

チルトローテータを搭載した油圧ショベルによる 自動掘削システムの開発

ー 自律施工技術基盤 OPERA を利用したシステム概要および実証実験 ー

Development of Automated Excavation System Based on Tiltrotator-Equipped Hydraulic Excavator

- System Overview and Verification -

藤沼花奈* 三澤孝史** 川澄悠馬*** 松田顕伍****

要 旨

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搭載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、計画掘削形状を基にしてチルトローテータのパケットの回転角度およびチルト角度を変えられる特徴を生かした掘削軌道の掘削計画を作成し、それに従った遠隔操作で効率的に自動掘削を行う。本システムのソフトウェアは、(国研) 土木研究所が整備している自律施工技術基盤 OPERA を利用している。斜面の配置等を変えた計画掘削形状 3 ケースについて実証実験を行い、概ね設計通りに自動掘削できることを確認した。

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. まえがき

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。建設機械の自動化の取り組みを促進すべく、国立研究開発法人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) ベースの開発環境であるオープンプラットフォームである。本開発は、OPERA を活用した機械土工の一環として、パケットの回転角度およびチルト角度を変えられるチルトローテータを搭載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いる²⁾。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。また、チルトローテータは北欧では大半の建機に搭載されている。国内においても、国交省の i-Construction2.0 の省人化 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が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普及が進むと思われる。

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、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性向上に関する共同研究」として取り組んだ。

2. 自動掘削システムの概要

2.1 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 (0.45m³ 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、同社の型式: 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 (TS) を用いた。油圧ショベルの各関節角度および車体姿勢の認識には、ICT 建機で一般的に用いられている IMU (慣性計測装置) を使用し、旋回角度は磁気式のリニアエンコーダシステムにより把握した。チルトローテータのチルト角度および回転角度の把握には油圧ショベルより出力される信号を使用し

* 東日本支社機電部 ** 技術本部技術研究所 *** 技術本部技術研究所土木研究グループ **** 東日本支社土木第一部



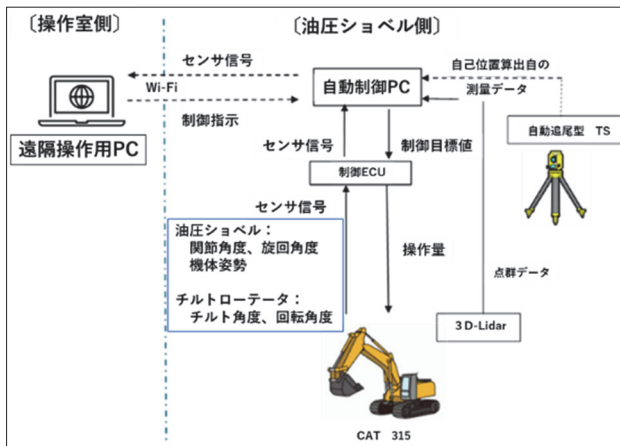
図ー１ 自動化した油圧ショベルおよび計測機器

た。土砂の掘削状況の認識にはキャビン上に設置した 3D-LiDAR を用いた。

図ー２に、システムのハード構成の概略図を示す。遠隔操作用 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用 PC に、油圧ショベルの関節角度等のセンサ信号が送られ、GUI (Graphical User Interface) 上で油圧ショベルの動作状況を把握することができる。

表ー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、車体姿勢の測定
リニアエンコーダシステム	(株)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	(株)トプコン	GT-1001	自己位置の測定
3D-LiDAR	Livox Technology Co., Ltd.	Horizon	土砂の掘削状況の認識



