

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

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@sec.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)

山岳トンネル工事において、発破直後の切羽は肌落ちによる死亡災害が発生することが多く、切羽の無人化の取り組みが急がれる状況である。建設現場には既に省人化や無人化を目的として、自動運転機械や遠隔操作機械が導入されつつあるが、肌落ち災害に直結するブレーカーによるコソク作業の省人化・無人化の事例は見られない。一方で、雲仙普賢岳の噴火による火砕流や土石流に対して1993年より始まった無人化施工は、現在では地元の建設会社が実施しているケースも見られ、今後普及が見込まれる状況だが、自動運転への対応はまだ難しい状況である。本研究では建設現場における自動運転の普及を目指し、既存の建設機械を自動化する手法を構築するとともに、SLAM (Simultaneous localization and mapping) を活用することで非GNSS環境である山岳トンネル内での走行やコソク作業に適用し、実用性を検証した。

Key Words : mountain tunnel, scaling, automatic construction, auto-driving, SLAM

1. はじめに

山岳トンネル工事において、発破直後の切羽は極めて不安定であり、肌落ちによる死亡災害が発生することが多く、切羽の無人化の取り組みが急がれる状況である。既に省人化や無人化を目的として、自動運転機械や遠隔操作機械が導入されつつあるが、肌落ち災害に直結するブレーカーによるコソク作業の省人化・無人化の事例は見られない。一方で、雲仙普賢岳の噴火による火砕流や土石流に対して1993年より始まった無人化施工は、様々な改良を加えながら、現在では地元の建設会社がレンタル機械を用いて実施することもあり、機材の供給を含め、実用性が向上している。

また、建設業は社会の少子高齢化が進む中で、深刻な労働者不足となっており、ICT を活用した効率化が進められている。その中で、建設機械の自動運転の事例も増えつつある状況である。但し、トンネル内では位置情報を取得する際に GNSS が利用できないこと、また、自動運転を実現するための機材の調達や、システムの構築は

建設機械の種類や車種ごとに緻密に設計する必要があり、普及させることが難しいという2つの課題が存在する。

そこで本研究では建設現場における自動運転の普及を目指し、既存の建設機械を改造し、走行や施工動作を自動化する手法を構築するとともに、非GNSS環境であり、かつ変化が多い施工中の山岳トンネル内で切羽のコソク作業に適用し、実用性を検証した。

2. 既往の研究

切羽の無人化を検討するにあたり、既に実用化されている無人化施工を適用することが考えられる。しかしながら、一般的な無人化施工は、通常の施工に比べ、施工効率が低下することが知られている。伊藤ら¹⁾は、その要因として、遠隔操作をする際にオペレータが建設機械や施工対象を見るためのカメラ映像の解像度の不足と、それらの映像を映すモニタに奥行き情報が存在しない点を指摘し、両眼立体3Dや4K解像度の映像をオペレータ

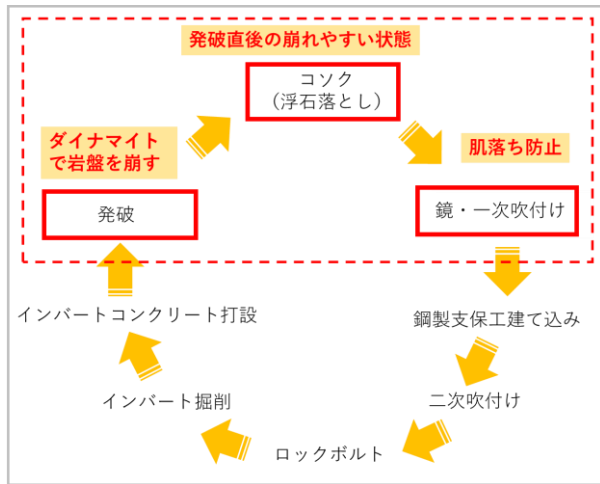


図-1 山岳トンネル工事(NATM・発破掘削)の流れ



写真-1 本研究で使用した無人化施工対応バックホウ

に提供することにより、施工効率を向上したと報告している。このように、遠隔操作をより搭乗操作の環境に近付けることによって、施工効率を向上する取り組みが進められてきた。

藤野ら²⁾は、オペレータ個人の素養による施工効率の差に着目し、オペレータの習熟度判定方法を提案しているが、その中で、車体を外から俯瞰して写している車外に設置したカメラの映像を理解できるか否かが重要であることを指摘している。藤野らの研究結果では、当時、遠隔操作を得意と位置付けたオペレータの割合は、20%であり、その場合においても、建設機械への搭乗操作と比較すると、サイクルタイムで1.5倍以上の時間がかかっている。他、最近では、ICT施工で用いられるマシンガイダンスシステムを併用することによって、掘削対象の土砂の3D形状（現況と仕上がり）を遠隔地のモニターで確認したり、マシンコントロールシステムを併用することによって、仕上げ時の操作を半自動化し、施工効率の向上を図っている事例がある。しかしながら、搭乗操作の施工効率には及ばない。

山岳トンネル工事（NATM・発破掘削）の流れを図-1に示す。本研究で扱う切羽のコソク作業は、発破直後の地山が不安定な状態で浮石を除去するものであり、安全上は無人化が望まれるものの、一般的な遠隔操縦で生じるような歩掛の低下は避けたい。

一方で、交通や工場のロボット分野で発展してきた自動運転技術が実用化されつつあるが、遠隔操作と異なり、一人で複数の建設機械を稼働させることもできるため、現場全体の省人化や、建設業全体の省人化にも期待が寄せられている³⁾。そして将来的には、単純な作業であれば人が操作するよりも速く効率的に進めることができると考えられている。しかしながら、自動運転を実現する

ためには、各々の建設機械の種別、機種の違いに対して、個々に設計・調整を行う必要があり、現場に普及させることはまだ難しい。

現在、山岳トンネル工事における切羽無人化の取組みについては、コンピュータジャンボを導入することにより、従来の作業人員を大幅に削減したり⁴⁾、吹き付け作業を自動化する⁵⁾など、各種の自動化に向けた取組みがなされている。このような中で、切羽の肌落ちに直結する浮石の除去（コソク）作業の自動化については、実現していない。現状、発破作業の切羽に人が近付かずに、コソク作業を自動で実施するには、バックホウが自己位置を把握し自走する必要があるが、トンネル内ではGNSSが使用できないことが課題である。

3. 提案する自動化手法

山岳トンネルの切羽コソク作業を自動化するためには、非 GNSS 環境で、障害物を回避しながら切羽まで走行し、かつ、切羽の性状を判断し、切羽に対してブレーカーを当てて作業を行う必要があると考えた。

本研究では、図-2 に示す構成で無人化施工対応バックホウ（写真-1）の自動化を実施、実際の山岳トンネル内でコソク作業の実証実験を行うものとした。この無人化施工対応バックホウは、標準アームであり、内空幅14m程度、路面からの高さ7.5m程度の山岳トンネル内で使用することを想定して構築したものである。これに対して、山岳トンネルでは一般的にショートアーム、ショートルーチと呼ばれるアームやブームが短いバックホウが用いられる。

