

山岳トンネル工事における計測作業の遠隔化技術の開発 切羽の無人化に向けた取り組み

瀬 瀬 善 孝・塚 田 純 一・松 本 慶 太

筆者らは山岳トンネル工事における切羽の無人化を実現するために機械の遠隔化や自動化に関する技術開発を進めており、本稿ではその一環として観察・計測作業の無人化を目的に開発したシステムについて述べる。本システムは計測台車と遠隔操作装置によって構成されており、任意の計測機器を搭載した計測台車を遠隔操作装置で制御することによって、観察・計測作業のための切羽近傍への人の立ち入りを不要とするものである。本システムを用いて自動走行技術の開発にも取り組んでおり、今後は各種重機の自動化も進めていく。

キーワード：山岳トンネル，観察・計測工，無人化，遠隔操作，自動化

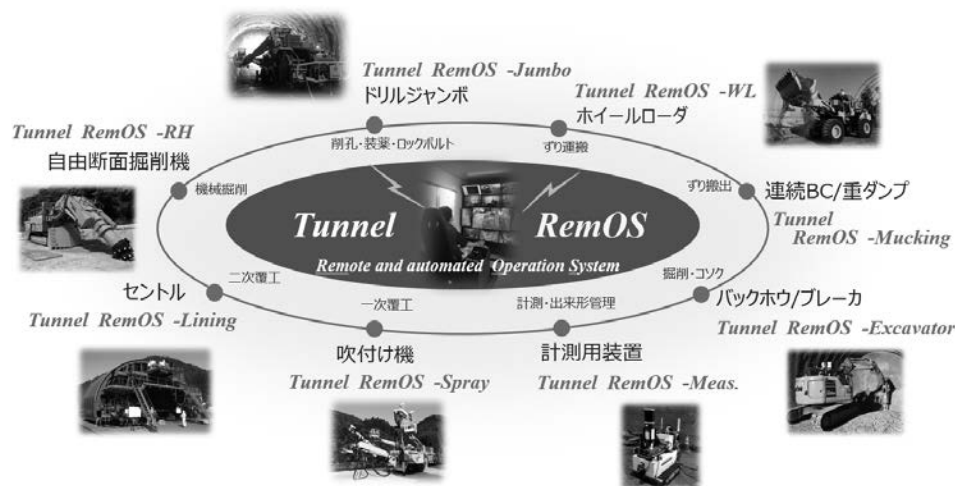
1. はじめに

国内における建設業の就業者数は1997年頃をピークに減少傾向を示すとともに、そのうち55歳以上が占める割合が増加する一方で29歳以下の割合は減少しており、高齢化が進行している。特に山岳トンネル工事においては狭隘な坑内で複数種類の特殊機械を使用する複雑な作業が必要とされているため属人化が進みやすく、将来的にベテラン作業員の引退や若手入職者の減少による労働力の不足や、技術継承ができないことによる施工品質の低下が懸念されている。また、切羽でたびたび発生している肌落ち災害においては、被災者のうち6%が死亡、42%が1か月以上の休業となっており、発生した場合の重篤度が高いことから、

作業員が切羽に近づく機会の削減（切羽の無人化）が求められている。

これらの問題を解決するために、切羽から離れた位置から機械を操作する“遠隔化”や、AIやSLAM等の制御により自動で機械を稼働させる“自動化”に関する技術開発が進められてきている。油圧ショベルやエレクトー一体型吹付け機等の重機による切羽作業が主な開発対象とされているが^{1), 2)}、山岳トンネルの施工管理の一環として日常的に行われている観察・計測作業の際にも切羽に近づく機会があることから、遠隔化や自動化が必要であると考えられる。

本稿では、上記の背景から山岳トンネル工事の観察・計測作業を遠隔で実施するために開発した無人計測台車『Tunnel RemOS-Meas. (トンネルリモスメジャー)』



図ー1 山岳トンネル工事の各種建設機械の遠隔化・自動化

について述べる。本システムは、山岳トンネル工事の各種建設機械の遠隔化・自動化のために筆者らが構築を進めている『Tunnel RemOS (トンネルリモス)』(図—1)の構成技術のひとつである。