図ー２ システムのハード構成の概略図

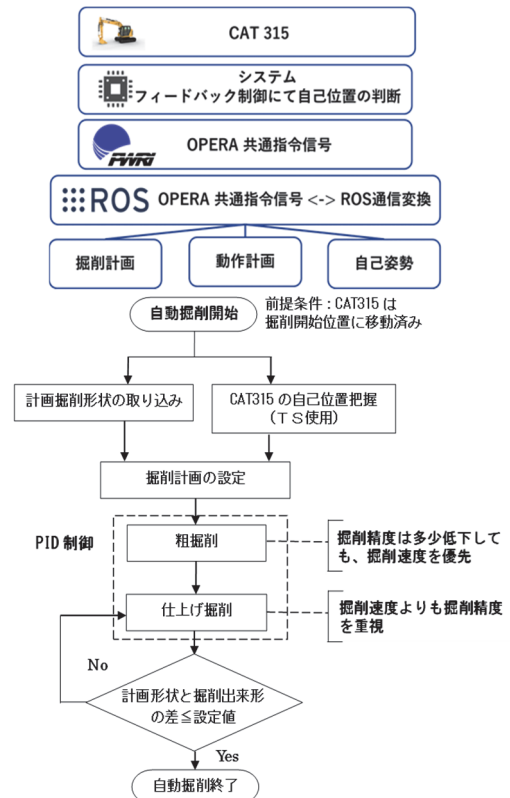
2.2 システムのソフトウェアの概要

本システムのソフトウェア構成および概略フローを図ー３に示す。ソフトウェア構成は、OPERA の共通指令信号に準じた指令信号を、ROS (Robot Operating System) を介してハードウェアに送っている。ROS とは、ロボットのソフトウェア開発を効率化するためのロボット用ソフトウェアプラットフォームである。

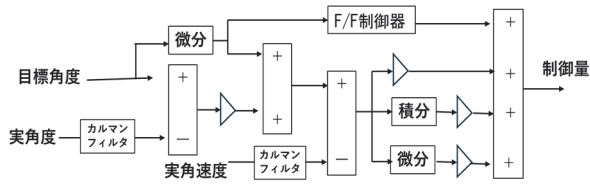
本システムでは計画掘削形状データ (LandXML 形式) より、油圧ショベルの掘削計画を設定する。

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、掘削精度よりも掘削時間の短縮を優先し、バケットの貫入量を大きく設定した。仕上げ掘削では、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 (F/F) 含む) による角速度制御を適用した。図ー４に使用した角速度制御ブロック線図を示す。図中の△は入出力関係における伝達関数を、「+」「-」は、各入力プラスあるいはマイナスとして重ね合わされることを表している。各関節角度を IMU から取得しているが、IMU は加速度から角度を検出しているため、振動の影響を受けやすい。ブーム等を動かした際の振動によ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行い、影響削減を図った。



図ー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 バケット刃先制御の角速度制御ブロック線図

自動掘削時の軌道アルゴリズムの概略を図－5に示す。これは計画掘削形状として、油圧ショベルから見て右側に斜面がある場合である。平坦部はチルトローテータによりバケットの角度を調整し、左側の鉛直面に対し平行となるように水平に掘削する。斜面の掘削ではまず階段状に大まかに掘削した後、チルトローテータによりバケットを斜面に沿って動かし掘削する。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把握(以下、土砂認識機能)し、設定値よりも差が大きければその箇所の掘削を行う。図－6に土砂認識機能の概念図を示す。3D-LiDARにより得られる施工領域の点群データを辺長100mm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。その結果、その差が設定値よりも大きければ、最も差の大きな箇所から再掘削する。なお、3D-LiDARの死角となり確実な土砂認識が難しい範囲等は再掘削の対象外としている。具体的には、掘削範囲の油圧ショベル手前側の1000mmと掘削範囲境界から200mmの範囲である。また、現時点では斜面も範囲外とした。

3. 実証実験

3.1 実験概要

a. 実験方法

奥村組技術研究所敷地内において、自動掘削システムにより、設定した計画形状を掘削し、出来形を3Dスキャナー(株トプコン、GLS-2000)等で計測した。掘削状況の動画を記録するとともに、掘削時間を把握した。自動掘削を行った実験ヤードの土質性状を表－2に示す。

実験では、自動掘削時に油圧ショベル本体を移動させずに、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、旋回して油圧ショベルの横に排土させた。

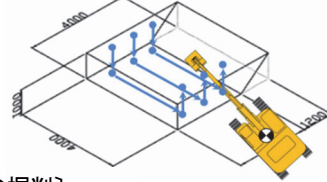
b. 実験ケース

実験は、図－7に示すように、斜面の配置と数をパラメータとした3ケースとした。まず、チル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の形状を中心にシステムの開発、検証に取り組んだ。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。

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±0mmより1000mmとした。掘削地点によっては、設定した座標系のGL0mmより部