図-2 において、赤の破線で囲っている無人化施工用

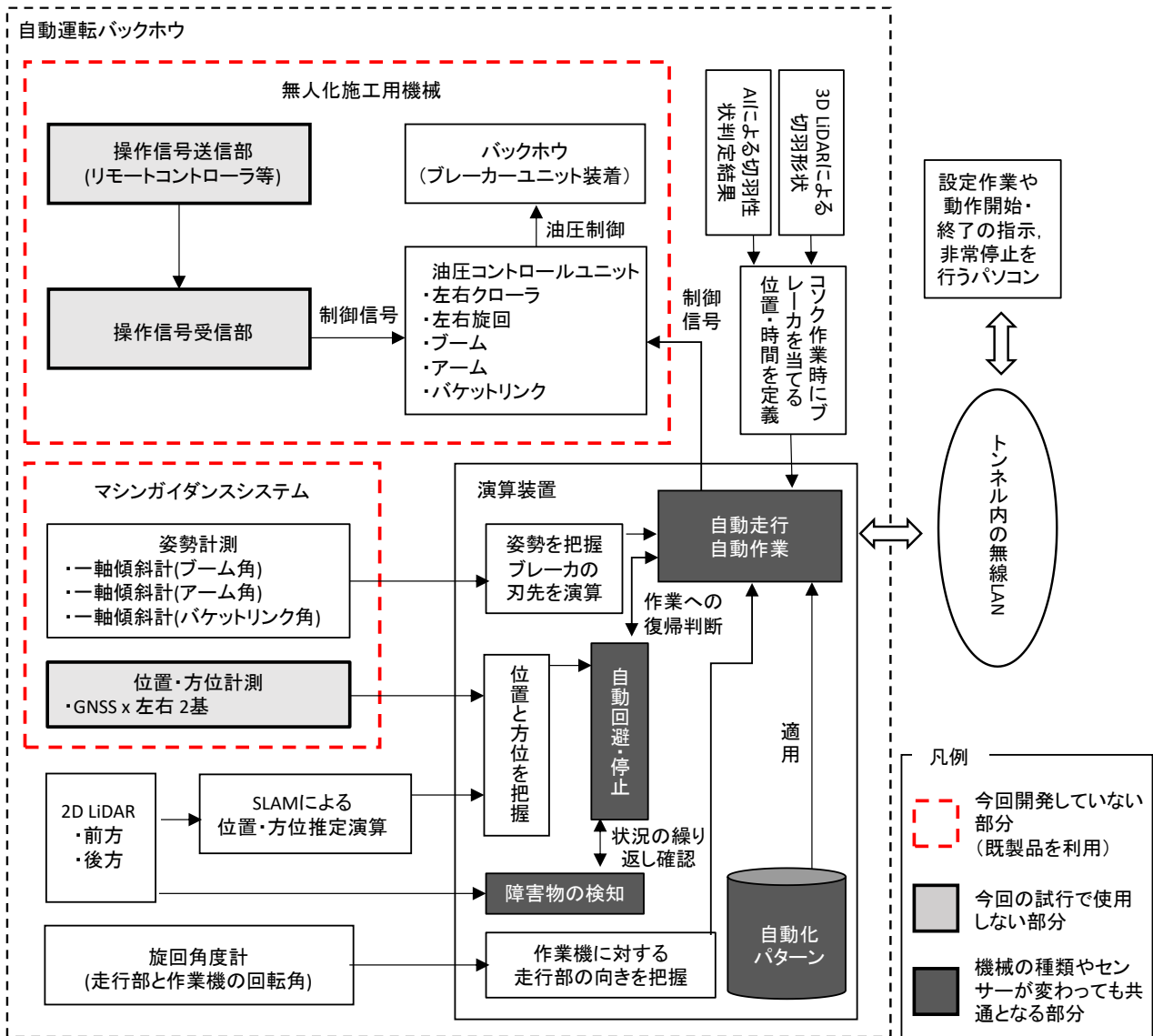


図-2 自動化手法の構成

機械ならびにマシンガイダンスシステムについては、開発効率と普及性を加味し、レンタルが可能な既製品を使用している。濃いグレーでハッチングした部分は、機械の種類やセンサーが変わっても共通と考えている。また、薄いグレーでハッチングしている部分のうち、無人化施工機械の枠内に示す、操作信号送信部（リモートコントローラ）と操作信号受信部は、オペレータが手動で操作する際に使用するものであり、本研究では、その代わりとして演算装置から自動運転の制御信号を送信するため、使用しない。また、マシンガイダンスシステムの枠内に示す、位置・方位計測（GNSS×左右2基）については、トンネル内ではGNSSが使用できないため、代わりとして、SLAMによる位置・方位推定演算を用いたため、使用しない。

通常の無人化施工では、無線式のリモートコントロー

ラで操作した内容が、操作信号受信部を経由して、油圧コントロールユニットに伝達され、遠隔でバックホウを動作させる。本試行では、バックホウに自動運転のための演算装置を搭載し、演算装置でリモートコントローラの操作信号を模擬した制御信号を自動的に生成する。演算装置はトンネル内の無線LANに接続され、設定作業や動作の開始・終了等の操作を無線LANを通じて遠隔から実施することができる。演算装置をバックホウに搭載し、自律動作可能としていることから、自動運転中は通信が途切れた場合にも、自動的に回避動作や停止動作を行う。なお、本試行中は、安全対策として通信が途切れた場合に自動運転を終了するよう設定した。切羽の自動ソック作業を実施するにあたり、この演算装置では、マシンガイダンスシステムからバックホウの車体の傾き、ブーム・アーム・バケットリンクの角度、それらによっ

