

7. 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

西松建設株式会社 技術研究所

○ 本山 昇

西松建設株式会社 技術研究所

田口 育

ジオマシンエンジニアリング株式会社

塚田 純一

1. はじめに

昨今の建設業においては、作業従事者の高齢化や、入職者の減少による人員不足が加速しており、将来にわたって、建設産業の持続性や生産性の低下等が懸念されている。山岳トンネル工事においては、坑内での過酷な環境下にて特殊技能を要する作業が未だ多いことから、現場の安全性確保も含めた、施工の省力化・省人化による生産性向上が急務とされている。こうした背景から筆者らは、山岳トンネルの無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS（トンネルリモス）』の開発を進めており、当該施工で使用する主要な建設機械の遠隔操作・自動化を中心とした、山岳トンネル施工のオートメーション化による生産性向上を図っている。

山岳トンネル施工の掘削サイクルの一つに、発破や機械掘削によって発生した掘削岩塊（以下、ずり）を坑外へ搬出する、ずり出し作業がある。ずり出し作業は、ホイールローダ単体によるずり出し搬送が中心であるものの、複数の建設機械が同時に作業する場面もあることから、一以上の建設機械を自動化することで、オペレータの省人化による生産性向上が期待できる。そこで筆者らは、ずり出し作業に使用する建設機械の中でも、オペレータの操作技量によって施工効率が左右されやすいホイールローダの自動化に着目し、当該機械の自動運転システムの開発を試みた。

本稿では、先行して開発したホイールローダの遠隔操作システムの概要および試行結果と、この度開発した自動運転システムの概要および試行結果について述べる。

2. ホイールローダによるずり出し作業

ずり出し作業（ベルトコンベヤ方式）では、ホイールローダによって切羽前方のずりをすくい取り、後方に位置する破碎機（以下、クラッシャ）まで運搬および投入を行う（図-1）。発破掘削では1回の発破につき、この一連の作業を数十回にわたって繰り返し実施する。このため、1回のずり運搬・投入に要する作業時間の短縮は、施工サイクルの短縮に直結することから、ホイールローダのオペレータには可能な限り高速な操作が求められる。一方で、ずりを確実にクラッシャへ投入するために、ホイールローダをクラッシャの側部へ接近させる繊細な操作も必要であることから、難度の高い作業であるとともに、オペレータの操作技量によって、施工効率が左右されやすい課題がある。

また、ずり出し作業では、掘削後の切羽面に残った浮き石を除去するためのブレーカと、ずりのかき寄せや集積を行う油圧ショベルを同時に使用する場面がある。このため、狭隘な切羽で複数の建設機械が同時に稼働することとなり、機械同士の接触による災害リスクがあると言える。

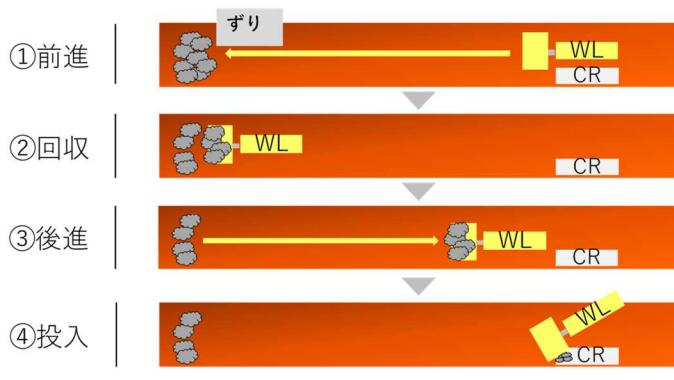


図-1 ホイールローダによるずり出しの一連動作

これらの課題に対して、ホイールローダのずり出し作業を自動化することで、オペレータの操作技量に依存しない安定した施工と安全性の向上を図るとともに、オペレータの省人化による生産性向上を図った。

3. ホイールローダ遠隔操作システムの開発

ホイールローダ自動運転システムの実現には、機体の制御部分を担う遠隔操作技術の構築が重要であると捉え、2019年度に遠隔操作システムの試作機を開発し、その後2号機となる実用機の開発および現場試行を実施した¹²⁾。実用機の開発では、試作機による現場試行で明らかとなつたシステムの操作性や耐久性の改良を図り、実現場でのずり出し作業へ試験的に導入し、その性能を検証した。以下、実用機のシステム概要等について述べる。

