

33. 施工システムからの指示に基づいて動作する自律型油圧ショベル

日立建機株式会社
日立建機株式会社
日立建機株式会社

○ 井村 進也
伊東 勝道
石井 宏紀

1. 開発の背景

建設業においては、生産労働人口の減少や熟練技能者の高齢化を背景として、省人化による生産性の向上が課題となっている。その解決策のひとつとして自律型建設機械の開発に期待が寄せられている。

建設機械は様々な現場で使われており、同じ作業を繰り返す現場もあれば、工事の進展に伴って作業内容が変化する現場もある。同じ作業を繰り返す現場を対象として自律型建設機械を開発する場合、作業内容を事前に細かくプログラミングしたとしても開発工数は多くならない。しかし、工事の進展に伴って作業内容が変化する現場を対象とする場合、全ての作業内容を事前に細かくプログラミングすると開発工数が膨大になってしまう。

そこで本研究では、工事の進展に伴って人が都度、大まかな作業指示を送ることを前提にして、送られてくる作業指示から細かな動作を自律的に判断して動作することができる自律型油圧ショベルを開発した。人が作業指示を送る時に用いるシステムは、今後、様々なものが開発されることを想定し、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、拡張性を考慮して、世界的に広く使われている ROS2 (Robot Operation System 2) を用いた。また、開発した自律型油圧ショベルを検証するために、前田建設工業株式会社と株式会社イクスが共同開発した施工システムと接続し、実証試験を行った。

2. 自律型油圧ショベルの構成

図-1 に開発した自律型油圧ショベルの外観を示す。また、図-2 に自律型油圧ショベルのシステム構成を示す。自律型油圧ショベルは、施工システムから送られてくる作業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て構築した。

自律化システムは、コントローラと、周囲情報

（地形や支障物などの情報）を取得するセンサなどで構成する。自律化システムは、施工システムから作業指示を受け取り、周囲情報、車体位置、車体方位、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）などに基づいて車体をどのように動かすかを決定し、車体制御システムへ角速度指令（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）や速度指令（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、車体の位置と方位を計測するシステム、車体姿勢を計測するセンサ、アクチュエータを制御する電磁弁などで構成する。車体制御システムは、自律化システムから角速度指令などを受け取り、車体姿勢などに基づいて電磁弁を制御して、車体を動作させる。



図-1 自律型油圧ショベルの外観

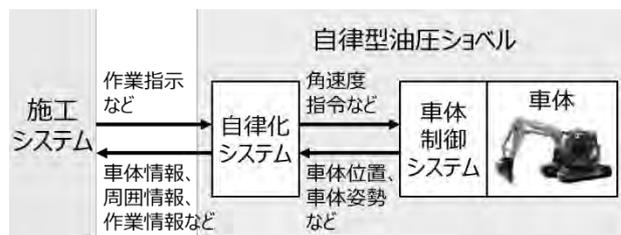


図-2 自律型油圧ショベルのシステム構成

3. 自律型油圧ショベルの機能

3.1 遠隔油圧ロック・解除機能

開発した自律型油圧ショベルは、車体が動く可能性がある時に人が車体に近づかなくても済むように、遠隔からパイロット油圧回路を遮断（以後、油圧ロックと呼ぶ）して、車体を動かなくすることができる。

車体を動かす時は、油圧ロックしたままエンジンを始動し、車体から離れてから油圧ロックを解除するようにする。車体に近づく時は、遠隔から油圧ロックした後、車体に近づくようにする。

3.2 周囲情報取得機能

自律型油圧ショベルは、複数の LiDAR (Light Detection and Ranging) を搭載し、車体から周囲の物体（地面や支障物など）までの距離を計測する。また、GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いて車体の位置と方位を計測する。車体から周囲の物体までの距離と、車体の位置と方位から、周囲の物体の位置を計算することができ、周囲の地形や支障物などの情報を取得することができる。

取得した周囲情報は、自律型油圧ショベルから施工システムへ送信する。人は施工システムを用いて、現場の状況を確認しながら作業指示を送ることができる。

3.3 自動掘削・放土機能

人が施工システムを用いて、掘削範囲と放土範囲を指定して自動掘削・放土の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは指定された範囲を掘削して指定された範囲に放土する。

自律型油圧ショベルは、指定された掘削範囲の中でどのように掘削すると効率良いかを判断し、その掘削動作を実現するためのブーム、アーム、バケット、旋回の目標動作を計算する。そして、指定された放土範囲に放土するためのブーム、アーム、バケット、旋回の目標動作を計算する。計算した目標動作は、自律型油圧ショベルから施工システムへ送信され、人は施工システムを用いて、目標動作を確認してから実行を指令することもできる。