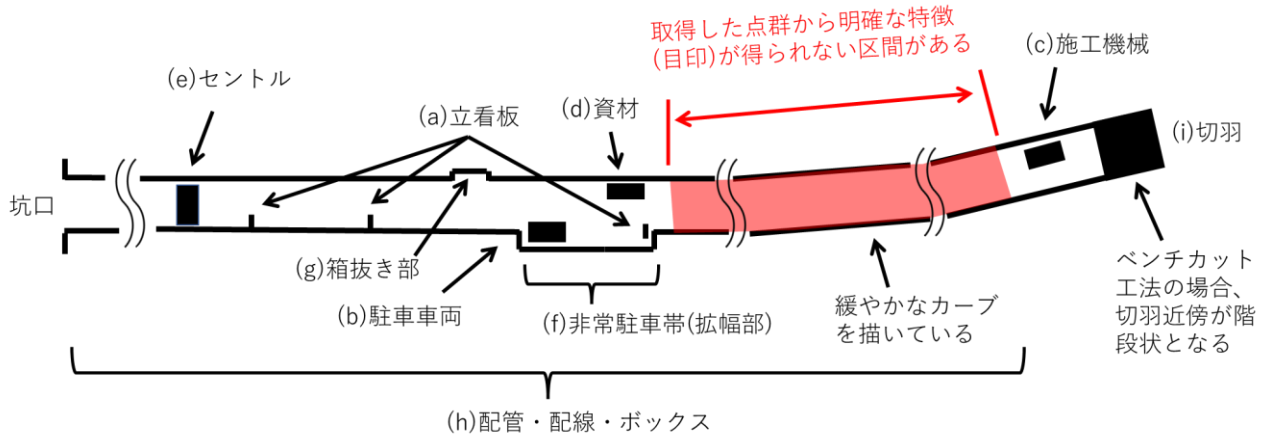


図-3 施工期間中の山岳トンネルのイメージ

て計算されたブレイカの刃先の位置を取得，ブレイカの刃先を所定の位置に誘導するための演算を行う．ブレイカの刃先を誘導する目標位置は，3D LiDAR によってバックホウと切羽の面的な距離と AI 判定結果のメッシュ図を重畳することで得られる．自動走行を実施するにあたり，SLAM によってバックホウの位置座標と方位を取得し，所定の経路に対する誤差を計算しながら走行，進路の自動修正を行うものとした．自動回避を実施するにあたり，周囲を監視する 2D LiDAR によってバックホウの進路上（監視角度・距離をあらかじめ設定）の障害物の相対座標を取得し，進路上に障害物を検出した場合に，障害物が進路に干渉しなくなるまで所定の角度ずつ旋回を繰り返すものとした．これらの自動コソク作業，自動走行，自動回避の自動化パターンは，リモートコントローラにより実際に遠隔操縦を行い，各操作に対応した制御信号を記録することで基本動作を作成した．SLAM の方式の選定について，トンネル内では可視光の光量が小さく，また，照明が均一ではなく光のムラが大きいことから，カメラを使用する Visual SLAM よりも，光（照明）の影響を受けにくい Laser SLAM が適していると判断した⁹⁾．一方，SLAM には，移動距離が大きくなるに従い，位置推定の誤差が蓄積し，推定位置が徐々にずれることが知られており（ドリフト），長距離走行中に十分な位置精度を確保するには，補正等の対策が必要である．トンネルでは，施工機械は長距離を移動するが，あらかじめトンネル内の設備や形状を把握し，それらを位置推定に用いることによって，例えドリフトにより自己位置に大きな誤差が生じて，回復させることが可能と考えた．また，施工中の現場では，物体の配置が変化することで，マッチングが困難となる場面も避けられず，自己位置を見失った場合でも，回復（自己位置を再取得するなど）が可能とすることが望ましい．

本研究で実証の対象とした施工中の山岳トンネルのイ

メージを図-3 に示す．また，施工期間中の山岳トンネル内の状況を写真-2 に示す．(a)立看板，(b)駐車車両，(c)施工機械，(d)資材，(e)セントル（移動型杵），(f)非常駐車帯(拡幅部)，(g)箱抜き部，(i)切羽等から得られるレーザー点群は，その形状が目印となり，自己位置推定を容易にすると考えられる．但し，駐車車両が移動した場合（図-4 参照），低く積まれた資材（図-5 参照）やベンチカット工法の場合の切羽付近で下半の点群を取得した場合，それが誤判定の要因となる可能性があるため注意が必要である．図-4 では，駐車車両が移動し，車体から遠ざかることによって，自分が後進しているように判定する．このため，基本的には，自己位置推定中に周囲の物体が動くことは好ましくない．図-5 は，車体が傾くことにより，2D LiDAR と高さの異なる物体からも点群を取得することを示している．山岳トンネルでは，位置推定時に目印となる物体は多くはなく，それらを常時捉えるには，少なくとも 20m 以上の範囲を対象として監視する必要があると考えている．ところが 20m 先では，車体が 1° 傾斜すると高さ方向に 30cm 以上のずれを生じる．これは少しの車体の揺れによっても，同じ物体が検出されたり，消えたりすることを示す．この現象は自己位置推定の誤差要因となる．また，写真-2(h) 配管・配線・ボックスの点群は，壁面の点群と混ざって計測され，誤差要因となると考えられる．本研究では位置推定手法として，低解像度と高解像度の地図を用いて，自己位置を効率的に絞り込む多重解像度法の計算量をさらに軽減し，簡易な CPU ボードでも稼働する車載向けの手法⁷⁾を選定するものとした．この手法では，近傍の物体が急に移動するなど，極端に大きな環境変化が生じた場合にも，その大きな変化に対して処理を間引くようになっており，トンネルのように狭い空間で車両や施工機械が動いている環境でも，自己位置をロストしにくいと考えた．トンネル内の設備や形状をあらかじめ地図として



