

自由断面掘削機遠隔操作システム (Tunnel RemOS-RH) の開発 Development of Remote Operation System of Road Header

辻岡 高志*	山本 悟*
Takashi Tsujioka	Satoru Yamamoto
寺西 淳二**	松崎 史明**
Junji Teranishi	Fumiaki Matsusaki

要 約

当社では、山岳トンネル施工に使用される各機械・設備の無人化（遠隔操作）・自動化技術を組み合わせた遠隔操作システム「山岳トンネル無人化・自動化施工（Tunnel RemOS）」の構築を進めており、「自由断面掘削機遠隔操作システム（Tunnel RemOS-RH）」はその要素技術として開発されたものである。

本システムを活用することにより、自由断面掘削機の掘削作業に必要な運転動作を、切羽から離れた位置に設置した遠隔操作室から遠隔操作することが可能となり、切羽近傍における作業の軽減による生産性や安全性の向上が期待される。本稿では、システムの概要および松浦1号トンネルでの現場実装結果について紹介する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 山岳トンネル無人化施工システム
- § 3. 自由断面掘削機遠隔操作システムの概要
- § 4. 遠隔操作システムの特長
- § 5. システム導入効果
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

建設業では、ベテラン技術者の引退や若手入職者の減少によって、将来的に施工品質の低下や労働力の不足が懸念されている。また、山岳トンネル工事では切羽における肌落ち災害がたびたび発生しており、作業員が切羽に立ち入る機会の削減（切羽作業の無人化）が求められている。しかし、山岳トンネル工事では狭隘な坑内において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、無人化技術の導入が進んでいないのが現状である。

そのような背景から著者らは山岳トンネルの施工重機を対象とした無人化・自動化技術『Tunnel RemOS』の開発に取り組んでおり、本稿ではその一環として開発した自由断面掘削機遠隔操作システム『Tunnel RemOS-RH』を紹介する。本システムを用いることにより、自由断面掘削機の走行から掘削までの一連の作業動作を無線

で遠隔操作することが可能である。

自由断面掘削機による掘削作業は、通常、切羽近傍に設置された機体上からオペレータが目視により操作を行うため、掘削に伴う粉じんや激しい振動・騒音に晒される過酷な環境下での作業となるほか、必要に応じて作業員が危険な切羽直下に降り、設計断面通りに掘削されているかを直接目視確認する場合がある。しかし、切羽は地山が露出しており、岩塊の抜け落ち（肌落ち）が発生すると、死傷災害につながる極めて危険な場所であるため、切羽直下作業を無くすための技術開発が急務であった。

このような背景から、自由断面掘削機による走行や掘削作業の操作を崩落等の危険性の高い切羽から離れ、安全で良好な環境下の室内からオペレータが遠隔で操作可能とする「自由断面掘削機遠隔操作システム」を開発した。

§ 2. 山岳トンネル無人化施工システム

当社では、今後の取り組みのひとつに、「施工の自動化に向けた技術導入・技術開発、自律化（AI）施工技術開発」を掲げている。その一環として、掘削作業に使用する自由断面掘削機やドリルジャンボ、ずり運搬作業に使用するホイールローダーや油圧シャベル、一次支保作業に使用する吹付機等の各機械・設備を遠隔や自動で操作するための技術開発を進めており、2027年度までの坑内主要作業の無人化施工技術の実用化を目指している。これらの技術を山岳トンネル無人化施工システム『Tunnel

