

自動運転ショベルの開発と現場運用

現場人員で運用できる自動運転技術

安藤ハザマ
コベルコ建機株式会社

○ 小田 銀河
藤原 翔
野田 大輔

1. はじめに

日本における生産年齢人口の減少は建設業に大きな影響を及ぼしている。特に 50 歳以上の労働者が多くを占める一方で、若年層の就業割合も低下しており、労働力不足が深刻な問題となっている。この労働力不足の解消を目的に国土交通省は 2016 年、ICT を活用して建設現場の生産性向上を目指す取り組みとして i-Construction¹⁾を発表した。さらに 2024 年には、ICT の活用と普及が進んだとして i-Construction2.0²⁾を発表した。ここでは建設現場のオートメーション化を推進して 2040 年に現場の生産性を 1.5 倍に拡大し、3 割以上の省人化を目指すとしている。今後は取り組みの 3 つの柱である「施工」「データ連携」「施工管理」のオートメーション化を実現するための技術開発が活発になることが予想される(図-1)。

安藤ハザマにおいては、省人化と生産性向上を目的に 2016 年から建設機械の自動運転技術の開発に取り組み、振動ローラ³⁾、ブルドーザ⁴⁾の自動化を行ってきた。2019 年からは現場での適用頻度と作業の汎用性が高い油圧ショベルの自動運転技術をコベルコ建機と共同で開発してきた。自動運転ショベルは複数の現場で実証を行い、技術面だけでなく、現場での運用面でも現場適用に問題のないことが確認できた。本稿では、自動運転ショベルが一定の完成段階となったことから、開発から現場検証についての経緯を報告する。



図-1 i-Construction2.0

2. 自動運転技術の開発課題

自動運転油圧ショベルの開発にあたっては、建設現場で使用するために次の課題が考えられた。

2.1 センサ技術の活用とデータ処理

建設現場では、掘削する土砂の形状や積込み対象であるダンプトラック荷台の位置は都度変化し、一定ではないため決められた動作では作業を行うことができない。そのため、形状や位置の変化を認識するためのセンサが必要となる。また、センサで認識した情報をもとにリアルタイムに動作を調整するデータ処理技術も必要となる。

2.2 安全性の確保

現時点では、全ての作業を自動運転建機で行うことができないため、有人運転の建機や作業員と協働で作業することとなる。作業の安全性を確保するため、フェイルセーフ機能や冗長性を持たせることで、万が一の故障時にも備える必要がある。

2.3 開発コストと経済性

センサやコンピュータを搭載するため、通常建機に比べて自動運転建機は調達コストが高くなる。複雑な作業に対応するために自動運転建機を高度化するとさらに調達コストは増加し、現場での適用が現実的ではなくなるため、経済的に実現可能な用途で使用することが重要である。

2.4 現場人員の教育と訓練

新しい技術を導入する際には、現場の作業員に対する教育と訓練が欠かせない。自動運転技術を理解し、現場で適切に操作できるようにするための対策が必要である。

3. システム概要

自動運転油圧ショベルの用途として、建機が移動することなく同じ動作を繰り返すような運転手が苦渋に感じる作業に着目し、人に代わって作業を行う自動運転システムを開発することとした。このシステムでは、実際の運転手の油圧ショベル操作を各種角度センサで記録し、記録した操作を再現する形で運転を自動化している。外部認識機能として油圧ショベルに LiDAR とカメラを搭載

して外部にある対象物の形状と位置を計測し、その情報をもとに動作の制御を行うことで効率的な自動運転を行っている。このとき、制御システムの開発は MBD（モデルベース開発）、外部認識機能の開発は ROS（Robot Operating System）環境を適用して全体的な開発効率の向上を図った。

