

ホイールローダとバックホウを用いたずり搬出作業の自動化システムの開発

Development of automated system for mucking using wheel loader and backhoe

本山 昇*

Sho Motoyama

瀬瀬 善孝**

Yoshitaka Koketsu

要 約

山岳トンネル工事では、人手不足や労働環境の過酷さから切羽作業の無人化が求められている。当社は2018年から山岳トンネル無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS』の開発を進めており、これまでに各種重機の遠隔操作技術の開発を中心に進めてきた。現在では、自動化へと開発を拡大させ、ずり搬出作業に用いるホイールローダとバックホウの自動化に注力しており、ホイールローダは切羽とクラッシャ間のずり運搬作業の自動化を、バックホウは走行と切羽作業の自動化を実現させた。これにより、重機オペレータ数を削減することが可能となり、作業の省人化による生産性向上の実現が期待される。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 山岳トンネル無人化・自動化施工システム概要
- § 3. 自動化技術の開発
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

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重機を使用する複雑な作業が行われるため属人化が進みやすく、将来的に熟練技能労働者の退職や若手入職者の減少による労働力不足も懸念されている。また、切羽における肌落ち災害や騒音、多湿等による過酷な労働環境でもあることから、作業員が切羽に近づく機会の削減（切羽作業の無人化）が求められている。こうした背景から、山岳トンネルの無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS (Tunnel Remote and automated Operation System, トンネルリモス)』（図—1、図—2）の開発を進めており、これまで重機の遠隔化を対象に開発を推進し、遠隔化した重機による複数の山岳トンネル現場で試行を重ねてきた。この結果、切羽から離れた安全な場所から

遠隔操作で作業できることが確認され、労働環境の改善と施工の安全性の向上が確認された。しかし、遠隔操作の際には、重機に搭載したカメラ映像をモニタで確認しながら操作するため、遠近感を把握しにくく、安定した作業の実施には操作の習熟が必要であることから、搭乗操作と比較して作業効率が低下する傾向も確認している。こうしたことから、オペレータの操作技量に左右されない作業の安定性向上と、オペレータの省人化による生産性向上を図るため、自動化技術の開発を進めている。

本稿ではずり搬出作業に用いるホイールローダとバックホウ、それぞれの自動化技術の開発状況について述べる。

§ 2. 山岳トンネル無人化・自動化施工システム概要

2-1 システム概要

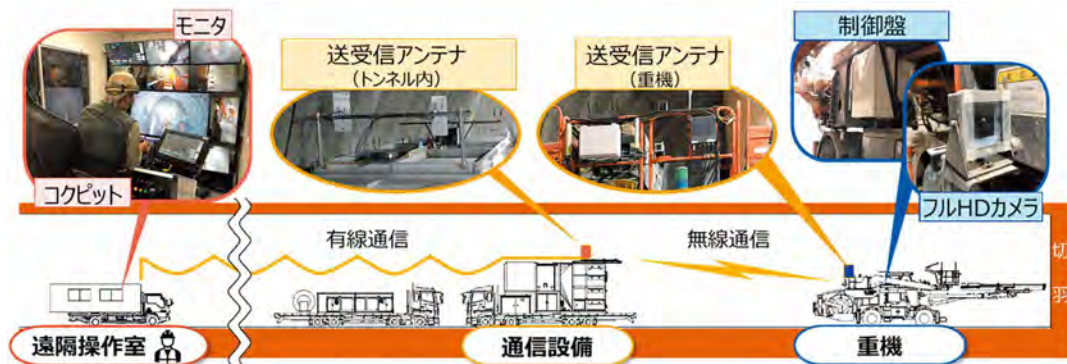
山岳トンネル無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS』は、山岳トンネル工事の掘削作業に使用する自由断面掘削機やドリルジャンボ、ずり運搬作業に使用するホイールローダや油圧ショベル（バックホウ、ブレーカ）、一次支保作業に使用する吹付機等の各種重機や設備の遠隔化、自動化を中心とした技術であり、坑内主要作業の無人化施工による安全性および生産性の向上を図っている。『Tunnel RemOS』では、①駐機場所から切羽までの重機の移動、②切羽における作業動作、③遠隔操作

* 技術研究所 先端技術グループ

** 技術研究所 土木技術グループ



図一1 Tunnel RemOS の構想



図一2 Tunnel RemOS のシステム基本構成

に必要な計測・ガイダンス3分野の要素技術で構成している¹⁾。これにより、将来的に複数の山岳トンネル現場の重機を一拠点から遠隔操作でき、また自動化によって、大幅な生産性向上の実現を目指している。

