

ホイールローダ遠隔操作システム (Tunnel RemOS-WL) の開発 Development of Wheel Loader—Remote Operation System

田口 毅*	山下 雅之**
Takeshi Taguchi	Masayuki Yamashita
山本 悟***	原 圭太****
Satoru Yamamoto	Keita Hara

要 約

山岳トンネル工事の生産性向上を目指した建設機械の遠隔操作技術確立に向けた取り組みを進める中で、掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業において使用されるホイールローダの遠隔操作システムを開発した。ホイールローダは、トンネル掘削で使用される建設機械の中でも走行速度が速く、複雑なステアリングやアーム・バケット操作が必要であるため、遠隔操作を適用する建設機械としては難度高いと言えるが、この遠隔操作技術を確立させることで、他作業において使用される建設機械への応用が期待できる。本稿では、本システムの概要について述べるとともに、トンネル現場への適用試験およびローカル 5G 通信システムを適用した試験状況について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. システム概要
- § 3. 開発システム適用試験
- § 4. ローカル 5G 通信システム適用試験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

山岳トンネル工事においては坑内の過酷な環境下にて特殊技能を要する作業が多く、技能労働者の確保や高齢化対策が喫緊の課題となっている。このような課題に対して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、それを解決する方策の1つとしてトンネル掘削の無人化(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作業が必要とされており、自動化・無人化技術の導入が進んでいないのが現状である。

このような背景から、現在、トンネル施工に使用する個別の建設機械に対する遠隔操作技術を開発し、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。その中でトンネル掘削時

の施工サイクルの約 30%を占めるずり出し作業に着目し、その作業に使用されるホイールローダの遠隔操作システムの開発を進めた。とくにホイールローダによるずり運搬作業では狭隘な坑内での高速移動や複雑なバケット操作が必要であり、この遠隔操作技術を確立させることにより他作業で使用する建設機械への応用も期待できる。

本報告では、開発技術の概要を述べるとともに、システム(プロトタイプ)の適用試験の状況について紹介する。

§ 2. システム概要

2-1 システム構成

ホイールローダ遠隔操作システムは、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『安全走行システム』で構成される。また、遠隔操作システムと合わせて、ホイールローダの稼働状況をリアルタイムで把握し、オペレータに教示するための『モニタリングシステム』を搭載している。システム概要図を図-1に示すとともに、構成している各システムの概要を以下に示す。

2-2 遠隔操作システム

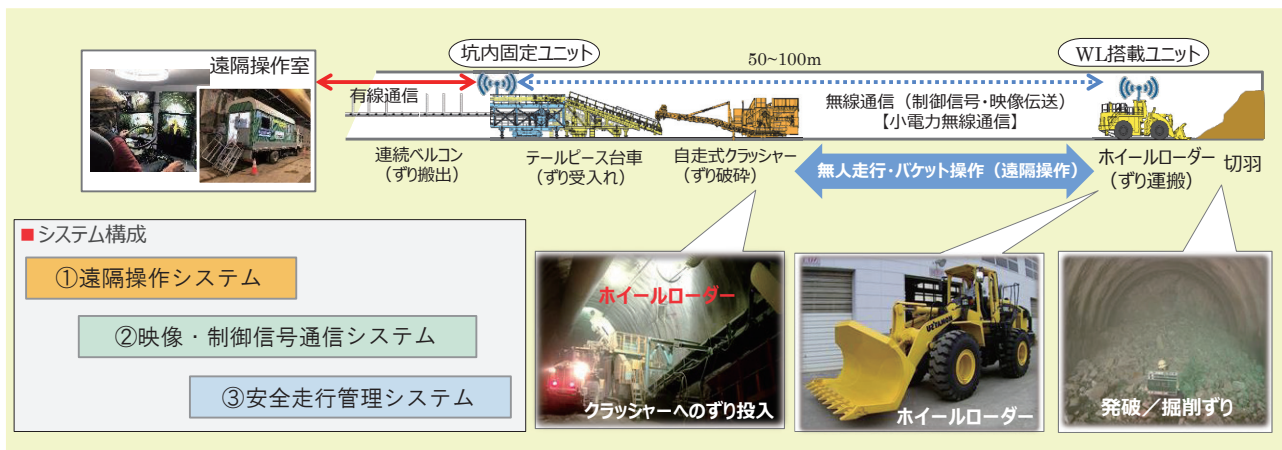
本システムは運転操作に必要な遠隔操作装置で構成される。ホイールローダには、ステアリングやペダル操作等無線受信により機械的に作動させる遠隔運転制御装