写真-2 施工期間中の山岳トンネル内の状況

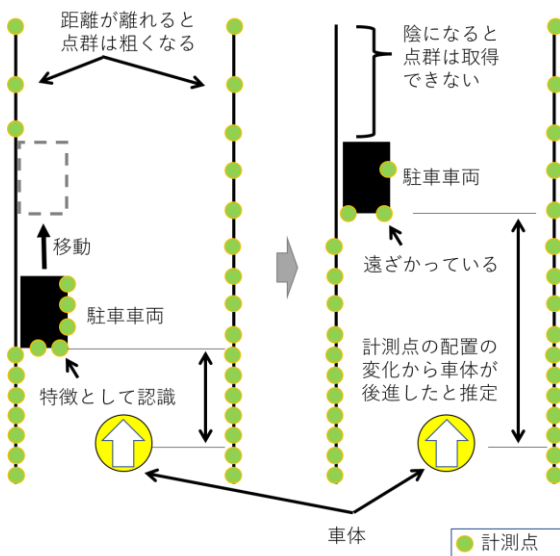


図-4 駐車車両等が移動した場合の誤判定例

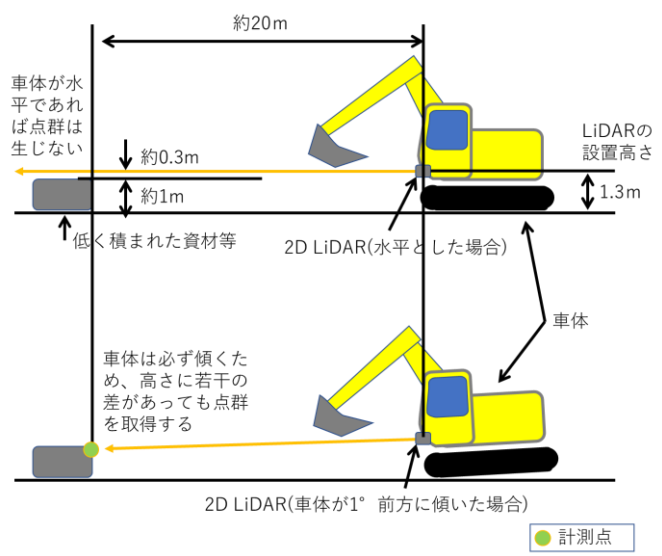


図-5 車体の傾きによる誤判定例

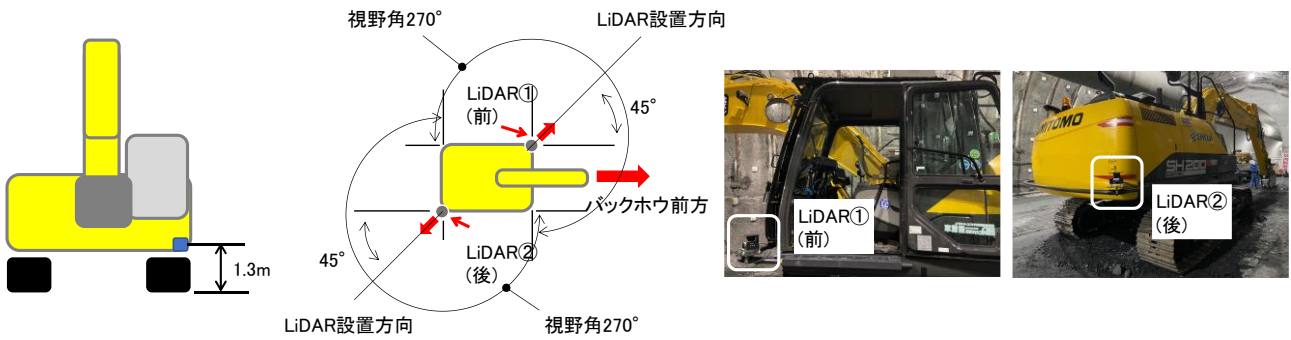


図-6 2D LiDARの設置位置

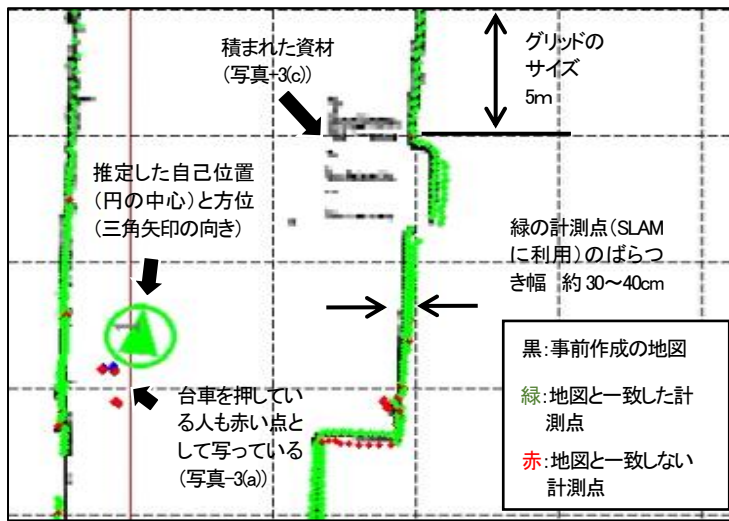


図-7 SLAM検証結果(非常駐車帯)

表-1 2D LiDARの仕様

メーカー	北陽電機株式会社
型番	URM-40LC-EW
検出距離	最大60m 反射率90% 白ケント紙 精度保証範囲
	0.1~40m 反射率10% 黒紙 精度保証範囲0.1~18m
検出角度範囲	270°
検出角度分解能	0.125° (高分解能モード)
距離平均精度	0.1~30m: ±20mm
	30~40m: ±30mm

記録することが可能であり、これらの任意の目印を活用して自己位置を推定することも可能と考えている。本手法は、工場や物流センターでAGV(Auto Guided Vehicle)に利用されているものである。本来、車体の揺れが少ない平坦なフロアでの運用を想定しているもので、位置推定の精度は、植ら⁹⁾の実験結果から概ね20mm以内と考えられる。

あらかじめ収集した点群データから、地図作成を行い、その地図と、リアルタイムで取得している点群データとのマッチングを行うことで、自己位置を推定することが可能である。この機能を用いて、トンネル形状や移動しない設備を地図に反映した。2D LiDARには、北陽電機製のURM-40LC-EW(表-1参照)を図-6のように2基設置した。設置高さは、設置されている物や車両などを含め、周辺の特徴を多く取得する必要があることから、可能な限り低い位置とした。使用にあたっては、あらかじめトンネル坑内で実験を行った。

事前作成の地図(黒)と自己位置推定時のリアルタイムのレーザー一点群の計測値(緑)との差分から自己位置推定を行っている状況を図-7に示す。計測値(赤)は、

事前作成の地図(黒)と座標の差が大きいため、除外したものである。トンネルの壁面は、写真-3(a)に示すように曲面となっている他、写真-3(b)に示すように凹凸や、配管・配線・ボックスなどが存在している。

路面が平坦ではないことから、レーザーの傾きを生じる。計測する点が変わることから計測距離も数10cmの範囲で大きく変化している。写真-3(c)の資材は図-7中に示す事前作成の地図(黒)に壁(線)としてではなく平面的に広く表示されているが、レーザーの傾きにより斜め上から写ったためである。このように、低く積まれた資材等が事前作成地図に反映される際のイメージを図-8に示す。

本検証結果より、トンネル壁面に対してレーザーの計測距離のばらつき幅は、約30~40cm(無作為に10箇所計測)であった。これには、1) LiDARの測距誤差(30m以内: ±20mm)、2) トンネルの壁が曲面であることから車体の揺れによって壁に対する計測距離が変動すること、3) 壁に設置された配管・配線・ボックスにレーザーが当たり壁面を捉えていないこと、という3つの要因が複合的に影響していると考えられ、自己位置推定



