

ニューマチックケーソン工法における自動掘削システムの開発

天井走行式掘削機の自動化および排土バケツ自動認識

日本工業大学
 日本工業大学
 株式会社大林組
 株式会社大林組
 株式会社大本組
 株式会社大本組

○ 大崎 颯成
 石川 貴一朗
 稲川 雄宣
 照井 太一
 橋 伸一
 都川 信吾

1. はじめに

ニューマチックケーソン工法(以下、ケーソン工法)では、ケーソン下部に設置された作業室内の天井に取り付けられた天井走行式掘削機(以下、掘削機)により、掘削作業を行う。この作業は、高気圧環境下にて行うため、地上の遠隔作業室から遠隔操作により掘削作業が行われてきた。この掘削作業は、作業員の経験によって施工される部分が多く、作業の効率性は、各々の作業員の熟練度に依存している。一方で、近年の少子高齢化、若手作業員の減少により、人手不足や、技術継承が課題となっており、AIやロボット技術を取り入れた掘削作業の自動化が望まれており、自動化に向けた研究が行われている¹⁾など。

このような背景のもと、著者らはこれまでに、オペレータの負担軽減および省力化を目的として自動掘削に向けた掘削機の自律制御システムの構築および実機による自動掘削の検証を行ってきた。²⁾本論文では、この自動掘削システムの概要に加えて、新たに開発したLiDAR点群からの排土バケツ認識手法と、自動認識を組み入れた掘削からバケツへの排土動作の検証試験について述べる。

2. 自動掘削システムの概要

システムの構成図を図1に示す。本システムは作業室内の天井走行式掘削機、環境計測用3D LiDAR、および遠隔管理室に設置した遠隔制御PC、状態管理PC、制御パラメータ計算PCから構成される。それぞれのシステムはLANにより接続されている。

掘削機の概略図を図2に示す。掘削機は、作業室天井に固定されたレールから吊り下げられており、レール上を走行することで移動する。また、走行、旋回、ブーム上下・伸縮、バケツ上下・回転の合計6軸で構成されており、走行、旋回、バケツ回

転部にはロータリーエンコーダ、ブーム上下・伸縮、バケツ上下には、シリンダー部にポテンシオメータが取り付けられている。また、掘削機はもともと遠隔操縦用にPLC(Programmable Logic Controller)が搭載されており、PLCに遠隔操縦PCとレバー入力装置(操作盤)が接続されている。自動操縦時に操作盤を操作した場合には、操作盤での動作が優先される。

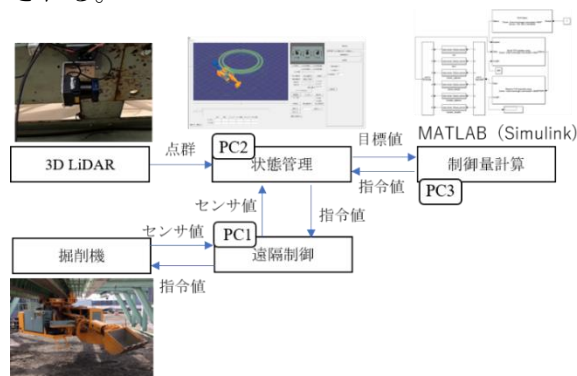


図-1 システム構成図

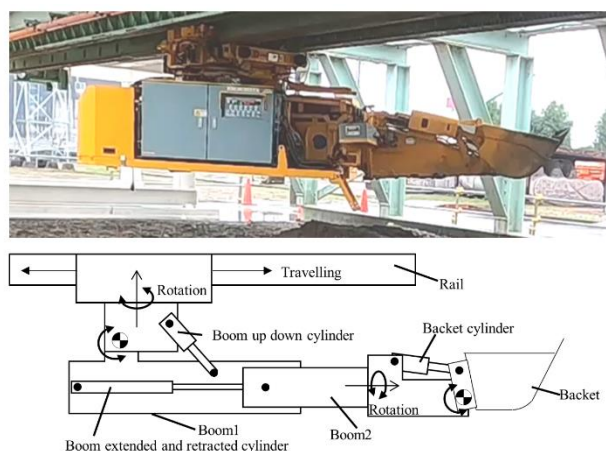


図-2 掘削機概略図

自動掘削は、状態管理ソフトからの指令により

行われる。状態管理ソフトはLiDARから得た点群により掘削位置や排土位置を自動決定し、掘削機の目標位置や姿勢と、掘削機に取り付けられたセンサ値を制御パラメータ計算PCに送信する。制御パラメータPCは、目標値とセンサ値との差分から制御量(レーバ入力値)を自動決定し、状態管理ソフトを通して遠隔制御PCに送信する。遠隔制御PCは、制御量に基づいて、掘削機のPLCに指令値を送信する。

