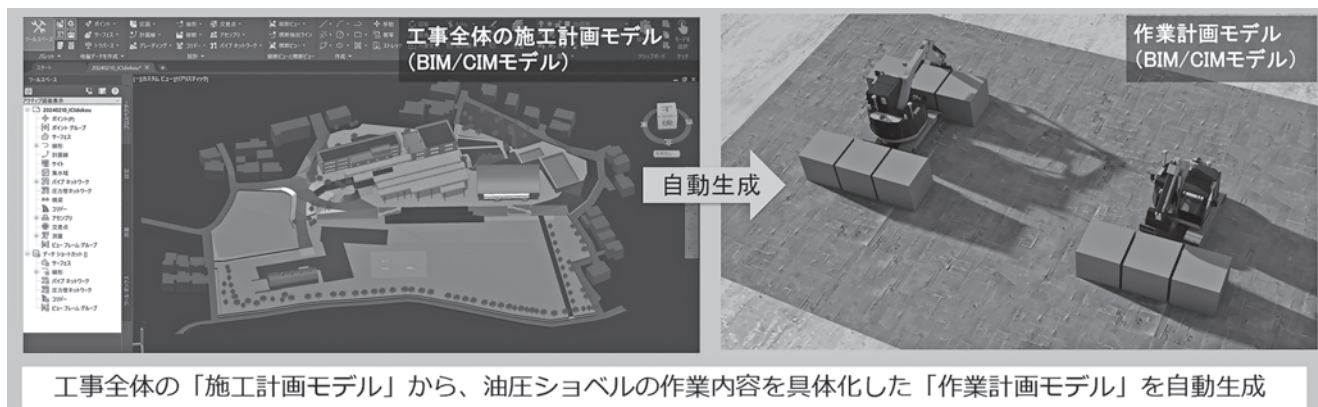
情報)を取り扱えるBIM/CIMと、施工計画の情報・データを自動施工(自律型油圧ショベル)までシームレスに届けることが可能なROS2を採用した。

(1) 自動施工計画システム

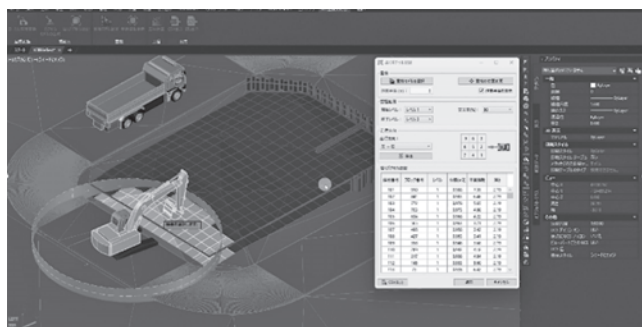
自動施工計画システム(図一2)は、施工計画段階のBIM/CIMモデルを基に、自動施工に必要な情報のみを自動で抽出・出力し、自律型油圧ショベルによる自動施工を指示・管理するシステムである「自動施工管理システム」に向けてシームレスにデータを送るシステムである。

主な機能として、掘削施工する範囲の土砂のBIM/CIMモデルを自動で作成する機能や油圧ショベルの仕様および作業可能範囲を考慮して掘削する順序の属性情報を自動で生成・付与する機能(図一3)、安全通路や資機材置き場等のエリアの属性情報を自動で生成・付与する機能などを開発し、これら複数の機能を組み合わせることで、自律・自動施工に必要な情報を自動で生成・出力できる仕組みを構築した。