(a) 台車によるSLAM実験



(b) 坑内の壁面



(c) 坑内に積まれた資材

写真-3 事前のSLAM実験状況

低く積まれた資材等には上から斜めにレーザーが当たり、点群が面的に散らばる

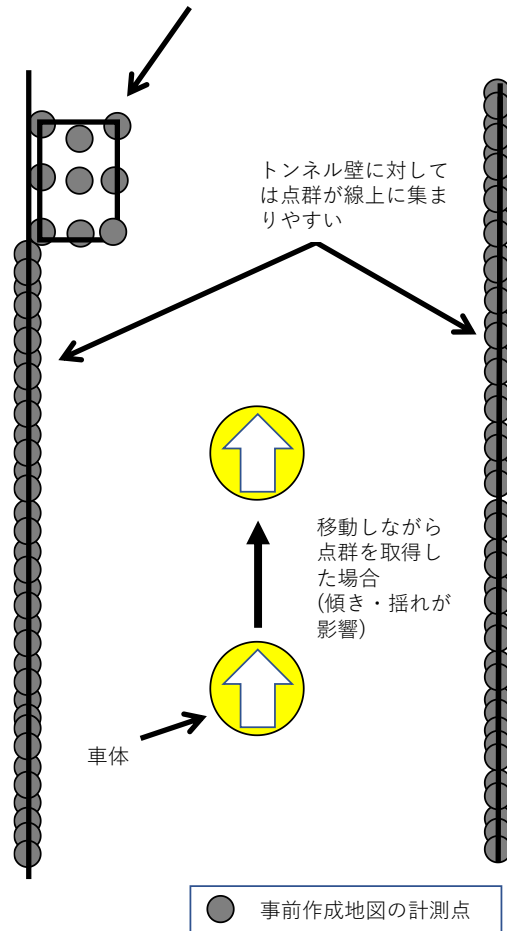


図-8 低く積まれた資材等が事前作成地図に反映される際の様子

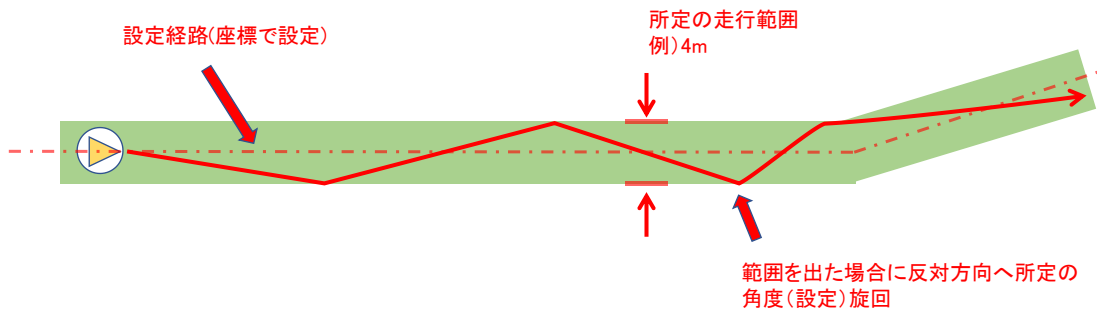


図-9 SLAMを利用した座標指定の自動走行

の誤差となっていると考えられる。本研究では、自己位置の推定結果に、この約 30~40cm の誤差を許容して運用する。

SLAMが利用できる区間では、図-9のように座標によって走行経路を指定することが可能である。この手法では許容範囲(図では4m)を超えた場合に、許容範囲に戻るよう旋回する。なお、図-3に示す角等の目印がない区間(赤で図示)については、SLAMが使用できな

い可能性が高い。このため、座標を用いない別の方法で安全な自動走行を行う必要がある。

本研究で使用した2DLiDARは、270°の視野角があり、バックホウの左前方と右後方に設置することによって、全周囲を監視することが可能である(図-6参照)。これを用い、SLAMだけでなく、回避に利用することを考え、周囲の障害物の検知に使用するものとした(図-1, 図-10参照)。また、この障害物検知による回避の機能

監視範囲内に物体を検知するとそれを避けるように進路を変える

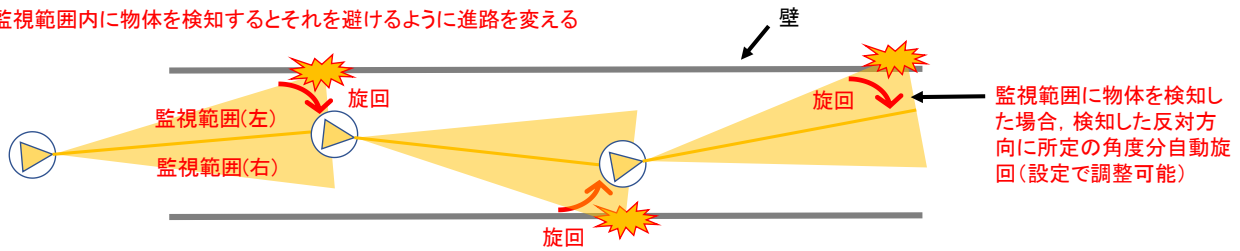


図-10 自動回避を連続で実施することによるトンネル内の自動走行

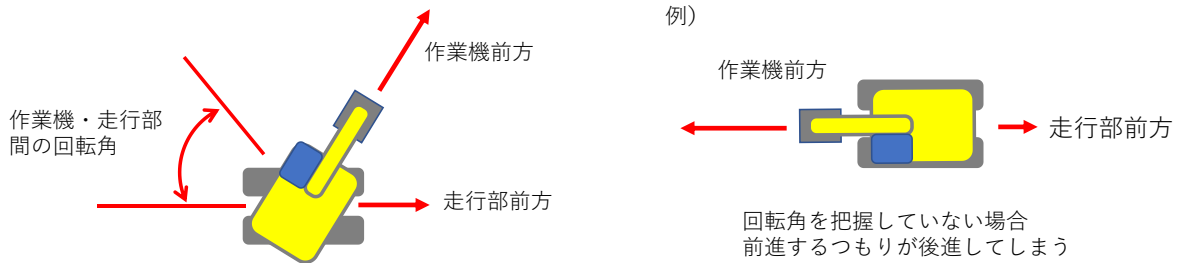


図-11 作業機と走行部の回転角の把握

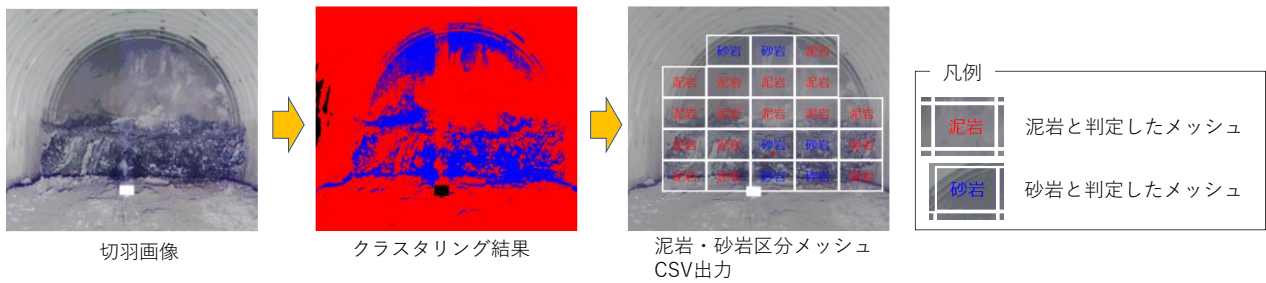


図-12 切羽岩種判定AIの結果



図-13 3D LiDAR設置状況(アームの付根に設置)

を用いて、SLAMが利用できない区間の自動走行を実施するものとした。

旋回角度計(図-11 参照)は、バックホウの走行部(下側)と作業機(上側)の回転角を把握するもので、遠隔操作の場合は、オペレータが車外モニターで回転角を把握するため必要ないが、自動運転では、走行開始時にどちらの向きに走り出すかを判別できないことが想定されるため、必要であると考えた。なお、広く障害物のない場所であれば、走り出してから移動方向を検出して判断することは可能である。コソク作業に必要な切羽の性状については、日々撮影している切羽のスペクトル画像

から AI 判定¹⁰⁾によって得られた岩種(砂岩=硬い・泥岩=脆い)の分布を用いた(図-12 参照)。浮石の判定については、本研究では対応しなかったが、判定結果をCSV等で受け取ることができれば、同様の処理でコソク作業に反映することは容易である。ブレーカーの刃先を切羽表面に誘導するために必要な切羽形状については、バックホウのアームの付け根に3D LiDARを設置しコソク作業の前に計測するものとした(図-13 および表-2 参照)。

以上の構成で、切羽のコソク作業の自動運転を実証した。

表-2 3D 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 $-45^\circ < \theta < 45^\circ$ 0.3-35m (白紙) 0.3-11m (黒紙 反射率10%) $-75^\circ < \theta \leq -45^\circ, 45^\circ \leq \theta < 75^\circ$ 0.3-20m (白紙) 0.3-6m (黒紙 反射率10%) $\theta \leq -75^\circ, 75^\circ \leq \theta$ 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°C時)	白紙15m以下: ±50mm 白紙15m~ : ±100mm