2-2 システム構成

(1) 遠隔操作室

遠隔操作室には、十数台のモニターやコクピットを設置した(図-3)。コクピットには、足元にペダル、手元にレバーや制御盤を設置しており、ここでの操作内容が室内のパソコンを介して操作信号として重機へ伝送されることで、無人の重機が稼働する仕組みである。なお、コクピットの下には電動式シリンダを設置しており、機体に設置した傾斜計の計測値に連動してシリンダを伸縮させることで、機体の傾斜や振動を再現している。これにより、走行中の傾きを把握して逸走やスタック等の防止を図っている。また、制御盤のボタンで設定を変更することで、1台のコクピットで複数の重機を操作することが可能である。このマルチオペレーションシステムにより、遠隔操作室に要するスペースや費用を削減している。



図一3 遠隔操作室

(2) 重機への設置機器

重機本体にはデータ処理装置を設置しており、遠隔操作室から受信した操作信号をもとに、電気信号等を用いて重機を操作する。また、複数のフルHDカメラも設置しており、機体周囲や切羽近傍の様子を遠隔操作室内で確認することが可能となっている。機体後方にはデブス

カメラを設置しており、AIによって一定の範囲内に人が検知された場合には、緊急停止する仕組みとした。これらの機器は後付けで設置できる仕様としており、重機メーカーや機種等の違いに左右されない汎用性の高い装置とした。また、通常の搭乗操作モードと遠隔操作モードは重機本体のスイッチで簡易に切り替えることができるため、現場状況に応じて、柔軟に使い分けることが可能である。

(3) 通信設備

遠隔操作室からの操作信号や重機からのカメラ映像、音声、機体の稼働状況等のデータは、坑内や重機に設置した通信設備を介して伝送される。切羽直近の坑内設備と重機に設置した送受信アンテナによって、切羽周辺では無線通信をおこない、送受信アンテナから遠隔操作室までの区間は有線接続を採用している。なお、現段階では遠隔操作室を坑内に配置しているが、LAN ケーブルや光ファイバケーブル等を用いて有線区間を坑外まで延長し、外部の通信回線へ接続することで長距離の遠隔操作も可能である。

無線通信の規格は、伝送するデータの種類ごとに適したものを選定しており、途切れがなく安定的に通信できることを重視して各無線機を採用している。

2-3 これまでの遠隔試行結果の概要

これまでに、約 10 箇所の山岳トンネル現場で遠隔操作技術の試行を行い、動作や効果の検証を行ってきた。また、2023 年には実大サイズ（幅 11m、高さ 7m、長さ 47m、断面積 66m²）の模擬トンネルを有する実験場である「N-フィールド」を栃木県那須塩原市に整備した。これによって、現場に近い環境での各種検証を集中的に実施し、技術開発の促進を図っている。

ホイールローダを対象とした遠隔操作技術の開発は、これまでに 2 箇所の現場で試行を実施し、運転席での搭乗操作と比較した作業効率率は平均で約 6～7 割であった。また、操作の習熟度が上がることで搭乗操作に近い作業時間で実施できることも確認している。

バックホウを対象とした開発では、ブレーカによるあ

たり取り・コンク作業の遠隔操作や、掘削形状をモニタリングするためのガイダンス技術の効果を過年度に確認している（図-4）。

§ 3. 自動化技術の開発

3-1 概要

山岳トンネルの切羽作業のうち、ずり搬出作業では複数の重機が稼働しており、将来的な労働力の不足に対応するためには、これらの重機の自動化による作業の省人化が必須であると考えられる。本開発では、ずりの搬出に連続ベルトコンベヤを用いるケースを想定して、切羽からクラッシャまでのずり運搬に用いられるホイールローダと、ずりの集積等に用いられるバックホウを自動化の対象としている（図-5）。これにより、複数の重機を従来よりも少ない人数で操作することによって、本作業の省人化による生産性向上が期待される。

今回開発したそれぞれの自動化技術は、いずれも過年度に開発された遠隔操作技術をベースにしている。遠隔操作中に遠隔操作モードから自動モードへ切り替えることで、自動制御用 PC から送られる操作信号を遠隔操作システムが受信することが可能となり、操作信号に従って自動制御が行われる。

