

自律ショベルの開発

Development of Autonomous Excavator

●佐野 裕介* 原 孝介* 相澤 晋* 平手 奨二*

Yusuke SANO

Kosuke HARA

Susumu AIZAWA

Shoji HIRATE

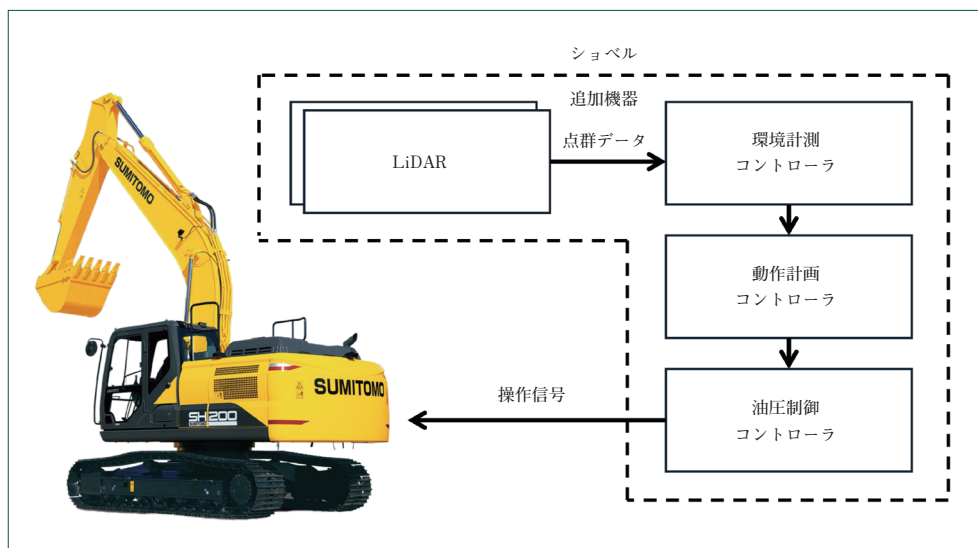


図1 自律ショベルの機器構成
Device configuration of autonomous excavator

建設業界では、熟練労働者の減少による労働力不足の解消と生産性向上が課題となっている。国土交通省のi-Construction2.0は施工のオートメーション化を目指しており、特に油圧ショベルの自動化が注目されている。当社グループでは自律ショベルの開発を進めているが、これは搭載されたコンピュータが周囲の環境を考慮しながら自律的に動作を計画し、作業を実施するものである。自律ショベルには、LiDARなどの自律動作に必要な機器が搭載され、これらのセンサ情報をもとに環境計測、動作計画、油圧制御が動作する。実証実験では、自律ショベルの性能を掘削土砂重量や作業時間によって評価し、掘削積込みと法面整形が自律作業によって行われることを確認した。また、開発中の成果は、国内外の展示会で参考出展を行った。

Major problems in the construction industry are labor shortages due to a decline in skilled workers and the need to improve productivity. In i-Construction 2.0, the automation of construction work is being promoted, and the development of autonomous construction machinery is progressing. We are developing an autonomous excavator that plans its operations autonomously while taking into account the surrounding environment and carries out tasks. This machine is equipped with sensors necessary for autonomous operation, and environmental sensing, motion planning, and motion control are performed based on this sensor information. In a proof-of-concept experiment, the performance of the autonomous excavator was evaluated based on the excavated soil weight and cycle time, and it was confirmed that the tasks of loading dump trucks and leveling slopes could be performed automatically.