3. 掘削機のモデル化と制御

3.1 掘削機のシステム同定

掘削機の制御パラメータを決定するためには、掘削機の各駆動軸について、入出力関係を表す数学モデルを求める必要がある。モデル化は、運動方程式などの理論式から求める方法や、実際の入出力関係に着目して理論式を当てはめるシステム同定などがあるが、理論式から求める場合、掘削機の油圧システムや、機械的な摩擦、各構造物の質量、慣性力など様々なパラメータの情報が必要となり、正確な理論式を求めることは極めて困難である。そのため、本研究では、実験により入出力関係を求めることでシステム同定を行った。システム同定においては、システムの次数を決める必要があるが、一般的に油圧システムの伝達関数は2次遅れ系として近似できることが知られているため⁴⁾、システムの伝達関数を式(1)で表される標準2次遅れ系と仮定して、各パラメータの同定を行った。

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

入出力関係は、軸ごとに遠隔操縦装置からステップ入力を加えたときのセンサ値を計測することで求めた。

導出した伝達関数は、実機の応答とモデル式により算出した応答を比較することで評価した。図3に走行の応答結果の比較例を示す。定性的に細部で多少の誤差が見られるが、ほぼ一致していることが見て取れる。

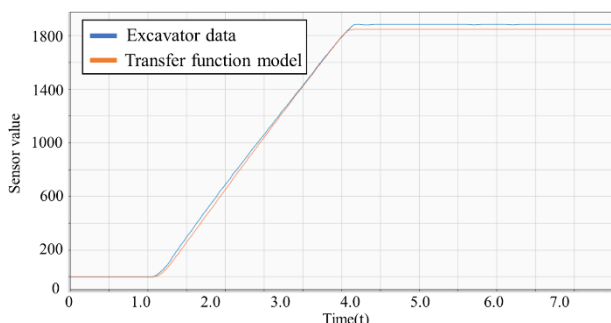


図-3 システム同定結果の評価例(走行軸)

3.2 PIDコントローラ的设计

本システムでは、各軸の制御に、PID制御を用いている。使用した制御システムのブロック線図を図4に示す。本システムでは、各軸とも、速度制御ループと位置制御ループを組み合わせることで、位置や角度の制御を行っている。目標値には、バケット先端位置から求めた各軸の角度や移動距離を与えている。各軸のセンサは、角度ではなくシリンダー長を計測しているため、それぞれの角度は、機構の幾何学的位置関係から、油圧シリンダー長に変換して目標値としている。また各軸のセンサは、位置を計測できるが、速度は計測できないため、計測周期で微分することで、速度に変換している。

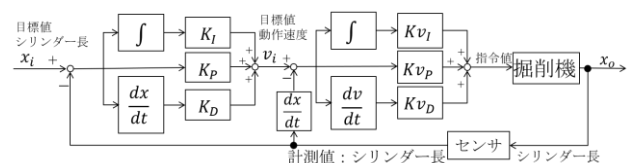


図-4 PID制御ブロック線図

各軸のPIDパラメータは、目標の制御性能を決めMATLABのオートチューニング機能を利用して値の概算を求めた後、実機実験により、軸ごとに各パラメータを微調整し決定した。

3.3 掘削機の位置・姿勢の決定方法

掘削機の自動化を行うためには、掘削機の各軸の位置姿勢を自動で決定する必要がある。掘削動作や排土動作において、重要となるのは、バケット先端位置であると考えられることから、本システムでは、バケット先端位置から、各軸の位置姿勢を逆算により求めている。掘削位置については、3D LiDARで計測した点群の中から、地表点を抽出し、0.1mグリッドに分け、各グリッドの平均高さが最も高いグリッドの中心を掘削開始位置として算出する。排土位置は後述する排土バケツ認識結果により求めた排土バケツ中心を排土位置とする。

次に、掘削・排土位置から、掘削機の位置を求めるが、ケーソン工法で主に使われるレールには、直線レールおよび円形のレールがあるため、それぞれについて、個別に算出方法を説明する。