* 技術研究所先端技術グループ

** 技術研究所

*** 技術研究所土木技術グループ

**** 西日本(支)不破原トンネル(出)



図一 ホイールローダ遠隔操作システム概要図



写真一 遠隔運転制御装置



写真二 遠隔操作室・運転コクピット



写真三 ホイールローダ搭載ユニット設置状況

置が取り付けられている（写真一）。ステアリング操作については、ステアリングホイールに円形ガイドギアを固定し、このギアを電動モータで駆動させてステアリングの操作を図った。ブレーキやアクセル等のペダル操作については、ペダル背面から電動モータでチェーンを介してペダル操作する手法を導入した。アーム・バケット操作は、レバーに操作ロッドを設置し、その操作ロッドを電動モータにより往復運動させてレバーの操作を図った。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、実機と同じ仕様の操作コクピットおよび9画面モニタが設置されており、このモニタに表示される映像や走行データを見ながら操作コクピットにおいて走行・バケット操作を遠隔で行う（写真二）。さらに、運転時の実機振動や作動音をコクピットに伝える装置も備えており、実機運転とほぼ同じ環境下での遠隔運転が可能となっている。

2-3 映像・操作信号通信システム

(1) ホイールローダ（WL）搭載ユニット

ホイールローダ本体には、7台のFHDカメラと5台の送受信機が「ホイールローダ搭載ユニット」として設置

されている（写真三）。ホイールローダには、走行時や掘削ずりの積込み作業時において、大きな振動が発生するが、キャビン上部に強固なフレームを取り付け、このフレームにカメラや受信機を設置・固定することにより、耐振性の向上を図っている。

(2) 坑内固定ユニット

切羽後方50～100mに配置された連続ベルトコンベア先端設備（テールピース台車）およびその周辺には、3台の固定送受信機、複数の固定カメラおよび通信ケーブル変換（SDI/HDMI変換、HDMI・RS232C/光ファイバ変

換）BOX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－4）。車載カメラの映像信号は、WL搭載ユニットの送受信機から無線で坑内固定ユニットの送受信機へ伝送され、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。坑内に設置された固定カメラの映像信号も、この固定ユニットを介して遠隔操作室へ有線伝送される。操作信号は、映像信号と同様に、坑内固定ユニットおよびWL搭載ユニットの送受信機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。主要な映像通信設備の仕様を表－1に示す。

2-4 安全走行システム

無人運転時の安全を確保するため、ホイールローダの運転操作を自動的に緊急停止（ブレーキ作動・エンジン停止）させるシステムを設置した。これらの緊急停止は、複数の安全機構から構成されており、安全機構を多重化することにより、遠隔操作に対する安全性を確保した。ホイールローダ後部に、距離検出も可能な特殊カメラを設置し、このカメラ画像をAIを用いたシステムで高速解析することにより、車輛後方5m以内に接近した人のみを検出して即座に車輛を自動停止させる。また、遠隔操作の無線通信状況を常時監視することにより、通信が不通になるなど通信が不安定になった場合も、自動的に緊急停止が作動する。また、自動停止だけでなく、運転コクピットや携帯式のスイッチBOXからも強制的に作動させることができる。ホイールローダ周辺の安全状況や坑内設備、同時作業中の他重機との接近については、ホイールローダに設置された全周囲カメラ（または前方左右カメラ）による合成映像を遠隔操作室の操作コクピットにおいて確認することもできる。システムの設置状況および検知状況を写真－5に示す。

2-5 モニタリングシステム

遠隔操作システムと合わせて、ホイールローダの稼働状況をリアルタイムで把握し、オペレータに教示するためのシステムを設置した。ホイールローダ稼働時の走行速度、走行ギア、ステアリング角度やバケット稼働状況等の運転情報は、コクピットのモニタ（写真－6）に表示し、オペレータは、ホイールローダに搭載されたカメラ画像や坑内カメラの画像と合わせて、アーム、バケット角度といったホイールローダの姿勢をリアルタイムで確認しながら操作することが可能である。運転情報計測項目の一覧を表－2に示す。これらの情報のうち、走行速度、エンジン回転数、走行ギア等の情報については、ホイールローダの運転パネル映像を遠隔操作コクピットのモニタに直接表示させている。ステアリング角度やバケット稼働状況については、バケットやアーム各所に油圧センサや回転センサ、油量計を設置して、その計測データをもとに把握した。上述の運転情報や走行経路は数値データとして遠隔操作室に伝送されPCに保存されるが、