1 まえがき

建設業界では、熟練労働者の減少による労働力不足の解消と生産性の向上が課題になっている。国土交通省が2024年に策定したi-Construction2.0では、施工のオートメーション化、データ連携のオートメーション化、施工管理のオートメーション化によって省人化を実現することを目指している⁽¹⁾。施工のオートメーション化では、施工を自動化することによって、一人のオペレータが複数の建設機械を遠隔で管理することを目指している。施工を自動化するには、建設機械を自動で動作させる必要があるが、建設機械のなかで油圧ショベ

ルは作業タスクや動作環境の複雑さによって、ルールベースで動作する自動化が困難であった。しかしながら、近年、高度なアルゴリズムを搭載し油圧ショベル自らが考えて動作する自律ショベルの開発が進んでおり⁽²⁾、現場への適用が期待されている。

2 開発目的

当社グループにおいても油圧ショベル自律化開発の成果を報告しており⁽³⁾、本報では自律ショベルの性能実証を目的に、油圧ショベルを自動で動作させるための機能を開発し、実証実験を行った結果を報告する。自律ショベルは、自動で所望



図2 ショベルに設置された LiDARのうち、車体上のもの
LiDAR mounted on machine, installed on vehicle body

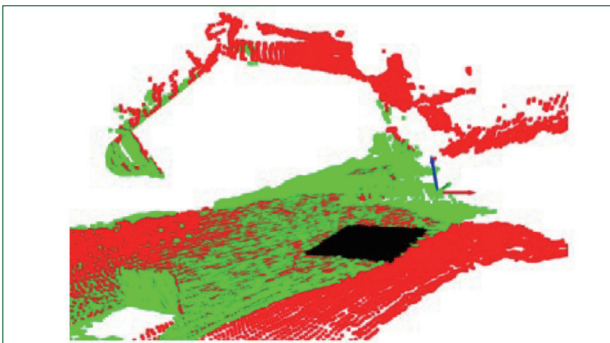


図4 点群データ
Point cloud data

のタスクを完遂する油圧ショベルである。通常の油圧ショベルは、機械に搭乗したオペレータの操作によって動作するが、自律ショベルは、ショベル内部に搭載されたコンピュータが周囲の環境を考慮しながら自律的に動作を計画し、作業を実施する。無人での作業が可能になることで、熟練オペレータの確保が不要になり、労働力不足の解消が期待される。また、一人のオペレータによる複数台の自律ショベルの管理が可能になることで、生産性の向上も期待できる。

3 機器構成

開発中の自律ショベルの概要を次に示す。自律ショベルのベース機として、住友建機株式会社製SH200-8(運転重量21t, バケット容量(新JIS) 0.8 m³)を用いた。本機はICT建機として、アタッチメントと車体の姿勢情報を計算するためのIMU センサ、車体位置を計測するGNSS受信機を搭載している。ショベルを自動で動作させるべく、図1に示す機器をショベルに設置した。外界センサとしてLiDARを車体とブームに設置し(図2)、外部情報を取得する。複数台のLiDARによって計測範囲の重複が発生するが、今回の実証実験では検証用として複数台のLiDARを設置した。取得したセンサ情報や外部情報を処理することを目的として、環境計測コントローラ、動作計画コントローラ、油圧制御コントローラを搭載した。各コントローラで今回開発した機能が実行される。

4 システム構成

図3に、自律ショベルのシステム構成を示す。自律ショベ

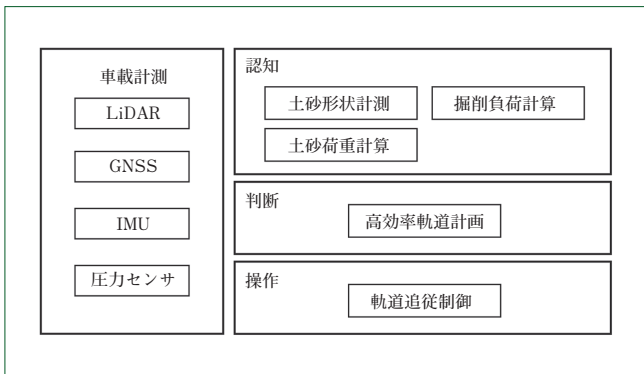


図3 システム構成
System configuration

ルの動作に必要な機能を「認知」「判断」「操作」に分類し、それぞれの分類において機能開発を行っている。認知は土砂形状計測、掘削負荷計算および土砂荷重計算を、判断は高効率軌道計画を、操作は軌道追従制御を行う。ショベルに設置された各種センサからの計測情報は「車載計測」に分類される。

