

(75) 山岳トンネル工事の切羽コソク作業 を対象とした自動運転手法の検討

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)

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。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縦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・無人化の事例はあまり見られない。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、現在では地元の業者がレンタル機械を用いて実施しているケースも見られ、普及しつつある。本研究では建設現場における自動運転の普及を目指し、レンタルの無人化施工機械を自動化するとともに、SLAM(Simultaneous localization and mapping)を用いることにより非GNSS環境に対応し、山岳トンネルのコソク作業に適用できることを実証した。

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

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縦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・無人化の事例はあまり見られない。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、現在では地元の業者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、建設機械の自己位置をGNSSを用いて取得することができないトンネル内では利用できない。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るため、普及させることが難しい。

そこで本研究では、普及を目指した自動運転の仕組みを構築するため、既に普及が進むレンタルの無人化施工機械を改造、自動運転機能を構築するとともに、山岳トンネル内で使用するために非GNSS環境に対応し、切羽のコソク作業に適用した。

2. 既往の研究

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に提供することにより、施工効率を向上している。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

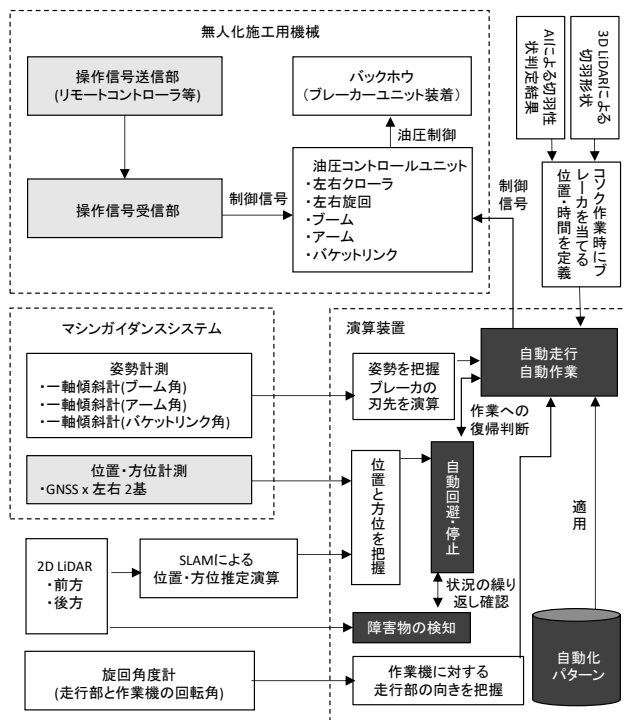


図-1 自動化手法の構成



写真-1 改造対象の無人化施工対応バックホウ

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、あまり検討されていない。

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-1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。破線で囲っている無人化施工用機械、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は、今回の自動運転では使用しない。

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操縦する。本試行では、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ものとしている。また、今回の実証現場は非GNSS環境であるため、SLAMによって推定した座標と方位を使用した。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、Visual SLAMよりも、可視光(照明)のぼらつきの影響を受けないLaser SLAMが適していると判断した⁹⁾。Laser SLAMの演算装置は、日立産機株式会社製のSLAM演算装置¹⁰⁾を使用した。市販の製品であり、容易に入手可能

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。

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、遠隔操縦と異なり、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⁾。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。

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



写真-2 事前のSLAM実験状況



写真-3 坑内の壁面



写真-4 坑内に積まれた資材

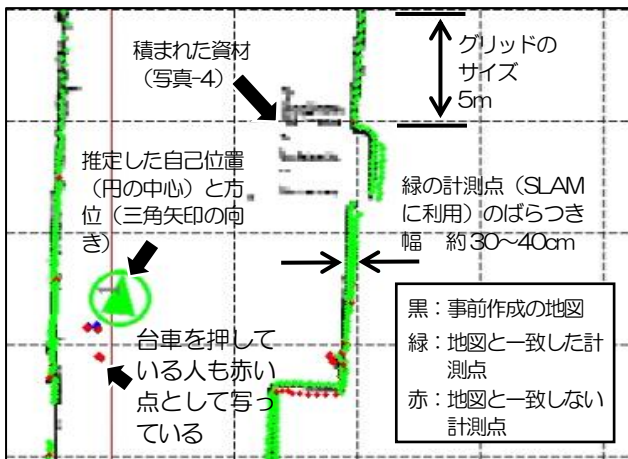


図-2 事前のSLAM検証結果(トンネル坑内)

