非GNSS環境下の山岳トンネルのインバート掘削の自動施工及びデジタルツインによる管理手法

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 (Corresponding Author)

[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）
E-mail: sadatoshi.oomori@mail.penta-ocean.co.jp

[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）
E-mail: yoichi.moriya@mail.penta-ocean.co.jp

[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）
E-mail: shinji.fujita@mail.penta-ocean.co.jp

ICT土工では，施工機械の位置をGNSSで高精度に取得することにより施工機械の半自動的な運転が可能であるが，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，高精度な位置推定が難しい．また，一般的に狭隘な空間で多くの工種が入れ替わりながら施工を進めることから，施工機械や資材，作業員の配置を把握して綿密に調整を行う必要がある．本研究では，非GNSS環境下における位置推定手法として，LiDARを用いて標定点をリアルタイムにトラッキングする手法を提案し，インバート掘削時のバックホウの座標取得に適用することにより，インバート掘削の荒掘りを自動化した．また，自動施工の前後の工程や周辺の状況，関連作業をデジタルツイン上で俯瞰的に可視化することにより，安全な遠隔地からの自動施工の管理を実証した．

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

1. はじめに

建設業の労働者不足に対して，国土交通省はBIM/CIM (Building/Construction Information Modeling, Management) や i-Construction，インフラ分野の DX (Digital Transformation)[1)]の取組みを通じて，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・自律化を進めている．このような中，ICT 土工では，施工機械の位置を GNSS (Global Navigation Satellite System)で高精度に取得することが可能であることから，施工機械の半自動的な運転が実現されつつある [2)]．これに対して，山岳トンネルのような地下空間は，GNSS の電波を受信できない非 GNSS 環境下であることから，高精度な位置推定が難しい．山岳トンネルの工種のうちインバート工における掘削作業については，掘削形状の正確性も必要とされ，かつ作業中に自走する必要もあることから，位置推定が重要であり，自動運転による施工が特に難しい．なお，インバート工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，一般的に余掘りを数 cm 以内に収めている．余掘り量が増えると，土砂の処分量が増え，また，コンクリートの打設量が増えるため，作業効率や環境配慮の面から，極端に大きくなることは避けなければならない．

また，山岳トンネル工事では，一般的に狭隘な空間において，多くの工種が入れ替わりながら施工を進めることから，施工機械や資材，作業員の位置，作業状況を把握して綿密に調整を行う必要があり，自動運転を実施するにあたっては，自動化対象の施工機械について，高精

度な位置推定が必要であるとともに，他の工種との位置関係や状況を適切に，かつリアルタイムに把握する必要がある．従来は，現場の職員や作業員が目視で観察し，無線等で状況を伝えていたが，最近ではこのような施工中の建設現場の状況をリアルタイムに可視化する方法として，デジタルツインが用いられている．デジタルツインには，遠隔地から現場全体を人が直感的に把握できるという利点があり，自動運転や自動運転の周囲の作業，自動運転の前後の作業との関係も把握しやすい．

一方，山岳トンネル工事では，従来より落盤による死亡災害が後を絶たず [3]，その他にも，出水や可燃性ガスの発生といった安全上のリスクや，掘削やずり積み，コンクリート等吹付作業，ロックボルト打設に伴う粉塵の発生といった衛生上のリスクが大きいことからも，坑内の省人化・無人化が望まれている [4]．このことから，坑内で管理を行う人員についても遠隔化することが望ましいと考えられる．

以上の背景から，本研究では，非 GNSS 環境下である山岳トンネル工事を対象として，自動運転によるインバート掘削作業，ならびにデジタルツインによる遠隔地からの状況把握と自動運転の管理手法を提案し，各々の有用性を実証することを目的とする．

2. 既往の研究

(1) 山岳トンネル施工の自動化に関する研究

山岳トンネル工事においては，一般的に狭い空間の中，多くの工種が入れ替わりながら進行する．例えば，NATM 掘削工の流れは**図-1** に示す通りである．これらの作業のうち，削孔・発破 [5),6),7)]，吹付け作業 [8),9)]，鋼製支保工建込 [10),11)]，ロックボルト打設 [12)]については，自動化の研究が進められているが，インバート掘削については，自動化の取組みは見られない．これは，インバート掘削を行うためには，バックホウが正確な座標を取得しながら，それに従って掘削位置に移動したり，掘削深さをコントロールしたりする必要があること，山岳トンネル内で移動しながら正確な座標を取得することが難しいことが要因と考えられる．また，自動的に施工場所を移動したり，自動で工種が入れ替わったりするような取組みも見られない．これは，いずれの工種についても，自動施工の前後あるいは自動施工中に補助的に現地での有人作業を必要とすることが要因と考えられる．

Yuhong ら [13)]，Zijian ら [14)]は，トンネル建設における安全のリスク管理をデジタルツインによって可視化することを提案している．山岳トンネルでは日々，切羽の崩落，出水や可燃性ガスの発生など，数多くのリスクを抱え，また常に状況が変わる可能性があることから，地山の情報や作業員の位置を含め，現場のデータをデジタルツインに集約することで，現場全体の作業管理や危険の予測を行うことが可能である．

デジタルツインは，前述のように有人作業が混在する環境下においても，工種の流れや作業配置を可視化し，自動施工を適切に行うための管理手法として利用することが出来る．

(2) 非 GNSS 環境下における自己位置推定に関する研究

中尾・若山 [15)]は，屋外ヤードにおいて運搬用のトラックの位置推定実験を LiDAR SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)によって実施しており，速度を変えて精度検証を行ったところ，時速 10，20，30 km と速度が速くなるにつれ誤差が大きくなるものの，おおむね 30～40 cm の誤差で位置推定が可能であったと報告し，非 GNSS 環境であるトンネル内の走行について，実用可能と結論づけている．また，筆者ら [16)]も，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 30～40 cm 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．しかしながら，これらの手法では，インバート掘削の様に，誤差数 cm 以内を目標に出来形管理を伴

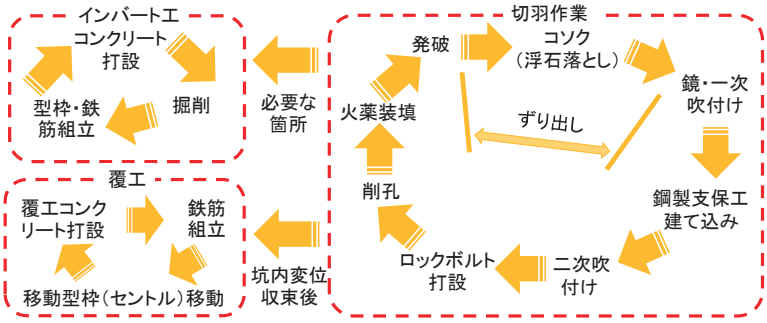


図-1 山岳トンネル施工（NATM・発破掘削）の流れ



写真-1 山岳トンネル施工中のトンネル壁面の状態

う掘削作業を自動化することは難しい．なお，この誤差の発生要因としては，施工中の山岳トンネルの路面が平坦ではなく SLAM で使用する LiDAR のレーザー光が，車体が走行することによる細かい揺れによって，トンネルの壁面や壁面に設置された設備に当たり，距離が変動するが，トンネルの壁面に当たるかこれらの設備（**写真-1**）に当たるかによって，計測距離に数 10 cm ほどの差が生じていることが考えられる．これを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．

Yimin ら [17]は，物体を検出する AI を用いてターゲットを取得し，これによって飛行中の UAV をリアルタイムに座標合わせをしているが，山岳トンネル坑内の施工機械についても既知点から座標を取得することができれば，より正確に自己位置を推定することが可能となり，円滑に自動施工を行うことが可能となると考えられる．

3. 提案手法

本研究で提案する手法は，非 GNSS 下である山岳トンネルにおいて，高精度にインバート掘削の自動運転を行う手法と， デジタルツインによって遠隔地から現場状況を把握し，自動運転の管理を行う手法である．

