(11) 山岳トンネルのインバート掘削を対象とした非 GNSS 環境下の自動運転手法の開発

石田　仁[1]・矢吹　信喜[2]・大森　禎敏[3]・森屋　陽一[4]・藤田　真司[5]

[1]正会員　五洋建設株式会社　ICT推進室（〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8）
E-mail: Hitoshi.Ishida@mail.penta-ocean.co.jp

[2]フェロー会員　大阪大学教授　大学院工学研究科　環境エネルギー工学専攻
（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
E-mail: yabuki@see.eng.osaka-u.ac.jp

[3]正会員　五洋建設株式会社　土木部門土木本部　土木技術部（〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8）

[4]正会員　五洋建設株式会社　ICT推進室（〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8）

[5]正会員　五洋建設株式会社　ICT推進室（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1）

建設業は深刻な労働者不足となっており，省人化を目的として施工の自動化を目指す取り組みが拡大している．自動施工における建設機械の位置や方向の把握には，一般的に RTK-GNSS が用いられているが，高精度に建設機械の座標を取得できるため，建設機械が移動し，入れ替わりながら複数工種にわたる自動施工を行うことが可能である．一方，山岳トンネルのような地下空間では，GNSS を利用することができず，坑内作業での位置合わせが難しい状況である．本研究では，山岳トンネルのインバート掘削作業を対象に，標定点を用いた高精度な自己位置推定をもとに自動掘削を実施するとともに，施工前後の移動も自動化することにより，山岳トンネルにおける複数工種を対象とした自動施工の実現の可能性を示した．

Key Words: *mountain tunnel, invert, automatic construction, auto-driving*

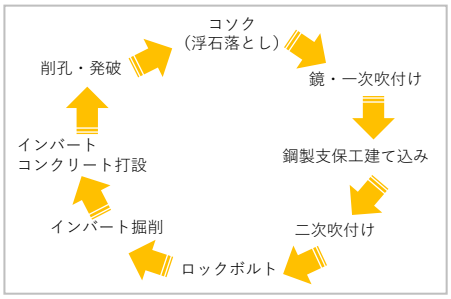
1. はじめに

建設業では，社会の少子高齢化が進む中，深刻な労働者不足となっている．国土交通省では，BIM/CIM や i-Construction，インフラ分野の DX[1]等の取組みを通じて，生産性の向上や労働環境の改善を進めており，その取り組みの中でデジタルデータの活用や 3 次元データによるコミュニケーションの拡大，現場作業の遠隔化・自動化・自律化が望まれている．民間企業においては，作成した BIM/CIM モデルの活用が進められ，施工中に得られた計測データをデジタルツインに集約し，現場の施工状況を遠隔地から分析，管理する取組みや，遠隔施工，自動施工の取組みが増えており，着実にインフラ分野の DX 実現に向けて実証が進められている．

2. 既往の研究

鬼頭ら [2]は，ダム工事において現実空間のセンサー情報をリアルタイムにデジタルツインに反映し，現場管理を実施した．その中ではクレーンやその他建設機械，作業員の位置監視に GNSS を用い，安全性向上を実現するとともに，クレーンの自動運転の操作をデジタルツインから行い，生産性の向上を進めている．菅井ら [3]は，ダム工事において，ブルドーザ，振動ローラの自動施工を実施し，遠隔管制室の少数の管制員が複数の自動運転機械を稼働させることで，省人化を実現している．この取り組みでは，ダンプトラックによる土砂運搬を行い，ダンプトラックの荷下ろし箇所では，ブルドーザによる敷き均し作業，振動ローラによる締固め作業を行っている．以上のように，GNSS 環境下における自動施工の実証は，連続した複数の工種を対象とするなど，実用に向けて拡大しつつある．

一方で，山岳トンネルを対象とした自動施工も，発破掘削時の削孔 [4]，吹付け [5]，鋼製支保工の建込 [6]，コンクリートの打設 [7]，ロックボルト打設 [8]など，多様な工種に対してそれぞれ進められている．しかしながら，非 GNSS 環境下であることから， 自動的に施工場所を移動



