

山岳トンネル工事における 切羽近傍作業の無人化を目指した取り組み

Tunnel Remote Operation System の開発

山下 雅之・山本 悟・田口 毅

山岳トンネル工事の更なる生産性・安全性向上を目的に、山岳トンネル無人化施工システム（Tunnel Remote Operation System）（以下「本トータルシステム」という）の構築を進めている。本トータルシステムは掘削作業に使用される各施工機械に対する遠隔操作システムで構成されており、これらの構成技術を効果的に組み合わせることによりトンネル施工の無人化を目指すものである。現在、無人化施工システム構築の第一段階として各施工機械のガイダンス技術や遠隔操作技術の開発を進めている。本稿では、本トータルシステムの概要を述べるとともに、その構成技術の開発状況を紹介する。

キーワード：山岳トンネル、無人化施工、遠隔操作、生産性向上

1. はじめに

我が国における高齢化に伴う労働人口の減少の流れは今後さらに加速すると予測されており、それに伴う建設就業者の減少・高齢化も着実に進行している。その中でも特に山岳トンネル工事においては、坑内の過酷な環境において特殊技能を要する作業が多く、これに従事する技能労働者の安定確保や高齢化対策が喫緊の課題となっている。このような課題の解決には労働環境の大幅な改善や労働生産性の向上が不可欠であり、その方策の1つとしてICT技術やメカトロニクスを駆使した無人化（遠隔操作）・自動化施工技術の導入が望まれている。しかしながら、山岳トンネルの施工では狭隘な坑内において多種にわたる特殊機械を使用する複雑作業が必要とされ、現状では無人化・自動化技術の導入が進んでいない。

このような背景から、トンネル工事に使用する個別の施工機械に対する遠隔操作システムを開発し、それらを効果的に組み合わせて施工全体の無人化・自動化を実現する取り組みを進めている。本稿では、構築中の山岳トンネル無人化施工システムの概要を述べるとともに、その構成技術であるホイールローダ、油圧ショベル（ブレイカ）、自由断面掘削機および計測機器の遠隔操作システムの開発状況を紹介する。

2. 本トータルシステムの概要

現在構築を進めている本トータルシステムの構成を図一1に示す。本トータルシステムは掘削作業に使

用する自由断面掘削機、ドリルジャンボや油圧ショベル、ずり運搬作業に使用されるホイールローダ、一次支保作業に使用される吹付け機等、各作業に使用される施工機械の遠隔操作システムで構成されている。また、これらの遠隔操作システムには以下の3分野の要素技術が備わることを基本とした。

- ①作業場所への遠隔「機体移動（走行）」技術
- ②作業場所における遠隔「機体動作（作業）」技術
- ③遠隔操作に必要な「計測・ガイダンス」技術

これら各分野の要素技術についてはそれぞれ個別に開発を進め、完成した技術から先行して現場適用を実施するとともに、既存技術の活用も積極的に行うことでシステム構築の迅速化を図っている。

3. 構成技術の開発状況

ここでは、本トータルシステムにおける掘削作業やずり運搬作業、計測作業に関する構成技術の開発状況を紹介する。

(1) ホイールローダ遠隔操作システム

掘削ずりの運搬に使用されるホイールローダは、狭隘空間での高速走行や複雑なバケット操作が必要とされるため、現在構築を進めている無人化施工システムの構成技術の中でもっとも難度の高い遠隔操作技術が必要とされる。その一方で、本技術が他の遠隔操作技術へ応用されることでシステム全体のより一層の開発促進が期待されることから、山岳トンネルの無人化施