(1) 作業位置への移動および位置推定精度の向上手法

構築した自動運転機を**図-2** に示す．インバート掘削の自動運転を実現するにあたり，インバート掘削箇所への自動移動を正確に行う必要があるため，車体前方に 2D LiDAR を設置し，周囲の点群をリアルタイムに取得するものとした．なお，バックホウの制御の自動化については，油圧制御装置を搭載した無人化施工用バックホウ（災害用の遠隔操縦機）を改造し，マシンガイダンス用の傾斜計 4 基（車体，ブーム，アーム，バケットリンク），走行部（バックホウの下部）と作業機（バックホウの上部）間の旋回角度を計測する旋回角度計を設置することにより，バックホウの姿勢をコンピュータで取得できるようにした．さらに，油圧制御器をこのコンピュータで制御することで，走行や姿勢を取得しながら油圧の制御を行う仕組みとした． この仕組みでは，搭乗操作のガイダンスシステム同様の精度で刃先の座標を計算することができる．このため，ここでは自動施工で特に大きな誤差を生じると考えられるバックホウ本体の位置合わせに着目し，正確に自動移動を行うための周辺環境の取得手法，正確に掘削位置に移動する手法を述べる．

既往の研究では，トンネル坑内の移動など正確な位置推定を必要としない場合，2D LiDAR を用いた SLAM により 30～40 cm の誤差で位置を取得することが出来る．SLAM による位置推定の状況と誤差を**図-3** に示す [16]．しかしながら，ブレーカ先端の精度に 5cm 以内が必要であり，また，本研究で利用したマシンガイダンスシステムの施工精度は 5cm 以内の精度である．このため，位置精度についても，少なくとも 5cm 以内が必要と考えた．そこで，**図-4** に示すように施工場所に 2 基の円筒型の標定点（バリヤドラム）を設置し，位置推定精度の向上を試みた．標定点としてバリヤドラムを使用した理由としては，現場に多数存在し，直径，重量も十分にあり安定性が高いためである．また，直径が大きいことによ

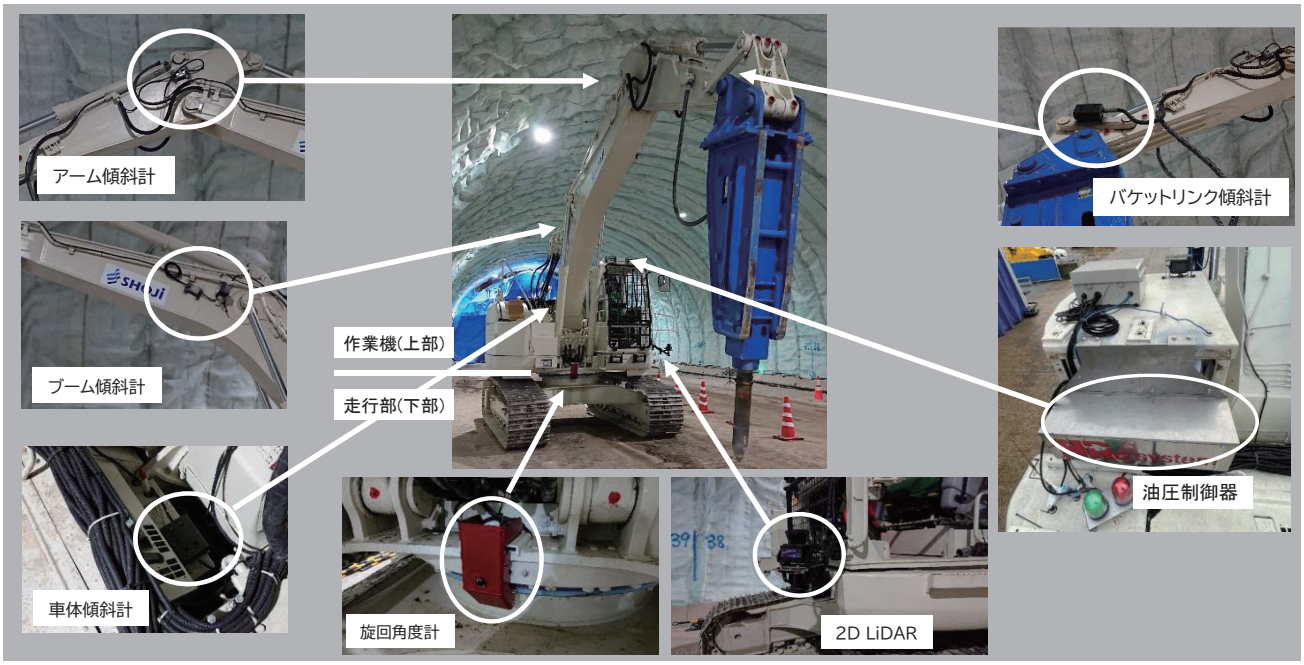


図-2 構築した自動運転機

り，LiDAR の計測点を多数取得することが可能である．

手順は以下のとおりである．1) 事前にバリヤドラムを施工箇所近傍に設置し，TS により円の中心座標を取得，システムに登録する．2) バックホウの車体に設置した 2D LiDAR によってバックホウの前方を探索しながら走行し，物体を検出し，3 点以上の点が取得できたら XY 座標で Circle Fitting（**図-5**）を行い，形状を判定し，所定の直径の円筒であれば標定点とみなす．3) 2 つの標定点を捕捉した時点で Circle Fitting の中心座標を TS で取得した座標とする．4) 2 点の座標から自動運転機の自己位置ならびに作業機の方位を推定する．2 基の標定点を検出することによって，車体の方位を計算可能となる．この手法により，SLAM よりも高い精度が実現可能である．

使用した 2D LiDAR の仕様を**表-1** に示す．この 2D LiDAR によって，リアルタイムに標定点を検出する．表の最下段に示すように，使用した LiDAR の測距精度は，白紙（レーザーを反射しやすい条件）を測距対象とした場合，15 m 以内で±5 cm，15 m 以上の場合で±10 cm であり，遠距離では十分な精度が得られない可能性がある．これに対して本研究では，山岳トンネル工事の施工単位の例としてブロック（1 ブロックの延長は，標準的なセントルの長さが 10.5 m であることから主に 10.5 m）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 10 m 以内に入ったら，SLAM による位置推定から標定点

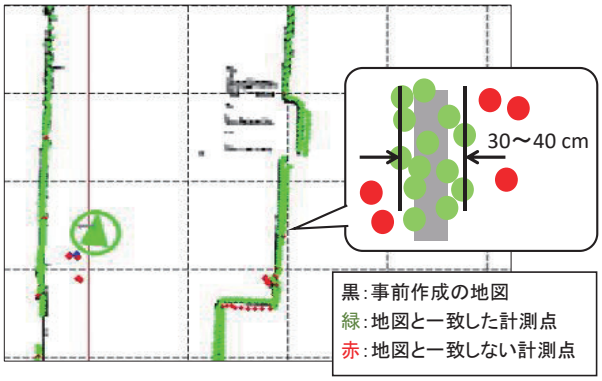


図-3　SLAM による位置推定状況と誤差

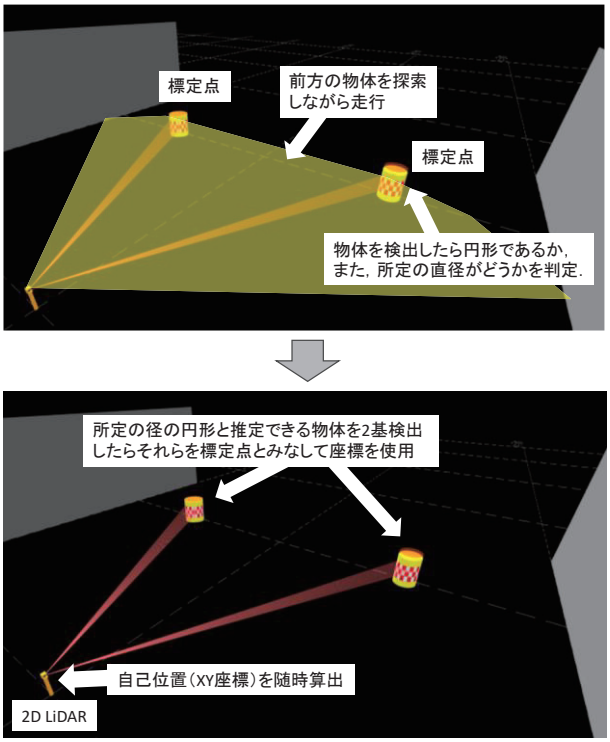


図-4　標定点による位置推定手法

表-1　使用した 2D LiDAR の仕様

形　　式	VFT-35LX-F0
水平走査角度	210°　以上　ピッチ6°　　精度±0.125°
垂直走査角度	40°（-5°　～35°　）精度±2°
データ点数（分解能）	2,590点以上（インターレースなし，20 fps） 518,000点以上（インターレースHDモード，0.1 fps）
検出距離	水平走査　-45° ＜ θ ＜ 45° 0.3～35 m（白紙），0.3～11 m（黒紙　反射率10%） -75° ＜ θ ≦ -45°，45° ≦ θ ＜ 75° 0.3～20 m（白紙），0.3～6 m（黒紙　反射率10%） θ ≦ -75°，75° ≦ θ 0.3～10 m（白紙），0.3～3 m（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15 m以下：±50 mm 白紙15 m～　：±100 mm