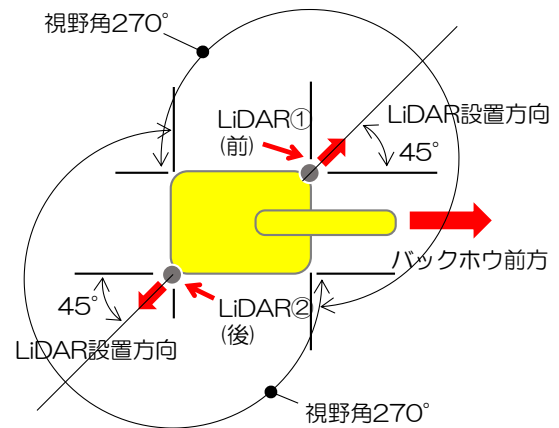


図-3 2D LiDARの配置

である。使用にあたっては、事前に坑内で実験を行った。使用したSLAM演算装置では、図-2に示すように事前作成の地図（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。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-2に示すように曲面となっている他、写真-3に示すように壁面の凹凸や、配管・配線などが存在している。また、路面が平坦ではないことから、レーザーの傾きも生じる。計測する点が変わることから計測距離も大きく変化している。写真-4の資材は図-2の事前作成の地図（黒）に壁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点群である。図-2の検証結果より、レーザーの計測距離のばらつきは約30～40cmであり、自己位置推定の誤差に反映されている。なお、今回使用した2D LiDAR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-3参照）。これを用い、SLAMだけではなく、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-1参照）。旋回角度計は、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、遠隔操縦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、今回は日々撮影している切羽写真からAI判定¹⁰⁾によって得られた岩種（硬い・脆いの区別）分布を用いた。浮石の判別については、今回対応していない。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部に3D LiDARを設置しコソク作業の前に計測するものとした。

以上の構成で、切羽のコソク作業の自動運転を実証するものとした。

4. 適用結果

今回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-1に示す。切羽の20m手前から自動走行、切羽に到達後、自動コソク作業を実施した。AI判定結果に基づく自動コソク作業状況を写真-5に示す。自動走行にあたっては、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-4参照）。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

表-1 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 NATM(発破工法)/覆工コンクリート工 /インパート工/残土運搬工126,300m ³



写真-5 自動コソク作業状況(左:坑内 右:工場)



図-4 自動回避状況

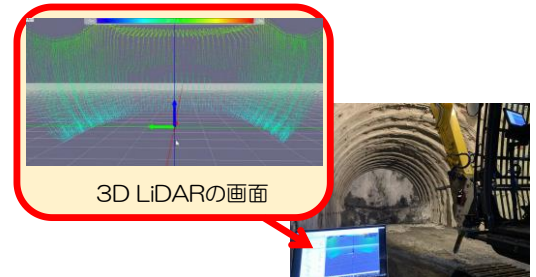


写真-6 3D LiDARによる切羽形状計測

側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、工場実験では全体を対象にコソク作業の動作を確認できた。3D LiDARによる切羽形状計測状況を写真-6に示す。

なお、今回の自動運転では、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、従来の搭乗操縦と比べても、容易に操作が可能であった。

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、レンタル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環境下の自動走行も行うことができた。操作に関しても、遠隔操縦はもちろん、搭乗操縦と比べた場合にも、容易となる面があり、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。

バックホウは汎用性が高く、多様な作業に対応できるため、自動化パターンの拡充に取り組むとともに、さらなる生産性の向上のため、操作者が一人で複数の建設機械を動作させる手法や、複数の建設機械や、作業員との協調作業についても、研究を進めていきたい。

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。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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.
- 4) 松田 一樹, 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.
- 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) 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.
- 7) 慎 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.
- 8) 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.