本システムにより、工事全体の施工計画情報(BIM/CIMモデル)から、油圧ショベルの作業内容や手順を具体化した「作業計画モデル」を自動に生成するこ



図一2 自動施工計画システムによる作業計画モデルの自動生成



図ー3 属性情報の自動生成・付与機能

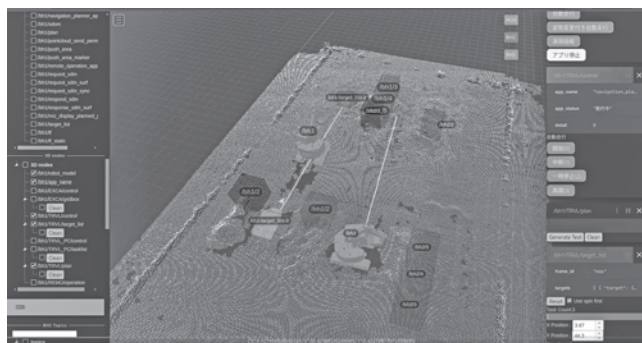
とができ、自動施工のための作業指示・管理に必要なデータ作成等の作業について効率化が図られる。

また、将来の機能の拡張や多様なシステムとの連携を視野に、計画・設計・施工・維持管理の各フェーズの情報を一元的に取り扱え、普及拡大しつつあるBIM/CIMに対応したシステム基盤およびデータフォーマット・データ構造を考慮し、施工計画から自動施工までのシステム間をつなぐデータの仕様・構造を設計した。

(2) 自動施工管理システム

自動施工管理システム（図ー4）は、自動施工計画システムより出力された「作業計画モデル」を基に、複数の自律型油圧ショベルに対して作業を指示・管理するシステムである。掘削作業の進捗状況など施工管理を円滑に行えるように、計画上の仮想空間（サイバー空間）と実現場である現実空間（フィジカル空間）とが連動するデジタルツインを採用した。

主な機能として、施工の指示に関する機能（指示機能）と施工の管理に関する機能（管理機能）を搭載した（図ー5）。指示機能については、自律型油圧ショベルが搭載するシステムに対し、掘削・放土、走行、遠隔操作、複数台連携の信号・情報を出力する機能を実装した。管理機能については、進捗、工程、安全、支障物に関する情報を視覚化・画面表示し、システム

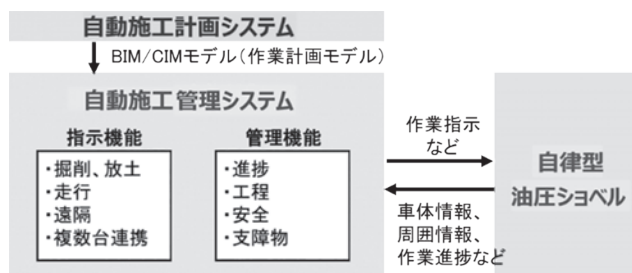


図ー4 自動施工管理システム

上で施工を管理できるようにした。

本システムにより、現場の建設機械や資機材などのオブジェクトと、掘削順序等の計画情報とが一元的かつ、リアルタイムに3次元（BIM/CIMモデルおよび点群データ）でモニタに表示され、複数台の自律型油圧ショベルへの指示や進捗等の管理を一人で円滑に行うことができる。さらに、遠隔操作機能を搭載し、現場の状況に合わせて自律運転と遠隔操作とを簡単に切り替えられるインターフェースを構築した。

また、人が作業指示を送る時に用いるシステムは、今後も様々なものが開発されることが想定される。そのため、作業指示を送るシステムと自律型油圧ショベルの間の通信には、汎用性・拡張性を考慮し、世界的に広く使われているROS2を採用した。自動施工管理システムと自律型油圧ショベルとの信号は、ROS2で通信可能なトピックの形式とした。自動施工管理システ



図ー5 自動施工管理システムの機能

表ー1 自動施工管理システムから送信する主な信号

No.	信号内容	送信タイミング
1	制御モード 切替指令	指令時
2	自動掘削・放土 範囲	指定時
3	自動掘削・放土 実行指令	指令時
4	自動走行 目標位置・方位	指定時
5	自動走行 実行指令	指令時
6	遠隔操作 操作量	10 ms 周期

表ー2 自律型油圧ショベルから受信する主な信号

No.	信号内容	送信タイミング
1	車体位置・方位	50 ms 周期
2	車体姿勢	10 ms 周期
3	車体状態	100 ms 周期
4	周囲情報	1 s 周期
5	制御モード 状態	1 s 周期
6	自動掘削・放土 目標動作	動作計算時
7	自動掘削・放土 終了通知	終了時
8	自動走行 目標経路	経路計算時
9	自動走行 終了通知	終了時

