

OPERA を利用したチルトローテータ付油圧ショベルの自動運転実験

藤 沼 花 奈・三 澤 孝 史・遠 藤 大 輔

近年、建設業において、生産性向上のために建設機械の自動化技術の開発、実用化が各機関で意欲的に進められている。筆者らは、効率的な施工が可能なチルトローテータを装備した油圧ショベルを用いた自動掘削システムを開発した。本システムは、(国研) 土木研究所により整備された自律施工技術基盤「OPERA」を活用した。計画された掘削形状より油圧ショベルが掘削する際の動作計画を作成し、それを遠隔で自動掘削する。この計画された動作はチルトローテータを適切に使用し効率的に掘削することができる。本システムの性能を確認するために、斜面の位置等が異なる3つの条件について実証実験を行い、出来形の掘削精度を評価した。

キーワード：油圧ショベル，チルトローテータ，自動掘削，OPERA，3D-LiDAR

1. はじめに

生産性向上のために、建設機械の自動化技術の開発が各機関で進められている。(国研) 土木研究所は、自律施工技術基盤「OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy)」¹⁾ (以下、OPERA) を整備し、自動化技術開発の促進を図った。OPERA は、共通制御信号をコアとした OSS (Open Source Software) ベースの開発環境を提供するオープンプラットフォームである。筆者らは、チルトローテータを装備した油圧ショベルの自動掘削システムの完成を目指しており、その開発プラットフォームとして OPERA の一部を活用することとした²⁾。本システムの特徴として、バケットの姿勢を作業機のみで任意に変えられるチルトローテータを使用することにより、機体の旋回や移動が難しい狭隘な箇所等においても効率的に施工できる利点がある。チルトローテータは北欧では大半の建機に搭載されており、国内においても国交省が i-Construction 2.0 で掲げる省人化3割を目指す取り組みに資する建設機械の普及促進のため、ICT 建設機械等認定制度において令和7年1月にチルトローテータ機能を有するバックホウも省人化建設機械に追加された。今後、さらにチルトローテータの利用が進むと思われる。

本報では、開発した自動掘削システムの概要およびシステムを実証するために実施した実証実験結果について述べる。なお、本開発は、(国研) 土木研究所の「自

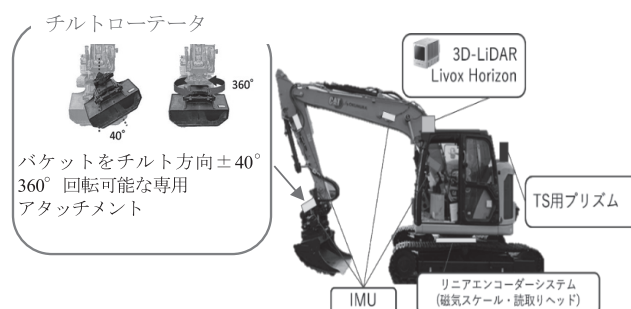
律施工技術基盤 OPERA を活用した機械土工の生産向上に関する共同研究」内のテーマの一つとして取り組んだものである。

2. 自動掘削システム

(1) 自動化した油圧ショベルのハードウェア構成

自動掘削システムは、日本キャタピラー(株)の電子制御された油圧ショベル (0.45 m³ 級、型式 CAT315) をベースマシンとして構築した。チルトローテータは、同じく日本キャタピラーの型式：TRS10 (チルト角：±40°，ローテート角：0～360°) を使用した。図—1 に使用した計測機器の配置を、表—1 に使用した計測機器の一覧を示す。

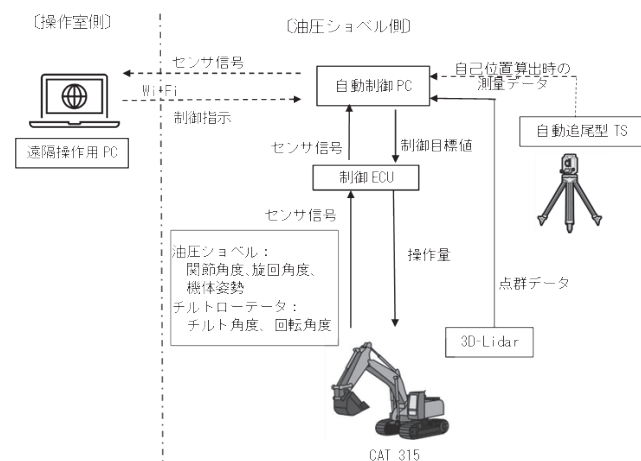
油圧ショベル本体の自己位置、旋回中心の認識にはトータルステーション (以下、TS) を用いた。油圧ショベルの各関節角度および車体の姿勢には IMU (慣性