3.1 システム構成

自動運転に使用した油圧ショベルはコベルコ建機製の SK135SR-5（13t 級 **写真-1 左**）および SK200-10（20t 級 **写真-1 右**）である。油圧ショベルには位置・姿勢情報を取得する角度センサ、加速度計など各種センサを搭載しており、これらのセンサ情報は制御コントローラに集約される（**写真-2**）。外部情報は LiDAR とカメラから取得し、その情報は周囲認識コントローラ（**写真-3**）に集約され、対象物の認識を行っている。対象物の認識情報とバケット、アーム、ブーム、旋回状態などを把握し、それぞれの部位を制御することで自動運転を行っている（**図-2**）。

3.2 制御概要

運転手の動作内容を記録し、動作を再現指示することで繰り返しの自動運転をするティーチング・プレイバック方式を採用している。動作内容の記録と再現指示はタブレットから遠隔で行うことができ、タブレットを複数台のショベルと接続し、1人で同時に作業指示を行うことができる。

3.3 外部認識機能

掘削対象の土砂は油圧ショベルに搭載した LiDAR（**写真-4**）の点群情報から、土砂山を判別して位置と高さを検知している。ダンプトラックの荷台は、カメラと LiDAR の情報を併用して位置を検知している。

3.4 安全支援装置

許容動作範囲を逸脱しないように、記録した動作内容と自動運転中に計測された動作内容を表示するシステムを搭載している（**写真-5**）。また操作タブレットとは別に、無線により自動運転を停止させる非常停止装置を設けている。さらに、外部に設置したレーザーバリア等と連携し、干渉した場合は機体を非常停止させることができる。



写真-1 自動運転に使用した油圧ショベル

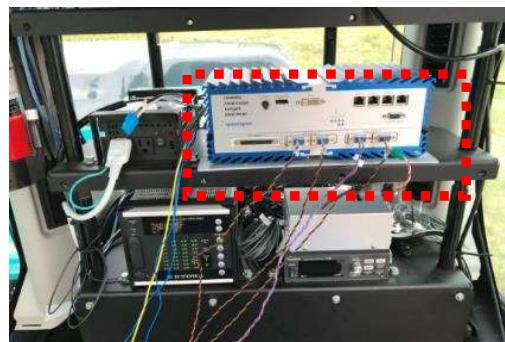


写真-2 制御コントローラ



写真-3 周囲認識コントローラ

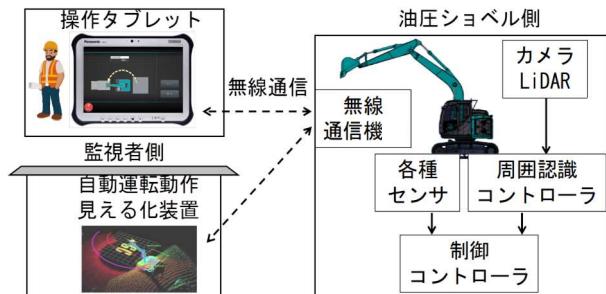


図-2 機器構成



写真-4 搭載した LiDAR

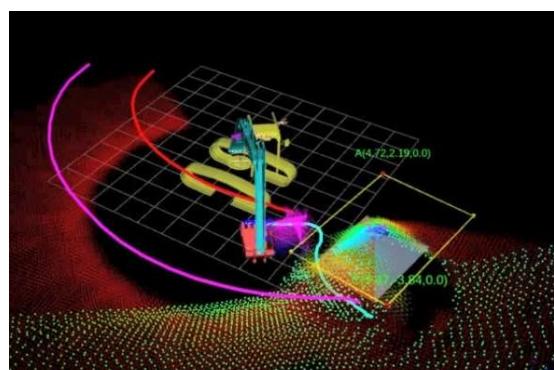


写真-5 自動運転動作の見える化

4. 実証実験と結果

4.1 外部認識機能の動作実験

(1) 実験方法

開発した外部認識機能が対象物を正しく認識・判断でき、人の運転操作と同様に自動運転できることを実験により確認した。実験では積み上がった土砂をダンプトラック荷台へ繰り返し積込む一連の動作について検証した(写真-6)。