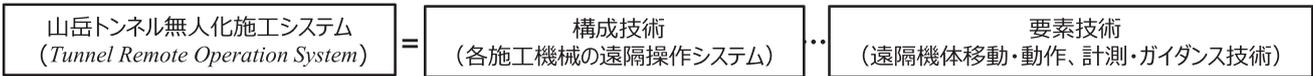
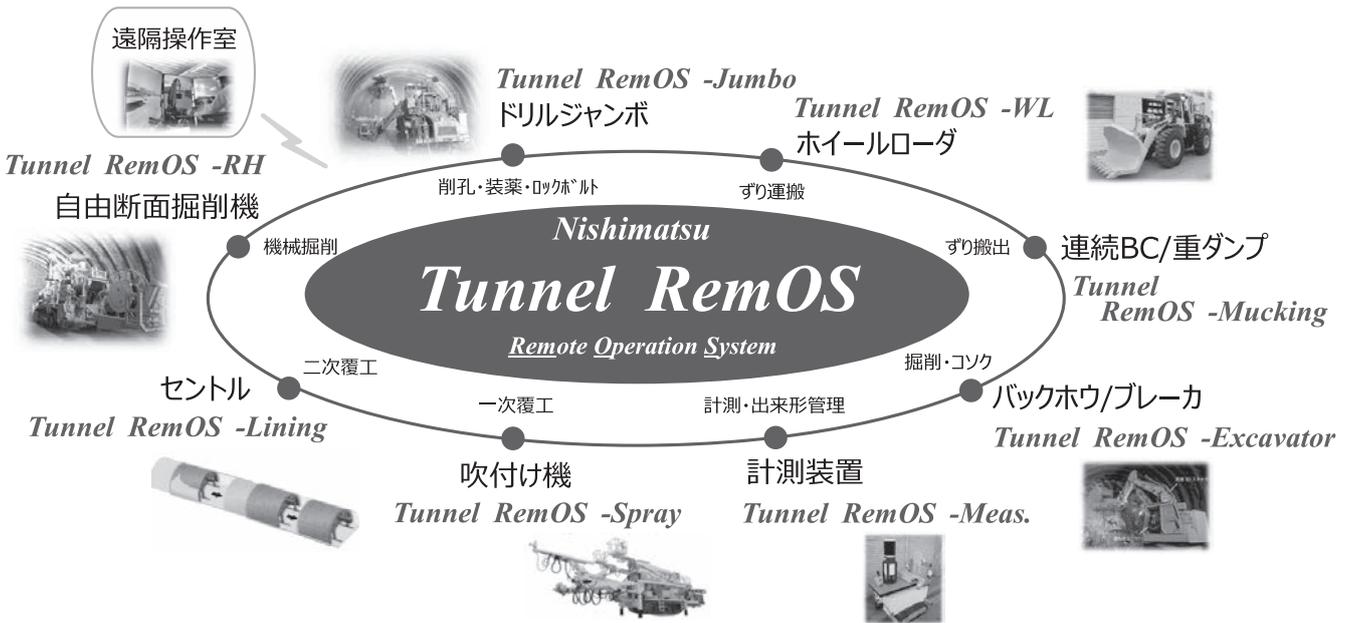


図-1 本トータルシステムの構成

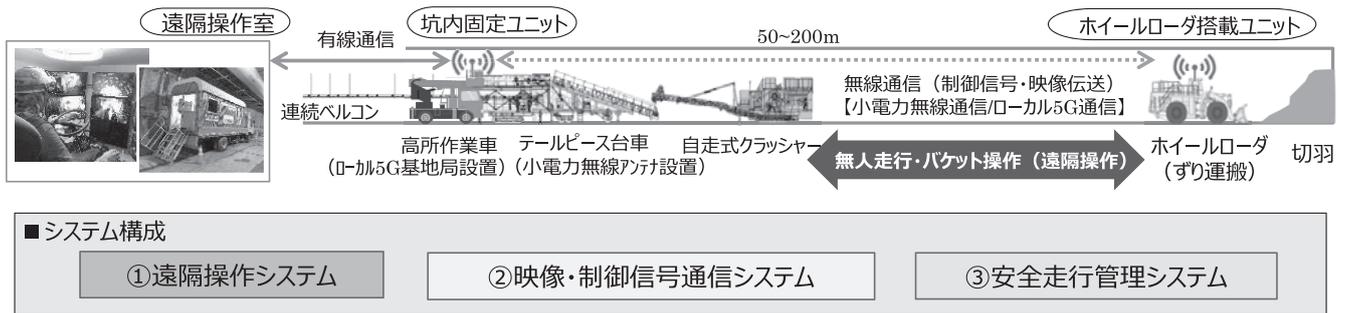


図-2 ホイールローダ遠隔操作システム

工システムを構築する上で非常に重要かつ実用化が急がれる構成技術といえる。

ホイールローダ遠隔操作システムの概要を図-2に示す。本技術は、切羽近傍におけるずり運搬作業に使用されるホイールローダの運転操作を遠隔で行うものであり、『遠隔操作システム』、『映像・操作信号通信システム』および『安全走行管理システム』で構成される。