ムから自律型油圧ショベルへ送信する主な信号を表—1に、自律型油圧ショベルから自動施工管理システムが受信する主な信号を表—2に示す。

(3) 自律型油圧ショベル

自律型油圧ショベル（写真—2）は、自動施工管理システムからの指示に基づいて自律運転する。自律型油圧ショベルは、市販の（人が搭乗して操作する）油圧ショベルに、自律化システムと車体制御システムを追加したものである（図—6）。

主な機能として、人が車体に近づくことなく安全に遠隔で油圧ロック・解除できる機能と、複数のLiDAR（Light Detection and Ranging）とGNSS（Global Navigation Satellite System）により周辺の地形や支障物などの情報や車体と周囲の物体との距離などを取得することができる機能、自動で掘削・放土する機能、自動で走行する機能、遠隔で操作できる機能を搭載した。

自律化システムは、コントローラと、車体の周囲の地形や支障物を検出するセンサなどで構成される。自律化システムは、自動施工管理システムから作業指示を受け取り、車体姿勢（ブーム角度、アーム角度、バケット角度、旋回角度、ピッチ角度、ロール角度）、車体位置、車体方位、周囲情報などに基づいて車体をどのように動かすかを決定し、車体制御システムに、油圧ショベルの各アクチュエータの速度指令（ブーム

角速度指令、アーム角速度指令、バケット角速度指令、旋回角速度指令、右クローラ速度指令、左クローラ速度指令）を送る。

車体制御システムは、コントローラ、車体姿勢を検出するセンサ、車体を制御する電磁弁などで構成される。車体制御システムは、自律化システムから各アクチュエータの速度指令を受け取り、車体姿勢や車体内部情報に基づいて電磁弁を制御し、車体を動作させる。

自動施工管理システムで遠隔操作が行われた場合は、遠隔操作の操作量に基づいて電磁弁を制御し、車体を動作させる。

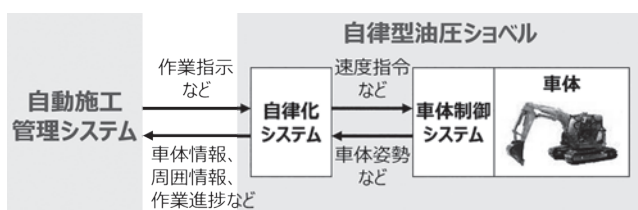
3. 実証試験

今回の実証試験は、自動施工計画システムから出力した施工計画データを自動施工管理システムに送り、自動施工管理システムと自律型油圧ショベルのシステムを接続し、自律型油圧ショベルの「自動掘削・放土機能」、「自動走行機能」、「遠隔操作機能」の基本性能および自動施工管理システムによる「複数台連携」についての実用性を確認した。なお、複数台連携については、2台の自律型油圧ショベルを使用した。なお、2台の自律型油圧ショベルは同一仕様とし、自動施工管理システムと無線通信で接続した。

また、実証試験のフィールドについては、自律型油圧ショベルが稼働するエリア（無人機械動作エリア）の外側に立入制限エリア（図—7）を設け、人と自律型油圧ショベルが近接・接触せず安全に実験できるようにルールを設定した。さらに、広範囲の地形を自動施工管理システムで確認できるようフィールドの周囲に、LiDARを搭載したサイトセンサシステム4台を配置し、自動施工管理システムと無線通信で接続した。



写真—2 自律型油圧ショベル（外観）



図—6 自律型油圧ショベルのシステム構成



図—7 実証試験フィールドの立入制限エリア

(1) 自動掘削・放土機能

自動掘削・放土機能（図一8）は、自動施工管理システムにより掘削範囲と放土範囲を指定・実行を指令すると、自律型油圧ショベルがバケットやブーム、アーム、旋回の動作経路を自動で計算し、ボクセル指定された掘削範囲の土砂をすくい、ボクセル指定された放土範囲に土砂を置く機能である。