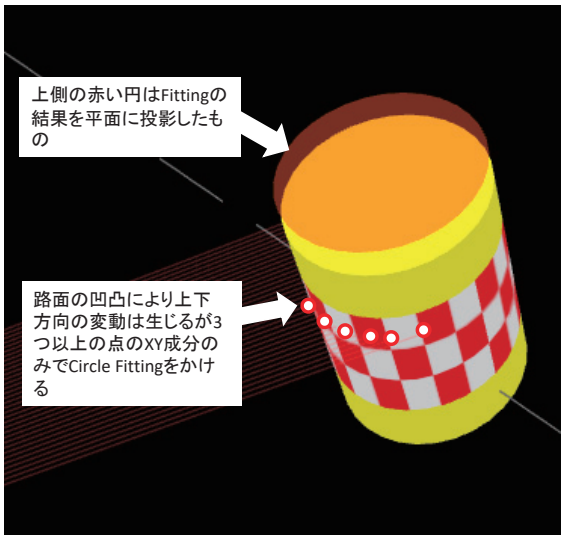


図-5　2D LiDAR の点群による標定点の検出

による位置推定に自動的に切り替え，精度が向上する仕組みとした．**図-6** に自動運転機のシステム構成を示す．左側にインバート掘削作業の自動化の仕組みを，右側にデジタルツインによる制御の仕組みを記載した．図の左上側の赤い破線囲い部分が既存の無人化施工用機械である．左下側の赤枠で囲んだ部分は，2D LiDAR のデータを用いて，SLAM による位置・方位推定演算と標定点による位置・方位推定演算を行っている部分である．以上の機能によって，非 GNSS 環境下に対応したインバート掘削の自動運転を実現し，その有効性を実証するものとした．

(2) デジタルツインを用いた遠隔地からの現場状況把握と自動施工の管理・制御

本研究で用いたデジタルツインを**図-7**，**図-8** に示す．**図-7** は WebGL による表示で，WEB ブラウザで全体を確

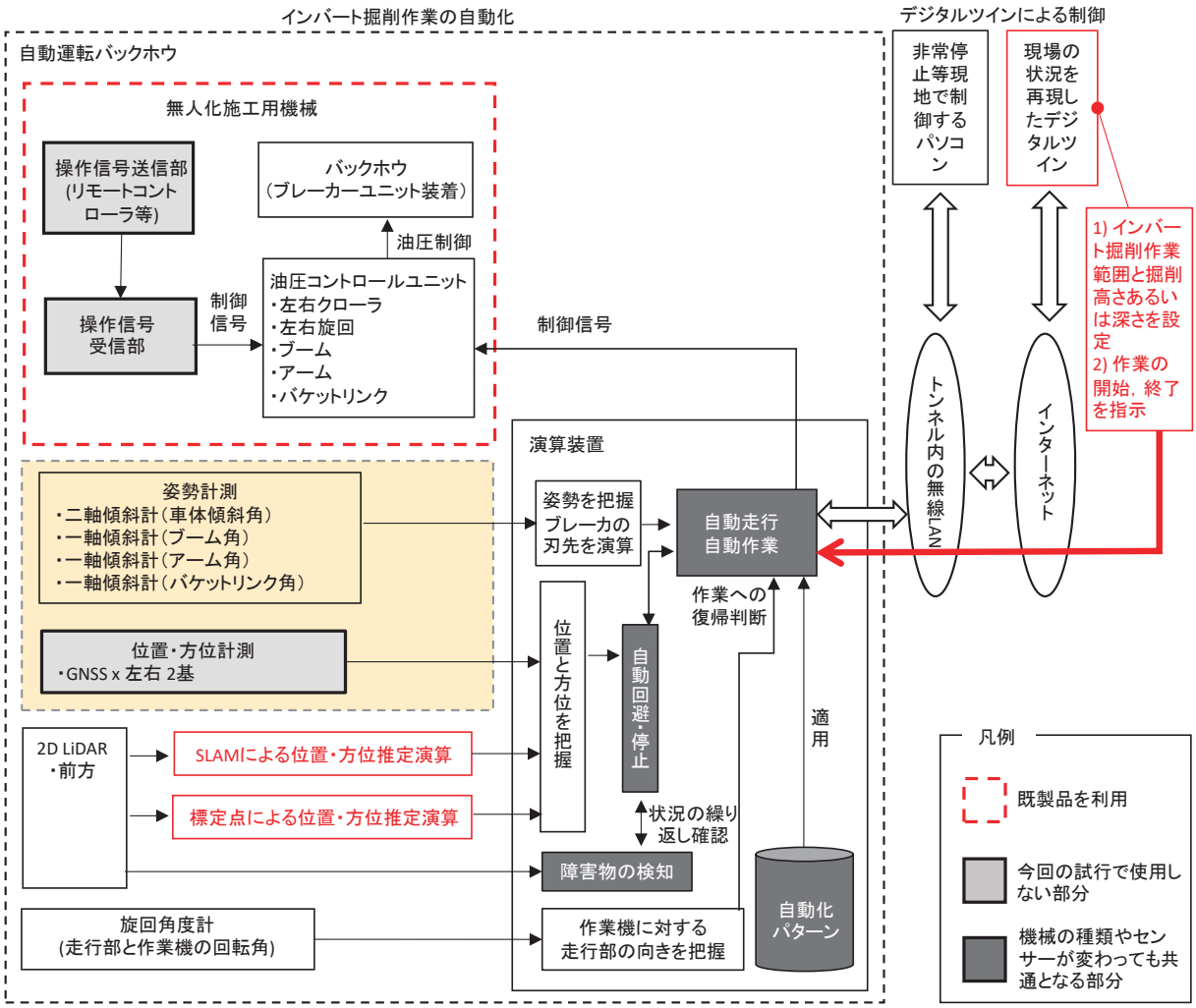


図-6　自動運転機のシステム構成図

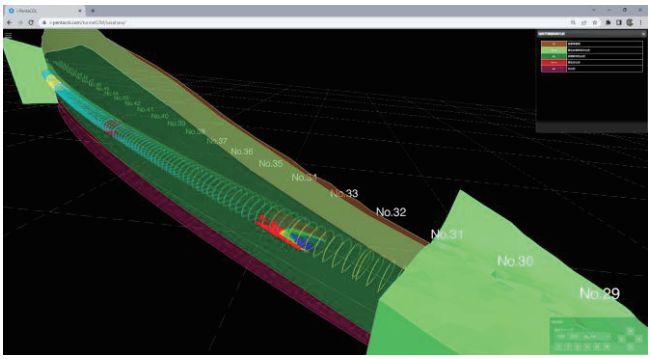


図-7　デジタルツインによる現場全体の俯瞰(WebGL)

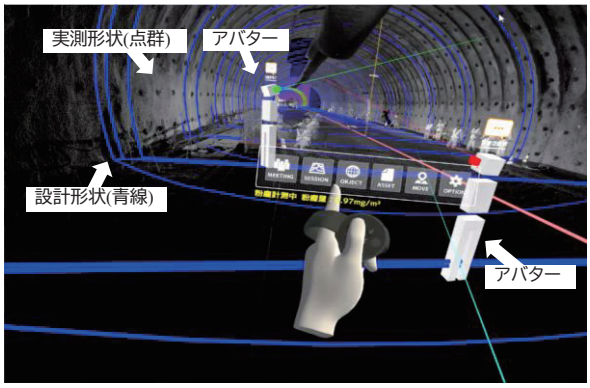


図-8　デジタルツインによる現場への没入(VR)