・直線レールの場合

図5のように、バケット先端位置から、旋回中心までの距離Rを半径とした円を描き、直線レールの中心線との交点を掘削機の移動位置として計算する。

この時、距離Rは、ブームは水平で縮んだ状態とし、バケットも先端位置が水平になっている状態の時のバケット先端から旋回中心までの距離である。また、旋回角度は、バケット先端位置と旋回中

心を結ぶ直線とレール中心線とのなす角として計算することができる。バケット先端がレールから距離Rよりも遠い場合は、その距離まで、ブームを伸ばしたとして計算を行う。

・円形レールの場合

図6のように、レール中心の円とバケット先端位置を中心とした半径Rの円との交点2点のうち、現在位置に近い点、または移動可能な点を掘削機の位置として計算する。旋回角は、レール円の接線と直線とがなす角として計算する。また、バケット先端位置によっては、交点が存在しない。この場合、バケット先端位置から最も遠いレール上の点で掘削機が移動可能な範囲を移動位置とする。

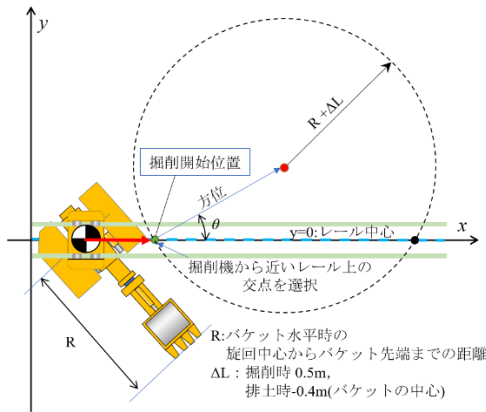


図-5 位置姿勢決定方法(直線レールの場合)

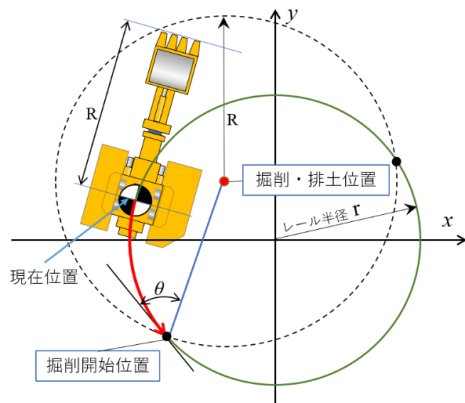


図-6 位置姿勢決定方法(円形レールの場合)

3.4 掘削動作パターン

掘削動作は、熟練オペレータによる掘削操作時の各軸の位置を連続的に時間とともに記録し、その値を各時刻における連続的な目標値とすることで生成した。掘削動作はバケット先端を土に入れ込みブームを伸ばしながらバケットを上げることで掘削する通常の掘削パターンと、バケットを任意の高さまで掘り込みながらバケットの軌跡が水平となるように移動させながらすくい上げて掘削する水平掘りのパターンを作成した。またそれぞれのパターンに対して、天井から地表までの距離

をパラメータとし、2.3mを中心として、0.25mおきに、5段階のパターンを作成した。

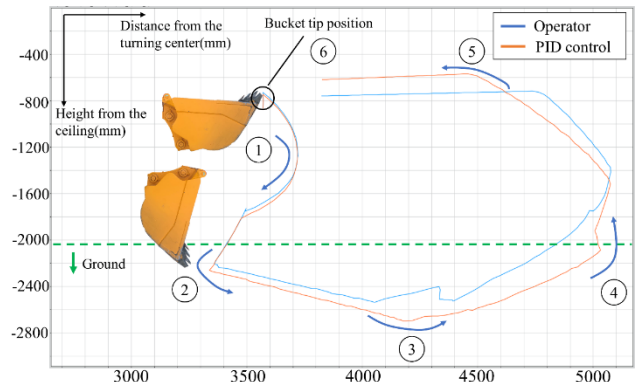


図-7 掘削動作(バケット先端位置の比較 2.05m)