図—1 自動化した油圧ショベルおよび計測機器

表—1 計測機器一覧

センサ	メーカー	型番	用途
IMU	ACEINNA, Inc.	OpenIMU300RI	各関節角度、 車体の姿勢の測定
リニアエンコー ダーシステム	㈱マコメ研究所	SAE-200 (読取ヘッド) SAS-200 (磁気スケール)	旋回角度の測定
トータルステー ション	㈱トブコン	GT-1001	自己位置の測定
3D-LiDAR	Livox Technology Co., Ltd.	Horizon	土砂の認識



図—2 システムのハード構成の概略図

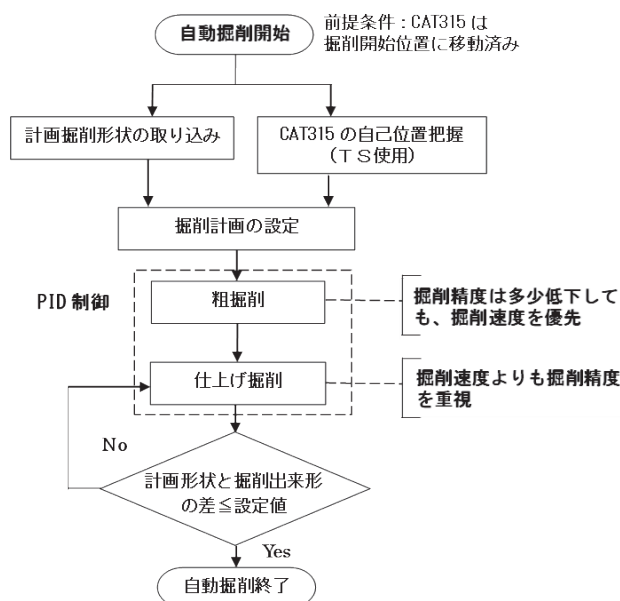
計測装置) により計測し、旋回角度は磁気式のリニアエンコーダーシステムにより把握した。チルトローテータのチルト角およびローテート角は油圧ショベルより出力される信号を使用した。掘削量把握のための土砂認識は、キャビン上に設置した 3D-LiDAR を用いる。

図—2 にシステムのハード構成の概略図を示す。遠隔操作 PC から、Wi-Fi により油圧ショベルのキャビン内に設置した自動制御 PC に制御指示を送ることにより遠隔で自動掘削できる。自動制御 PC からは、リアルタイムに遠隔操作 PC に、油圧ショベルの関節角度等のセンサ信号が送られ、オペレータは GUI (Graphical User Interface) 上で油圧ショベルの動作状況を監視することができる。

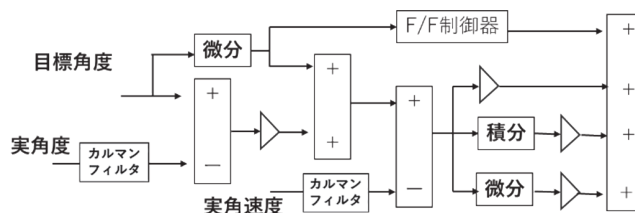
(2) システムのソフトウェアの概要

本システムのソフトウェア構成および概略フローを図—3 に示す。ソフトウェア構成は、OPERA の共通制御信号に準じた制御信号を、ROS (Robot Operating System) を介してハードウェアに送受信している。