2. システムの概要

本システムは、計測機器を搭載する計測台車と、計測台車を制御する遠隔操作装置によって構成されており、各種計測作業の遠隔化を目的としている(図—2)。

(1) 計測台車

計測台車は、任意の計測機器を搭載することが可能な台車である。特長を以下に述べる。

- (a) 幅、長さ、高さが各々1 m程度と比較的小型であるため、重機との離合や狭隘な場所での計測が容易である。
- (b) 移動手段はクローラであり、左右のクローラを独立的に操作することで、前進、後進、旋回といった動作が可能である。不整地での走行やその場での方向転換が可能であるため、切羽作業の合間に迅速に計測作業を行うことができる。
- (c) 広さ40 cm × 65 cmの設置スペースには、カメラ

やスキャナ等の任意の計測機器を設置可能である。設置スペースは垂直昇降型のリフトとなっており、計測機器の使用場面に合わせて高さを85～170 cmの範囲で調整することができる(図—3)。

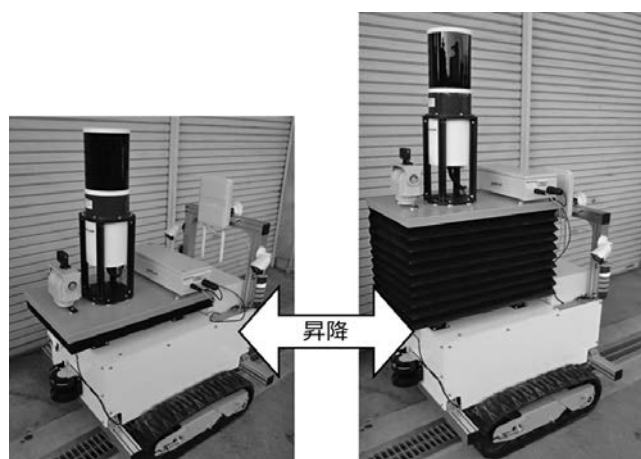
- (d) 動力源はリチウムイオンバッテリーである。エンジンと比較して坑内環境を悪化させないこと、他の種類のバッテリーと比較して軽いこと、昼夜稼働する山岳トンネル現場で使用するために連続稼働や急速充電が可能であることを考慮して選定した。
- (e) 遠隔操作中に装置周囲の状況を確認するために、映像を取得するためのカメラや、接近物を検知するためのラインスキャナやLiDARを搭載している。併せて、装置の稼働状況を周囲に知らせるために表示灯やブザーを搭載している。また、緊急時に動作を停止させるためのキルスイッチも設けている。
- (f) 小電力無線局(2.4/5.0 GHz)を搭載しており、遠隔操作装置からの操作信号を受信するとともに、計測台車からは稼働状況や各計測機器のデータが送信される。

(2) 遠隔操作装置

計測台車の遠隔操作には、遠隔操作室またはタブレット端末といった遠隔操作装置を用いる。装置の種類は、現場の状況や他技術の適用状況を鑑みて選定する。遠隔操作室(図—4)は床面積12 m²程度のコン



図一2 システム構成



図一3 計測機器設置スペースの昇降



図一4 遠隔操作室

テナハウスを4tトラックに搭載したものであり、室内に設置されている専用のリモコンまたはコクピットを用いて計測台車を遠隔操作することができる。コクピットには、前方に複数のモニタ、足元にペダル、手元にレバーやボタンのついた制御盤を設置しており、設定を変更することで、共通の設備を用いて坑内の各種重機を遠隔操作することも可能となっている。この機能は将来的に複数の重機を遠隔化・自動化することを見据えて実装したものであり、重機の遠隔操作システムを導入する現場においては、計測台車の制御も遠隔操作室から行われることが想定される。なお、現段階では遠隔操作の試行中のため遠隔操作室を切羽から200～300m程度の位置に配置しているが、将来的には光ケーブル等で通信区間を延長して坑外や現場外から遠隔操作を行うことを想定している。タブレット端末を使用する場合には、計測台車を制御するために開発したソフトや、周囲確認用カメラの映像を観るための市販のソフトを多重起動して遠隔操作を行う（図—5）。