3.1 システムの概要

ホイールローダ遠隔操作システムは、通常のホイールローダに各種制御装置や通信装置等を搭載し、遠隔仕様に改造することで、機体より離れた安全な場所に位置するコクピットから遠隔操作することが可能である(写真-1)。また、ホイールローダには各種センサを搭載し、稼働時の走行ギア、走行速度、ステアリング角度やバケット稼働状況等をリアルタイムで計測およびモニタへ表示することが可能である。これにより、遠隔操作時の運転情報をオペレータに教示するとともに、後述する自動運転システムの機体制御において重要なデータとして寄与している。

3.2 機体の遠隔制御装置

ホイールローダのステアリング、ブレーキ・アクセルペダル、アーム・バケットレバーには、それぞれの遠隔制御装置を取り付けた(写真-2)。これらの装置を作動させることによって、オペレータがステアリング等を直接操作せずに、遠隔地から機体を操作することが可能である。また、先行して開発した試作機では、アーム・バケットレバーの操作において、操作ロッド等をレバーに外付けした装置を使用して、レバーを直接的に動かす機械的な

制御としていた。しかしながら、実際の搭乗操作との操作性の違いや、装置の構成部品数が増加することによる機械的故障のリスクが課題であった。これに対して実用機では、ホイールローダ内部の電子回路へ信号を伝送してレバーを動かす電気的な制御にすることで、より実機搭乗時に近い操作を可能にするとともに、装置の構成部品数の削減による耐久性の向上を図っている。

3.3 遠隔操作信号・カメラ映像の通信装置

ホイールローダの上部には、コクピットからの操作信号を伝送する無線機や、複数のカメラとその映像を伝送する無線機等を設置した(写真-3)。これらを使用し、ホイールローダの操作信号とカメラ映像の通信を低遅延で確立することで、高速かつ繊細な操作が要求されるホイールローダを正確に制御し、ずり出し作業を安定して実施することが可能である。



写真-3 ホイールローダ上部の搭載装置



写真-1 遠隔ホイールローダによるずり出し状況

3.4 現場でのシステム検証

遠隔操作システム(実用機)の性能を評価するため、現場でのずり出し施工効率を検証した。検証では、有人搭乗によるホイールローダのずり出し(從来工法)のサイクルタイムと、実用機によるオペレータ2名(A:ホイールローダの遠隔操作経験が浅い、B:遠隔操作経験が豊富)のサイクルタイムの比較を実施した(表-1)。検証の結果、2名のサイクルタイムは平均75秒~95秒であり、搭乗操作のサイクルタイムの平均54秒を基準とした場合、施工効率は約60%~70%前後であった。また、経験豊富なオペレータによる最短時間としては59秒、施工効率は約92%となり、一時的ではあるが、遠隔操作でも搭乗操作に近しい施工効率で稼働できることが確認された。また、複数回にわたって実施した現場試行において、システムに大きな動作不良や故障は発生しなかったことから、システムの耐久性向上も確認された。このことから、自動運転システムの制御部分を担う技術として、高い完成度であることが実証され、本システムを基盤とした、自動運転システムの開発を進めることとした。

4. ホイールローダ自動運転システムの開発

4.1 自動運転システムの概要

開発した自動運転システムは、前述したホイールローダ遠隔操作システム(実用機)を基幹とし、遠隔操作仕様に改造したホイールローダ本体に、複数のレーザースキャナを搭載した(写真-4)。スキャナより、坑内における機体周辺の側壁および前方の切羽面と、これらと相対的な自己位置を計測可能とした。本システムでは、ホイールローダが切羽とクラッシャ間を自動走行する経路を座標系によって、事前に設定している。レーザースキャナにより取得した自己位置に加えて、前述した機体の走行速度やステアリング角度等の情報に応じて、設定された自動走行経路に追従するよう、ステアリング制御・速度制御および所定位置でのバケット操作を自動的に作動させることで、ずり出しの一連作業を自動化した(図-2)。なお、システムの操作は、専用の操作端末(タブレット)を介して行う仕様とした。端末には制御プログラムの操作画

面を表示しており、オペレータの判断によって事前設定した自動走行経路を画面上で選択し、自動運転の開始・停止を操作可能とした。

4.2 システムの試行

本システムの試行を実験ヤードで実施した³⁾(写真-5、写真-6)。実験ヤードは、トンネル断面約66m²、トンネル幅11m×高さ7m×延長47mであり、トンネル内には、ずりやクラッシャおよび風管を設置し、実際の山岳トンネルの現場を再現した。また、トンネル内のクラッシャ周辺には、車載と同様のレーザースキャナを設置した。これにより、クラッシャ付近におけるホイールローダの自己位置・姿勢を補足計測し、クラッシャ接近時の動作の安定性を高めている。