* 技術研究所土木技術グループ

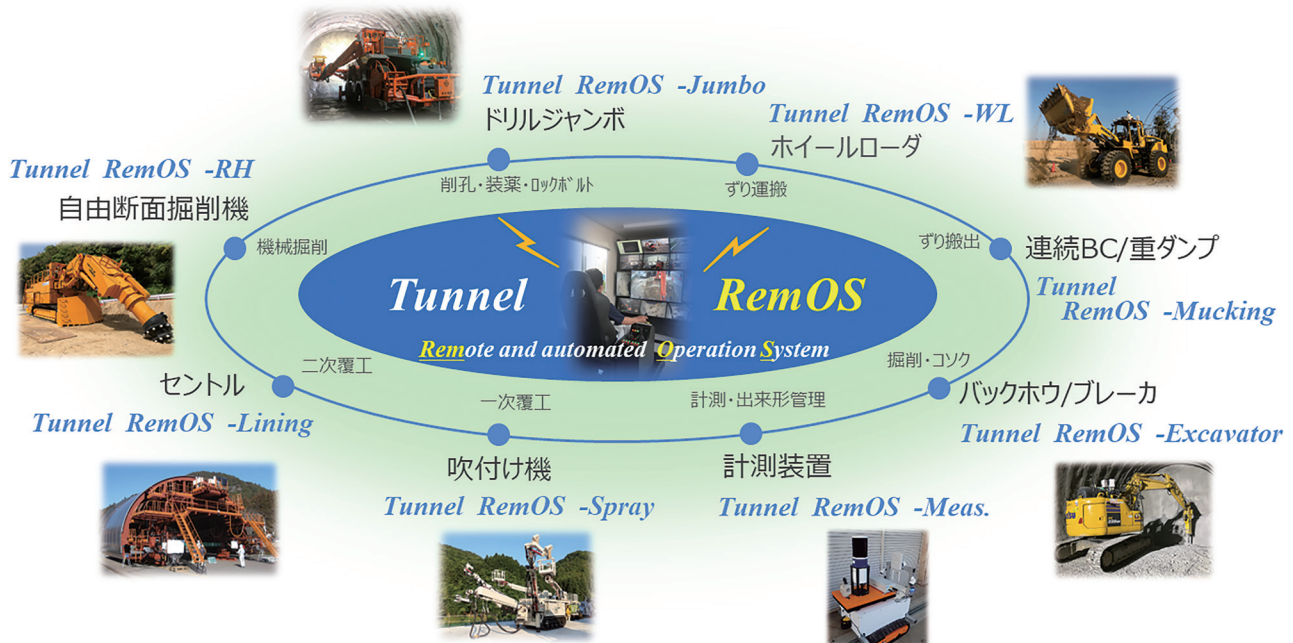
**九州（支）松浦1号トンネル（出）

RemOS (トンネルリモス, Tunnel Remote and automated Operation System)』と総称しており, ①駐機場所から作業場所までの重機の移動 (走行), ②作業場所における動作 (作業), ③遠隔操作に必要な計測・ガイダンスの3分野の要素技術で構成している (図一1). 本技術を活用して, 切羽直下作業を削減することで安全性や労働環境の向上が見込まれるとともに, 複数のトンネル現場の特殊

重機を一拠点から遠隔操作することで, 大幅な生産性向上が期待される.

§ 3. 自由断面掘削機遠隔操作システムの概要

自由断面掘削機遠隔操作システムは, 『遠隔操作室』, 『映像・制御信号伝送システム』, 『機体制御システム』,



図一1 Tunnel RemOS (山岳トンネル無人化施工システム) の構成



図二 自由断面掘削機遠隔操作システムの構成

『ガイダンスシステム』および『安全操作管理システム』で構成されている (図-2)。

3-1 遠隔操作室

遠隔操作室内には遠隔操作コクピットおよび複数のモニターが設置されており、このモニターの映像や音声を確認しながら機体走行やブーム操作等を遠隔で行う (図-3)。なお、座席下に電動式のアクチュエータを設置しており、機体に設置した傾斜計と連動させることで、遠隔操作室に居ながらにして機体の傾斜や振動を体感できるようにしている。そのため、走行時に傾きを体感して逸走を防止することや、掘削時に振動を体感して手応えを判断することが可能となっている。

3-2 映像・制御信号伝送システム

機体と遠隔操作室の間の通信は、無線通信と有線通信を組み合わせた伝送システムによって行われる。機体および先端設備である集塵機の上部には送受信用の無線通

信アンテナが設置されており、60 GHz 帯の V バンド高速無線 LAN、5 GHz 帯の省電力無線および 5 GHz 帯の Wi-Fi の 3 種類の無線伝送方式でデータ通信が行われる。集塵機のアンテナと遠隔操作室の間では有線通信を採用している。