- 自動運転の動作手順は次の通りである(図-3)。
- ・自動運転システムで油圧ショベルの各部位の挙動であるセンサデータの記録を開始する。
 - ・運転手が油圧ショベルを操作し、バケットの刃先位置によって掘削対象となる土砂の作業範囲を指定する(①)
 - ・運転手が土砂の作業範囲からダンプトラック荷台に積込むまでのショベルの動作軌跡を記録する。(②→③→④)
 - ・自動運転システムの記録を停止する。
 - ・運転手が通常の油圧ショベルを操作しながら操作タブレットで自動運転ショベルへ記録した動作の再現を指示する。(⑤)
 - ・AIによる外部認識機能で検出、認識した掘削対象の土砂山の形状・位置と積込み対象のダンプトラック荷台を特定する。(⑥→⑦)
 - ・特定した情報と記録したセンサデータから、自動運転システムが掘削位置と動作経路を自動生成して自動運転の動作を実行する。(⑧→⑨→⑩→⑪)
 - ・自動運転システムは荷重計量機能と連携し、バケットにすくい取った土砂重量を計測でき、ダンプトラックへの土砂積込み重量が設定値を超えると積込み動作を自動的に終了する。

(2) 実験結果

図-4のように、LiDARで計測した情報とAIを用いて土砂山を認識することができた。LiDARの点群情報から判別した土砂山の位置形状は、基準となる地点で比較して±200mm以内の差異であり、自動運転に問題のない精度で位置形状を認識できていると考える。また、LiDARとカメラによる情報からAIが算定したダンプトラックの荷台位置は、ショベルとの相対位置で実測に対して±50mm以内の差異であり、現場適用に問題のない精度で認識できていることを確認した。

4.2 現場での動作実験

外部認識機能を装備した自動運転ショベルの現場環境下での安全性と作業時間について検証した。

(1) 実験方法

実証実験は、シールド工事現場においてピットに貯留している掘削土砂をダンプトラックに積込む作業を自動運転で行い、安全性や有人運転との速度比較などを検証した(写真-7)。