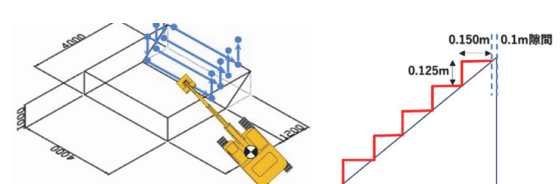
〔平坦部の掘削〕

- ・壁面に沿って水平に掘削

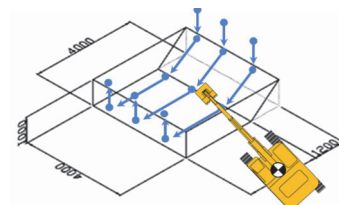


〔斜面の掘削〕

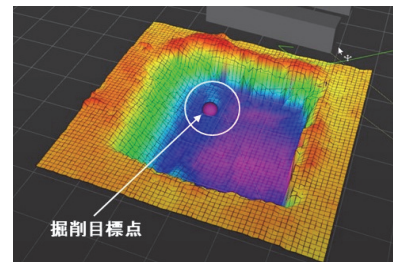
- ①斜面を大まかに階段状に掘削



- ②斜面に沿って掘削



図－5 軌道アルゴリズムの概略



※最も差が大きい箇所が赤色で表示される

図－6 土砂認識機能の概念図

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)		
コーン貫入抵抗 q _k kN/m ²	約 400 (掘削底面において)		

分的に地表面が 100mm 程度高くなっている箇所もあった。

3.2 実験結果

a. 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、掘削を完了することができた。

b. 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、図－9に 3D スキャナー計測により取得した点群データを示す。これらより、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 500mm 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。図中には計画掘削形状を併記した。図－10より、斜面と平坦部が交差する近傍を除くと、斜面はほぼ計画掘削形状通りに掘削できている。それに対し、平坦部では、斜面と反対側の鉛直面近傍は計画掘削形状に比べ、比較的差异が大きくなっている。これは、本検証においては、3D-LiDAR による掘り残し判定において、掘削範囲の油圧ショベル手前側の 1000mm と掘削範囲境界から 200mm の範囲は判定範囲に含めていないため、掘削時に崩れた土砂が残置されたためと考える。

表－3に、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 μ 、標準偏差 σ 、信頼度 95%の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) を示す。なお、表－

3中の平坦部については、3D-LiDAR による掘り残し判定の設定範囲外の区間である、左側の鉛直面から 200mm の範囲と手前の鉛直面から 1000mm の範囲を除いて算出した。鉛直方向の掘削精度の評価指標として、「土木工事施工管理基準及び規格値 (案)」（平成 30 年 3 月、国土交通省）では、掘削工において、レーザースキャナー等による面管理の場合での規格値は、平場では平均値 $\pm 50\text{mm}$ かつ個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ 、法面では平均値 $\pm 70\text{mm}$ 、個々の計測値 $\pm 160\text{mm}$ となっている。この規格値に沿って今回の実験結果を評価した。

表－3より、平坦部、斜面ともそれぞれの規格値である平均値 $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 70\text{mm}$ 以内であり、高い掘削精度を示している。ただし、平坦部の信頼度 95%の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) は $-199 \sim 115\text{mm}$ であり、規格値の個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ に対するとばらつきが大きいことがわかる。

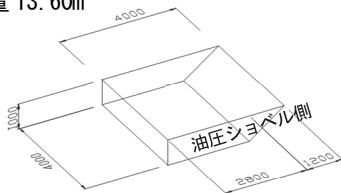
(b) ケース 2：左右斜面

写真－4に自動掘削後の出来形を示す。手前が油圧ショベル側である。左右に斜面が形成されていることがわかる。

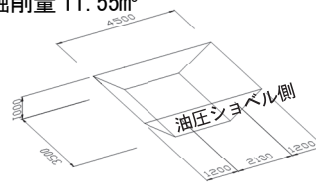
図－11に、ケース 1 と同じく Y 軸に直交する断面のポリラインを示す。両側の斜面では、平坦部と交差する近傍は計画掘削形状に比べ少し差が大きい、それより上部は概ね計画掘削形状に合っている。

表－4に、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。ケース 1 と同様に、平坦部、斜面ともそれぞれの規格値である平均値 $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 70\text{mm}$ 以内であり、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、信頼度 95%の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) は、平坦部、斜面とも規格値の個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ 、 $\pm 170\text{mm}$ に対してばらつきが大きいことがわかる。

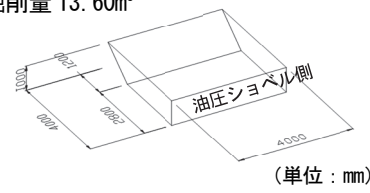
ケース 1：右斜面
掘削量 13.60m³



ケース 2：左右斜面
掘削量 11.55m³



ケース 3：正面斜面
掘削量 13.60m³



(単位：mm)

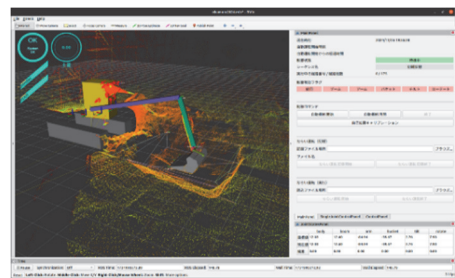
図－7 実験ケース



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



写真-3 自動掘削による出来形 (ケース 1)