※ 別途，変位の収束後に覆工コンクリートを打設
（鉄筋組立 → 型枠組立 → コンクリート打設）

図-1　山岳トンネル施工（NATM・発破掘削）の流れ

表-1　使用した 2D LiDAR の仕様

型　　式	YVT-35LX-F0
水平走査角度	210度以上　ピッチ6度　　精度±0.125°
垂直走査角度	40度　(-5度～35度)　　精度±2°
データ点数 （分解能）	2590点以上（ｲﾝﾀｰﾚｰｽなし、20fps） 518000点以上（ｲﾝﾀｰﾚｰｽHDモード、0.1fps）
検出距離	水平走査　-45° ＜θ＜45° 0.3-35m（白紙）0.3-11m（黒紙　反射率10%） -75° ＜θ≦-45°,45° ≦θ＜75° 0.3-20m（白紙）0.3- 6m（黒紙　反射率10%） θ≦-75°,75° ≦θ 0.3-10m（白紙）0.3-3m　（黒紙　反射率10%） ※上記は垂直走査の上向き15°（垂直走査中心)での値 上向き35°、下向き-5°では上記の70%に減衰する。
測距精度 （周囲25℃時）	白紙15m以下：±50mm 白紙15m～　：±100mm

したり，自動で工種が入れ替わったりするような取組みは見られない．山岳トンネル工事においては，**図-1** に示すように，工種が刻々と進行するため，各々の工種の入れ替わりを無人化，自動化することも，安全性や生産性を向上する上で重要と考えられる．

筆者ら [9]は，山岳トンネルの切羽コソク作業（ブレーカを使用）を対象に自動施工を実施した際，LiDAR SLAM を用いて 30～40cm ほどの誤差で自己位置推定を行うことが可能であること，自己位置を把握しながら自動移動することが可能であることを実証した．また，待機場所・退避場所と施工場所の間の移動についても，障害物を避けながら切羽に到達することが可能であることを実証した．しかしながら，この手法では位置推定に 30～40cm 程度の誤差を生じることから，インバート掘削の様に出来形管理を伴う掘削作業を自動化することは難しい．なお，この誤差は，施工中の山岳トンネルの路面が平坦でないこと，施工中に必要な配管やケーブル，ボックスなどが壁面に設置されていることが大きな要因となっており（**写真-1**）[9]，解消するためには現在の施工設備を大幅に見直す必要があり，現実的ではない．



写真-1　山岳トンネル施工中のトンネル壁面の状況



写真-2　標定点として三脚上（既知点）にスフィアを設置した例（3D スキャナによる測量の例）

3.　提案する手法

山岳トンネルのインバート掘削作業の現行の出来形はインバートの厚さが設計値以上となるように管理しており，余掘りは数 cm 以内に収めている．これを自動化するためには，非 GNSS 環境であっても，高精度に位置推定を行う必要がある．

一方，3 次元スキャナによる測量では，既知点にスフィア等のターゲットを設置し標定点とし，それらをもとに取得した点群データを現地の座標と合わせたり，点群データどうし合成したりすることが可能である [10]．施工中の山岳トンネルの既知点に，三脚で標定点としてスフィアを設置した例を**写真-2** に示す．このような標定点により点群の座標を高精度に合わせることができる．本研究では，インバート掘削作業を行う際の座標合わせに，標定点を用いるものとした．インバート掘削作業を開始する前に施工箇所付近に標定点を二箇所以上設置し，その標定点を用いて自己位置を推定する．本研究で構築した自動運転機を**図-2** に示す．遠隔操縦に対応した油圧制御装置を搭載し，また，車体，ブーム，アーム，バケットリンクに傾斜計を設置，マシンガイダンスやマシンコントロールと同様に車体の姿勢をリアルタイムに取得可能である．加えて，旋回角度計によって作業機（バックホウの上側）を基準とした走行部（バックホウの下側）の向きを取得し，2D LiDAR によって作業機を基準とした障害物を含む周囲の形状を取得する．2D LiDAR は作業機に設置し，高さはクローラの下端から 1.3m とした．使用した 2D LiDAR の仕様を**表-1** に示す．この 2D LiDAR によって，標定点を検出し，自己位置推定を行った．**写真-3** に，インバートの自動掘削の状況を示す．バックホウの進行方向に自己位置推定に使用した円筒形の標定点が配置されている．水平方向の位置を算出するため，円筒形のものを用意した．同時に 2 基の標定点を