また、搭載した計測機器の制御には、専用のソフトウェアをインストールしたタブレット端末やスマートフォンを使用する。

3. 使用方法

本システム使用時には計測機器を搭載した計測台車を駐機場所から切羽まで走行させ、観察・計測を行った後に再び走行させて駐機場所へ戻す。本システムによる遠隔化が想定される観察・計測作業の例を以下に述べる。

(1) 切羽観察

地質状況を把握して設計や施工の妥当性を判断するために切羽観察が実施されているが、ずり搬出直後の岩肌が露出している状況で切羽に近付くため、肌落ち

による被災が懸念される。本システムにカメラを搭載して、遠隔臨場のための映像配信や切羽観察簿に貼付するための写真の撮影を遠隔で行うことにより、安全性の向上が期待される。また、AIで切羽性状を評価するシステム³⁾と併せて運用することで、切羽評価の自動化による省力化も期待される。

(2) 覆工コンクリートの打設数量の推定

本システムに3Dスキャナを搭載して側壁や天端に打設した吹付けコンクリートの形状を計測し、得られた点群データを設計の覆工コンクリートの形状と比較することで、覆工コンクリートの打設数量を容易に把握できる。これにより、材料の発注の容易化による生産性向上や、材料の余剰を防止することによるコスト削減が期待される。

(3) 切羽面の押出変位の計測

特に爆薬の装填作業は切羽に近接しながら行うため肌落ちによる被災リスクが高いが、本システムにLiDARを搭載して切羽面の形状を連続的に計測し続け、作業開始時との差分から閾値以上の押出し変位が検知された場合に警報を出すことで被災を防ぐことが期待される。装薬作業中は大型重機であるドリルジャンボが切羽近傍に設置されているものの、計測台車は小型であるため容易に切羽に接近することができる。

(4) 作業環境の測定

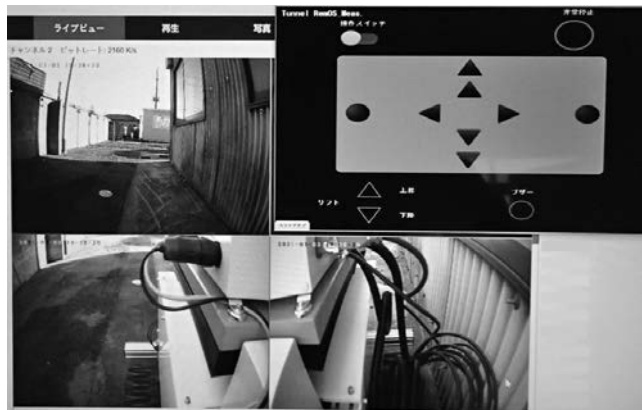
本システムにガス濃度計や粉じん計等を搭載して無人で計測を行うことができるため、ガスや粉じん等が発生した場合でも人が立ち入ることなく状況を把握することが可能である。

4. 自動走行に関する取り組み

観察・計測作業は項目ごとに実施頻度が定められ日常に行われている場合が多く、自動化を進めることで職員の拘束時間の短縮による生産性向上が期待される。そのため、本システムを利用して切羽で観察・計測作業を行う場合を想定して、計測台車の自動走行技術の開発に取り組んだ。

(1) 自動走行技術の概要

今回開発した自動走行技術は、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）を活用して計測台車の駐機場所と切羽の間の移動を自動化する。計測台車に搭載した複数のLiDARやカメラによる認識結果から自



図—5 タブレット端末による操作

己位置推定 (Localization) と周辺地図作成 (Mapping) を同時に行い、適切な走路を判断して左右のクローラを制御する。遠隔操作装置による遠隔操作中に設定を切り替えることで自動走行を行うことが可能であり、以下の方法で制御が行われる (図-6, 7)。なお、切羽における観察・計測作業は、現時点では遠隔操作にて行うが、将来的には自動化を検討している。

- (a) 走行時には、2DLiDAR や 3DLiDAR で取得した点群データから周囲の物体を認識してトンネル内の地図を作成するとともに台車の位置を把握し、トンネル壁面と一定の離隔距離を確保しながら駐機場所と切羽の間を移動する。走路上に重機や人