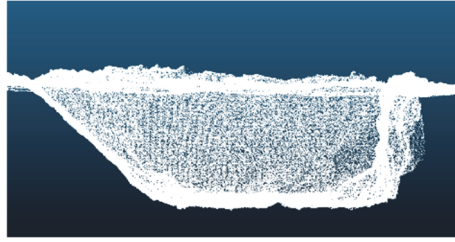


図-9 出来形の点群データ (ケース 1)



写真-4 自動掘削による出来形 (ケース 2)

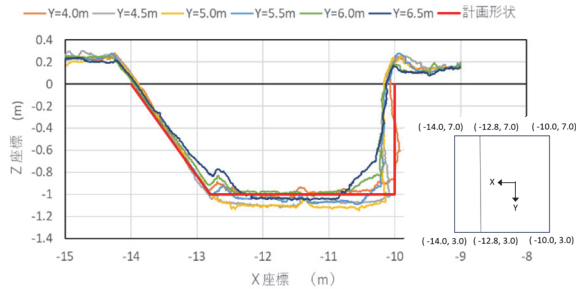


図-10 Y軸直交断面における掘削深さ分布 (ケース 1)

表-3 計画形状に対する掘削深さの差 (ケース 1)

	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	$\mu \pm 2\sigma$ (mm)
平坦部	-42	79	-199~115
斜面	43	39	-35~121

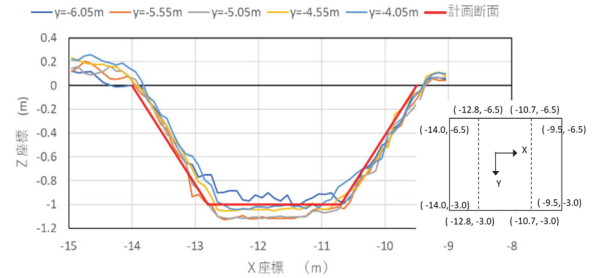


図-11 Y軸直交断面における掘削深さ分布 (ケース 2)

表-4 計画形状に対する掘削深さの差 (ケース 2)

	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	$\mu \pm 2\sigma$ (mm)
平坦部	-26	74	-174~122
斜面	14	95	-176~204

(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。計画掘削形状に比べ、斜面部では全体的に深く掘り過ぎていることがわかる。

表-5 に、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、同表では、3D-LiDAR による掘り残り判定の設定範囲外である手前の鉛直面から 1000mm の範囲を除いて算出した。平均値は、平坦部および斜面とも規格値を超えている。特に、平坦部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みられる。また、信頼度 95% の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) においても、平坦部および斜面とも規格値の個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ 、 $\pm 170\text{mm}$ に対してばらつきが大きいことがわかる。ケース 1、2 と比べ掘削精度が低い、この要因の一つとして、油圧ショベル本体の位置ずれが考えられる。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。これは全てのケースにおいて生じたが、特に正面斜面のケースでは、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精度への影響が大きくなったと推察する。この対策としては、油圧ショベルの自己位置把握を適宜行う等の対応を検討する予定である。



写真-5 自動掘削による出来形 (ケース 3)

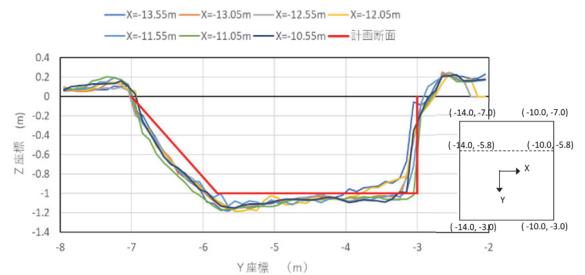


図-12 X軸直交断面における掘削深さ分布 (ケース 3)

表-5 計画形状に対する掘削深さの差 (ケース 3)

	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	$\mu \pm 2\sigma$ (mm)
平坦部	-91	43	-177~-5
斜面	-168	68	-304~-32

c. 掘削時間

図-13 に各ケースの掘削時間を示す。同図中には、自動掘削と同じ条件で、ケース 1 の掘削形状をオペレータにより掘削した場合の掘削時間も併せて示している。

図中の「掘削時間」は、油圧ショベルのバケットが動作を開始し、バケットを引いて土砂をすくい、旋回して排土、という掘削に要する合計時間を示している。「その他」は、自動掘削では油圧ショベルの自己位置把握の動作時間、オペレータによる掘削では地均しやバケットで土砂をかき集める動作に要した時間である。オペレータ掘削の「レベル計測」は、オペレータへ残りの掘削量や掘削位置を指示するために、掘削途中で1回行ったレベル測量時間である。