機体には 10 台の FHD カメラ、集塵機上部には自由断面掘削機を含めた切羽周辺全体を見通せる 1 台の俯瞰カメラが設置されており、これらの映像データの大部分は SDI から HDMI に合成・変換され、さらに IP 化することで V バンド高速無線 LAN により集塵機上部のアンテナに無線伝送され、そこから LAN ケーブルを介して遠隔操作室へ有線伝送される。また、一部の映像データは省電力無線により機体から遠隔操作室まで直接無線伝送される。

遠隔操作室からの操作信号や、自由断面掘削機で取得した機体情報 (音、振動等)、ガイダンスシステムのデータ (機体位置・姿勢から算出したカッター位置やカッタートルク等)、各種アラートのデータ等は 5 GHz 帯の



(a) 全景



(b) モニター



(c) 運転席



(d) 遠隔操縦状況



(e) 制御送受信ユニット

図-3 遠隔操作室

Wi-Fi を使用して送受信され、情報の一部がモニターに表示される。また、これらの運転データは専用 PC に運転データとして蓄積しており、将来的に AI による自動制御を検討する際の教師データとして活用できることが期待される。

3-3 機体制御システム

遠隔操作室から伝送された操作信号は、自由断面掘削機に設置された機体制御盤で処理され、これをもとに機体が遠隔操縦される。自由断面掘削機の制御に関しては、機体のクローラー、ブーム、カッターヘッド、アウトリガー、ケーブルヘッドに遠隔制御装置が取り付けられているため、機体の走行、ブーム操作、カッターヘッド回転といった掘削作業に直接関係する動作に加え、それ以外のアウトリガーの張り出し、キャブタイヤケーブルの巻取り、巻出し等、有人作業時に可能なすべての動作を遠隔制御することができる。

3-4 ガイダンスシステム

ガイダンスシステムは自由断面掘削機のカッターの掘削位置を可視化する「掘削ガイダンスシステム」および地山の性状を定量評価する「地山評価システム」で構成される。

(1) 掘削ガイダンスシステム

自由断面掘削機を切羽に配置した時に測定される機体位置・姿勢情報および掘削時に計測されるブーム稼働情報をもとにカッター先端部の絶対座標が計算され、モニター画面にリアルタイムにイラスト表示される (図-4)。機体位置・姿勢情報は、自由断面掘削機の後方 50 m 以内の任意の位置に設置して事前にトータルステーションで絶対座標を把握しておいた 3 個の特殊基準球を、機体に設置した高速 3D スキャナで自動的に視準することで測定される (図-5)。また、カッター先端部の絶対座標をもとに、設計値と比較した掘削の出来形も、モニター

画面に色分け表示されるようになっている。そのため、オペレーターはモニター画面を確認しながらブームを操作することで、設計断面に沿った掘削を確実に行うことができる。

(2) 地山評価システム

掘削に要した電力量 (掘削エネルギー) とカッター軌跡より算出した地山掘削量から掘削体積比エネルギー (単位体積の地山を掘削するのに要した仕事量) を求め、さらに独自式を用いて掘削体積比エネルギーから地山強度を自動的に算出することができる。また、この結果はモニターにも簡易計測結果としてリアルタイム表示されるが、専用の PC ソフト (DRISS-3D) を使用することでより詳細な 3 次元の地山強度評価も行うことができる (図-6)。