本システムでは計画された掘削後の地形状 (以下、計画掘削形状) のデータ (LandXML 形式) より、油



図—3 自動掘削システムのソフトウェア構成および概略フロー



図—4 使用した角速度制御ブロック図

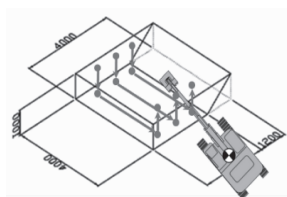
圧ショベルが掘削する際の動作計画 (以下、掘削計画) を設定する。

掘削計画は、掘削時間の短縮と精度向上の両立のため、掘削動作を粗掘削と仕上げ掘削の 2 段階で設定した。粗掘削では、バケットの貫入量を大きく設定して、掘削精度よりも掘削時間の短縮を優先して掘削するように図った。仕上げ掘削では、時間よりも掘削精度を重視した掘削動作とした。

バケットの刃先位置の制御は、角度偏差を目標角速度とした角速度偏差に基づく PID 制御 (フィードフォワード項を含む) による角速度制御を適用した。図—4 に使用した角速度制御ブロック図を示す。また、各

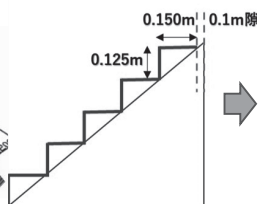
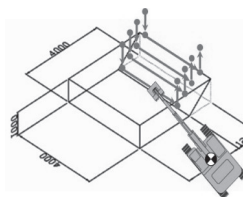
〔平坦部の掘削〕

- ・壁面に沿って水平に掘削



〔斜面の掘削〕

- ① 斜面を大まかに階段状に掘削



- ② 斜面に沿って掘削

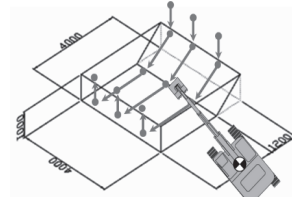


図-5 自動掘削のアルゴリズム

関節角度をIMUから取得しているが、振動の影響による誤差を生じやすい。ブーム等を動かした際の振動により、不安定な動作となり、制御精度への影響が大きかったため、カルマンフィルタによるフィルタ処理を適用し、振動の影響低減を図った。

自動掘削のアルゴリズムの概略を図-5に示す。油圧ショベルから見て右側に斜面がある計画掘削形状が配置されている場合を例として示す。平坦部はチルトローテータによりバケットの姿勢を制御し、壁面に沿うように水平を維持しながら掘削する（図-5左）。斜面の掘削では先ず階段状に大まかに掘削した後、チルトローテータによるバケットを斜面に沿って動かし掘削する（図-5中央、右）。計画した仕上げ掘削が終了したら、最終的に3D-LiDAR計測により出来形と計画掘削形状との差を算出（以下、土砂認識機能）し、あらかじめ設定した許容値よりも差が大きければその個所の掘削を再度行う。図-6に土砂認識機能を可視化した図を示す。3D-LiDARにより得られる施工領域の点群データを辺長0.1mのグリッドで分割し、グリッド毎の平均値と計画掘削深さの差を算出する。全グリッドにおいて、その差があらかじめ設定した許容値を下回るまで、最も差の大きな個所から再掘削する。なお、3D-LiDARの死角となり確実な土砂認識が難しいため、掘削範囲の油圧ショベル手前側の1mおよび掘削範囲を規定する多面体の各辺から

0.2mの範囲は再掘削範囲外としている。また、現時点では斜面部分も範囲外とした。

3. 実証実験

（1）実験概要

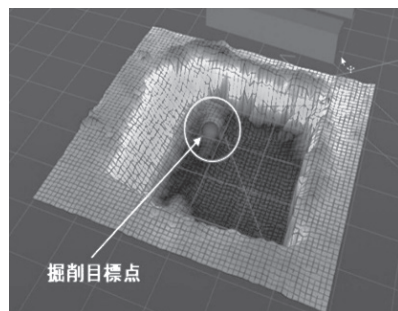
①実験方法

実験は奥村組技術研究所敷地内において、本システムにより計画掘削形状を設定し、掘削完了後の出来形を把握するために3Dスキャナー（㈱トプコン、GLS-2000）等で計測した。自動掘削を行った実験ヤードの土質性状を表-2に示す。また、掘削後に行ったポータブルコーン貫入試験結果より、掘削底面におけるコーン貫入抵抗 q_c は400 kN/m²程度であった。

実験では、自動掘削時には油圧ショベル本体の移動はさせずに、チルトローテータを活用することで斜面を有する計画掘削形状を掘削した。掘削した土砂は、掘削方向より90°旋回させた油圧ショベル横に排土させた。