等の障害物が検知された場合には回避し、回避後に再び走路に戻る。

- (b) 台車前方の LiDAR の点群データを基に切羽を検知し、事前に設定した位置で停止する。
- (c) 駐機場所では、台車側方や後方のカメラを用いて、壁面に設置した AR マーカーを検知する。映像内のマーカーの大きさを基に、壁面との距離を画像処理で判断しながら出発や駐機を行う。
- (d) 駐機場所や切羽付近で旋回する際には、LiDAR で取得した壁面の点群データを基に台車の旋回角度を制御する。

(2) 自動走行技術の試行結果

施工中のトンネル現場や実験ヤードにおいて、自動走行技術の試行を行った (図-8)。トンネル中央が走路となるように壁面からの離隔距離を設定して自動走行を行った結果、障害物を模擬するために走路上に設置した衝立を迂回しながら、直進時には概ね一定の速度 (2 km/h) で進むことができた。また、切羽から 12 m の地点を停止位置に設定した結果、台車は切羽から 11.9 m の位置で停止し、比較的高い精度で制御できることが確認された。駐機場所においては、壁面に設置した AR マーカーを視認して出発や駐機を行

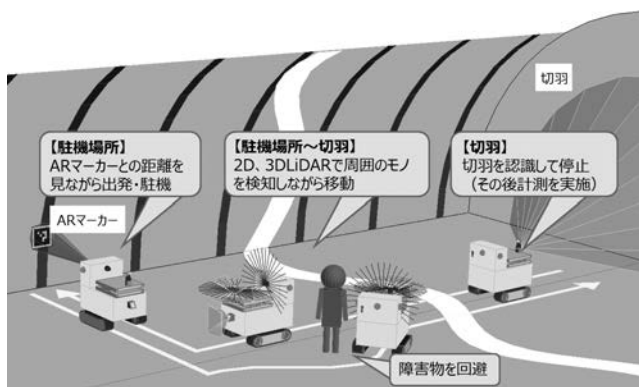


図-6 自動走行技術の概要

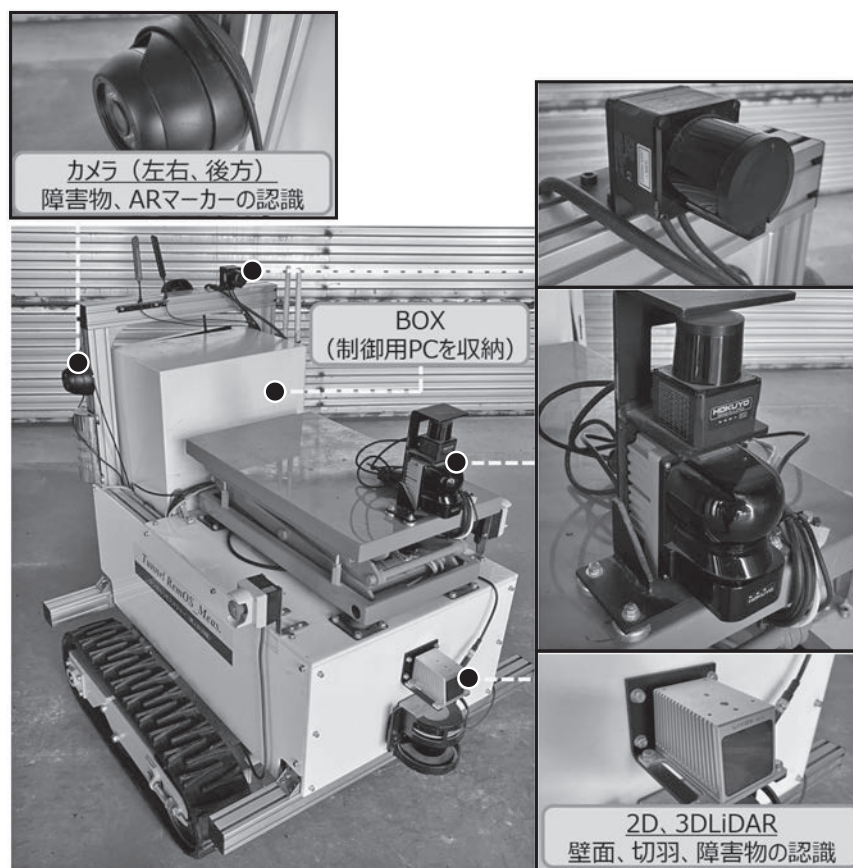
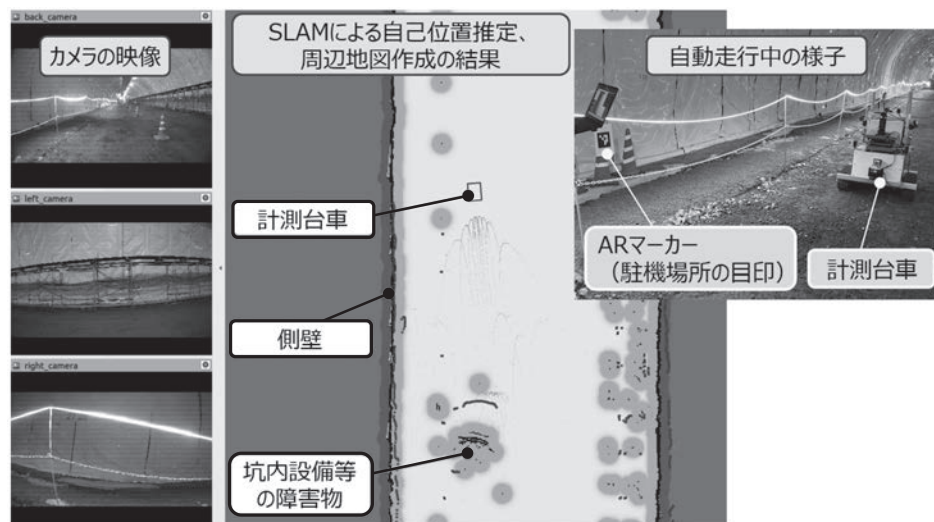