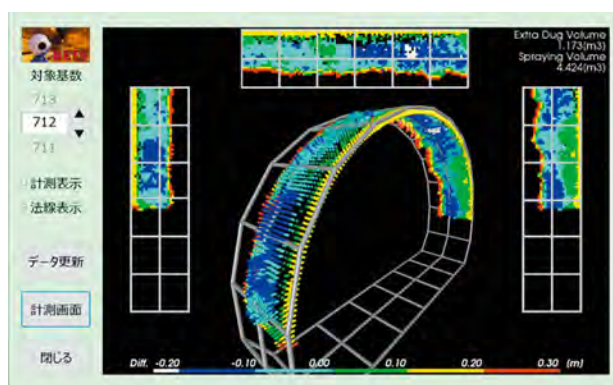


図-4 ブレーカのガイダンス技術
(あたりや余掘りを色分け表示)

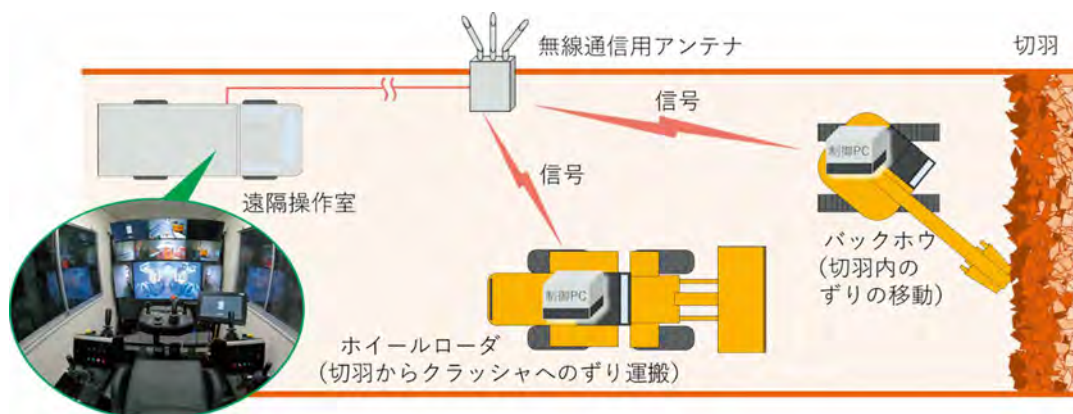


図-5 本開発で自動化したずり搬出作業の概要

3-2 ホイールローダ

(1) 搭載機器

重機の自動化には、重機の自己位置を取得する必要があるが、坑内ではGNSSによる測位は困難である。このため、ホイールローダに二次元LiDAR（Light Detection and Ranging）を搭載し、坑内の切羽面や側壁からの距離を計測することで相対的な自己位置を取得することとした（図-6）。また、遠隔操作室内のコクピットには、自動制御の開始操作や設定を行うためのタブレット端末を設置している。

(2) ずり搬出の一連動作の自動化

前述した二次元LiDARによる自己位置に加えて、遠隔操作システムから得られる走行速度や機体の姿勢情報等を用いて、ホイールローダによるずり搬出時の一連の動



図-6 二次元LiDARを搭載したホイールローダ

作を自動化した（図-7）²⁾。

切羽とクラッシャの約100m間において、自動走行する経路を、切羽の右、中央、左のように予め制御プログラム上で設定している。付属のタブレット端末を用いて走行経路を選択し、自動制御を開始することで、二次元LiDARは坑内での自己位置を取得し、併せて機体の姿勢情報等をもとに、選択された経路に追従するようにステアリング操作やアクセル、ブレーキ操作を自動で制御する（図-8、図-9、図-10）。

(3) 遠隔化バックホウとの同時操作の試行

ずり搬出作業は、ホイールローダに加えてバックホウを同時に使用する作業であることから、これら2台の重機を自動化することで、最大で2名の省人化が期待できる。一方で、いずれか1台の重機を自動化し、2台の重機を1名のオペレータで操作することで、1名の省人化を図ることができる。

そこで、遠隔操作のバックホウと、自動化したホイールローダを同時に使用したずり搬出作業の検証をN-フィールドで実施した³⁾（図-11）。検証の結果、1名のオペレータは、遠隔操作室のコクピットからバックホウを遠隔操作し、ずりのかき寄せや集積作業を行いつつ、自動化ホイールローダによるずり運搬を行うことで、2台の重機を同時に使用したずり搬出作業を行うことが可能であった。このことから、通常は2名のオペレータが必要な作業を、1名で行えることが確認された。