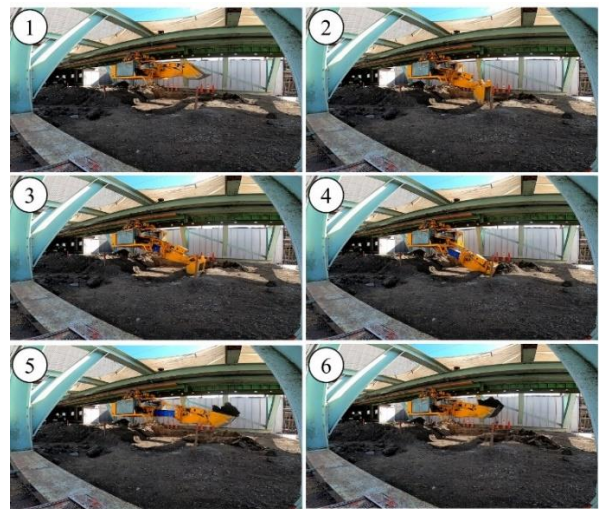


図-8 PID制御による掘削動作

図7は天井から地表まで2.05mの時の掘削パターンのバケット先端の軌跡を表示したものである。また図8は、図7の時の掘削機のPID制御時の動作写真を示す。

青色の線は、熟練オペレータによる掘削軌跡、橙色の線は、青色の軌跡を目標値としたときのPID制御によるバケット先端の軌跡である。それぞれの軌跡に違いが見られるが、これは、目標値が図7の①の位置から⑥の位置まで、10Hzで連続的に変化していくことと、操作指令から動作まで油圧に起因する遅れ時間があるため、PID制御による修正動作に入る前に、次の目標値に変化していくことが要因であると考えられる。目標値に対して精密に動かす場合は、時間により目標値を変更せずに、各軸が目標値の一定範囲内に入ったことがセンサに検知され次第、次の目標値に変更する方法があるが、この場合、地質の影響などにより、必ずしも一定範囲内にバケット先端位置を制御できないことがあること、目標値近傍に近づくまで時間がかか

り、動作が遅くなることが予想されるため、本手法のように熟練オペレータの軌跡を同一の時間で追う手法とした。また、図9に示すように、熟練オペレータとPID制御の掘削形状を計測し比較すると、ほぼ同様の形状で掘削できており、十分な掘削性能を有していると考えられる。

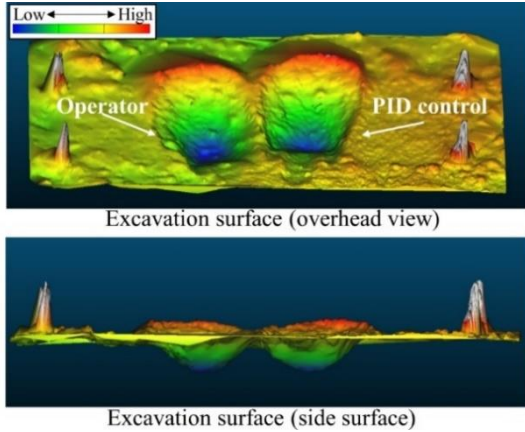


図-9 掘削結果比較

3.5 排土バケツ認識

ケーソン工法では、作業室内で発生した掘削土をケーソン外へ排土する必要がある。ケーソン上部のマテリアルシャフトから、クレーン等によりワイヤーで吊り下げた排土バケツを作業室まで下ろし、排土を行っている。掘削の自動化のためには、この排土バケツの位置を排土位置とし、ワイヤーに衝突しないように排土する必要がある。そこで我々のグループでは、作業室内天井部に取付けた3D LiDARで取得した点群の中から、排土バケツとワイヤー位置を認識する手法を構築した。作業室内の点群は図10に示すように、排土バケツ以外にも掘削機本体やレール、作業室壁面、地表面が計測されている。排土バケツが設置される地面は、必ずしも平坦ではないため、毎回異なった位置、姿勢で設置される。また、ワイヤーを取り付けている吊り手の倒れる方向も定まっていないため、ワイヤー位置も不定である。

本節では、点群からの排土バケツとワイヤー位置の認識手法について述べる。認識は以下のプロセスで行う。

① マテリアルシャフト直下の点群の抽出

排土バケツはマテリアルシャフトより、作業室内に下ろすため、原則としてマテリアルシャフト直下付近に設置される。そこで、計算に必要な点群数を減らすため、図11右側のように、まずマテリアルシャフト直下の近傍点群のみを入力点群として抽出する。