②実験条件

実験条件は、図-7に示すように、斜面を有する計画掘削形状を変えた3パターンとした。先ず、チル



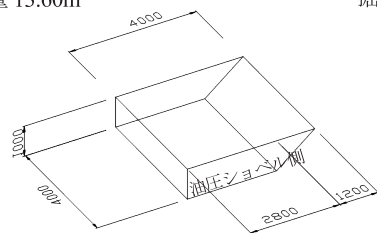
※最も差が大きい個所が赤色で表示される

図-6 土砂認識機能の可視化図

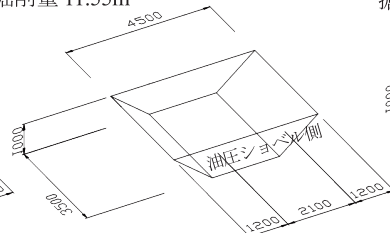
表-2 実験ヤードの土質性状

土粒子密度 g/cm ³		2.628
自然含水比 %		28.6
粒度分布	礫分 %	35.2
	砂分 %	25.5
	シルト分 %	17.8
	粘土分 %	21.5
最大粒径 mm		37.5
50% 粒径 D ₅₀ mm		0.2009
液性限界 %		72.3
塑性限界 %		38.6
塑性指数		33.7
地盤材料の分類名		細粒分質砂質礫（GFS）

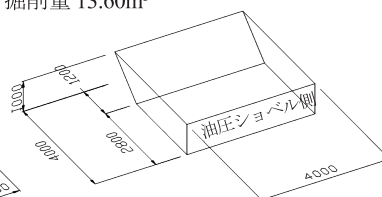
ケース 1：右斜面
掘削量 13.60m³



ケース 2：左右斜面
掘削量 11.55m³



ケース 3：正面斜面 (単位: mm)
掘削量 13.60m³



図—7 実験条件

トローテータの特長を活かした自動掘削システムの実証として、油圧ショベル側から見て右側に斜面があるケース 1 の形状を中心に本システムの開発を行った。それに加えて、左右に斜面を有するケース 2、正面に斜面を有するケース 3 についても自動掘削を実施した。斜面の勾配は全て 1.2 : 1 (約 40°) とした。

本実験では、実験ヤードに実験用の座標系を設定し、この座標系で作成した計画掘削形状データを読み込ませ自動掘削した。全ケースにおいて計画掘削深さは、座標系の Z 軸（鉛直方向）の GL 0 m より 1 m とした。ただし、掘削地点の地表面は最高点と最低点の間でおおよそ 10 cm 程度の凹凸がある条件で行った。図—7 に示した掘削量には、その土量は含んでいない。

(2) 実験結果

①動作確認

実験状況を写真—1 に示す。写真—2 は、斜面掘削時にチルトローテータによりバケットを回転させて斜面に沿ってバケットを動かしている状況を示す。

図—8 に掘削中の GUI 画面例を示す。油圧ショベルの動きおよび 3D-LiDAR により掘削状況をリアルタイムに表示させ、現在の状況を確認することができる。

開発した自動掘削システムは設計通りに作動し、掘削を完了した。

②出来形

(a) ケース 1：右斜面

写真—3 に自動掘削後の出来形を示す。図—9 に 3D スキャナー計測により取得した出来形の点群データを示す。これらより、油圧ショベルの右側に斜面が形成されていることが確認できる。

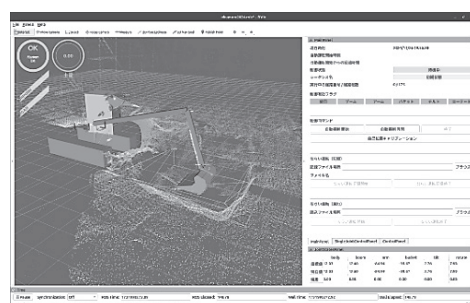
点群データより、水平 2 軸 (X, Y 軸) に対し、直交する断面のポリラインを 0.5 m 毎に抽出した。図—10 に Y 軸に直交する断面のポリラインを示す。図中には計画形状を併記した。図—10 より、斜面と反対側の鉛直面近傍が計画形状に比べ、比較的誤差が大き