認している状況を示し，**図-8** は VR によってデジタルツインに没入している状況を示す．本研究では，自動運転と有人作業が現場内で混在する状況を想定し，デジタルツインを自動施工と有人作業の一元管理に用いることを提案する．このデジタルツインには現場の状況をリアルタイムに反映し，これにより遠隔地から直感的に現場全体の状況を把握することができる．デジタルツインには，設計形状の他，出来形計測結果や，IoT センサの計測データを表示する．IoT センサについては，粉じん濃度，照度，作業員に装着した BLE (Bluetooth Low Energy)ビーコンの電波強度をリアルタイムに取得し，作業環境と作業員の位置を管理した．自動化の対象としたインバート掘削の区画や周辺区画については，安全性確保の観点から有人作業の有無を管理することが重要となるため，BLE ビーコンによって取得した作業員の位置をデジタルツインに反映するとともに，有人作業中の区画に自動運転機を進入させないよう制限した．

インバート掘削終了後は，同じ区画に有人の型枠・鉄筋組立が入り，インバート掘削は隣接区画に移動する流れとなる．このように自動施工と有人作業は切替わりながら，また隣接して進行するが，自動施工をデジタルツインにより管理・制御するため，管理者が目視で状況を確認できると同時に，システムの制御によって有人作業区画で自動施工が行われないようにすることが出来る．デジタルツインにはあらかじめインバート掘削の設計形状が登録されており，現況地形は，インバート掘削の直前に 3D レーザースキャナで取得し，そのデータをデジタルツインに取り込むことによって，現況地形と設計形状から自動的に計画データを生成する（**図-9**）．なお，**図-6** の右上側の赤枠が，このデジタルツインでインバート掘削作業の計画を作成し，自動運転機に転送する機能を示している．以上の機能によって，遠隔地から現場の状況を確認し，有人作業と自動運転のすみ分けを行いながら自動運転の制御を行い，その有効性を実証するものとした．

4. 山岳トンネル工事現場における実証

本研究で提案する手法の実証を，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：熊本県宇土市笹原町～網津町）で実施した（**表-2**，**図-10**）．幅約 14 m，高さ約 8 m，全長 679 m の山岳トンネル工事である．

待機場所からの自動運転機の移動の様子を**図-11** に，移動方法を**図-12** 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．

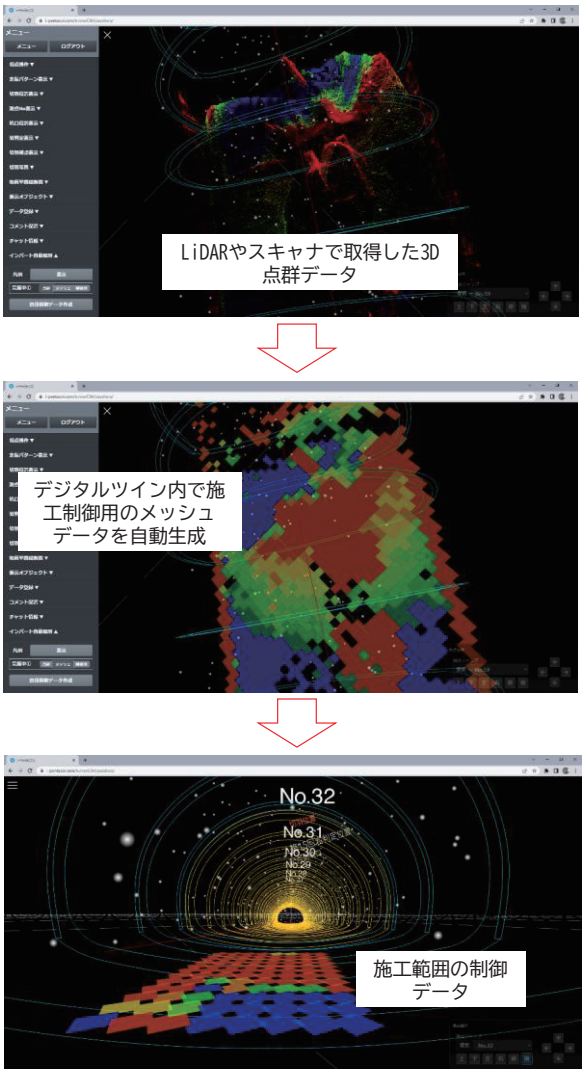


図-9 デジタルツインによる自動施工計画の自動生成

表-2 実証現場の工事概要

工 事 名 称	熊本57号笹原トンネル新設工事
発 注 者	国土交通省 九州地整整備局
工 事 概 要	熊本57号宇土道路(L=6.7 km)のうち熊本県宇土市笹原町から網津町間において，全長L=679 mの笹原トンネル終点側工区592 mを施工するもの．
主な工事内容	1) 工事区間の総延長：748 m 2) トンネル工(NATM)：679 m 3) トンネル仮設備：1式 4) 残土処理：69,590 m^3 5) ボックスカルバート(2 m×2 m，L=34 m)：1箇所 6) 路体盛土：4,080 m^3 7) 路床盛土：1,600 m^3 8) 小構造物：1式

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-2** に，インバートの自動掘削の状況を示す．また，自動掘削の制御画面を**図-13** に示す．奥行 1.0 m 掘削ごとに自動で 1 m 後進し，掘削動作を繰り返した．精度の検証にあたっては，**図-13** の左下のメッシュ図に示す 1～8 の計測点について自動掘削を実施した．精度の検証方法については，掘削時のブレーカを最深部で停止し，誘導した刃先のずれ量を測定した．掘削誘導状況表示部は，捕捉した標定点，自動運転機，施工対象範囲のメッシュ図の位置関係を示す模式図である．施工対象範囲が広くなるとメッシュの数は多くなる．

なお，車体の前後方向を X 軸，左右方向を Y 軸，深さ方向を Z 軸とし，深さ方向の測定にはブレーカの上部に目印を設置し，目印の高さを測ることで深さを計算した．精度確認結果を**表-3** に示す．キャビンにオペレータが乗り，掘削を手動で行う場合のブレーカ先端の位置精度は約 5cm である．本実証の自動運転では，平均誤差が 5 cm を超えており，搭乗操作よりも全体的に精度が低く，仕上げ掘りに適さないことがわかった．しかしながら，しかしながら，仕上げ掘りの 50 cm 上を目標