② 点群を高さ方向で層分け

図11-a)に示すように、点群を最下点から天井点

まで一定の高さ間隔でスライスし、層分けを行う。本研究では、0.1m間隔とした。図11-b)は一層分の点群を水平面に投影表示したものである。

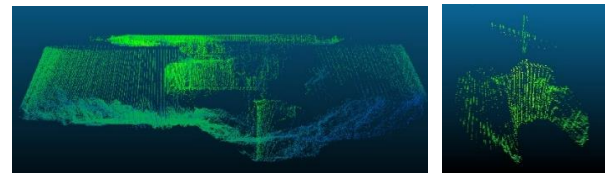
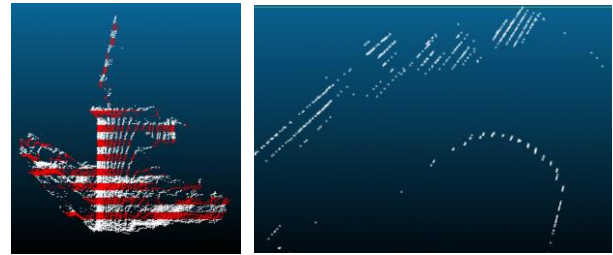
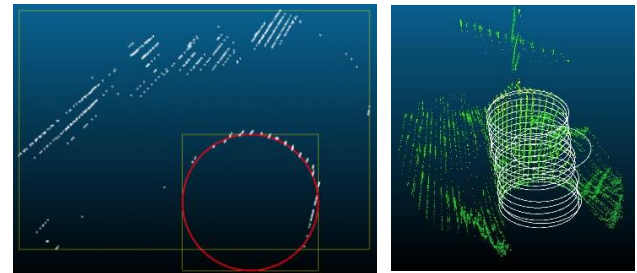


図-10 作業室内点群と排土バケツ近傍点



a) 点群の層分け例 b) 1層分の点群

図-11 高さ方向での点群の層分け



a) 一層分の結果 b) 全体の結果

図-12 円フィッティング結果

③ 各層の点群ごとに円フィッティング

各層に含まれる点群に対してRANSAC⁵⁾法(RANdom Sample Consensus)を用いて円フィッティングを行う。

RANSAC法はロバスト推定アルゴリズムの一つで、データからランダムに要素をサンプルしモデルを複数生成。そのモデルとデータを比較し、最も条件が当てはまるモデルを採用する手法である。

本手法では、各層の点群からランダムに3点を選び、3点を通る円を計算する。次に、計算した円のうち、排土バケツの半径から一定範囲内にある円を候補円として選択する。次に候補円の円周上の一定範囲内に含まれる点群数を比較し、最も点の数が多い円をフィッティング円として決定する。今回は、LiDARの計測誤差±5cmを範囲として点群数をカウントした。

図12はフィッティング結果を示している。図12-a)は一層分の結果、図12-b)は全ての層の結果を点群上に重ねて表示した結果である。ほとんどの円は、バケツ上にフィッティングしているが、一部の円が、バケツから大きくずれていることが分かる。

これは、近傍の地表点に含まれる点群密度が高かったことが要因である。

④ 各層の円中心を結ぶ直線の導出

各層でフィッティングした円の中心点(図13-a))を結ぶ直線を求める。③の工程において、外れ値も含まれることがあるため、外れ値に強いRANSACを用いて直線フィッティングを行った。直線計算ではランダムに2点を選び、2点を通る直線を計算した上で③と同様に点の数を比較して中心線を求めた。図13-b)の赤点は中心線状の代表点をプロットした結果である。図13-a)中に含まれる外れ値の影響を受けずに、計算できていることが分かる。

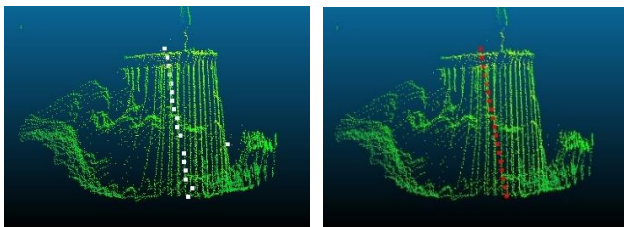
⑤ ワイヤ点群候補の抽出と直線の導出

排土バケツの上部には、天井の点またはワイヤのみが含まれる。そのため、ここまでの処理で円が抽出されなかった層よりも、高い位置にあり、かつ天井近傍にない層の点群は、ワイヤ点であると仮定することができる。