図-7 ずり搬出作業時のホイールローダの一連動作



図-8 自動化したホイールローダの動作イメージ

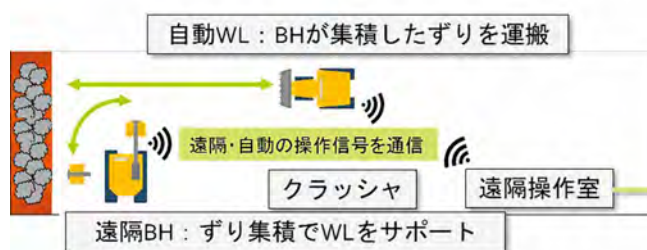


図ー9 自動化ホイールローダのずり回収状況



図ー10 自動化ホイールローダのずり投入状況

オペレータ1名で遠隔BHと自動WLの両方を操作



図ー11 遠隔バックホウと自動ホイールローダを使用した1名でのずり搬出イメージ

3-3 バックホウ

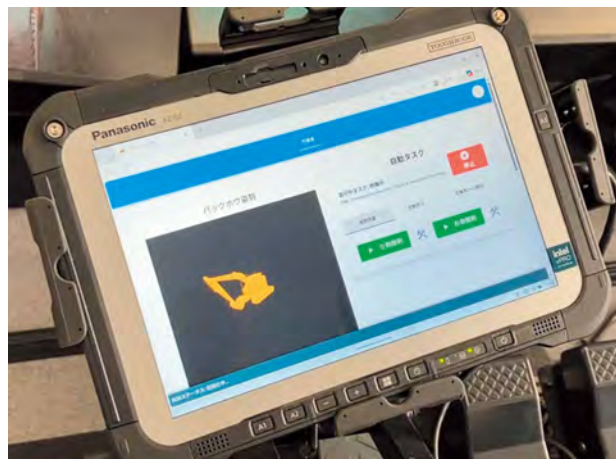
(1) 搭載機器

自動化のために、重機には制御用 PC、周囲の点群データを取得するための二次元・三次元 LiDAR、画像を取得するためのカメラ等を搭載した。また、遠隔操作のために搭載した傾斜計や、上部旋回体、ブーム、アーム、バケットの角度センサのデータも活用している。遠隔操作室内のコクピットには、ホイールローダと同様に自動制御の操作および設定を行うためのタブレット端末を設置した(図ー12)。

(2) 走行の自動化

走行に関しては、機体に搭載した複数の LiDAR の認識結果から SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 等を活用して、駐機場所と切羽の間の移動を自動化している⁴⁾。

具体的には、LiDAR で取得した点群データから周囲の壁面や物体を認識して坑内の地図を作成するとともに機体の位置を把握し、適切な走路を判断して左右のクローラの動作を制御することで、切羽や駐機場所等の目的地まで移動する。壁面や物体の周囲にバックホウの立入禁止区域や速度制限区域を設定することで余裕をもって衝突を回避する仕様であり、安全に走行することが可能である(図ー13)。



図ー12 自動制御用タブレット端末

(3) 切羽作業の自動化

切羽作業に関しては、ホイールローダによるずり運搬作業の支援を目的とした切羽付近のずりの集積作業を自動化した⁴⁾。

具体的には、例えばバックホウが切羽左側にある場合には、左側のずりの形状を LiDAR 等で把握して、バックホウとの相対位置で定義された掘削対象ゾーンの中から掘削箇所を自動で選定し、上部旋回体、ブーム、アーム、バケットの角度を制御することでずりをすくい上げ、右方向へ旋回し、事前に設定した位置でバケットを開いて

ずりを落とす。作業中には掘削対象となるずりの体積を点群データから算出しており、これらの動作はずりが一定量以下になるまで連続して実施される（図-14、図-15）。

その際、同時に作業しているホイールローダとの衝突を防止するため、LiDAR等で接近を検知した場合には稼働範囲を制限する仕組みとした。具体的には、バックホウが切羽に正対している場合は右方向の旋回を行わず、既に右方向に旋回している場合は、ずりを落とす動作中であっても左方向へ旋回して回避する（図-16）。また、作業中に機体がずりに乗り上げる等により傾斜した場合でも、ずりをすくえるようにブーム、アーム、バケットの角度を制御している。

(4) 試行状況や今後の予定

上記の自動化に関する開発や試行をN-フィールドで行い、概ね問題なく動作することを確認している。今後は実際の施工現場での試行を行い、実環境でも問題なく動作するか検証する。検証事項としては、例えば“不陸な路盤においても円滑に走行可能であるか”、“N-フィールドでは再現できない程度に高く積み上がったずりも掘削可能か”等が挙げられる。また、ホイールローダの接近を検知する際、現時点ではバックホウ側のシステムのみで判断を行っているが、将来的には連携のための通信を行い、ホイールローダ側からも接近の信号を受け取れるようにすることで、より安全にシステムを運用できることが期待される。