表－1 主要映像・通信設備の仕様

機 器	仕 様
映像・制御信号 伝送装置 (小電力無線)	フォーマット：HD-SDI/HDMI1.4（映像信号） RS-232/422（制御信号） 周波数：5 GHz 帯 無線 LAN：IEEE802.11 ac（W52/W56） 伝送遅延：95—140 msec（実測値）
カメラ	1/2.8 型 CMOS 有効画素：約 200 万
光ファイバ	4 芯 SC、CLコネクタ



写真－5 安全走行システム設置状況



写真－6 運転情報表示画面

表－2 運転情報計測項目

計測項目	計測方法	計測機器
バケット高さ	アーム角度、バケット角度	傾斜計他
バケット角度	バケット中継ピン角度	ポテンショメータ
ステアリング角度	アーティキュレート角度	回転計
ステアリング圧	ステアリングシリンダ圧	圧力計
サイドダンプ角度	ダンプシリンダストローク	流量計
リフト圧	リフトシリンダ圧	圧力計
バケット圧	バケットシリンダ圧	圧力計
走行位置	坑壁からの離隔距離	ラインスキャナ
走行速度	車輛本体モニタパネル	カメラ
回転数	車輛本体モニタパネル	カメラ
走行ギア	車輛本体モニタパネル	カメラ

運転パネルの映像情報についてもOCR機器を介して数値情報に変換し、データとして保存される。これらの数値データは、ホイールローダの走行・積み込み作業における車輛本体の位置・姿勢・動作状況をモニタリングしたもので、今後の自動・自律運転に向けた車輛制御の基礎データとして蓄積・活用する。



写真-7 屋外ヤードにおける遠隔操作試験状況

§3. 開発システム適用試験

3-1 屋外ヤード試験

トンネル現場へのシステム適用に先立ち、屋外ヤードにおける遠隔操作試験を実施した¹⁾（写真-7）。試験ヤードにはトンネル断面を模擬したフレームを1.5m間隔で組上げて約15m区間のトンネル空間を構築し、そこにクラッシャの代用として10tダンプを配置して仮想のホイールローダによるずり投入位置とした。さらに、模擬トンネル区間を含めて約50mのずり運搬走路を確保してその端部を仮想切羽とし、遠隔操作室は模擬トンネルから約50m離れた位置に設置した。試験では、 $\phi 0 \sim 80$ mm程度の再生碎石を掘削ずりとして仮想切羽の位置に積み上げ、ホイールローダによる掘削ずりの積み込みや10tダンプへのずり運搬・投入を遠隔操作によって繰り返し行った。

試験当初は遠隔操作装置の作動や映像・通信状況の不具合が発生したが、試験を進める過程でシステム改良や車載カメラ・通信機器の配置等の調整を繰り返し行った結果、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。

3-2 現場適用試験

屋外ヤードの試験により遠隔操作の基本システムの動作性が確認できたことから、続いてトンネル現場への試験導入を開始した²⁾。今回導入したトンネルは、北海道

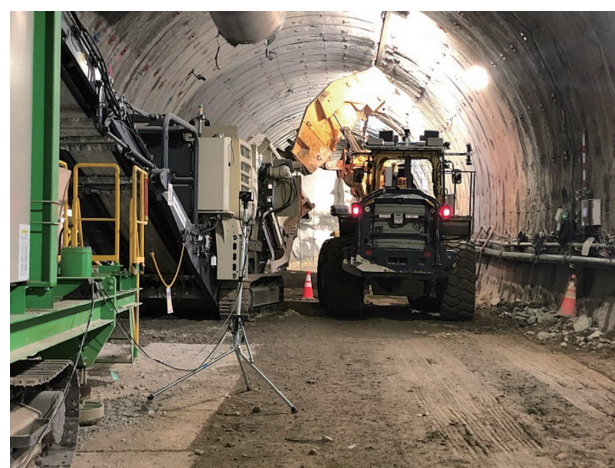


写真-8 トンネル坑内における遠隔操作試験状況

表-3 運転効率比較

	平均ずり運搬 往復距離 (m)	平均往復時間 (sec)	平均作業速度 (m/sec)
実施工 (有人運転)	66	35	1.9
遠隔操作 (無人運転)	57	45	1.3

開発局小樽開発建設部発注の「一般国道5号 仁木町外新稲穂トンネルR側仁木工区工事」である。本試験では図-1で示したような配置で坑内にシステムを設置し、切羽から約200m後方に配置した遠隔操作室において切羽～クラッシャ間のホイールローダによるずり運搬作業の遠隔操作を実施した。システムの調整・改良を続け