(a) 遠隔操作システム

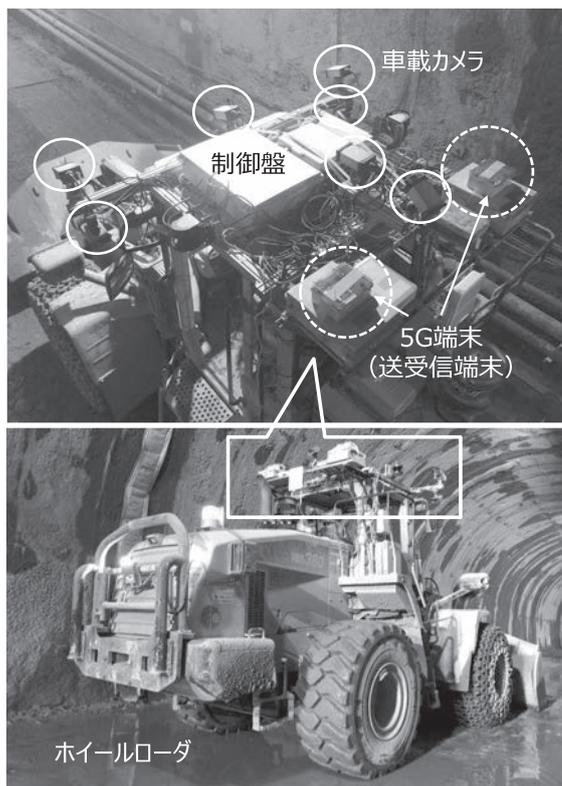
ホイールローダの運転は、ステアリング、ブレーキ・アクセルペダルおよびアーム・バケットレバーを操作することによって行われるが、これらの操作を無線受信により機械的に作動させる遠隔運転制御装置をホイールローダに取り付けた(写真-1)。また、これらの装置を設置した状態で通常の有人運転も可能な構造としており、有人運転および無人(遠隔)運転の切り



写真-1 遠隔運転制御装置



写真一2 遠隔操作室および運転コクピット



写真一3 映像・制御信号通信システム（ホイールローダ搭載ユニット【L5G仕様】）

替えを容易に行うことができる。遠隔操作室内には、実機と同じ仕様の運転コクピットおよび9画面モニターが設置されており、このモニターに表示される映像や走行データを見ながら遠隔操作が行われる（写真一2）。

(b) 映像・操作信号通信システム

映像・操作信号の伝送については、5 GHz 帯の小電力無線および 28 GHz 帯のローカル 5G（以下、L5G）の2種類の無線伝送方式の使用が可能なシステムを構築した^{1), 2)}。ホイールローダには、複数の FHD カメラ、送受信機および制御盤で構成される「ホイールローダ搭載ユニット」が設置されている（写真一3）。また、切羽後方約 50~200 m には、坑内に設置された送受信装置や有線カメラ等で構成される「坑内固定ユニット」が設置されている（写真一4）。車載カメラの映像データは、ホイールローダ搭載ユニットから小電力無線や L5G により坑内固定ユニットの送受信装置へ伝送され、そこから光ファイバケーブルを介して遠隔操作室へ有線伝送される。一方、操作信号は同様の通信設備を使用して遠隔操作室からホイールローダに伝送される。

(c) 安全走行管理システム

遠隔操作時の安全を確保するため、ホイールローダの運転を自動的に緊急停止させるシステムを備えた。これらの緊急停止は、ホイールローダへの人の異常接近を AI が認識した場合や無線通信にトラブルが発生した際に自動的に作動するが、コクピットや携帯式の



写真一4 映像・制御信号通信システム（坑内固定ユニット【L5G仕様】）

イッチから手で緊急停止を作動させることもできる。

(d) トンネル適用試験

現在、本システムによる運搬やクラッシャへの投入時のバケット操作といった遠隔走行・動作試験を施工中の道路トンネルにおいて実施しており、これまでの実験で基本的な遠隔運転動作に問題がないことが確認されている（写真一5）。本システムについては今後もシステム改良や調整を重ね、早期の実用化を目指す予定である。



写真一5 トンネル坑内における遠隔操作実験状況

(2) 掘削形状モニタリングシステム

本技術は、油圧ショベル（ブレーカ）の遠隔操作システムにおける「計測・ガイダンス」分野の要素技術に位置付けられている。

ブレーカは、発破掘削時のトンネル切羽において浮石除去や掘削設計断面線の内空側に残った地山の整形作業（あたり取り）に使用される施工機械である。通常、あたり取りの際は作業員が切羽直下に立入り、目視にて整形が必要なあたり箇所を判断してレーザーポインタ等でオペレータに指示を出している。しかし、切羽には地山が露出しており、そこから岩塊の抜け落ち（肌落ち）が発生すると死傷災害につながる可能性が高い危険な場所である。そこで、あたり取りを行うブレーカに搭載した高速3Dスキャナで切羽の掘削形状の3次元データを取得し、設計断面と比較してあたり箇所を迅速に可視化することで、作業の安全性向上と効率化を図るガイダンス技術を開発した³⁾。