§ 4. おわりに

山岳トンネルのずり搬出作業で用いられるホイールローダとバックホウ、それぞれの自動化技術の開発について述べた。今後は、各自動化技術のブラッシュアップや連携機能の強化を行っていくことで、ずり搬出作業の省人化による生産性向上の実現を目指す。

参考文献

- 1) 山本悟，瀬瀬善孝：山岳トンネルにおける無人化施工への取組み，土木施工，Vol.64，No.4，pp.87-90，2023
- 2) 本山昇，田口毅，塚田純一：山岳トンネルにおけるホイールローダ自動運転システムの開発，第80回土木学会年次学術講演会，VI-1206，2025
- 3) 本山昇，田口毅，塚田純一：山岳トンネル工事のずり出しにおけるホイールローダ自動運転システムの開発，令和7年度建設施工と建設シンポジウム論文集・梗概集，pp.29-32，2025
- 4) 瀬瀬善孝，松本慶太，塚田純一：山岳トンネルのずり搬出作業におけるバックホウの自動化技術の開発，第80回土木学会年次学術講演会，VI-1207，2025

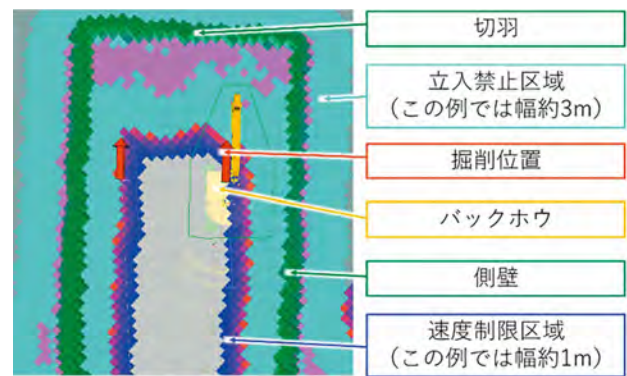


図-13 走行時のシミュレータ上の表示

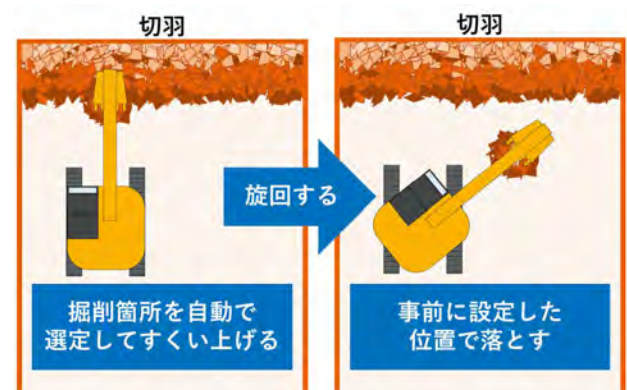


図-14 自動化した切羽作業の概要

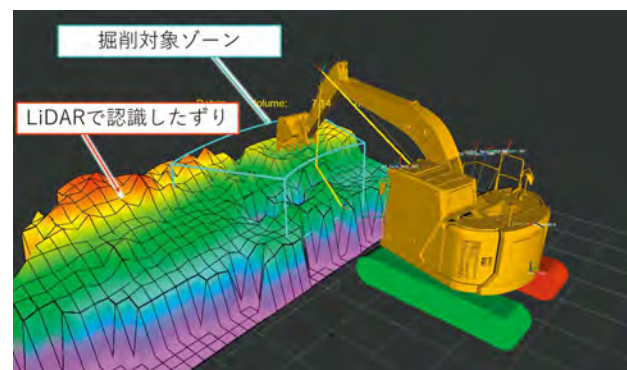


図-15 掘削時のシミュレータ上の表示

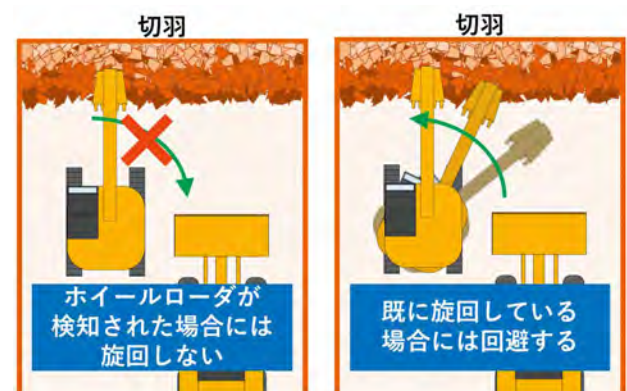


図-16 ホイールローダとの衝突回避