図-10　実証現場の位置図

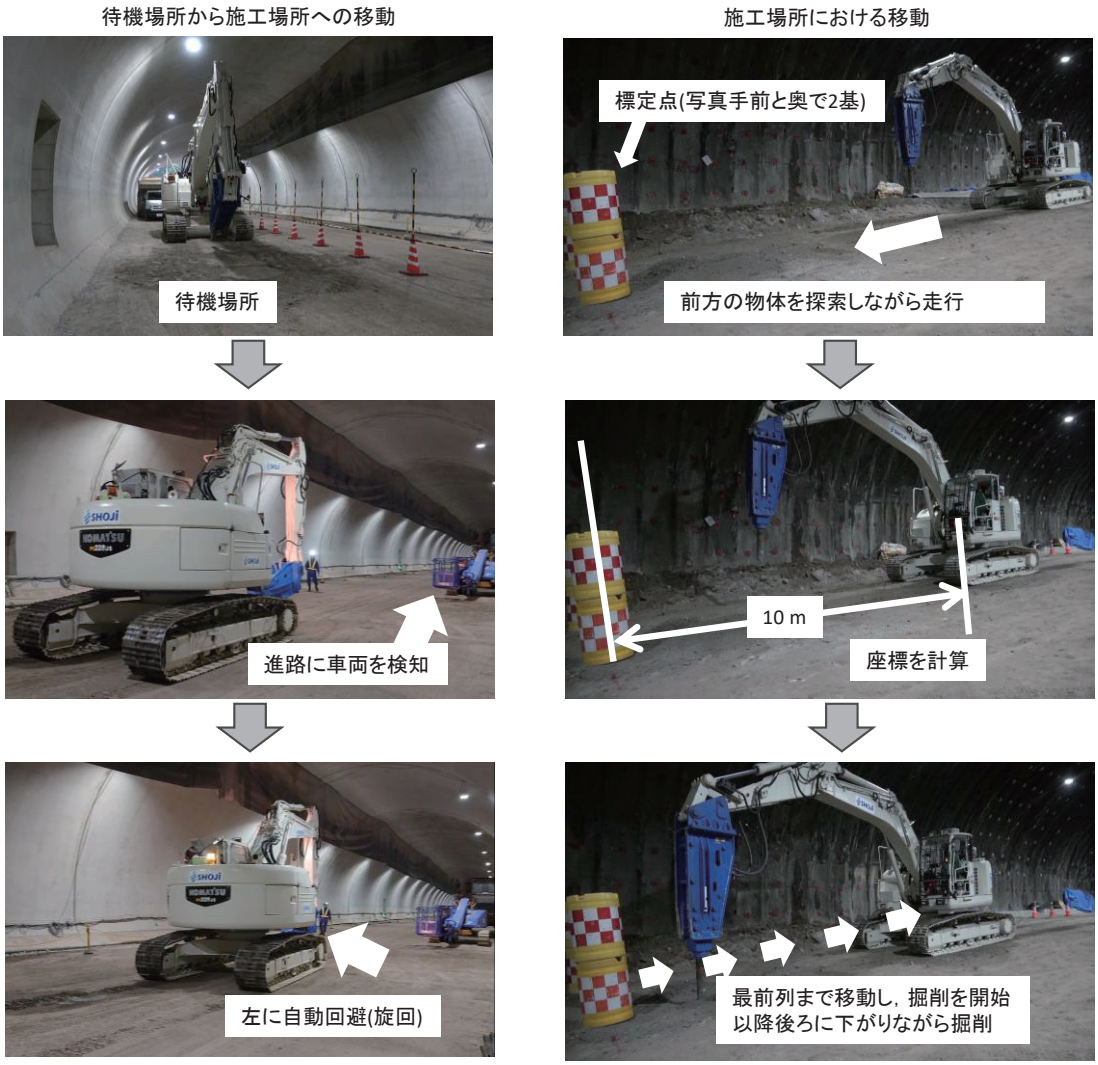


図-11　待機場所からの移動状況

とする荒掘りについては，50cm までの誤差が許容できるため，高い精度は必要なく，十分適用可能である．**表-3** の中で計測点 1 については，他の測点に比べ深さ方向の誤差が大きいが，山岳トンネル用途では，通常のブレーカーユニットと比較して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，その影響があると考えている．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に大きくふらつくことが多い．このため，端部の施工についても，壁面との接触の可能性があると判断し，搭乗操作で施工した．

実証時の施工の流れを**図-14** に示す．インバート掘削中，通常は現地で随時作業員 3 名が出来形を測定し，所定の深さに誘導するが，本実証では 3D LiDAR による自動出来形管理を実施した（**図-15**）．従来の作業員による出来形管理・誘導の流れを**図-14 (a)**に，3D LiDAR による自動出来形管理を行った場合の流れを**図-14 (b)**に示す．前者はインバート掘削中，施工場所が無人状態と有人状態を繰り返しながら進行するのに対し，後者はインバート掘削作業の間，無人で作業が進行している．また，前者は，施工場所の近傍で，出来形計測の人員が 3 名待機する必要があるが，後者は施工場所から離れた場所に計測者が 1 名いるだけで実施可能である．このように，施工機械を自動化しただけでは，施工場所を無人状態にすることができず，無人化するためには付随する出来形確認等の作業を自動化あるいは遠隔化する必要があることが明らかになった．なお，本研究においては，自動掘削の精度が低く，仕上げ掘削を搭乗操作とせざるを得ない結果であったため，仕上げ掘りの段階では，追加でバックホウのオペレータを施工場所に配置する必要があった．

図-16 にインバート掘削施工中の施工場所の移り変わりの例を示す．本研究のインバート掘削の作業の前工程は，ロックボルト打設であったが，前工程から日数が経過しており，特に作業調整は生じなかった．なお，ロックボルト打設とインバート工は，連続して行われないため，本実証以外においても同様に作業調整は生じないと考えられる．**図-17** に一回のインバート掘削の範囲と周囲の状況の例を示す．**図-16** の濃いグレーの部分が自動施工の対象で，無人とする範囲であり，グレーの部分が有人作業が行われる範囲である．施工は図の下（坑口）から上（切羽）に向かって進んでいる．インバート掘削により，地盤の荷重が小さくなるため，片側ずつ交互に掘削し，掘削後はなるべく早い段階でコンクリート打設と埋め戻しを行うよう，工程を調整することが多い．インバート掘削時の土砂を埋め戻しに使うため，施工効率の観点から仮置き土は近傍に置くことも多い．このため，実際の現場は，**図-16** に示すよりもさらに細かく区画が