図一3に示すように、本技術では発破・ずり出し



図一3 掘削形状モニタリングシステム

完了後の切羽において、ブレーカに搭載した高速3Dスキャナで切羽の掘削形状を計測する。さらに掘削形状の3次元データと設計断面を比較し、あたり箇所を運転キャビン内のモニタにヒートマップ表示させる。オペレータはモニタ画面のヒートマップ表示をもとにあたり取りを行うため、従来作業と比較して安全性が向上する。また、計測開始から結果表示までが15秒程度と迅速であるため掘削サイクルへの影響が少なく、安全性向上と余掘り低減によるサイクルタイム短縮による効率的なトンネル作業が可能となっている。さらに、切羽で得られた掘削形状の点群データおよび各種施工データは機体に搭載したPCからトンネル坑内ネットワークを経由してクラウドサーバ上に蓄積され、作業進捗、予定吹付け量や掘削土量等の各種データを関係者でリアルタイムに共有することも可能となっている。

現在、ブレーカの遠隔機体移動・機体動作技術の開発を進めており、それを本ガイダンスシステムに付加させて油圧ショベルの遠隔操作システムを構築する予定である。

(3) 自由断面掘削機ガイダンスシステム

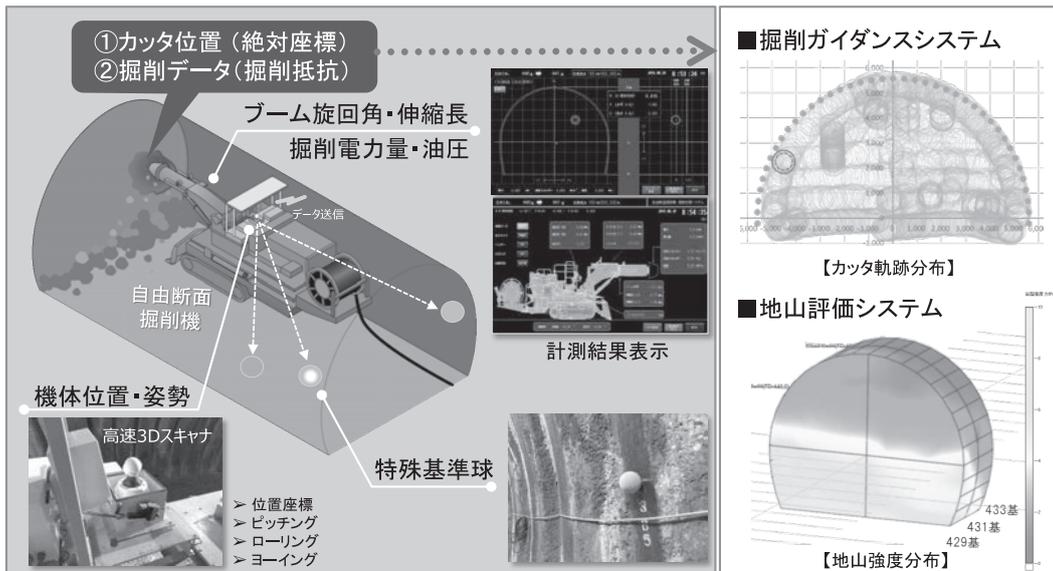
本技術は、自由断面掘削機の遠隔操作システムにおける「計測・ガイダンス」分野の要素技術に位置付けられている。

自由断面掘削機は、軟岩地山等の機械掘削に使用される施工機械である。自由断面掘削機による掘削では機上からの目視操作が一般的であるが、目標とすべき掘削断面通りの掘削が行われているかを確認するために必要に応じて作業員が掘削中に危険な切羽直下に立ち入る必要があった。また、軟岩地山では切羽が脆弱で不安定なことも多いため、支保の妥当性や切羽作業の安全性を確認するために地山性状を定量的に把握することも非常に重要となっている。そこで、自由断面掘削機による掘削時において高精度な掘削形状管理とともに地山性状の定量評価をリアルタイムで実施可能な掘削ガイダンスシステムを開発した⁴⁾。

本技術は、掘削位置を可視化する『掘削ガイダンスシステム』および掘削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（図一4）。

(a) 掘削ガイダンスシステム

自由断面掘削機を所定の位置に配置した際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ト先端部の絶対座標が計算され、その結果がリアルタイムでモニタ画面に表示される。オペレータがこのモニタ画面を確認しながら