写真—1 実証実験状況



写真—2 チルトローテータを使用した斜面掘削状況



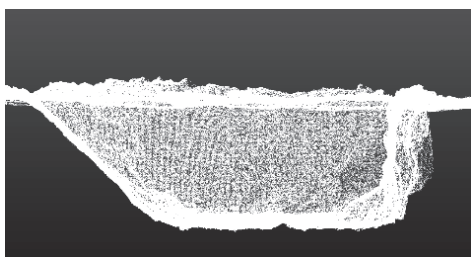
図—8 GUI 画面例

くなっている。これは、今回は 3D-LiDAR による掘り残し判定において、鉛直面から 0.2 m は現状判定範囲に含めていないため、掘削時に崩れたりした土砂が残置されていても、再度掘削ができないため誤差が大きくなったと考える。

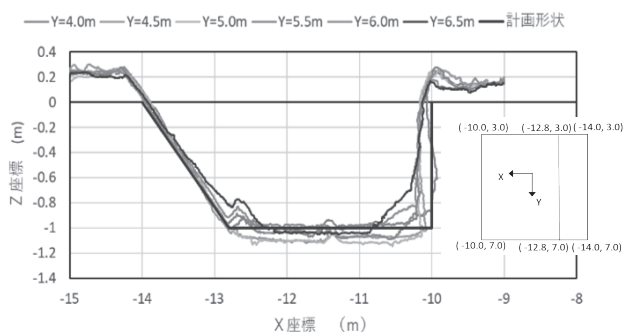
表—3 に、上記の抽出したポリラインについて、計画掘削形状に対する出来形の鉛直方向の差の平均値等を示す。なお、表—3 では、3D-LiDAR による掘り



写真—3 自動掘削による出来形（ケース 1）



図—9 出来形の点群データ（ケース 1）



図—10 Y軸直交断面における掘削深さ分布（ケース 1）

表—3 計画形状に対する掘削深さの差（ケース 1）

	平均 (m)	標準偏差 (m)	絶対平均 (m)
平坦部	-0.027	0.069	0.061
斜面	0.043	0.039	0.047
全体	0.004	0.068	0.056

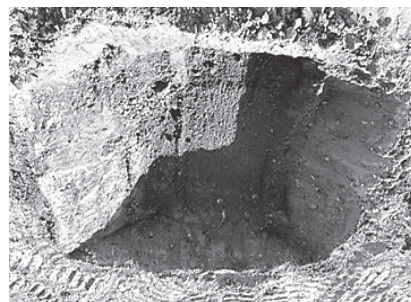
残し判定の設定範囲外の区間が含まれる斜面と反対側の鉛直面から 0.2 m の範囲は除いて算出した。

表—3 より、平坦部と斜面で各諸量に大きな差は見られない。全体としては平均 0.004 m と高い掘削精度を示している。ただし、標準偏差や絶対平均では 0.05 m 以上となっており、ばらつきが大きいことがわかる。

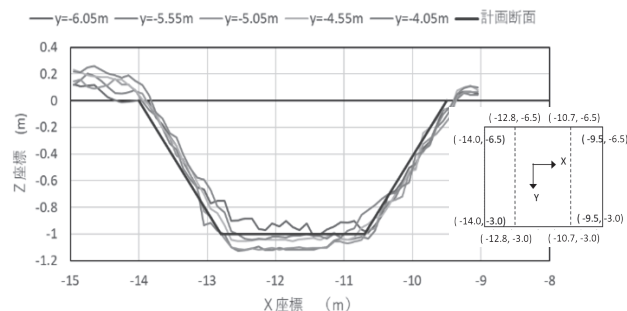
(b) ケース 2：左右斜面

写真—4 に自動掘削後の出来形を示す。左右に斜面が形成されていることがわかる。

図—11 に、ケース 1 と同じく Y 軸に直交する断面のポリラインを示す。両側の斜面では、平坦部と交差する近傍は計画掘削形状に比べ少し差が大きい、そ



写真—4 自動掘削による出来形（ケース 2）



図—11 Y軸直交断面における掘削深さ分布（ケース 2）

表—4 計画形状に対する掘削深さの差（ケース 2）

	平均 (m)	標準偏差 (m)	絶対平均 (m)
平坦部	-0.026	0.074	0.066
斜面	0.014	0.095	0.085
全体	-0.005	0.088	0.076