表-3 実証現場の工事概要

工 事 名	平成29-32年度 見の越トンネル工事
工 事 場 所	愛媛県大洲市肱川町見の越地先
発 注 者	国土交通省四国地方整備局山鳥坂ダム工事事務所
工 事 概 要	完成延長2,128m 内空幅約8.8m(一般部) NATM(発破工法)/覆工コンクリート工/インバート工/残土運搬工126,300m ³

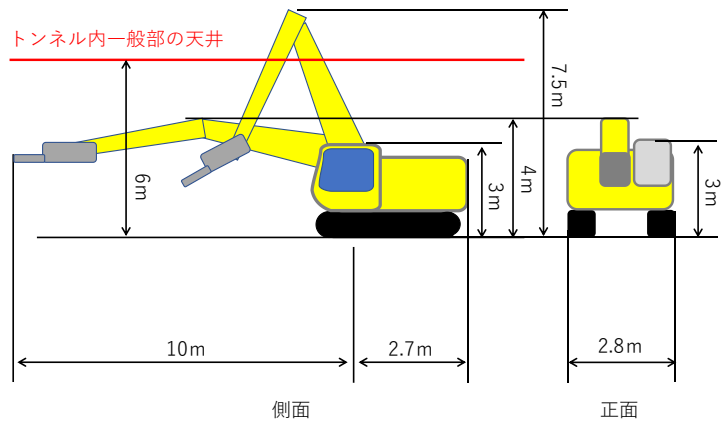


図-14 使用したバックホウの寸法

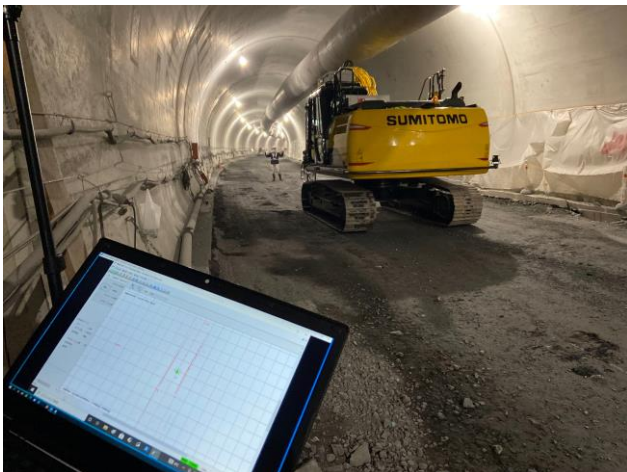


写真-4 SLAMを用いた自動走行(通路幅約8.8m)



写真-5 狭所の走行試験(通路幅約4.0m)

4. 適用結果

本研究で実証の対象とした工事は、「平成 29-32 年度 見の越トンネル工事」である。本工事の概要を表-3 に示す。内空幅が8.8mと小さく、路面からの高さも6m弱程度と低かった。このため、本研究で使用している標準

アームの0.8m³バックホウ(図-14参照)は、トンネル内壁や設備に接触しないよう、取れる姿勢が限られた。バックホウと天井との接触を避けるため、ブームを起すことはできず、ブームを前に倒して実証を行った。