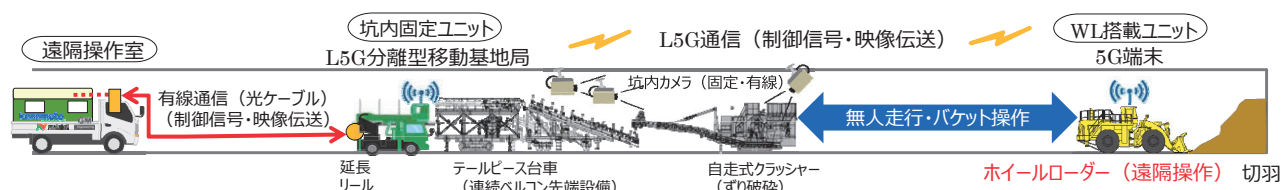


図-2 ローカル 5G 通信による遠隔操作システム概要図

ながら写真-8に示すようなホイールローダの坑内無人走行やずり投入時のバケット操作といった基本動作試験を実施したが、この試験により坑内においても基本的な遠隔運転動作に問題がないことが確認された。システム導入初期段階の運転試験においては、表-3に示すように遠隔操作によるずり運搬作業の効率が実施時（有人運転）の70%程度であった。これについては、遠隔操作に合わせた運転方法（走行経路など）の確立や運転オペレータの経験の蓄積、さらなる操作システムの改良等を継続的に行うことで、遠隔操作による作業効率のさらなる改善が可能であると考えている。

§4. ローカル 5G 通信システム適用試験

近年、次世代移動通信として5G通信システムの普及が進んでおり、携帯電話通信事業者による基地局整備、通信エリアの拡大が図られているとともに、通信機器も、これまでの4G/LTEと5Gの両システムに対応した端末のシェアも急速に拡大している。

「ローカル 5G (L5G)」は、携帯電話通信事業者が提供している「5G」と同様の通信環境を、ユーザのニーズに合わせて、個別に構築できる通信システムで、施工現場や工場・農場といったユーザ自身が管理する特定の作業場所や建屋において、自営で5G通信環境を構築することにより、局所的なエリアで5Gネットワークを運用・利用することができる。

この通信システムやデバイスを用いてワイレス化、デジタル化を図ることにより、労働生産性の向上を図るべく、製造業や農業・医療機関・サービス業といった各種分野で、実証試験などの様々な取組みも行われている。建設業においても5GやL5G通信システムを用いた検証や現場導入も進められている。そこで、今回構築したホイールローダ遠隔操作システムの改良および発展に向けた新たな取組みとして、L5G通信システムを採用し、現場での適用試験を実施した。

なお、L5G通信システムの導入・試験については、国土交通省「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」の採用、助成を受け推進したものである。

4-1 通信システム概要

ホイールローダ遠隔操作システムを構成する映像・制御信号通信システムでは、これまで通信設備として小電



写真-9 ホイールローダ搭載ユニット設置状況 (L5G)

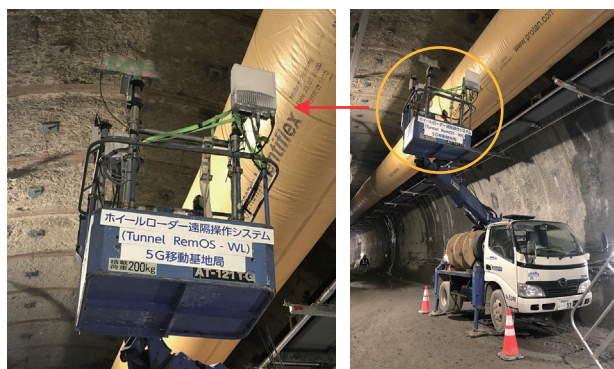


写真-10 坑内固定ユニット設置状況 (L5G)

力無線を使用していたが、今回の試験では、通信システムの機器類をL5G (28 GHz帯)の機器に入替えてシステムを再構築した。システムの概要を図-2に示す。

(1) ホイールローダ搭載ユニット

本ユニットでは、ホイールローダに7台の車載カメラ (FHDカメラ) および2台の送受信用のL5G端末ルータ (CPE: Customer Premises Equipment) が設置されている。端末の設置状況を写真-9に示す。

(2) 坑内固定ユニット (分離型移動基地局)