自律型油圧ショベルは、目標動作で動くためのブーム、アーム、バケット、旋回の角速度を計算し、その値と車体姿勢、車体状態に基づいて電磁弁を制御する。掘削・放土の1サイクル毎に指定された範囲の掘削を終了したかどうかを判断し、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し、そうでなければ掘削・放土を繰り返す。

3.4 自動走行機能

人が施工システムを用いて、目標位置と目標方位を指定して自動走行の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは目標位置で目標方位を向くよう

に走行する。

自律型油圧ショベルは、周囲の地形や支障物などの情報に基づいて、転倒したり支障物と接触したりしない目標経路を計算する。計算した目標経路は、自律型油圧ショベルから施工システムへ送信され、人は施工システムを用いて、目標経路を確認してから実行を指令することもできる。

自律型油圧ショベルは、目標経路と車体位置・方位に基づいて電磁弁を制御し、目標位置で目標方位を向いたら、施工システムへ終了を通知する。

3.5 遠隔操作機能

上述した自動掘削・放土機能と自動走行機能を組み合わせれば、工事の進展に伴って掘削・放土する場所が変化する現場にも対応できるが、掘削、放土、走行以外の動作が必要になる時や、何かしらの原因で自律運転がうまくできない時は、オペレータが遠隔から操作したり、車体に搭乗して操作したりすることもできる。

施工システムで、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、オペレータが遠隔操作する時は遠隔操作モードに切り替え、車体に搭乗して操作する時は制御OFFに切り替える。遠隔操作モードの時は、オペレータは施工システムのコントローラを操作し、施工システムはその操作量を自律型油圧ショベルへ送信し、自律型油圧ショベルはその操作量に基づいて電磁弁を制御して動作する。

3.6 施工システム・自律型油圧ショベル間の信号

表-1に施工システムから自律型油圧ショベルへ送信する主な信号を、表-2に自律型油圧ショベルから施工システムへ送信する主な信号を示す。なお、これらの信号はROS2で通信可能なトピックの形式とした。

施工システムから自律型油圧ショベルへは、自律運転の時は、自動掘削・放土や自動走行の指令を送信し、遠隔操作の時は、遠隔操作の操作量を送信する。

自律型油圧ショベルから施工システムへは、車体位置・方位、車体姿勢、車体状態（油圧ロック状態など）、周囲情報、作業情報（自動掘削・放土や自動走行に関する情報）などを送信する。

表-1 施工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-2 自律型油圧ショベルから送信する主な信号

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

4. 実証試験

開発した自律型油圧ショベルを検証するために実証試験を行った²⁾。実証試験は、前田建設工業株式会社のICI総合センターで行った。

実証試験では、大規模造成工事や都市土木における土留め内の掘削工事など、2台の油圧ショベルが連携して同時に施工する現場を想定し、2台による土砂の受け渡し動作を検証した。自律型油圧ショベルは同じものを2台準備し、施工システムと無線で接続し、1人が施工システムを用いて2台へ作業指示を送った。2台へはそれぞれ作業指示を送る必要があるが、一度作業指示を送ったら、自律型油圧ショベルはその作業が終わるまで自律的に動作するため、2台それぞれにオペレータが搭乗する場合と比べて省人化になる。

図-3に実証試験エリアの模式図を示す。自律型油圧ショベルが無人機械動作エリアを出ないように作業指示や遠隔操作を行い、人は無人機械動作エリアと立入制限エリアに入らないようにした。そうすることで、たとえ車体が無人機械動作エリアをはみ出たとしても、はみ出たのが立入制限エリア内であれば、人とは接触しない。また、広範囲の地形を施工システムで確認できるように、LiDARを搭載したサイトセンサを4台準備して周囲に配置した。サイトセンサと施工システムは無線で接続し、サイトセンサから施工システムへ地形や支障物などの情報を送信した。

実証試験を始める時は、人が無人機械動作エリアに入って、自律型油圧ショベルを油圧ロックしたままエンジンを始動し、車体から離れて立入制限エリアの外に出て、遠隔から油圧ロックを解除した。実証試験を終える時は、遠隔から油圧ロックした後、人が無人機械動作エリアに入って自律型油圧ショベルのエンジンを停止した。

図-4に実証試験の様子を示す。また、図-5に図-4と同じ時刻における施工システムの画面を示す。図-4に示した実際の地形および自律型油圧ショベルの位置・姿勢と、図-5に示した施工システムの画面の地形および自律型油圧ショベルの位置・姿勢は同じであり、施工システムが実際の状況をリアルタイムに把握していることを確認できた。