表-1 施工効率の比較結果

	搭乗操作	オペレータA	オペレータB
WL 走行距離	約85m (ずり回収位置～クラッシャ位置間)		
サイクル タイム	平均	平均	平均
	54秒	95秒	75秒
施工効率	100%	57%	72%
			92%



写真-4 レーザースキャナを搭載した遠隔ホイールローダ



図-2 自動運転システムの概要図

本試行では、自動走行経路を切羽の左側・中央・右側の3つを設定し、各経路においてずり出しの一連動作を実施可能であるか検証した。その結果、設定した経路すべてにおいて、①前進走行・②ずりのすくい取り・③後進走行・④クラッシャへのずり投入、これら一連動作を自動で行うことが可能であることを確認した（写真-5・写真-6）。

4.3 遠隔操作の油圧ショベルとの連携

前述した通りずり出し作業では、ホイールローダに加えて、ブレーカや油圧ショベルが同時に稼働する場面がある。筆者らが取り組んでいる、山岳トンネルの無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS（トンネルリモス）』の開発においては、油圧ショベルの遠隔操作システムも構築している。そこで、油圧ショベルの遠隔操作システムと本システムを連携させた、ずり出し作業の検証を実験ヤードで実施した。検証の結果、遠隔操作の油圧ショベルのオペレータは、ずりのかき寄せや集積作業を行いながら、ホイールローダのずりすくい取りを自動で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名で実施できることが確認され、本システムが作業の省人化に寄与する技術であることを実証した。

5. おわりに

本システムの開発により、ホイールローダによるずり出しの自動運転を実現し、当該作業の大幅な省力化と、オペレータの操作技量に依存しない安定した施工を可能とした。また、遠隔操作の油圧ショベルとの同時稼働により、オペレータの省人化による生産性向上が期待できるものとなった。今後は、本システムの改良による動作の高速化や高機能化を図るとともに、並行して進めている油圧ショベルの自動化技術と組み合わせた、ずり出しのオートメーション化の実現を目指す。また、山岳トンネルの施工で使用するその他建設機械においても自動化を展開し、山岳トンネル無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS』の構築を進める。

参考文献

- 田口毅・本山昇・原圭太・角和樹・清水亮・塙田純一：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実施工への試験導入、第78回土木学会年次学術講演会講演概要集、VI-764、2023
- 本山昇・田口毅・山下雅之・原圭太：ホイールローダ遠隔操作システム（Tunnel RemOS-WL）の現場試行、西松建設技報48号、No.15、2025
- 本山昇・田口毅・塙田純一：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



写真-5 自動運転システムによるずりすくい取り状況



写真-6 自動運転システムによるずり投入状況

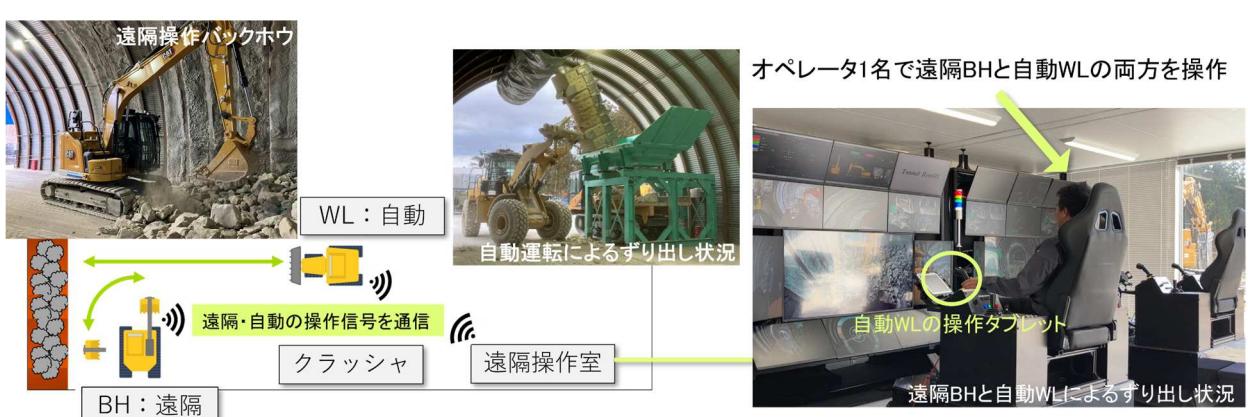


図-3 遠隔操作バックホウと自動ホイールローダによるずり出し概要