4.1 認知

認知に分類される土砂形状計測は、ショベルに搭載されたLiDARによって取得された外部情報を用いて、ショベル周囲の地面形状とダンプトラックの荷台形状を計測する機能で、環境計測コントローラで実行される。計測された土砂形状の情報は、ショベルの目標動作を計算する高効率軌道計画で利用される。ショベル周辺の地面形状の計測は、ショベル車体上に設置された2台のLiDARによる計測情報を使用する。それぞれのLiDARの座標系が異なることから、LiDAR同士の位置関係をショベル座標に校正することで、高精度な地形形状の地図生成を可能にした。図4に、校正された点群を示す。2台のLiDARによる点群データが色分けしてプロットされているが、2台のLiDARによる点群データがショベルのバケットと地面を構成しており、精度良く校正されていることが確認できる。ダンプトラック荷台の土砂形状は、主にブームに設置されたLiDARによって計測される。ショベルによって積載されるダンプトラック荷台内の土砂形状を用いて、軌道計画機能は荷台内の積載可能な位置に土砂を排土する軌道を生成する。

4.2 判断

判断に分類される高効率軌道計画は、土砂形状計測によって得られた土砂形状をもとに、ショベルが動作する軌道を生成する機能で、動作計画コントローラで実行される。ショベルが土砂を掘削するとき、作業効率を最大化するには1回で多くの土砂をすくう必要があるが、掘削によって時々刻々と変化する地面の形状やショベルの機構的な制約(力・速度など)をリアルタイムに考慮する必要がある。油圧ショベルのアクチュエータは、油圧ポンプによって動作することから、各アクチュエータの速度の合計は油圧ポンプの吐出流量によって制限される。また、油圧ショベルのアタッチメントは、油圧シリンダによって動作するので、動作可能な角度範囲が存在する。生成された軌道が、これらの制約を満たしていな