図-3 実証試験エリアの模式図



図-4 実証試験の様子

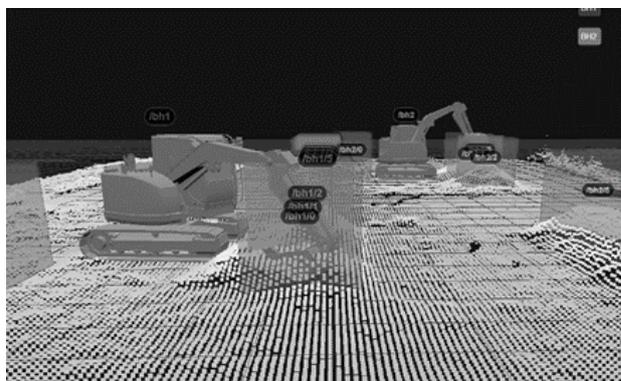


図-5 施工システムの画面

図-6に自動掘削・放土の指示を行う時の施工システムの画面を示す。人が施工システムのマウスを操作して、掘削範囲と放土範囲を指定して自動掘削・放土の実行を指令すると、自律型油圧ショベルが指定された範囲を掘削し、指定された範囲に放土する動作を繰り返し行うことを確認した。また、掘削範囲の土がなくなった時に、自律型油圧ショベルが施工システムへ、自動掘削・放土の終了を通知することを確認した。

図-7に自動走行の指示を行う時の施工システムの画面を示す。人が施工システムのマウスを操作して、目標位置と目標方位を指定して自動走行の

実行を指令すると、自律型油圧ショベルが目標位置で目標方位を向くように走行することを確認した。また、走行を終えた時に、自律型油圧ショベルが施工システムへ、自動走行の終了を通知することを確認した。

図-8 に遠隔操作の様子を示す。施工システムで自律型油圧ショベルの制御モードを遠隔操作モードに切り替えて、オペレータが施工システムのコントローラを操作すると、自律型油圧ショベルが操作通りに動作することを確認した。

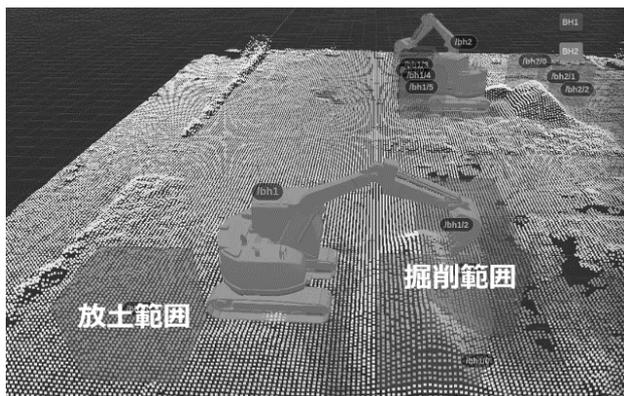


図-6 自動掘削・放土の指示

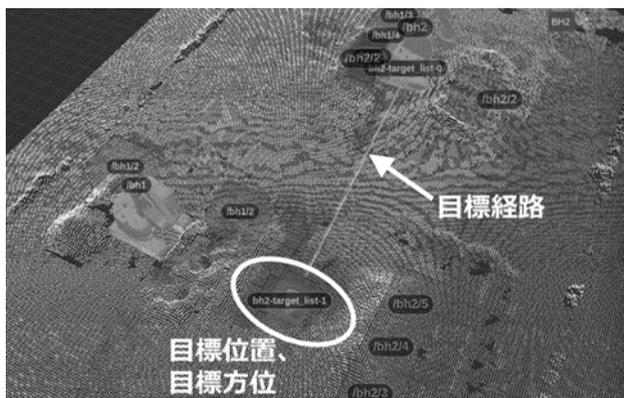


図-7 自動走行の指示



図-8 遠隔操作の様子

5. まとめ

施工システムから送られてくる作業指示に基づいて自律的に動作することができる自律型油圧ショベルを開発した。人が施工システムを用いて、掘削範囲と放土範囲を指定して自動掘削・放土の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは指定された範囲を掘削して指定された範囲に放土する動作を繰り返し行い、掘削範囲の土がなくなった時に終了を通知する。また、目標位置と目標方位を指定して自動走行の実行を指令すると、自律型油圧ショベルは目標位置で目標方位を向くように走行し、走行を終えた時に終了を通知する。さらに、施工システムで遠隔操作モードに切り替えてコントローラを操作すると、自律型油圧ショベルは操作通りに動作する。

実証試験では、1人が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。

参考文献

- 1) 井村進也：遠隔・自動化のためのシステムプラットフォーム，建設機械，Vol. 57，No. 10，pp. 14～17，2021
- 2) 日立建機：TP15-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://www.youtube.com/watch?v=HcBQmzRTHFA>
(参照日2024年8月20日)