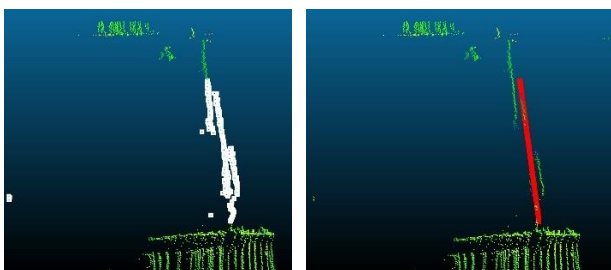
図14-a)はワイヤ候補点を示している。ワイヤ候補点についても、これまでと同様にRANSACにより、直線を求める。通常ワイヤなどの形状はカタナリー曲線となるが、厳密な形状は必要ではないため、計算の簡略化のために直線に近似している。図14-b)はワイヤの近似結果を示している。

以上の手順により抽出した排土バケツ中心線とワイヤ線を抽出した結果を図15に示す。

また、排土バケツが存在しない場合もあるが、この場合は、中心線の長さや、点群の高さ方向の分散により判定する。



a) 中心候補点 b) 中心線近似結果
図-13 排土バケツ中心線の抽出



a) ワイヤ候補点 b) ワイヤ近似結果
図-14 ワイヤ直線近似

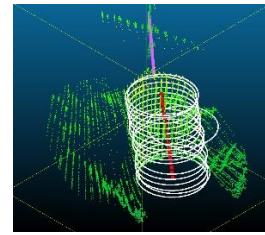


図-15 排土バケツ, ワイヤ認識結果

4. 自動掘削・排土動作管理

自動掘削では3章に挙げたそれぞれのプロセスを図16の状態遷移図に応じて切り替えることで実行する。それぞれのプロセスが終了した段階の状況に応じて、状態を選択し実行する。掘削パターンは、掘削箇所の点群の平均高さからパターンを選択し、実行する。また、地質によっては、掘削動作終了後に、バケツが土から引き抜けないことがあるため、掘削動作終了時のブーム角度、バケツ角度などから、掘削動作が正常に完了していないことを検知し、必要に応じて引き抜き動作を行う。

排土バケツが無い、または認識できない場合はあらかじめ設定した排土仮置き場に排土を行う。また掘削の終了の判定は、自動掘削開始前に状態管理ソフト上で設定した掘削対象エリア内の点群の高さが、すべて指定した高さ以下になった段階、または、あらかじめ指定した掘削回数で終了する。

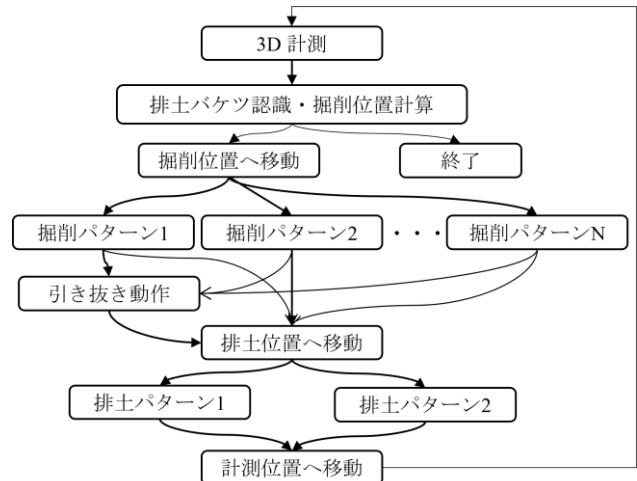


図-16 状態遷移図

5. 評価試験

5.1 試験概要

開発した自動掘削排土システムの性能を評価するため、ここまでの機能を組み合わせた総合試験を試験場において実施した。

試験場は15m×10mの長方形で、レールは直線レールが設置されている。試験場内に、3D LiDARを1台、内径1050 mm深さ600mmの排土バケツ1つを3D LiDARから5m以内に設置した。また半径1060mmの掘削範囲をあらかじめ設定した。使用し

た掘削機のバケット容量は0.25m³である。

自動掘削では、3D LiDARにより計測した点群から、掘削範囲内の最も高い点を掘削目標点とし、掘削範囲全体が指定した高さになるまで掘削を繰り返す。また、排土位置は、計測点群の中から排土バケツを自動認識させ、バケツの開口部の中心点を目標値として排土動作を行わせた。