れより上部は比較的、計画掘削形状に合っている。

表—4 に、上記の抽出したポリラインについて、計画掘削形状に対する出来形の鉛直方向の差の平均値等を示す。平坦部と斜面で各諸量に大きな差は見られない。全体としては平均 -0.005 m と計画深さとの差は小さく、高い掘削精度を示している。ただし、ケース 1 と同様に、標準偏差や絶対平均では 0.05 m 以上となっており、ばらつきが大きいことがわかる。

(c) ケース 3：正面斜面

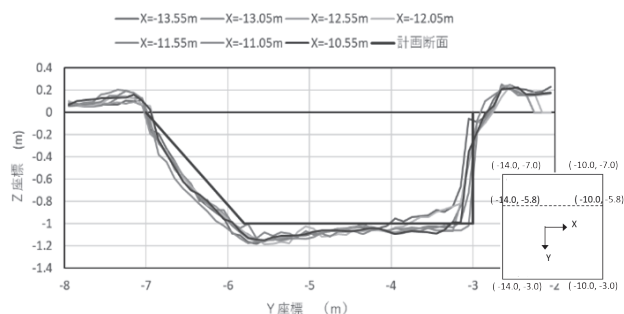
写真—5 に自動掘削後の出来形を示す。油圧ショベルの正面側に斜面が形成されていることがわかる。

図—12 に、X 軸に直交する断面のポリラインを示す。斜面が計画掘削形状に比べ、全体的に深く掘り過ぎていることがわかる。

表—5 に、上記の抽出したポリラインについて、計画掘削形状に対する出来形の鉛直方向の差の平均値等を示す。なお、表—5 では、3D-LiDAR による掘り残し判定の設定範囲外である手前の鉛直面から 1 m の範囲は除いて算出した。平均値では、斜面に比べ斜面における計画掘削深さに対する差が大きく、深く掘り過ぎている傾向が見られる。また、全体でもケース



写真—5 自動掘削による出来形（ケース3）



図—12 X軸直交断面における掘削深さ分布（ケース3）

表—5 計画形状に対する掘削深さの差（ケース3）

	平均 (m)	標準偏差 (m)	絶対平均 (m)
平坦部	-0.091	0.043	0.091
斜面	-0.168	0.068	0.172
全体	-0.122	0.066	0.124

1, 2 と比べ、平均値および絶対平均の値が大きく、掘削精度が低下している。この要因の一つとして、バケットの貫入時等に、その反力で油圧ショベル本体の位置がずれる場合があることが観察された。これはすべての掘削形状においても同様に生じたが、正面斜面のケース3では、油圧ショベルから最も遠い位置に斜面を形成するため、作業半径が長くなり油圧ショベル本体のずれによるバケット先端の位置の誤差が大きくなる。そのため、斜面形成時のバケット先端の位置制

御への影響が大きくなった可能性が考えられる。今後、詳細に対策を検討したいと考える。

4. おわりに

チルトローテータを装備した油圧ショベルによる自動掘削システムの開発に取り組んだ。今後は、自動掘削システムのさらなる施工精度向上や施工時間短縮等のブラッシュアップを図るとともに、油圧ショベル本体の移動についても自動化するなど、機能拡張したいと考える。これらのシステムの性能向上を図り、現場適用できるように取り組んでいく予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 遠藤大輔ほか、「自律施工の技術開発促進に向けた取組み」, 土木技術資料, 65 巻 1 号, pp.18-21, 2023 年 1 月
- 2) 藤沼花奈ほか、「OPERA を活用したチルトローテータ搭載油圧ショベルの自動掘削システムの開発」, 令和 6 年度建設施工と建設機械シンポジウム, 2024 年 10 月

【筆者紹介】

藤沼 花奈（ふじぬま かな）
 (株)奥村組
 東日本支社
 機電部 機械技術課



三澤 孝史（みさわ たかし）
 (株)奥村組
 技術本部 技術研究所
 担当部長



遠藤 大輔（えんどう だいすけ）
 (国研) 土木研究所
 技術推進本部 先端技術チーム
 主任研究員