また、自律型油圧ショベルは、実行が指令されたら掘削と放土を繰り返しながら、地形情報に基づいて指定された範囲の掘削を終了したかどうかを判断する。指定された範囲の掘削を終了したと判断したら、施工システムへ終了を通知する。

(2) 自動走行機能

自動走行機能（図一9）は、自動施工管理システムにより自律型油圧ショベルの目標位置と目標方位を指

定・実行を指令すると、自律型油圧ショベルが指定された目標ポイントまでの走行ルートを自動で計算し、操作することなく自動で走行する機能である。周囲の地形や支障物などの情報に基づいて、転倒や支障物と接触しない目標経路を計算し、走行に障害となる箇所を回避する走行ルートを自動生成することができる。

(3) 遠隔操作機能

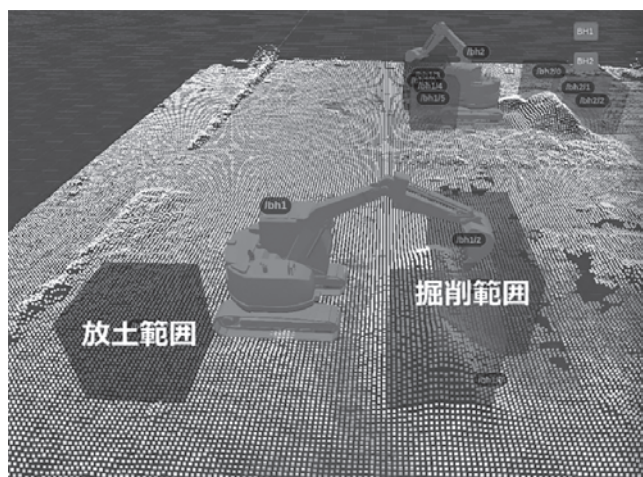
遠隔操作機能（写真一3）は、自動施工管理システムにより、自律型油圧ショベルの制御モード（自律運転モード／遠隔操作モード／制御 OFF）を切り替えることができる機能である。自動では掘削できないような場面でも施工を中断することなく、制御モードをシームレスに切り替えられる機能である。この機能により、現場の条件・状況に応じて最適な制御モードを選択することが可能となる。

(4) 複数台連携機能

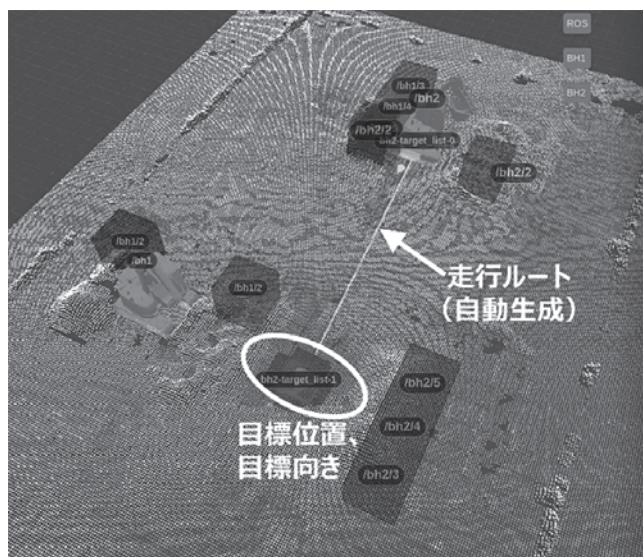
複数台連携機能は、自動施工管理システムにより、複数台の自律型油圧ショベルに指令を送信する機能である。また、複数台の自律型油圧ショベル（現実空間）の状況をリアルタイムに把握・デジタルツイン（図一10）を可能とする自動施工管理システム（仮想空間）により、複数台の自律型油圧ショベルを一人でオペレーションできる。

実証試験において、これらの機能について、各機能が正常に動作・連携したことを確認した。加えて、2台の自律型油圧ショベルを一人でオペレーションできることを実証し、その実用性も確認できた。