写真-6 自動運転の状況

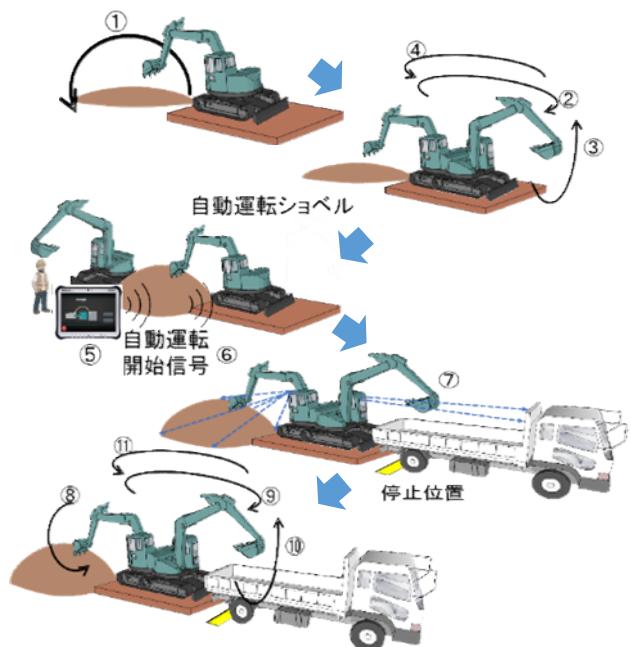


図-3 自動運転の動作手順

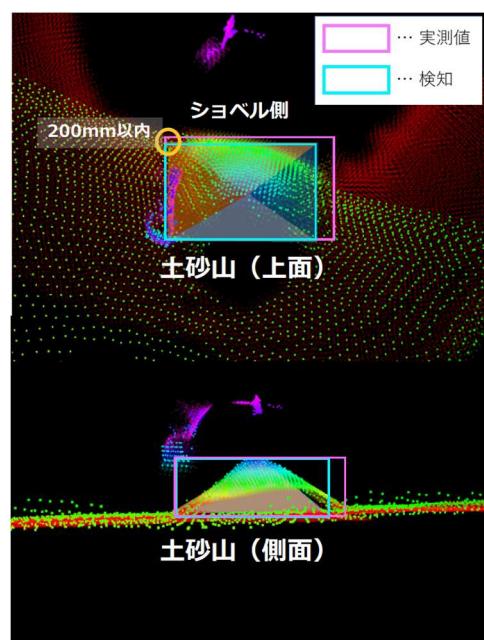


図-4 土砂形状・位置の認識結果

自動運転の動作手順は図-3で示した通りである。このうち①～④は事前に実施しておき、⑤～⑪は自動積込みを行うダンプトラック毎に実施した。

(2) 実験結果

安全面に関して、稼働中の現場であることから、人や物への接触防止を重点的に対策した。現場は油圧ショベルの動作範囲に余裕がない条件であったが、機械側の旋回角度検知やレーザーバリア設置等で稼働範囲を制限した。これにより、周囲と接触することなく積込み動作を行うことができた。特に旋回軌道上の飛散防止シートを回避するため、ブーム上げながら旋回する同時動作が必要であったが、目標通りに動作して接触することはなかった(写真-8)。

また、現場で実証実験を開始時した直後の自動運転システムによるダンプトラックへの土砂積込みに要した時間は、有人運転と比較して約2倍となっていた。その後、制御方法と動作設定を見直すことで、約1.6倍の作業時間で積込み作業を自動化することができた(図-5)。自動運転に際しては、別途ティーチングや準備作業に時間を要するが、これらの作業は何度も行う必要がないため、サイクルタイムへの影響は小さいと考えている。



写真-7 自動運転の現場実証

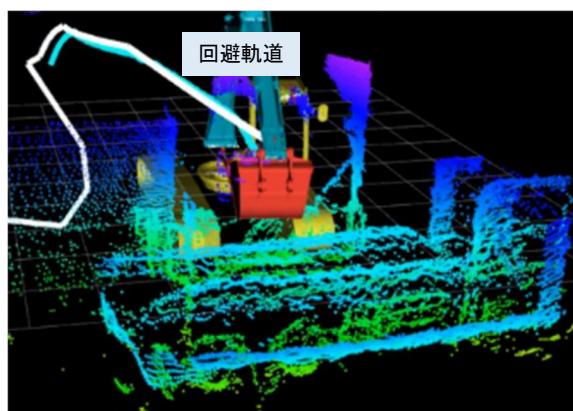


写真-8 飛散防止シートの回避

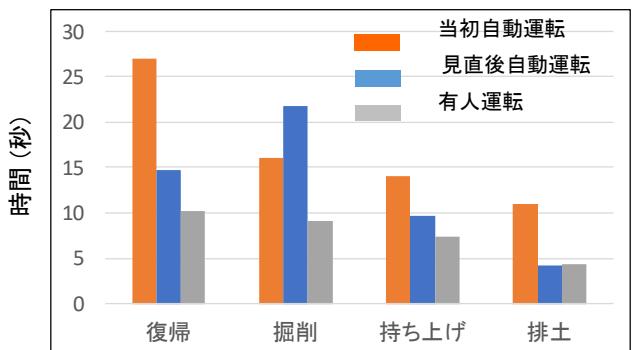


写真-5 積込み作業の時間

4.3 複数台管理機能の実証実験

自動運転では動作制御や安全面から有人運転に比べて動作速度が劣り、生産性の向上には課題がある。そこで、運転手1人で複数の自動運転ショベルを同時稼働・作業監視させることで生産性を向上させる機能を開発した(写真-9)。

(1) 実験方法

1人の操作者が2台の自動運転ショベルへ作業指示・監視することで掘削土砂をダンプトラックに積込みが可能か実証実験を行った(写真-10)。その際、自動運転ショベルでの作業時間を計測し、有人運転と比較した。各自動運転ショベルへの動作指示は図-3で示した通りである。