図-7 自動走行のための搭載機器



図—8 SLAM による取得データの例と自動走行中の様子

うことができた。

今回の試行では基本的な自動走行の動作を確認できたものの、実用する際にはいくつかの課題が挙げられることから、今後は更なる改良が必要であると考えられる。具体的には、今回の試行では障害物として衝立を使用したのに対し、実際の現場では人や重機等のように移動するものや、形状が複雑で全体像の認識が困難である機械・設備が存在しており、それらとの衝突を防止するためには実環境での検証や改良が不可欠であると考えられる。また、切羽付近ではずりや泥濘化によって路盤が不陸になっている場合が多く、台車が傾斜・振動してLiDARやカメラによる周囲環境の認識が不安定になることで、SLAMによる自己位置推定や周辺地図作成の精度が低下することが懸念される。これに関しては、台車の安定化や、設置機器の防振等の措置が必要であると考えられる。

5. おわりに

本稿では、山岳トンネル工事における観察・計測作業の遠隔化・自動化を目的としたシステムの開発状況について紹介した。今後は本システムの改良を行っていくとともに、今回の開発で得られた知見を活かして各種重機の自動化にも取り組んでいきたい。

JCMA

《参考文献》

- 1) 山本悟, 塚田純一, 高橋将史: 山岳トンネルにおける油圧ショベルの遠隔操作システムの開発, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, VI-927, 2023
- 2) 五味春香, 水谷和彦, 小笠原裕介, 鈴木麟太郎, 坂下誠, 浅井秀明: 全自動鋼製支保工建込みシステムの現場適用に向けた検証試験, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, VI-938, 2023
- 3) 三井善孝, 山下雅之, 山本悟, 園田香織: 山岳トンネルにおけるAIを活用した切羽評価システムの開発, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-666, 2020

【筆者紹介】



三井 善孝 (こうけつ よしたか)
西松建設㈱
技術研究所 土木技術グループ
係長



塚田 純一 (つかだ じゅんいち)
ジオマシンエンジニアリング㈱
本社
代表取締役社長



松本 慶太 (まつもと けいた)
㈱アラヤ
事業推進部
リーダー