5.2 試験結果

排土バケツが満杯になるまでの5回の計測すべてでバケツ、ワイヤーは正しく認識された。評価試験時の自動掘削から排土までの一連の動作の様子を図17に示す。バケツ先端が排土バケツ上部で、正しく排土できていることが見て取れる。図18に、排土バケツが満杯になるまでの、3D LiDARの計測結果を示す。①は掘削開始前の状態であり、計4回の掘削で排土バケツがほぼ満杯になった。左下の排土バケツを見ると⑤で排土バケツ上部まで土が到達していることが分かる。1回の排土までの時間は、毎回異なるが、計測時間も含めておよそ120秒であった。3D LiDARの計測には20秒弱かかっている。掘削前に必ず計測を行うため、熟練オペレータよりも1連の動作に時間はかかるが、掘削から排土までの作業を自動で行うことができることから、実用的な時間であると考えられる。

6. まとめと今後の課題

ケーソン工法の自動化を目的として、天井走行式掘削機による掘削から排土バケツへの排土動作までの自動化システムを開発し、実験により有効性を確認した。今後は、複数の掘削機の協調作業の実現や、より精密な動作が求められるケーソン刃口の自動掘削の実現などの課題が挙げられる。

参考文献

- 1) Naoto NEGISHI・Toshitaka TSUNEKI・Koki KIKUCHI・Toshihiro KONDO・Tetsuya KOYO・Akira KAMEI and Keigo HAYAKAWA:A Study on Autonomous Operation System of Caisson Shovels in High Air Pressure and Narrow Underground Space (Demonstration of Trajectory Tracking Control), The 4th International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2017
- 2) 角田敦史・別井雄介・照井太一・稲川雄宣・中村清志・尾形恒夫・藤澤秀行・橘伸一・都川信吾・石川貴一郎：天井走行式掘削機の自動化に関する研究（第2報）－LiDARを利用した掘削排土作業の自動化と評価－，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
- 3) 照井太一・伊藤良二・藤澤秀行・橘伸一・石川貴一郎・角田敦史・南部泰範：ニューマチックケーソン工法の自動運転に関する試験施工報告-，土木学会 令和4

年度全国大会第77 回年次学術講演会

- 4) 西海孝夫・一柳隆義・加藤博司・小波俊文朗：自励振動法を用いた油圧サーボアクチュエータ系の実時間パラメータ推定，日本フルードパワーシステム学会論文集，第36巻・第1号，2005年1月
- 5) Robert C Bolies・Martin A.Fischler：Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Communications of the ACM, Volume 24・Issue 6, pp 381~395, June 1981

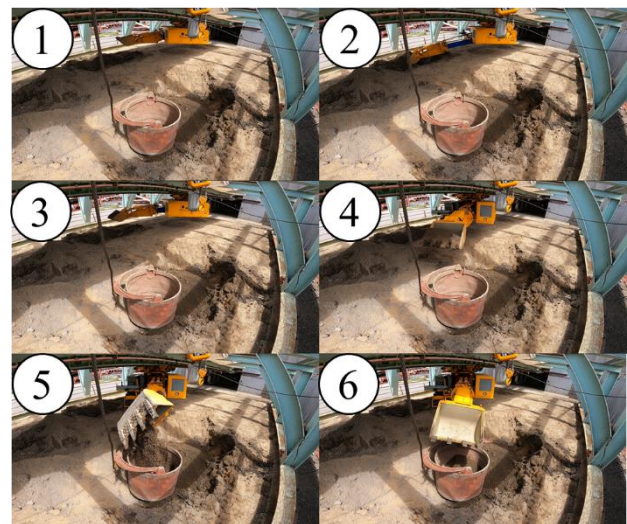


図-17 自動掘削排土動作

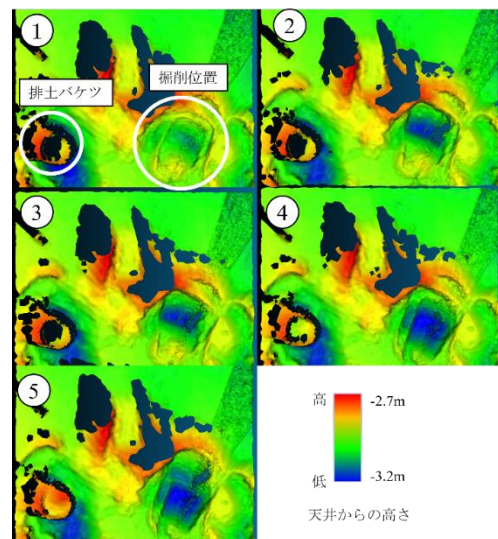


図-18 掘削排土計測結果