実証は、SLAMを用いた自動走行(内空幅約8.8mに加え、幅約4m程度の狭所を含む)(写真-4, 5)、自動



図-15 自動回避検証状況

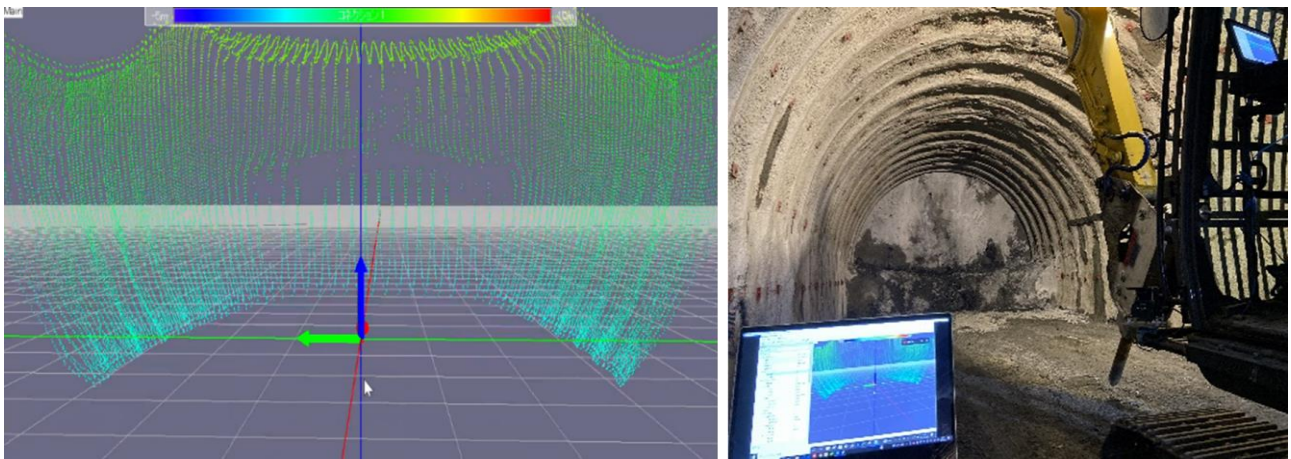


図-16 3D LiDARによる切羽形状取得

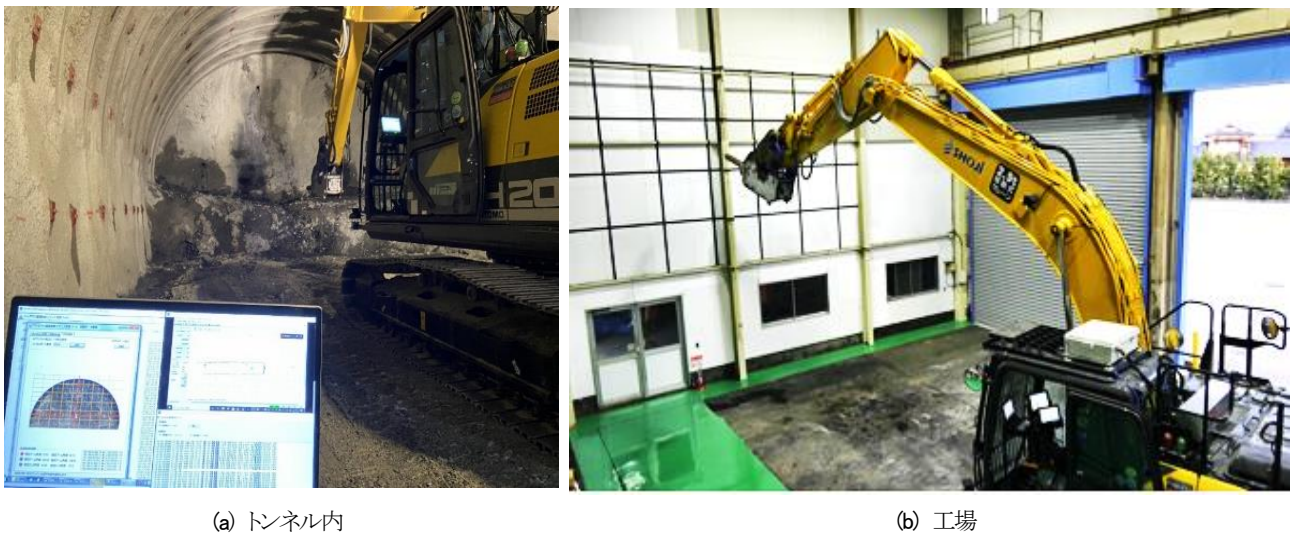


写真-6 AI判定結果に基づく切羽自動コソク作業

停止・自動回避（旋回角度を制限）（図-15），切羽に到達後切羽形状取得（図-16），AIによる岩種判定結果に基づく切羽の自動コソク（写真-6）の通り実施した。また，一般部では旋回ができないため実証後はバックで400m先の非常駐車帯まで移動する必要が生じ，走行ボタンと旋回ボタンを用いた半自動操作での移動を試みた。実験中，目視できる近傍に監視者を付け，常に手

動の非常停止の用意をした。

SLAMにより自己位置を把握して走行する場合，座標に30～40cmの誤差が生じていることから，座標を指定（図-9参照）して狭所（通路幅約4.0m，車体幅2.8m）を通り抜けることはできなかった。現状のSLAMでは，山岳トンネル内のセントル（移動型枠）等の狭所をくぐることは難しい。次に，図-10に示した自動回避を用い

て走行を行ったが、両側のカラーコーンやポール（写真-5）を障害物として検知し、前進させることができなかった。このため狭所の走行については、外側から離隔を目視しながら、半自動操作（走行ボタン、旋回ボタン）を行い、通行した。通路幅 4.0m に対して車両の幅が 2.8m、左右計 1.2m の余裕があるが、わずかな旋回動作によってポール際ぎりぎりまで車体の角が寄ることが多く、狭所通行の自動化にあたっては、より細かい制御を行う必要があることがわかった。また、路面とクローラの間で滑りが生じた場合、車体がわずかに回転するが、5° 程度の回転でも、走行進路に大きく影響するため、路面の変化については計画時に留意したほうが良い。写真-5 の路面は急な登り勾配から、下りに移る箇所であり、クローラが滑りやすく注意を要した。同じ写真-5 の上部に風管が見えるが、このような勾配や揺れの影響で走行時に離隔が小さくなる瞬間もある。キャビンからは見えにくい部分であるが、ベテランオペレータが操作する場合は、窓から顔を出したり、降車して周囲を確認するなど、随時離隔を確認しながら通過している。

トンネル内の自動走行中、人を障害物に見立て、進路上に入ってもらい、自動停止や自動回避が機能することを確認した（図-15(a)参照）。図-15(b)に、工場で連続的に自動回避を行っている様子を示す。複数の障害物を検知すると、近い障害物を優先して回避するように設定してカラーコーンの間を通り抜けている。通路は 6m の幅を取っているが、旋回時にバックホウの後上部やクローラがカラーコーンに接触することがある。周囲 360° の障害物を 2D LiDAR で監視しているが、現状は回避動作を進路方向だけで判断しているため、回避によって車体が周囲にどう干渉するかを加味する必要がある。

3DLiDAR による切羽形状の計測状況を図-16 に示す。切羽の形状はリアルタイムに鮮明に取得できており、凹凸の変化を見ながらコソク作業を行うことも将来的に可能と考える。自己位置推定の誤差が大きくとも、切羽に到達した時点で、切羽形状を取得し、位置合わせを行うことも可能と考えている。

AI 判定結果に基づく自動コソク作業状況を写真-6 に示す。自動コソク作業については、アームの付け根がトンネルの天井に接触することが危惧されたため、ブームを起こさず、下半のみを対象としたが、その範囲ではコソク作業を実施することができた。なお、工場実験では上半を含む全体を対象にコソク作業の動作を確認した（写真-6）。現状は、ブレーカ先端を所定の座標に自動誘導し、叩く動作を繰り返すようにしているが、実際の運用にあたっては、それ以外の動作を加味する必要がある。例えば、自動コソクの実証中、ブレーカが岩盤に深

く刺さり、抜けなくなるケースもあったため、このようなトラブルからの復旧手順を自動化するなど、対策を検討したい。本試行では、浮石の検出ができていないため、AI 判定によって岩種区分のメッシュ図を作成し、脆いと考えられる泥岩部分のコソク作業時間を長くするように設定した。将来的には、浮石を判定し、必要な部分だけにブレーカを当てることを可能とすることで、コソク作業時間を短縮することが可能と考えられる。

なお、本研究の自動運転では、操作者が目視できる範囲で実施し、自動運転の内容切替えや非常停止等を行った。車外で視点を自由に変えることができ、周囲の状況（障害物との離隔等）が把握しやすく、従来の搭乗操作と比べても、操作は容易であった。実証項目と現場へのヒアリング結果を表-4 に示す。

5. 結論

本研究では、普及を前提とした自動運転の仕組みを構築する目的で、既存の無人化施工機械を改造し、山岳トンネルのコソク作業を自動化した。非 GNSS 環境下の自動走行を含め、種々の課題を得ることができた。あらかじめプログラミングした前進、後進や旋回など、ボタン押下による半自動操作に関して、通常の人化施工で行われるリモコンによる遠隔操作や、搭乗操作と比べ、周囲の離隔を把握しやすく運転がしやすい面が多いことがわかり、オペレータ確保などの運用面においても普及のしやすさを期待できる結果となった。

走行に関して、狭所を通行する場合に路面の状況などに配慮が必要であることが分かったが、対策の方向性としては、離隔が小さくなってから回避制御をするだけでは不十分で、離隔が小さくならないように進路を取るような考え方を導入する必要がある。また、自動走行がしやすい走路整備、マーカーの設置などを検討することも考えられる。

コソク作業は、発破直後の地山が不安定な状況で実施するため、迅速に行う必要があり、無人としながらも、施工効率を確保する必要がある。自動コソク作業については、搭乗操作以上の施工効率が要求されると考え、実用に向け改良を行う。

バックホウは汎用性が高く、自動運転の動作パターンを増やすことで、多くの工種に対応することが可能である。動作パターンの拡充に取り組むとともに、建設現場全体の自動化に向け、オペレータが複数の建設機械を操作する手法や、複数の建設機械の協調作業、安全性を確保した上での作業員との協調作業についても、研究を進