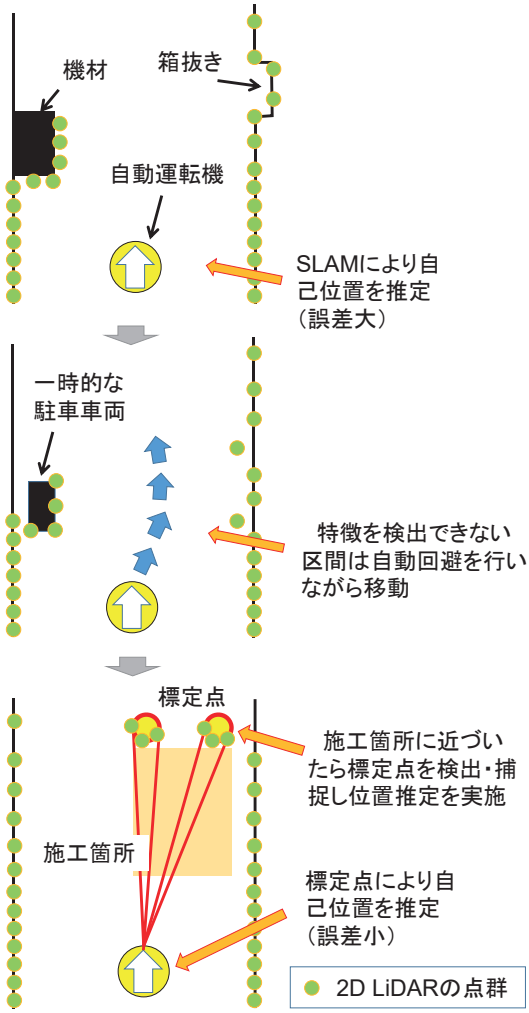


図-12　待機場所からの移動方法



(a) 刃先を自動移動中



(b) 自動掘削中

写真-2　インバート自動掘削状況

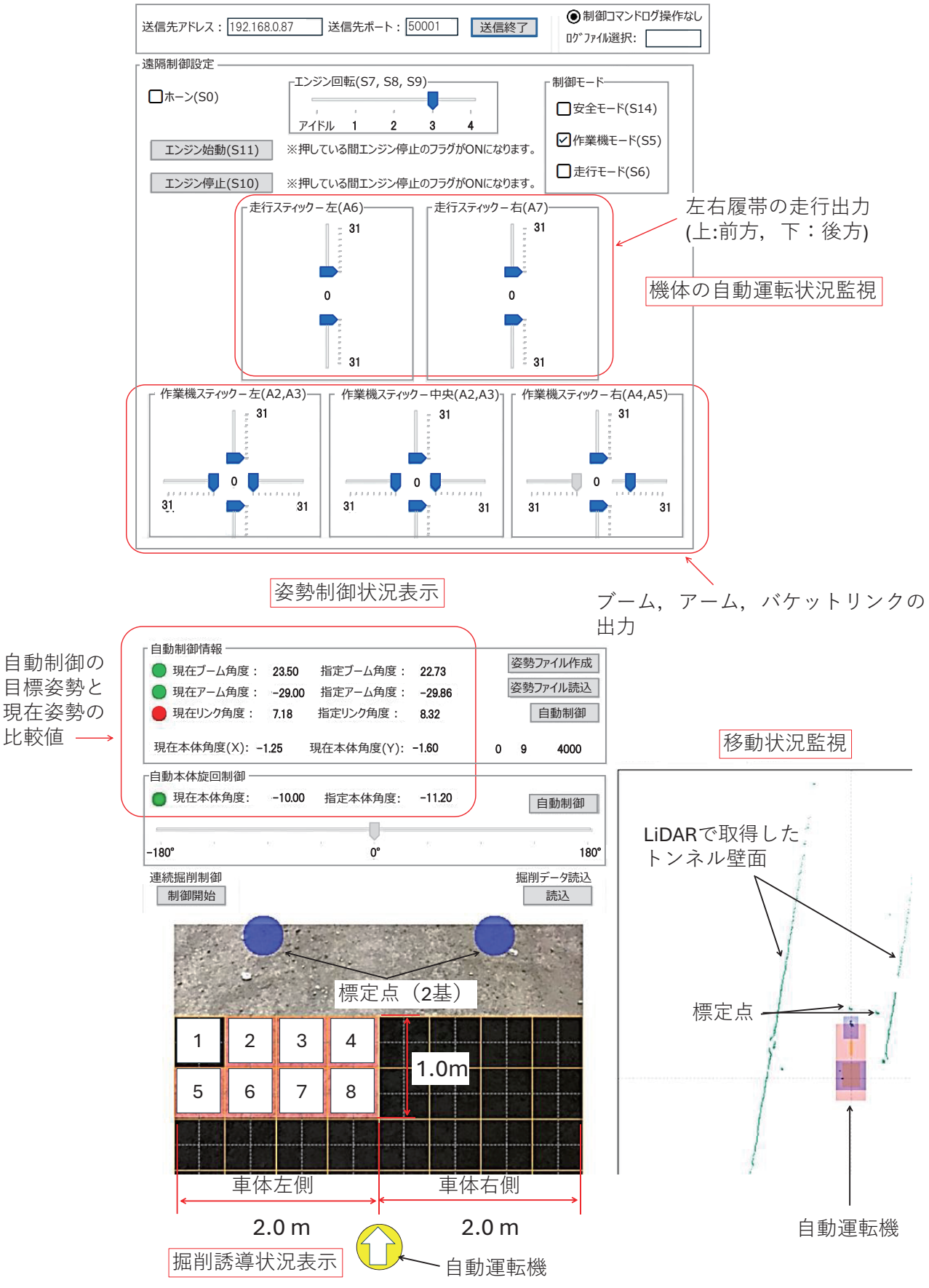
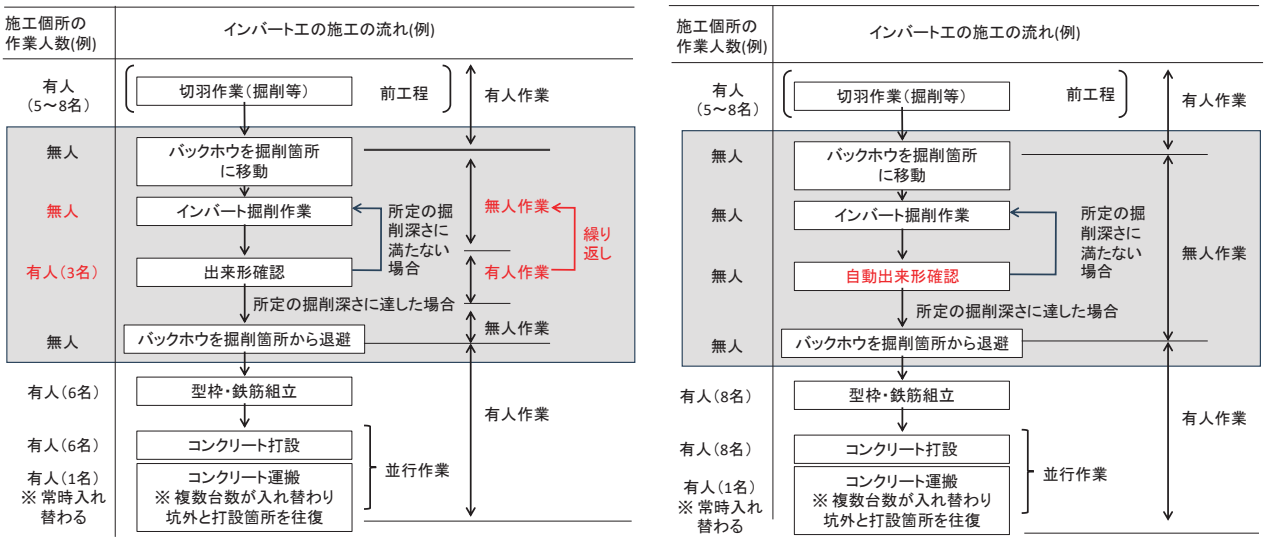