図一四 自由断面掘削機ガイダンスシステム

ブーム操作することにより、設定断面に沿った掘削を確実に行うことができる。機体位置・姿勢情報については、機体に設置した高速3D スキャナが切羽後方の任意の位置に設置された特殊基準球（座標は既知）を高速スキャンすることで正確に得ることができる。ブーム稼働情報については、ブーム内の各可動部に設置した角度センサやブームシリンダの伸縮距離センサ等の計測値を使用した。

(b) 地山評価システム

本システムでは、まず掘削に要した電力量（掘削エネルギー）とカッタ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掘削機が要した仕事量）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が換算される。また、この結果はモニタにも簡易計算結果としてリアルタイム表示されるが、専用の処理ソフト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。

この自由断面掘削機についても遠隔機体移動・機体

動作技術の開発を進めており、この技術を本ガイダンスシステムに付加させて自由断面掘削機の遠隔操作システムを完成させる予定である。

(4) トンネル無人計測システム

本システムは、掘削時の切羽近傍において実施される切羽観察をはじめとした様々な計測作業の無人化を目指して開発された⁵⁾。システム概要を図一五に示す。

計測装置を搭載させる台車については、坑内の不整地での走行を容易とするために無限軌道式を採用し、リチウムイオンバッテリーによる電動駆動とした。また、施工機械との離合、狭隘な箇所や不整地での走行・旋回を可能にするため、車体をコンパクトな構造（幅100 cm×長さ115 cm×高さ150 cm程度）とした。現在、台車には切羽写真撮影用カメラおよび変位計測・出来形測定用の高速3D スキャナが搭載されているが、目的に応じて計測機器を変更・追加させることもできる。

本システムで撮影された切羽画像については、独自のAIエンジンと連携させることにより切羽評価を自



図一五 トンネル無人計測システム

動化させることができる。また、高速 3D スキャナで得られた点群データを前述の掘削形状モニタリングシステムの一部機能と連携させることにより、ヒートマップによる出来形管理や変位計測が可能となっている。

4. おわりに

ここまで、山岳トンネル工事における労働環境の大幅な改善や労働生産性の向上を目指して構築を進めている本トータルシステム「山岳トンネル無人化施工システム」の取り組み状況について述べた。本稿で紹介した構成技術のほかにも、現在、ドリルジャンボや吹付け機、二次覆工のためのセントル等の施工機械についても遠隔操作システムの開発や現場への試験適用準備を進めており、これら構成技術を効果的に組み合わせた無人化施工システムの早期運用を目指している。将来的には、本トータルシステムの運用による切羽近傍作業の完全無人化や遠隔操作拠点からの複数トンネルの遠隔施工管理を目指しており、その実現により山岳トンネル工事における安全性や生産性の大幅な向上が図れるものと期待している。

なお、今回紹介した構成技術のうち、「ホイールローダ遠隔操作システム」は(株)カナモトおよびジオマシンエンジニアリング(株)と共同開発したものであり、「自由断面掘削機ガイダンスシステム」、「掘削形状モニタリングシステム」、「トンネル無人計測システム」についてはジオマシンエンジニアリング(株)および(株)ビュープラスとの共同開発である。また、5G 通信を使用したホイールローダ遠隔操作技術およびブレーカに搭載した高速 3D スキャナを使用した掘削形状モニタリング技術については、官民研究開発投資拡大プログラム(通称 PRISM) 予算を活用して国土交通省が実施する

『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』において現場実証実験を行った。

JICMA

《参考文献》

- 1) 山下雅之, 吉田道信, 塚田純一: 山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システム, 建設機械施工, Vol.72, No.11, pp.36-39, 2020
- 2) 山下雅之, 田口毅, 山本悟, 原圭太, 清水亮, 吉田道信, 石井孝佳, 塚田純一: 山岳トンネルにおけるホイールローダ遠隔操作システムの開発と現場試行, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, 2021 (投稿中)
- 3) 山本悟, 三井善孝, 高橋将史: 切羽掘削形状モニタリングシステムの開発, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, VI-281, 2019
- 4) 山本悟, 山下雅之, 三井善孝, 高橋将史, 塚田純一: 自由断面掘削機の掘削支援システムの開発, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-665, 2020
- 5) 額額善孝, 山下雅之, 山本悟, 塚田純一: トンネル無人計測システムの開発, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, 2021 (投稿中)

【筆者紹介】



山下 雅之 (やました まさゆき)
西松建設(株)
技術研究所
主席研究員



山本 悟 (やまもと さとる)
西松建設(株)
技術研究所 土木技術グループ
副課長



田口 毅 (たぐち たけし)
西松建設(株)
技術研究所 先端技術グループ
上席研究員