(a) 自動掘削とオペレータによる比較

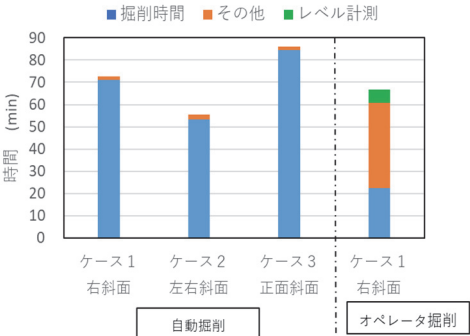
ケース 1 において、自動掘削とオペレータ掘削を比較する。図中に示すように、「掘削時間」は、自動掘削では、オペレータの操作による掘削と比較し、49 分多くの時間がかかった。

バケットを引いて土砂をすくい、旋回排土して次の掘削位置までバケットを移動させる一連の動きを1回当たりの掘削動作として、それに要した時間と回数を表一6に示す。オペレータ掘削の場合が平均 41 秒に対し、自動掘削では平均 52 秒である。特に排土時のバケット操作に、オペレータの操作時よりも時間を要していた。また、掘削回数においては、オペレータ掘削では 33 回に対し、自動掘削では 53 回と約 1.6 倍多くなっている。オペレータ掘削では、特に掘削の終盤において土砂をかき集めてバケットにできるだけ多くの土砂をすくった状態で旋回、排土動作をしている。これに対し、自動掘削では、バケット内に十分な土砂がない状態でも設定した掘削計画に従い、旋回、排土動作をしている場合がある。このように1回当たりの掘削動作の時間および回数が増えたことが、自動掘削の全体の掘削時間がオペレータ掘削よりも多くなった要因の一つと考える。しかし、オペレータ掘削では「その他」の時間が長いため、レベル測量分も合わせると、全体としては自動掘削が 73 分間に対し、オペレータ掘削は 67 分と微差であった。オペレータ掘削には事前に丁張（施工を行う上で基準となる位置や高さを示す目印）に要する時間が別途発生するため、この時間も考慮すると、オペレータ掘削に要する時間はさらに増えることになる。

(b) 自動掘削における 3 ケースの比較

ケース別の掘削時間は、ケース 1 が 73 分、ケース 2 が 55 分、ケース 3 が 86 分となった。計画掘削土量が他ケースの約 85%であるケース 2 が、左右に斜面を形成する必要があっても全体の掘削時間は最も短かった。また、掘削土量 1m³ 当たりの掘削時間で比較しても、ケース 1 が 5.4 分/m³、ケース 2 が 4.8 分/m³、ケース 3 が 6.3 分/m³ とケース 2 が最も短い時間となった。このように、掘削土量が少ないとともに、油圧ショベルからの最遠の掘削距離が短く、ブーム、アームを伸ばす動作にかかる時間が短縮されることが、ケース 2 の全体の掘削時間が最も短い要因として考えられる。

計画掘削土量が同じケースでは、斜面が油圧ショベルの正面にあるケース 3 の方が全体の掘削時間が 13 分多くなっている。斜面が側部にある場合は、平坦部や斜面を階段状に掘削する際に、一度に水平引きできる距離を長くできる。これに対し、正面にある場合ではその距離が短くなり、バケット刃先を移動させるポイントが増え、掘削動作の回数が増えるためと考えられる。



図一13 全体の掘削時間

表一 6 掘削動作 1 回当たりの掘削時間と掘削回数

	自動掘削	オペレータ掘削
1 回当たりの平均掘削時間	52 秒	41 秒
掘削回数	53 回	33 回

4. まとめ

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を開発した。斜面の配置および数を変えた 3 ケースの計画掘削形状を設定し、本システムの動作確認を行った。得られた知見を以下に示す。

- i. 出来形の異なる 3 ケースの掘削において概ね計画形状通りに掘削できた
- ii. オペレータ掘削と同等の時間で掘削が可能で、丁張の作業、レベル計測が不要のため省力化が可能

5. おわりに

今後は、本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自走についても機能拡張したいと考える。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。

【参考文献】

1) 遠藤大輔、山内元貴、鈴木裕敬、橋本 毅、「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、三澤孝史、石井敏之、川澄悠馬、遠藤大輔、「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」、第 22 回建設ロボットシンポジウム、2024 年 10 月