図-13　自動掘削の制御監視画面



(a) 従来の出来形計測を実施　　(b) 3D LiDARによる自動出来形計測を実施

図-14　インバートの自動掘削実証時の施工の流れと有人作業の有無

表-3　掘削制御の精度確認結果

	各測点3回の平均誤差（絶対値）		
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

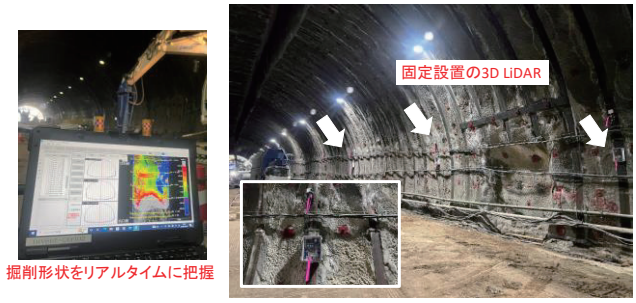


図-15　インバート掘削の出来形管理を自動化するために施工箇所に設置した3D LiDAR

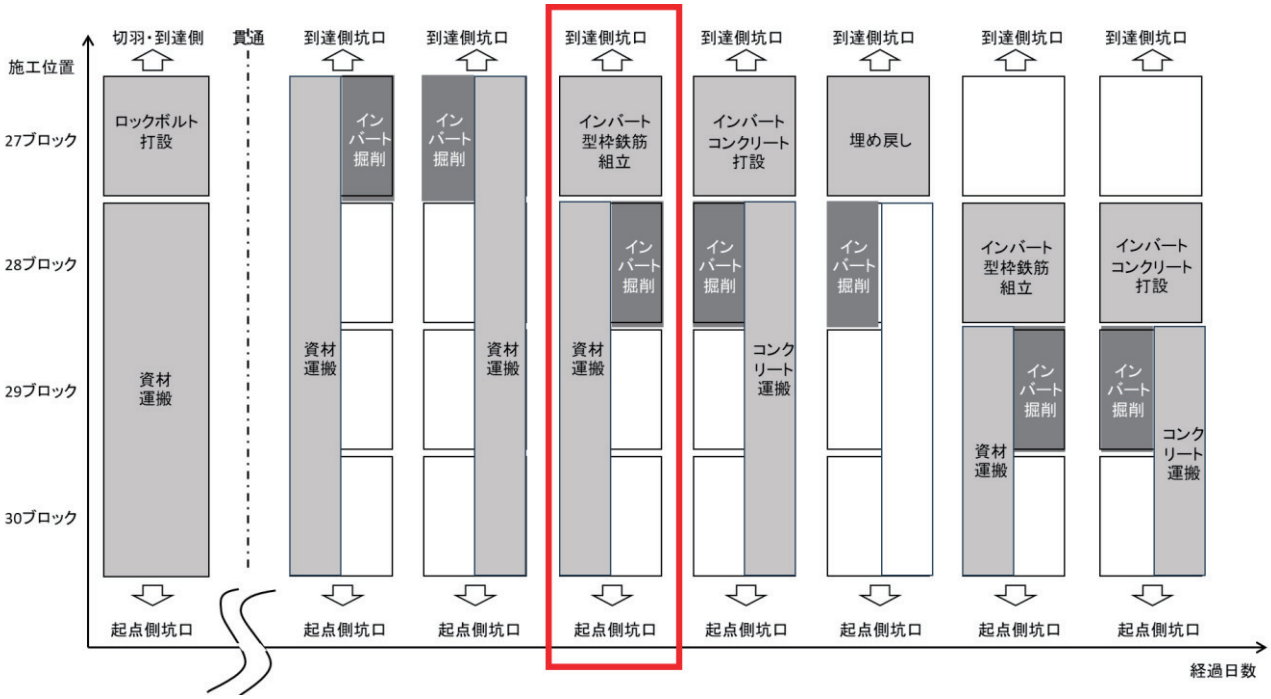


図-16 インバート掘削施工中の施工場所の移り変わりの例

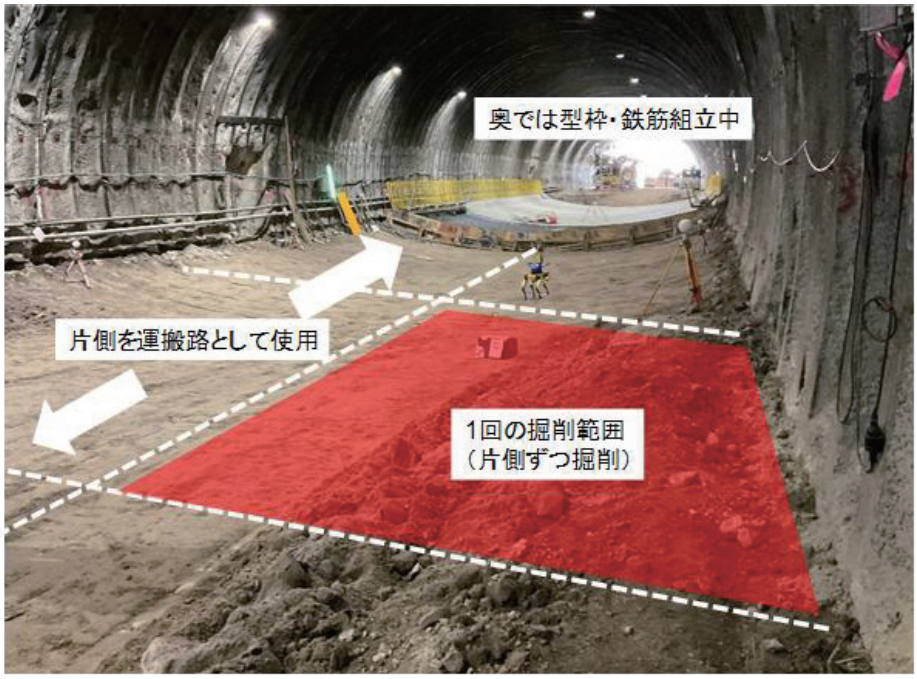


図-17　一回のインバートの掘削範囲と周囲の状況

分かれ，有人作業が発生している．**図-16** の中央の赤枠内では，図の上側（トンネル奥側）でインバート掘削の後工程の型枠・鉄筋組立を有人で行っている．また，左側は，資材等を運搬する通路となっていた．次の段階（赤枠の右側）では，インバート掘削は反対側に移り，トンネル奥側では有人でインバートコンクリートの打設が行われ，インバート掘削が終わった側をコンクリートの運搬路としている．このように時系列的に変化する自動施工周辺の状況も管理する必要がある．本研究では，作業員が装着した BLE ビーコンの電波から，有人作業の位置管理を行い，型枠・鉄筋の組立状況，資材の運搬状況を把握し，また，作業員や車両が自動運転機に近接した場合に自動施工が自動で止まるようにした．しかしながら，資機材の運搬が頻繁になると，自動施工が遅延するため，運搬路を施工範囲から離すよう工夫が必要である．

実証内容および結果について，山岳トンネル工事の施工経験の長いベテランの現場担当者（複数）の評価をまとめたものを**表-4** に示す．トンネル坑内は狭隘であり，多くの工種が錯綜することから，作業間の細かい調整も多く，現場担当者としては当初，山岳トンネルの自動施工は現実的ではないと考えていたが，本研究の実証を通じて，山岳トンネルの自動施工の実現性を感じたとのことである．この実現性については，単に施工機械の自動化だけでなく，デジタルツインで人が現場全体を俯瞰し，かつ人による管理が介在できる仕組みを構築したことで，細かい状況の変化に対しても自動施工と従来の施工を組み合わせながら進めることができる点が大きい．

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，1) 非 GNSS 環境下におけるインバート掘削作業の自動化と，2) デジタルツインによる自動施工の管理を実証した．1) 非 GNSS 環境下におけるインバート掘削の自動化については，搭乗操作による施工に比べ，施工精度が低いことから荒掘りに適用するにとどまったものの，荒掘りだけであっても，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，省人化に期待できることが明らかになった．現場職員の意見によれば，荒掘りだけでも自動で行うことができれば，オペレータが半日ほど他の作業を行うことができるとのことであった．2) デジタルツインによる自動施工の管理・制御については，ビーコンにより有人作業の位置と自動施工の位置を明確にすることが可能となった他，デジタルツインを通じて人の目と直感的な判断を介在できるようにしたことで，自動施工と従来の有人作業を混在させながら進めることが可能となった．

また，施工機械を自動化しても，自動施工中の出来形計測や誘導など，現地での作業が度々発生するが，これも自動化を進めることで自動施工の効率が向上することがわかった．今後は，各工種との入れ替わり時の動きなどをデジタルツインで可視化し，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，他工種との円滑な連携が可能になる．

位置推定の方法について，本研究の手法では，標定点の設置・撤去が必要であり，追加の現場作業が発生する

表-4 実証内容の評価

項目	現場の評価
1) インバート掘削作業の自動化	
精度	有人運転（ブレーカの刃先±5 cm）に比べ，10～20 cmほどの誤差が生じ，施工精度が低く，壁際などの端部や仕上げ掘削には適用が難しい． 高い精度を必要としない荒掘り（本実証現場では仕上げ面まで50 cmの離隔がある）には適用可能．
安全性	有人運転と異なり，施工中に周囲を確認できないことから，施工範囲に人がいないことを前提となる．
	移動中（走行中）は進路上の障害物や人を検知して回避あるいは停止するため，安全性は高い．
生産性	壁際などの端部の掘削や仕上げ掘削には適用できないが，荒掘りには適用でき，半日程度の自動施工を行うことが可能．その間，オペレータが別の作業を行うことも可能．インバート掘削でオペレータが不要な時間は，そのオペレータが他の作業を行うため生産性も向上する．しかしながら，その程度については十分な検証ができていない．
	出来形管理を従来法（作業員3名）で行う場合，自動施工を頻繁に止めて深さの確認を行う必要があるが，3D LiDARによって出来形の自動管理を組み合わせた場合には，連続して自動施工を行うことができる．3D LiDARを使用した場合はこの作業員3名を計測員1名とすることができる．また，この1名も施工場所から離れることが可能である．
	ICT建機と同様，丁張が不要となり現場作業は容易である．丁張が不要であることから，おおよそ15分の作業短縮となった．
	標定点(設置時間10分ほど) や3D LiDAR(設置時間30分ほど)の設置作業が省けると良い．
	刃先の座標で出来形管理ができたほうが良い．そうすれば3D LiDARの設置が不要となる．
2) デジタルツインによる自動施工の管理・制御	
精度	デジタルツインにより施工精度が直接向上することはないが，設計と出来形をデジタルツインで確認することができるため，施工の手直し等を適切に指示することができる．
安全性	デジタルツインで作業員がどこにいるか分かり，かつ作業員がいる場合には自動施工を停止するため，安全性が高い．複数の工種を扱う場合，現場で見るよりもわかりやすい可能性がある．
生産性	日々の施工を管理しているデジタルツインで自動運転の管理を行うため，手間が少ない．日々の雑多な作業を効率化できたが，本研究では定量化までは至らなかった．
	設計（計画）形状の3次元データを自動で作成し，自動施工機械に連携することができるため，通常のICT建機よりも運用は容易である．ICT建機に比べ設定の手間は少ないが，本研究では定量化までは至らなかった．
その他	遠隔で自動施工を管理・制御するのは怖いが，3Dで可視化することによって，現地の状況を直感的に把握でき，安心感が得られる．
	デジタルツインにより現場全体を俯瞰することで，全体の作業状況が把握できるため，自動運転の管理は容易である．