本ユニットは、2種の送受信アンテナ (L5G, BWA) を高所作業車に設置したL5G分離型移動基地局および複数の固定カメラ、信号変換 (SDI/HDMI変換, HDMI) BOX, 光ケーブル中継BOX等で構成され、これらを切羽後方に配置した。この中で、固定カメラの通信については小電力無線を使用した場合と同様の機器・方法を用いた。坑内固定ユニット (L5G分離型移動基地局・BWA一体型基地局) の設置状況を写真-10に示す。

(3) 遠隔操作室

遠隔操作室内には、L5G 通信の無線基地局（BBU）を設置するとともに、L5G 通信による映像出力・保存や遠隔操作システム制御信号伝送に必要な機器類も併せて設置した。L5G 関連機器の設置状況を写真-11 に示す。

4-2 現場適用試験（L5G）

前回の現場適用試験と同様、「一般国道 5 号 仁木町外新稲穂トンネル R 側仁木工区工事」の現場において検証試験を行った。本試験では図-2 で示したような配置で、切羽から約 50～200 m 後方に L5G 基地局を搭載した高所作業車を設置し、遠隔操作室において切羽～クラッシャ間のホイールローダによるずり運搬作業の遠隔操作を実施した。

L5G 通信システムは、「高速・大容量」「超低遅延」「多接続」が特徴とされており、今回の試験においても、理論値程の実測値は確認できなかったが、通信性能の高さは確認できた。小電力無線を使用した通信システムは、FHD カメラ 1 台に対して無線機が 1 台必要となるが、L5G の場合では、ホイールローダに搭載した 5 台の FHD カメラの映像信号を 1 台の CPE で送信することが可能であることを確認した。小電力無線では、同一エリアで使用できるチャンネル数も限られるが、L5G では、1 基の基地局で複数台の端末を接続できることから、トンネル坑内で稼働する様々な建設機械の遠隔操作システムを運用することが可能となる。今回適用した 28 GHz 帯の L5G 通信システムは、基地局と L5G 端末（CPE）の見通しがない状況においても、直ちに通信が切れるようなことはなかったが、転送速度が低下する事象が確認されたことから、基地局と L5G 端末の見通しを確保することが重要であることが把握できた。今回の適用試験において、運転操作に大きく影響するような映像伝送遅延や通信上の不具合は生じず、狭隘な坑内においても有人運転に近い高速走行（時速 20 km/h 程度）や掘削ずりの積み込みやクラッシャ投入時の微妙なバケット操作を遠隔で実施可能であることを確認できた。

§5. まとめ

トンネル掘削サイクルの多くを占めるずり出し作業の無人化を目指して、ホイールローダ遠隔操作システムを開発した。現在、適用試験を実施しながらシステム改良・調整を重ねており、早期の実掘削作業への適用を目指している。

また、トンネル坑内において使用するドリルジャンボ、自由断面掘削機、油圧ショベル（ブレーカ）、吹付け機といった建設機械にも遠隔操作システムを導入するべ

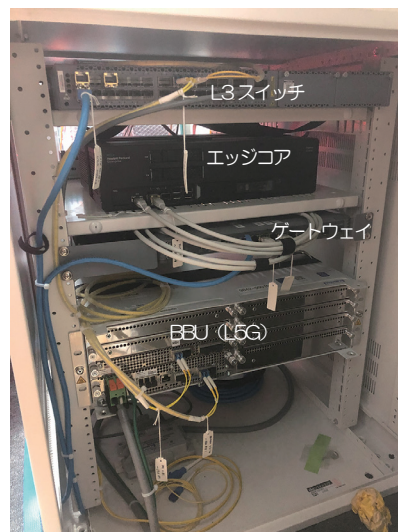


写真-11 L5G 機器設置状況（遠隔操作室内）

く、山岳トンネル無人化施工システム「Tunnel RomOS (Tunnel Remote Operation System)」の構築を進めている^{3,4)}。

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図り、山岳トンネル施工のさらなる労働生産性向上に役立てていきたいと考えている。今後も、各建機の遠隔操作技術の早期確立を目指すとともに、自動化・自律化に向けた取組みを進めていく。

謝辞。 本システムの開発にあたり、(株)カナモト、ジオマシンエンジニアリング(株)、(有)浅草ギ研の皆様に多大なご協力を頂いた。また、システムの適用試験および L5G 試験については、札幌支店新稲穂トンネル出張所に多大なご支援を頂いた。深く感謝するとともに、ここに厚く御礼申し上げます。

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、第 76 回土木学会年次学術講演会、VI-916, 2021.
- 3) 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.
- 4) 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.