(2) 実験結果

有人運転と自動運転によるダンプトラックへの土砂積込み作業に要する時間を計測した(表-1)。有人運転では233秒に対して、自動運転はティーチング時間ほかを含めると604秒と大幅に時間を要した。この時、有人運転(運転手1名に対し油圧ショベル1台)では人日当たりの積込み台数が100台であったのに対して、自動運転では1人の運転手が2台の自動運転ショベルの同時稼働を行ったとすれば128台となり、3割増加することが分かった(図-6)。今回は2台のショベルの同時稼働だったが、台数を増やすことでさらなる積込み台数の拡大も期待できる。



写真-9 操作タブレットの画面

4.4 運用面を考慮した実現場での試行

(1) 実験方法

技術面では自動運転として実用化レベルに達したもの、現場人員だけでは自動運転システムを設定するのは難しく、稼働開始までに時間が掛かってしまい、自動運転の操作も難しいという運用面での課題が残っていた。そこで、それら2つの

課題について、シールド工事現場において、検証した。具体的な検証項目は次の5点である。

- ① 現場搬入後の準備立ち上げ時間：現場搬入から自動運転システムが立ち上がるまでの時間
- ② 日常点検の試行・評価：現場職員、作業員だけで日常点検ができるか
- ③ 自動運転操作の試行・評価：現場職員、作業員だけで自動運転操作、運用ができるか
- ④ 施工の品質評価：自動運転で荷こぼしなく積込みができるか
- ⑤ 自動運転の安定性：自動運転システムが安定して稼働し、かつ継続して操作、運用ができるか

(2) 実験結果

① 現場搬入後の準備立ち上げ時間

自動運転システム立上げまでの確認項目および、各項目の所要時間を表-2に示す。自動運転システムの初回設定手順書を作成したことに加えて、タブレット画面に沿って操作すれば確認が完了するようにユーザーインターフェースを再設計したこと、ショベルの搬入からシステム稼働までの設定、動作確認に開発担当者がこれまで1日程度要していたものが、1.5時間で完了させることができた。

② 日常点検の試行・評価

自動運転システムの日常点検は、各項目の詳細内容を記載した日常点検リストを作成したこと、現場人員でも問題なく実施することができた。

③ 自動運転操作の試行・評価

①に記載のように画面指示に沿って操作することで設定が完了するようにユーザーインターフェースを設計した。これにより直感的にタブレットを扱うことができ、2時間弱の指導で、現場人員のみでエリア設定やティーチング、自動運転の指示操作が実施できるようになった(写真-11)。

④ 施工の品質評価

エリア設定、ティーチング、および掘削対象物と積込み対象場所の検知に従い動作することで、荷台への接触やバケットからの土砂の荷こぼしもなくダンプトラックの荷台へ自動運転により積込むことができた(写真-12)。積込んだ土砂をバケットの背で均す動作も自動で行うことで、荷姿は良好であった。



写真-10 自動運転ショベル2台への動作指示状況

表-1 積込み作業の時間

有人運転の積込み時間

作業内容	所要時間(秒)
ダンプ位置確認	10
積込み	201
均し	22
計	233

自動運転の積込み時間

作業内容	所要時間(秒)	
ティーチング	93	
エンジン始動	29	
機械の切り替え	5	
ダンプ検知	50	
積込み	395	127
均し	32	
計	604	477

表-2 確認項目ごとの所要時間

確認項目	所要時間(h:m)
自動運転機器の通信確認	0:07
カメラ、LiDARおよび各種センサ動作確認	0:06
作業場所の決定	0:30
非常停止装置の動作確認	0:08
自動運転動作設定(エリア、動作ティーチング)	0:18
自動運転動作の事前確認	0:25
合計	1:34