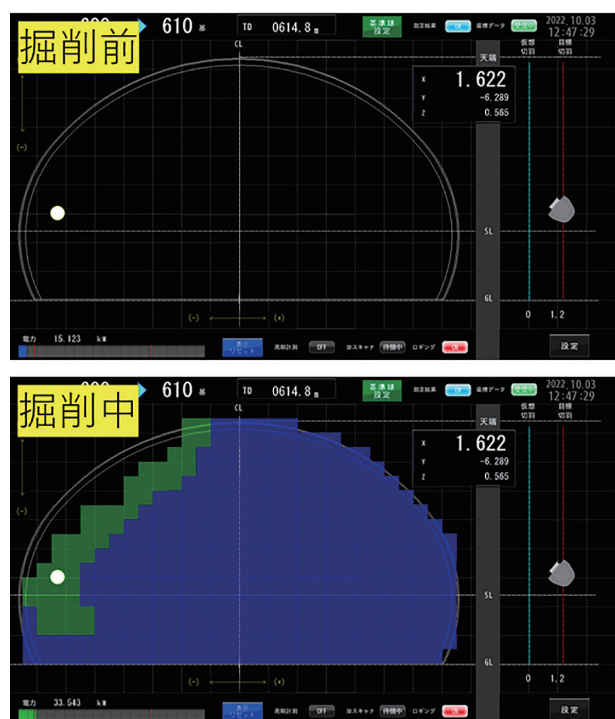


図-4 掘削ガイダンスシステム画面

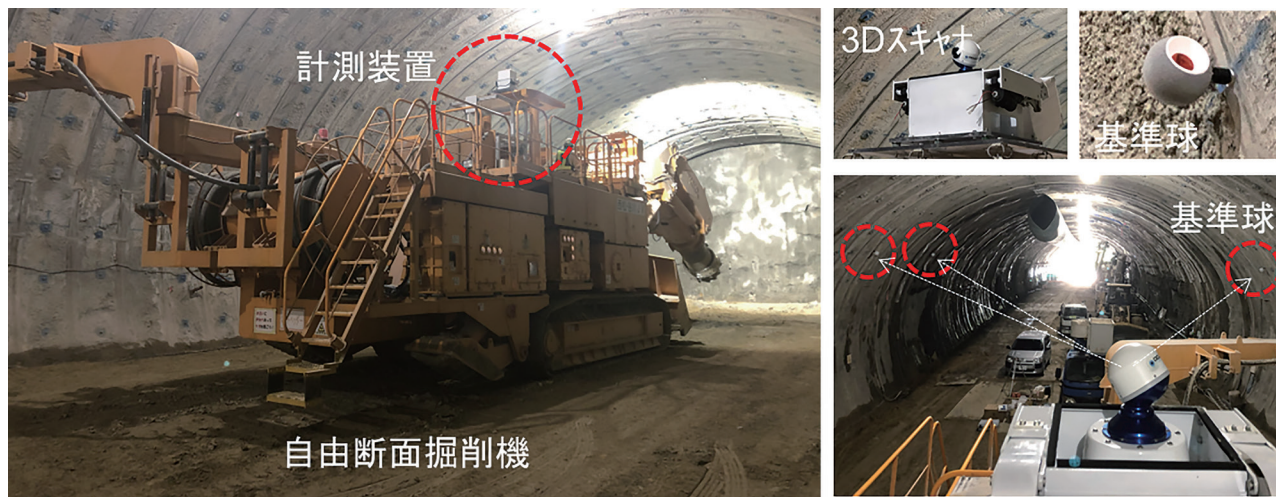


図-5 高速 3D スキャナによる機体位置・姿勢測定

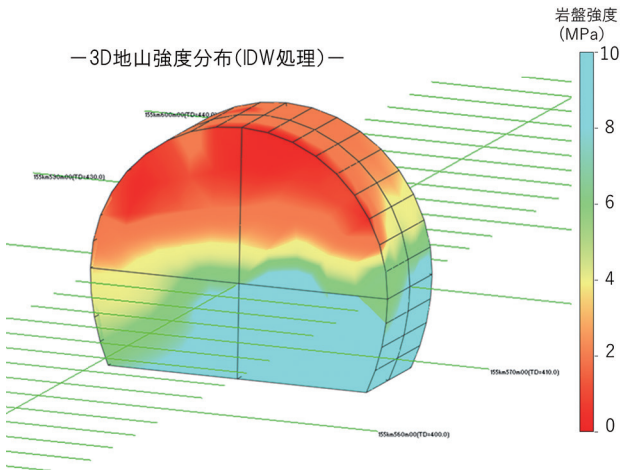


図-6 地山評価システム



SZ-VH1X

検出角度	190°
測定距離	60 m
測定間隔	0.2°

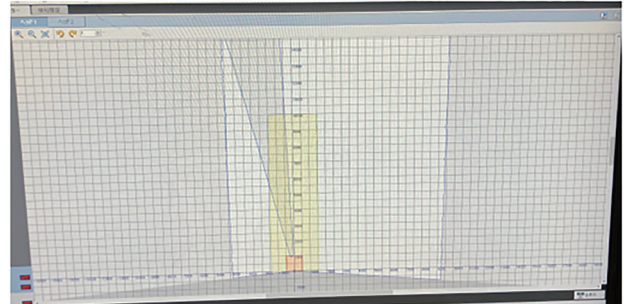


図-7 ラインスキャナ

3-5 安全操作管理システム

遠隔操作時の安全を確保するため、無線通信が途切れた際や、遠隔操作室内に備えられた緊急停止スイッチが押された際には、自由断面掘削機の運転を停止させるシステムを備えている。