表-4 実証項目と現場ヒアリング回答

実施項目	結果	現場の評価
非GNSS環境での自己位置推定と自動走行	問題なく実施。 風管との離隔が小さい箇所は、ブーム、アームの角度を調整し、前後進ボタンと旋回ボタンを使用した半自動走行により通過。搭乗操作よりも離隔の確認が容易で操縦が容易であった。 一般部であれば、自己位置推定の誤差が30~40cmほどあっても問題はない。	良い。 半自動であっても、搭乗操作よりも容易と思う。
狭所の自動走行	左右の壁やカラーコーン、ポールを障害物として検知するため、自動運転は自動停止機能がはたらき、通り抜けられなかった。前後進ボタンと旋回ボタンを使用した半自動走行により通過。 搭乗操作よりも離隔の確認がしやすく、操縦は容易であった。 リモコンによる遠隔操縦と比較しても操縦が容易。	自動で止まるので問題はない。セントルやその他、狭所を通す場合は、トンネルの付属物や自動運転機のホースなども含めて注意を払う必要がある。現状では半自動走行が望ましい。 半自動であっても、搭乗操作よりも容易。
自動停止	問題なく実施。	良い。 全周囲を監視していることもあり、安全対策として有効。
自動回避	バックホウの大きさに対し、内空幅が非常に小さいため、トンネルの壁面との接触の恐れがあり、坑内では回避角度を小さく、5°程度に調整。その上では問題なく実施。 工場では、回避角度の制限なく、問題なく実施。	良い。 全周囲を監視していることもあり、安全対策としても有効。
切羽形状把握	アーム付根に取り付けた3D LiDARにより、問題なく実施。 LiDARの機種について、今後、内空が大きいトンネルに対応する場合には、垂直走査角度が40°では足りない可能性がある。	岩種や形状だけでなく、浮石を検出する方法があればより良い。
AI岩判定結果に基づく自動コンク作業	坑内では、ブームと天井の接触のおそれがあったため、下半のみを対象として実施。 工場で上半を含む全体の動作を実施。 作業機の旋回動作が速く、指定の角度を通り過ぎることがあり、ブレイカーの方向を合わせるのに時間がかかる場合がある。 ブレイカーが岩盤に深く刺さる場合があり、ブレイカの破損の恐れがあったため自動運転を止めてベテランオペレータの搭乗運転で回復した。現状は補助役のオペレータが近くにいた方が良い。	近傍で別の作業をしているオペレータが必要時に補助をするのは十分実用的と考える。しかしながら、ベテランオペレータが高齢となっていること、また、切羽は危険であることから、将来的には人が不要となるのが理想。 コンクの動作のパターンを増やすなど、工夫することで、オペレータの補助を減らすことができると考える。
半自動走行（後進）	旋回ができないため、非常駐車帯まで約400mをバックで移動。一般部については問題なく実施。	バックでの長距離走行は搭乗操作では大変なので、誰でも簡単にできるという点が良い。

めていくことで、建設業界全体の生産性向上と安全性向上に努めたい。

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、四国地方整備局技術管理課・山鳥坂ダム工事事務所をはじめ、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) 伊藤 禎宣, 坂野 雄一, 藤野 健一, 安藤 広志: 無人化施工において遠隔操作の映像環境が作業効率へ与える影響について, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.1, pp.15-24, 2017. [Ito, S., Sakano, Y., Fujino, K. and Ando, H.: Remote controlled construction equipment by using highresolution stereoscopic 3D images, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series F3 (Civil Engineering Informatics)*, vol. 73, No.1, pp.15-24, 2017.]
- 2) 藤野 健一, 橋本 毅, 油田 信一, 建山 和由: 無人化施工に最適なオペレータの選抜方法に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.1, pp.11-17, 2018. [Fujino, K., Hashimoto, T., Yuta, S. and Tateyama, K.: Study on effective method to select a suitable operator for unmanned construction system, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series F3 (Civil Engineering Informatics)*, vol. 74, No.1, pp.11-17, 2018.]
- 3) 建山 和由, 横山 隆明: ICT を利用した建設施工の高度化と将来展望, 計測と制御, 第 55 巻, 6 月号, 2016. [Tateyama, K. and Yokoyama, T.: Advancement of Construction Work Using ICT and Future Prospects, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.55, June, 2016.]
- 4) 松田 一輝, 文村 賢一, 浅井 伸弘, 宮本 真吾, 渡邊 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 by ICT-equipped Drill Jumbo in Mountain Tunnels and Its Effectiveness, *JSCCE 76th Annual Conference*, 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. [Sakanishi, T., Miyagawa, K. and Teduka, H.: Development of automatic spraying machine for small section tunnels, *JSCCE 76th Annual Conference*, VI-677, 2021.]
- 6) 藤田 真司, 石田 仁, 前田 智之, 森屋 陽一: 覆工コンクリート初期ひび割れ点検への自律飛行ドローンの適用, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol.44, pp.153-156, 2019. [Fujita, S., Ishida, H., Maeda, T. and Moriya, Y.: Application of Autonomous Flying Drone for Inspection of Initial Cracks in Lining Concrete, *Proceedings of the symposium on civil engineering informatics*, Vol.44, pp.153-156, 2019.]
- 7) 槇 修一, 白根 一登, 正木 良三: 物流支援ロボットの地図とその応用, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.10, pp.732-737, 2015. [Maki, S., Shirane, K. and Masaki, R.: A Map for Logistics Support Mobile Robot and Its Application, *journal of the robotics society of Japan*, Vol.33, No.10, pp.732-737, 2015.]
- 8) S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox: Probabilistic Robotics, MIT Press, 2005.
- 9) 槇 修一, 松本 高斉, 正木 良三: 位置同定コンポーネントの開発と精度評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2013 巻, 1P1-104, 2013. [Maki, S., Matsumoto, K. and Masaki, R.: Development of Position Estimation Component and its Accuracy Evaluation, *Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1P1-104, 2013.]
- 10) 翟 思敏, 大森 禎敏, 石田 仁, 野村 貴律: 複数の分析技術を組合せた切羽評価システムの開発について, トンネル工学報告集, 第 30 巻, I-17, pp.20-1-20-8, 2020. [ZHAI, S., Ohmori, S., Ishida, H. and Nomura, T.: Development of rock mass classification system at tunnel face combining multiple analytical techniques, *Journal of Tunnel Engineering, JSCE*, No.30, I-17, 2020.]

(Received October 27, 2022)

(Accepted February 2, 2023)

DEVELOPMENT OF AUTOMATED DRIVING METHOD FOR ROCK SCALING IN MOUNTAIN TUNNELS IN GNSS-DENIED ENVIRONMENT

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

In mountain tunneling, many fatalities occur in the tunnel face after blasting due to falling rocks, and the face should be unmanned as soon as possible. Automated machines and remote-controlled machines have already been introduced to construction sites to reduce manpower and improve safety, but there are no examples of unmanned or automated face scaling. On the other hand, unmanned construction, which began in 1993 in response to pyroclastic flows and mudslides caused by the eruption of Mount Unzen-Fugen, is now being implemented by local construction companies in some cases, and is expected to become widespread. However, automated operation is still difficult. In this study, aiming at the spread of automatic operation in construction sites, we developed a method to automate existing construction machinery and applied it to automatic driving and automatic scaling in mountain tunnels, which are GNSS-Denied environments, by utilizing SLAM (Simultaneous localization and mapping). We also verified its practicality.