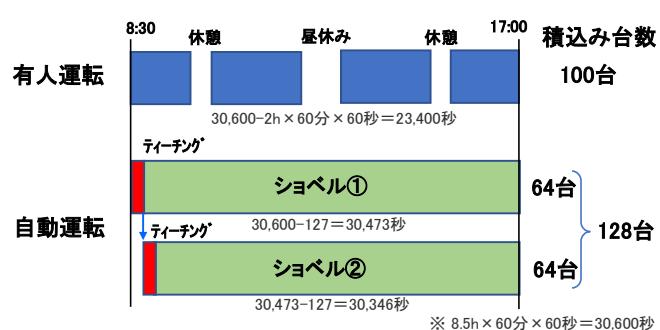


図-6 有人運転と自動運転の積込み台数比較(算定)



写真-11 タブレットによる自動運転の様子



写真-12 自動運転での積込み状況

⑤自動運転の安定性

現場での2週間の連続使用の結果、自動運転システムの不具合による停止は発生せず、安定して稼働したこと、現場人員だけで問題なく土砂の掘削・積込みを行うことができた。

5. 考察

5.1 技術面での評価

開発した外部認識機能が対象物の形状や位置を施工に問題ない精度で検知でき、より効率的な自動運転が可能であることを確認した。また、実現場での検証では外部認識機能で得た情報をもとに掘削位置や積込み位置を調整することで変化する現場状況にも対応し、効率的な運転ができるこことを確認した。加えて、システムが誤動作することなく、動作の信頼性でも現場適用に安全面の問題はないことを確認した。このことにより技術面では現場適用レベルに到達し、一定の完成をみたと考えている。

しかし、現時点では有人運転に比べて自動運転の動作速度は劣っており、動作速度向上に向けて制御面での改善を継続的に行う必要がある。複数台の同時稼働や休憩なしの連続稼働など現場での運用方法も合わせて検討すべきである。

5.2 運用面での評価

運用面を考慮した実現場での試行により、自動運転のシステム稼働までの時間を短縮し、現場人員だけで運用できることが確認できた。また、

開発担当者だけが操作、運転できるような取り扱いが難しいシステムではなく、広く現場に展開できる汎用性を備えていることを確認できた。このことにより、技術開発段階から、実用・普及段階に移行できたと考えている。

5.3 安全面での評価

安全性確保のためフェイルセーフ機能を持たせたシステムとしたことで、実現場での実証実験、試行では人や物との接触もなく実施できた。また自動運転システムも安定して稼働したことから、現場適用に問題はないと考えている。

国土交通省では、「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を2022年3月に設置し、2024年3月には「自動施工の安全ルール Ver.1.0」を策定した。一方、両社はこれまでの実証を通じて様々なリスクアセスメントを行い、既に安全ルールに合致した安全性を確保していた。このこともあり、安全ルールの策定に参加し、我々の考える装備すべき安全装置やリスクアセスメントについて提言を行なながら、存在感をアピールする活動を行っている。

6. おわりに

本技術は油圧ショベルが移動することなく、同じ動作を繰り返すような単純作業の自動化を行ったものである。このような自動運転ショベルであっても、適用できる作業は少なくないと考えている。シールド掘削土の積込み、トンネル掘りの2次搬出などで適用できると考えている。

このような作業であれば、複数台のショベルを1人で操作することも可能であり、人日あたりの作業量を増大させることもできる。単純作業は自動運転で行い、それ以外の作業は有人運転で行うことで限られた人員を最適配置でき、作業の効率化と生産性の向上が実現できると考える。

自動運転では、技術面だけでなく現場における運用面でも、自動運転ショベルの実用化について一定の目途がついたと考える。これらの共同開発の成果をもとに、今後、自動運転の適用工種の拡大と現場運用に向けた取り組みを加速させていく。

参考文献

- 1) <https://www.mlit.go.jp/common/001137123.pdf>
- 2) <https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>
- 3) 武石学ほか：振動ローラの自動運転システムに関する実験報告、土木学会第73回年次学術講演集、2018,VI-701
- 4) 武石学ほか：ブルドーザの自動運転システムに関する撒き出し実験報告、土木学会第74回年次学術講演集、2019,VI-357