§ 4. 遠隔操作システムの特長

4-1 高速 3D スキャナによる機体位置・姿勢測定

本システムでは、機体位置・姿勢情報を高速 3D スキャナで測定するため、トータルステーションとの連動が不要である。この測定は掘削開始前に機体を切羽近傍に据えた際に実施されるが、所要時間は 10~20 秒程度であるため掘削作業への影響がほとんどない。また、この高速 3D スキャナはトータルステーションによる計測と比較して粉じん環境下でも比較的安定した計測が可能である。

4-2 掘削効率・安全性の向上

設計断面線とカッター軌跡をモニター画面上において逐次比較することにより計画通りの断面掘削が可能となっている。これにより余掘り・余吹きが低減されることで、搬出するずりの量や吹付けに必要なコンクリートを低減することが可能なため、材料費の低減や施工サイクルの改善等が期待される。また、切羽直下における掘削形状の確認作業を削減することができるため、作業効率や安全性の向上が期待できる。

4-3 掘削地山の 3 次元定量評価

地山評価システムでは、掘削地山の強度特性を 3 次元的にリアルタイムで把握することができるため、地山の崩落や不安定化の可能性を迅速に予測することが可能である。また、予測結果は施工した支保の妥当性評価にも使用することができる。

4-4 CIM との連携

本システムで得られた出来形計測や三次元地山評価の結果はクラウドサーバーに蓄積されるため、技術研究所等の遠隔地からのモニタリングが可能であるとともに、山岳トンネルの CIM と連携させることで総合的な施工管理に活用できることが期待される。

§ 5. システム導入効果

5-1 トンネル施工現場への導入

開発システムを松浦 1 号トンネルへ試験適用した。現場適用において、高速 3D スキャナによる機体位置の算出精度をトータルステーションによる測量結果との比較で求めたところ、カッター先端部においては概ね 50 mm 程度であった。

現場導入当初は遠隔操作装置の作動や映像・通信状況の不具合が生じたが、実験を進める過程でシステム改良やカメラ・通信機器の配置等の調整を繰り返した結果、最終的には遠隔操作に大きく影響を及ぼすような映像・操作遅延もなく一連の遠隔運転動作を概ね円滑に行うことができた。

5-2 課題と展望

導入により抽出された課題として、自由断面掘削機による長時間の掘削作業によって作業環境の粉塵濃度が高くなることで高速 3D スキャナによる機体位置把握に時間を要し、有人作業時と比較して施工サイクルが遅延することが挙げられる。現在は、高濃度の粉塵環境においても計測可能なラインスキャナ (図-7) による計測データを用いて、機体位置の把握ができるようにシステムの調整と改良を行っている。今後も操作システムの改良を継続的に行い、遠隔操作による作業効率の更なる改善を検討していく。

§6. おわりに

今回、山岳トンネル工事における自由断面掘削機の遠隔操作システムを開発した。当社施工中の山岳トンネル現場にて本システムの試行を行った結果、自由断面掘削機の掘削作業を遠隔操作で遅延なく実施することができた。今後は現場適用を通してシステムの完成度をさらに高めていき、トンネル掘削の自動化・無人化への取り組みをさらに加速させていく予定である。

参考文献

1) 山下雅之, 山本悟, 田口毅: 山岳トンネルにおける

無人化施工への取り組み, 施工機械の遠隔操作システムの実用化を目指して, 土木施工, Vol. 62, No. 1, pp. 135-139, 2021

2) 山下雅之, 山本悟, 田口毅: 山岳トンネルにおける切羽近傍作業の無人化を目指した取り組み, 建設機械施工, Vol. 73, No. 7, pp. 43-48, 2021

3) 山下雅之, 三井善孝, 塚田純一: ドリルジャンボの削孔データを使用した3次元地山評価システムの開発, 第72回土木学会年次学術講演会, VI-208., 2017