また、一定の効果を確認するとともに、現場導入に向けた安全機能や施工精度、運用ルールに関する課題を抽出した。引き続き、抽出した課題を整理・分析し、更なる安全機能の充実、施工精度の向上、運用ルールの策定等を図っていく。



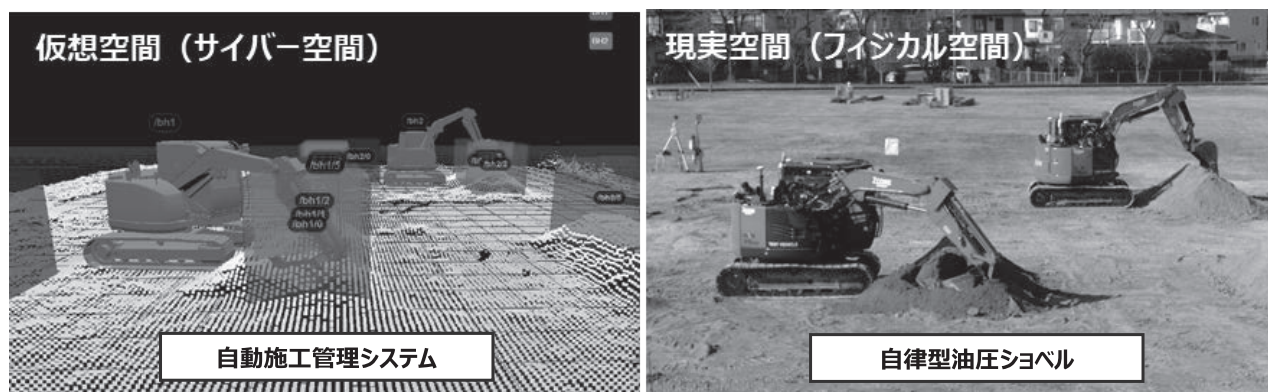
図一8 自動掘削・放土機能



図一9 自動走行機能



写真一3 遠隔操作機能



図ー10 デジタルツイン

4. おわりに

今回の実証試験により、自律型油圧ショベルによる施工の計画から指示・管理、実行までの複数のシステムを接続し、ROS2, BIM/CIM, 3次元点群データなどをシステム間でシームレスにデータ交換できる汎用的な機能の実用性を確認できた。これにより、他の自律型建設機械やシステムへの接続が容易になり、本システムの拡張性が高まった。

さらに、建機を管理するオペレータ1人で2台の自律型油圧ショベルへ作業指示を送り、2台がそれぞれ自律運転を行うことを確認し、省人化の見通しを得ることができた。

今後は、本システムの実用性および安全性を高めるとともに、油圧ショベル以外の運搬・敷均し・締固め等の自動・自律型建設機械にも適用拡大することにより、土木や建築の山留掘削、トンネル・シールドなどのズリ・土砂搬出、ダム・道路などの造成、災害現場といった様々な現場における更なる生産性の向上を図っていく。

J C M A

《参考文献》

- ・日立建機の公式YouTube「ZCORE 施工システムと油圧ショベルの連携による自動施工」
(<https://youtu.be/HcBQmzRTHFA>)
- ・国土交通省 i-Construction 2.0 ～建設現場のオートメーション化～
2024年4月

- ・国土交通省 大臣官房 参事官（イノベーション）グループ 自動施工における安全ルール Ver.1.0 2024年4月
- ・（国研）土木研究所 自律施工技術開発促進に向けた土木研究所の取組およびデモンストレーション 2021年11月

【筆者紹介】

工藤 新一（くどう しんいち）
前田建設工業(株)
土木事業本部 土木技術部
BIM/CIM 推進グループ長



秋田 剛（あきた つよし）
前田建設工業(株)
土木事業本部 土木技術部
施工 DX 推進グループ
主査



井村 進也（いむら しんや）
日立建機(株)
研究・開発本部 先行開発センタ
担当部長 兼 協調型建設機械プロジェクトリーダー



山崎 文敬（やまさき ふみのり）
(株)イクシス
代表取締役 Co-CEO 兼 CTO