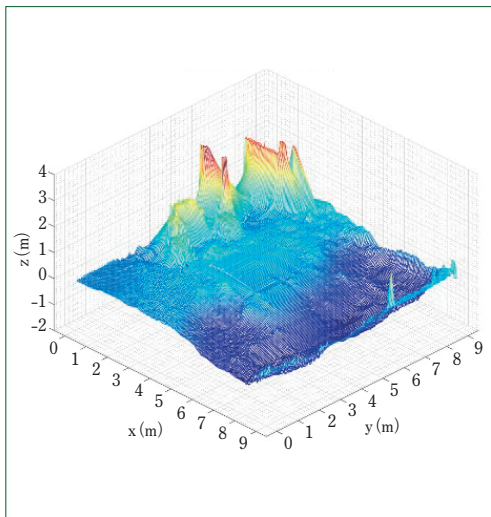


図5 地形形状
Measured terrain shape

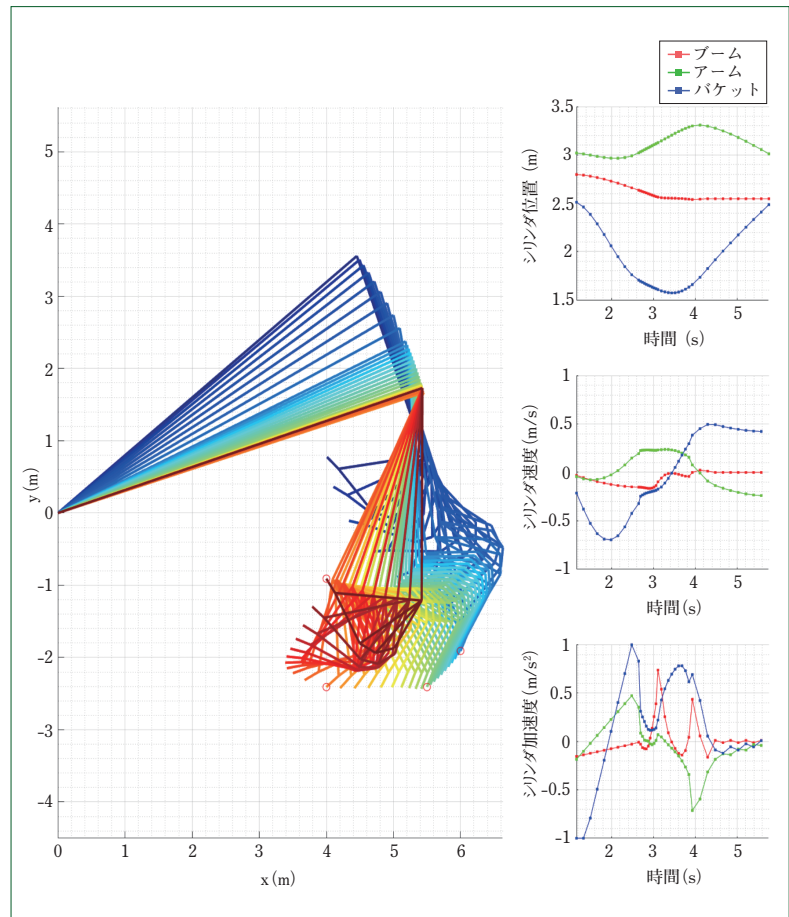


図6 生成された目標軌道
Generated target trajectory

いと実現不可能なものになってしまう。この問題に対応すべく、動作計画と軌道生成の階層構造を持つように動作計画機能が設計された。動作計画は掘削、旋回、排土などの動作の状態遷移や、土砂形状に適した軌道パラメータを深層学習によって学習した予測モデルを使用して推論する。軌道生成は、動作計画で決定された指示をもとに、最適化計算によって軌道を生成する。軌道はブーム、アーム、バケット、旋回の4軸それぞれに対する位置、速度、加速度の目標値で、リアルタイムに生成される。

4.3 操作

操作に分類される油圧制御機能は、動作計画機能によって生成された軌道に対してショベルアタッチメントの4軸（ブーム、アーム、バケット、旋回）を制御する。油圧ショベルは油圧特性やアタッチメント姿勢による非線形性の影響が大きく、高精度な制御は困難である。このことから、モデル予測制御を採用し、ショベルの油圧特性と姿勢の影響を考慮することで高精度な制御を実現した。これにより、ショベルの動作に応じた最適な制御入力生成され、計画された軌道に高精度に追従する。

4.4 機能検証

開発した地形形状計測機能が正しく動作し、所望の軌道が生成されること、アタッチメントが軌道に追従することを確認した。図5に、環境計測機能によって計測された地面形状

を示す。X方向がアタッチメント方向、Y方向が車体横方向である。X方向に地面が傾斜していることが地面形状として表現されていることが分かる。X方向の0m付近の土砂が盛り上がっている箇所は、ショベル車体を土砂と認識してしまっているが、ショベルの位置座標から削除することが可能である。図6に、計測された土砂形状と目標形状をもとに生成された軌道を示す。ショベルアタッチメントの目標位置が時系列で算出され、動作が生成されていることが分かる。図7に、生成された目標軌道に対する爪先位置の制御結果を示す。赤色の目標軌道の爪先位置に対し、青色の測定値は掘削中の外部負荷による影響で部分的に偏差が発生している箇所も存在するが、精度良く追従していることが分かる。これらの結果から、自律ショベルの一連の動作が可能であることが確認された。