図-2　自動運転機の構成

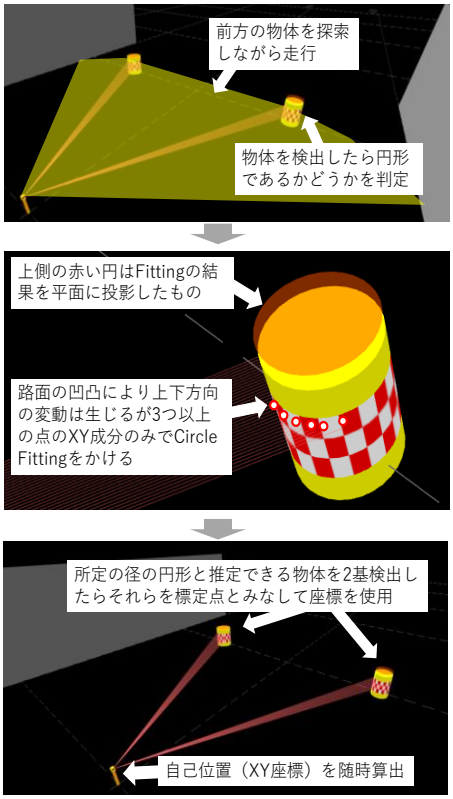


図-3　位置推定手法の概要

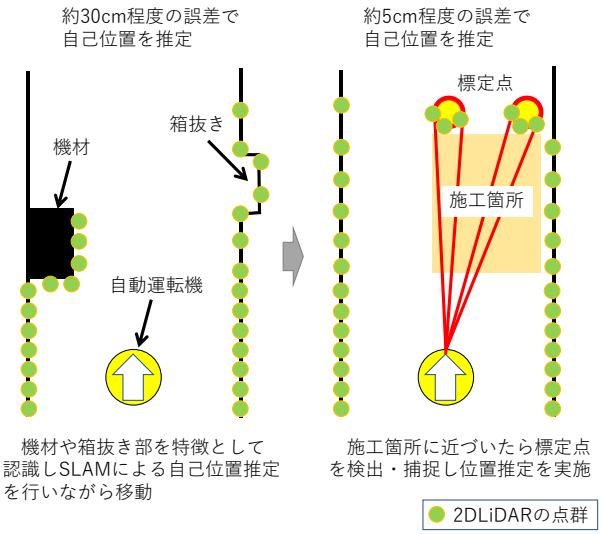


図-4　待機場所からの自動移動と施工箇所への到達



写真-3　インバートの自動掘削状況

捕捉することで，作業機の方向を算出することが可能である．なお，標定点を捕捉していない状況下では，SLAM やビーコンによっても自己位置を推定することが可能であり，作業に必要な精度に合わせて自己位置推定手法を切り替える．本研究では，山岳トンネル工事の施工単位の例としてブロック(主に 10.5m 等)ごとに自動施工を行うことを想定し，自動運転機が標定点の 10m 以内に入ったら精度が向上することを目標とした．2D LiDAR の測距精度は，**表-1** の最下段に示すように 15m 以内で±5cm であるため，水平精度としては許容範囲と考えた．位置推定手法の概要を**図-3** に示す．

4.　実証結果

本実証は，九州地方整備局発注の国道 57 号笹原トンネル新設工事（場所：熊本県宇土市）で実施した．幅約 14m，高さ約 8m，全長 679m の山岳トンネル工事である．待機場所からの移動の様子を**図-4** に示す．自動運転機は，SLAM による位置推定をもとに施工位置手前まで移動し，円筒形の標定点を検出した後，標定点による位置推定に切り替わる．その後は，あらかじめ設定した掘削箇所に刃先を自動で移動させ，ブレーカによる掘削作業を行う（**写真-3**）．自動掘削の制御画面を**図-5** に示す．奥行 1.0m 掘削ごとに自動で 1m 後進し，掘削動作を繰り返した．**図-5** の左下のメッシュ図に示す①～⑧の計測点について，スケールにて掘削制御位置の精度確認を行ったところ，**表-2** の通りであった．通常，有人運転の施工誤差は 5cm 以内に収まるため，有人運転より精度が低い．特に計測点①については，深さ方向の誤差が大き