ため，既存の特徴点，例えば支保工やロックボルト，移動しない仮設備等に座標を付与し，これらを自動検出することで，位置推定を行うことが考えられる．

本研究では，デジタルツインでインバート掘削作業を管理したが，他の工種についても，3 次元データや IoT データで，詳細な現場情報をリアルタイムに取得すれば，人が介在する部分を削減することが可能と考えられる．デジタルツインによる安全リスク管理と，有人・無人エリアの管理，そして自動施工の制御を組み合わせて運用することも視野に入れて研究を進めたい．

山岳トンネルの工事は狭く，長い空間で多くの工種が動くため，現場の状況を詳細に把握し，綿密に調整する必要がある．山岳トンネルの自動施工については，多くの工種について研究が進められており，今後はこれらを統合的に調整する仕組みが必要と考える．自動化・遠隔化を進めた場合に，各工種で必要な作業員がどのくらい坑内に残るのか，どのような流れで各工種の作業を進めていくのかを分析しながら，自動施工や遠隔施工の導入を進めたい．

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．

REFERENCES

1) 国土交通省：インフラ分野の DX アクションプラン 2, pp. 4-10, 2023. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: DX Action Plan 2 for Infrastructure Field, pp. 4-10, 2023.]
2) 金森宗一郎，味田悟，加藤和宣：建設施工機械の自動化・自律化技術の普及に向けた取組みについて，令和 4 年度建設施工と建設機械シンポジウム，一般社団法人 日本建設機械施工協会，2022. [Kanamori, S., Mita, S. and Kato, K.: Approaches to the spread of automated and autonomous technology for construction machinery, *2022 Symposium on Construction and Construction Machinery*, 2022.]
3) 独立行政法人 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に関する検討会 報告書，2023. [Independent Administrative Agency Japan Labor Health and Safety Organization Japan Industrial Safety and Health Organization: Study Group on Measures to Prevent Rock fall in Mountain Tunnel Face Construction Report, 2023.]
4) 厚生労働省：ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン，2020. [Ministry of Health, Labour and Welfare: Guidelines for dust countermeasures in construction work such as tunnels, etc., 2020.]
5) 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. [Matsuda, K., Fumimura, K., Asai, N., Miyamoto, S., Watanabe, K. and Ishikawa, A.: Fully automatic drilling and its effects by ICT-equipped drill jumbo type in Mountain Tunnels, *JSCE 77th Annual Conference*, VI-976, 2021.]

6) 纐纈善孝，塚田純一，櫛島秀一，高橋真琴：山岳トンネルにおけるドリルジャンボ遠隔操作システムの開発，土木学会第 78 回年次学術講演会，VI-936, 2023. [Koketsu, Y., Tsukada, J., Nudejima, S. and Takahashi, M.: Development of remote operation system for jumbo drill in rock tunnel construction site, *JSCE 78th Annual Conference*, VI-936, 2023.]
7) 小笠原裕介，坂下誠，浅井秀明，水谷和彦，五味春香，鈴木麟大郎：自動装薬システムにおける装薬孔位置検出システムの開発，土木学会第 78 回年次学術講演会，VI-957, 2023. [Ogasawara, Y., Sakashita, M., Asai, H., Mizutani, K., Gomi, H. and Suzuki, R.: Development of explosive charging hole position detection system for automatic charging system, *JSCE 78th Annual Conference*, VI-957, 2023.]
8) 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. [Sakanishi, K., Miyagawa, K. and Tezuka, H.: Development of automatic sprayer for small cross-section tunnels, *JSCE 76th Annual Conference*, VI-677, 2021.]
9) 渡辺正嘉，竹中計行，木下勇人，宮本真吾，松田一輝：HMD によるコンクリート吹付機の遠隔操作技術の開発（その 3），土木学会第 76 回年次学術講演会，VI-529, 2021. [Watanabe, M., Takenaka, K., Kinoshita, H., Miyamoto, S. and Matsuda, K.: Development of remote control technology for concrete sprayer using HMD (Ver. 3), *JSCE 76th Annual Conference*, VI-529, 2021.]
10) 水谷和彦，坂下誠，浅井秀明，逵亮太：鋼製支保工建込みロボット 測量用ミラー自動回収機構の開発，土木学会第 76 回年次学術講演会，VI-913, 2021. [Mizutani, K., Sakashita, M., Asai, H. and Tsuji, R.: Steel timbering erecting robot development of automatic surveying mirror collector, *JSCE 76th Annual Conference*, VI-913, 2021.]
11) 内藤将史，関根一郎，辻川泰人，若竹亮，内藤雅人：鋼製支保工建て込み切羽無人化施工システムの開発，土木学会第 76 回年次学術講演会，VI-913, 2021. [Naitou, M., Sekine, I., Tsujikawa, Y., Wakatake, R. and Naitou, M.: Development of unmanned construction system on face for steel support, *JSCE 76th Annual Conference*, VI-918, 2021.]
12) 西村風希，堅田篤史：完全ワンオペレーターによるロックボルト自動打設の試験施工，土木学会第 78 回年次学術講演会，VI-777, 2023. [Nishimura, K. and Katada, A.: Test construction of automatic rock bolting by purely a single operator, *JSCE 78th Annual Conference*, VI-777, 2023.]
13) Yuhong, Z., Naiqiang, W. and Zhansheng, L.: An established theory of digital twin model for tunnel construction safety assessment, *Applied Sciences*, Vol. 12, Issue 23, 2022.
14) Zijian,Y., Ying, Y., Chengping, Z., Zhiming, Z., Wei, L., Xuejie, W., Lei, W. and Libin, W.: A digital twin approach for tunnel construction safety early warning and management, *Computers in Industry*, Vol. 144, 2023.
15) 中尾勇貴，若山真則：SLAM 技術を活用した 2 トン積トラックの自動運転実験，土木学会第 78 回年次学術講演会，VI-795, 2023. [Nakao, Y. and Wakayama, M.: Autonomous driving experiment of 2-ton truck using SLAM technology, *JSCE 78th Annual Conference*, VI-795, 2023.]
16) 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. [Ishida, H., Yabuki, N., Oomori, S., Moriya, Y. and Fujita, S.: Development of automated driving method for rock scaling in mountain tunnels in GNSS-denied environment, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series F3* (*Civil Engineering Informatics*), Vol. 79, No. 22, 2023.]
17) Yimin. Z, Zhixiong, Y. and Zhuang, M.: UAV based indoor localization and objection detection, *Front. Neurorobot*, Vol. 16, 2022.

(Received July 22, 2024)
(Accepted July 15, 2025)

土木学会論文集, Vol. 81, No. 9, 24-00199, 2025.

AN AUTOMATED CONSTRUCTION AND DIGITAL TWIN-BASED METHOD FOR INVERT EXCAVATION OF MOUNTAIN TUNNELS WITHOUT ACCESS TO GNSS

Hitoshi ISHIDA, Nobuyoshi YABUKI, Sadatoshi OHMORI, Yoichi MORIYA and Shinji FUJITA

In the ICT earthwork, the semi-automatic operation of the construction machine is possible by obtaining the position of the construction machine with high precision by GNSS (Global Navigation Satellite System). However, in underground spaces such as mountain tunnels, the GNSS cannot be used, and the high precision position estimation in the underground works is difficult. And, it is necessary to grasp the arrangement of construction machines, materials, and workers and carry out the detailed adjustment, because the construction proceeds while many kinds of construction work change in generally narrow spaces. In this study, as a position estimation method under a non-GNSS environment, a method to track a fixed point in real time using LiDAR was proposed, and rough excavation in invert excavation was automated by applying it to coordinate acquisition of backhoe in invert excavation. And, the management of the automatic construction from the safe remote place was verified by visualizing the process before and after the automatic construction, peripheral situation, and related work on the digital twin in a bird's-eye view.