5 実証実験

開発中の自律ショベルを用いた実証実験により、ダンプトラックへの掘削積込み（図8）と法面整形（図9）の自律作業が可能であることを確認した。ダンプトラックへの掘削積込みでは、ショベル周囲の土砂形状を認識しながら複数回の掘削を実行し、ダンプトラックが満載になるまで積み込むことを確認した。法面整形では、事前に与えられた目標地形をもとに法面を整形できることを確認した。なお、法面整形中の

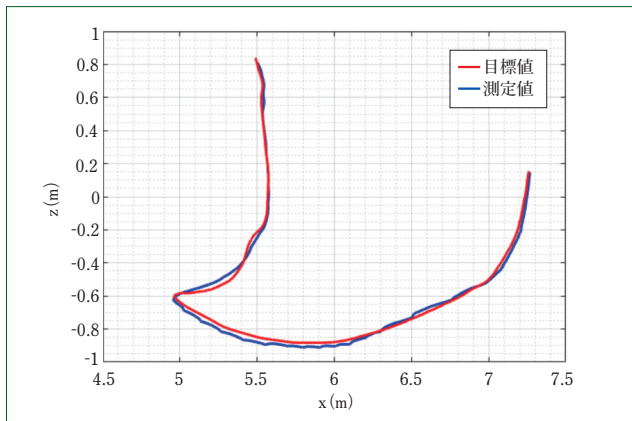


図7 アタッチメントの軌道追従試験結果
Attachment trajectory tracking results



図8 掘削積込み試験
Loading dump trucks tests



図9 法面整形試験
Slope leveling tests

表1 作業時間
Cycle time

作業	オペレータ操作時間(s) (参考)	自律ショベル作業時間(s) (平均)
掘削	5	4.26
上げ旋回	6	6.56
排土	5	4.11
下げ旋回	5	6.91
合計	21	21.84
動作速度比	-	96%

走行操作は、ショベル内部に設置された無線通信機器によって、車外の実操者が遠隔操作で実施した。整地作業後にバケット幅分の移動が行われ、連続して整地作業が行われた。

自律ショベルの評価に、掘削積込み作業時に掘削された土砂量と作業時間を用いた。掘削された土砂量の基準値は、バケットに土砂を平積みしたときの土砂重量とし、その重量は680kgであった。ダンプトラックへの掘削積込みを行う試験中の掘削土砂量の平均値は1135kgであり、バケットに平積みしたときの167%である。表1に、自律ショベルによる作業時間を示す。自律ショベルによる1回の掘削積込み動作の平均時間は21.84秒で、参考ではあるが、同様の試験を実操者が行ったときは21秒であった。このことから、自律ショベルの動作速度はオペレータ操作の96%であった。

これらの結果から、実証実験の目的は達成したと考えられる。実証実験の映像を展示会 (CONEXPO：米国、CSPI：日本) に参考出展した。

6 むすび

- (1) 自律動作に必要なLiDARなどの機器を油圧ショベルに設置し、自律動作可能にした。
- (2) 自律ショベルに必要な機能を認知、判断、操作と分類して開発し、それぞれの機能の動作を検証した。
- (3) 開発中の自律ショベルを用いた実証実験で、掘削土

砂量や作業時間を計測し、掘削積込みと法面整形の自律作業が実施可能であることを示した。

(参考文献)

- (1) 国土交通省ウェブサイト、報道発表資料：「i-Construction 2.0」を策定しました～建設現場のオートメーション化による生産性向上(省人化)～、国土交通省、https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html、参照 2025年5月8日。
- (2) Jud, D., Leemann, P., Kerscher, S. and Hutter, M., Autonomous free-form trenching using a walking excavator, IEEE Robotics and Automation Letters, 4-4 (2019), 3208-3215.
- (3) 横木竜次・原孝介・臼井道太郎、熟練者の模倣による自律ショベルのための高効率な軌道計画アルゴリズムの開発、第21回建設ロボットシンポジウム、(2023-9)。