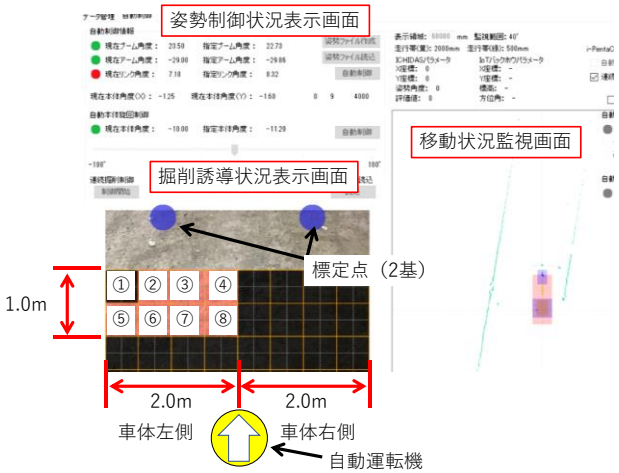


図-5　自動掘削の制御監視画面

いが，ブレーカーユニットの重量が大きいことから，車体から遠い箇所の揺れが大きいことが確認できており，その影響も大きいと考えている．全般的に車体の揺れは，アームを伸ばした際に大きく，刃先が所定の位置に到達するまでふらつくことが多い．このため，端部の施工については，壁面との接触の可能性があると判断し，有人運転で施工した．

5.　結論

本研究では，山岳トンネルの自動施工を実現する一環として，インバート掘削作業の自動化を試みた．単純な繰り返し作業の間は重機オペ―レータが不要となるため，生産性を向上することが可能である．待機場所から施工箇所への移動は，無人でも十分可能であることが分かった．今後は，各工種との入れ替わり時の動きなど，それぞれの条件に合わせて自動運転機の動作条件を定めることで，他工種との連携も可能になると考えている．インバート掘削作業の自動化については，有人運転に比べると精度が低く，仕上げを除けば可能であることがわかった．半日程度自動運転を行い，仕上げに有人運転を行うなど，省人化を図ることが可能である．しかしながら，将来的に全てを自動化するためには，精度を向上する必要がある．特に，山岳トンネル施工用のブレーカユニットは，重量が大きいため，揺れを抑制するための工夫が必要と考えている．

謝辞：本手法の現場実証にあたっては，国土交通省『建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト』の助成を受けた．また，本研究の実施にあたり，九州地方整備局をはじめ，関係者から多大なご協力を受けた．ここに記して感謝の意を表す．

表-2　掘削制御の精度確認結果

	各測点3回の平均誤差		
計測点	x (cm)	y (cm)	z (cm)
①	8.3	9.2	22.3
②	6.0	8.7	12.3
③	5.7	7.0	16.0
④	7.0	5.7	9.3
⑤	10.3	8.3	12.3
⑥	7.0	6.0	8.3
⑦	10.0	8.3	7.7
⑧	8.3	7.7	5.7

参考文献

1) 国土交通省：インフラ分野のDXアクションプラン，pp7-10，2022.
2) 鬼頭昂平，小俣光弘，土橋武夫，飯島芳則：デジタルツインによる現場管理手法に関する提案，土木学会第77回年次学術講演会，VI-71，2022.
3) 菅井貴洋，三浦悟，出石陽一，青木恒，浜本研一：自動化施工システムの台形ＣＳＧダム工事への適用（その２），土木学会第77回年次学術講演会，VI-53，2022.
4) 松田一輝，文村賢一，浅井伸弘，宮本真吾，渡邉慶一郎，石川輝：山岳トンネルにおけるICT搭載型ドリルジャンボによる完全自動削孔とその効果，土木学会第76回年次学術講演会，VI-976，2021
5) 坂西孝仁，宮川克己，手塚仁：小断面トンネル用自動吹付機の開発，土木学会第76回年次学術講演会，VI-677，2021.
6) 五味春香，水谷和彦，小笠原裕介，下山悠，坂下誠，浅井秀明：模擬トンネルを活用した完全自動鋼製支保工建込みシステムの開発，土木学会第77回年次学術講演会，VI-664，2022.
7) 手塚康成，松本修治，日野博之，青柳隆浩：トンネル覆工コンクリートの自動打設システムの開発，土木学会第76回年次学術講演会，VI-677，2021.
8) 石村昌也，畔津伸彦，山口洋平，生島直輝，三上英明，若竹亮：山岳トンネルのロックボルト打設自動化に向けた取り組み，土木学会第76回年次学術講演会，VI-679，2021.
9) 石田仁,矢吹信喜,大森禎敏,森屋陽一,藤田真司：山岳トンネルの切羽コソク作業を対象とした非GNSS環境下の自動運転手法の開発，土木学会論文集F3（土木情報学），Vol.79，No.22，2023.
10) 国土交通省，「地上型レーザースキャナーを用いた出来形管理の監督・検査要領（土工編）（案）」，令和4年3月(入手2023.3.27)