

ヘッドマウントディスプレイによる重機遠隔操作システムの開発

Development of a heavy machinery remote control system using a head-mounted display

キーワード

山岳トンネル、遠隔操作、ヘッドマウントディスプレイ、ドリルジャンボ

京免 繼彦*, 中田 範俊**, 吉田 直人*
江田 正敏*

研究概要

国土交通省は、2024年にi-construction2.0を策定し、建設現場のオートメーション化へ向けた取り組みが本格的に行われ始めている。また、技術提案においては、令和7年度より「自動化に資する技術開発（費用は変更対象）」のテーマが挙げられ、工事への本適用に向けた取り組みが行われている。昨今、生成AIは進化が速く、生成AI技術を利用した「ロボット化の実現」は現実味を帯び始めている。そこで、筆者らは、重機の自動化へ資する技術開発として、「重機遠隔操作システム」を進めている。2023年度より、トンネル施工を対象とし、「ドリルジャンボ」の無線遠隔に挑戦した。本技術の特徴としては、ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）を利用した「視覚支援システム」である。これまで、複数カメラ+ディスプレイによる視覚支援を行っていたことに対し、HMDを用いることで実際の運転席で操作している感覚で遠隔操作が可能となる。本稿では、そのHMDによる「ドリルジャンボ」の無線遠隔操作取り組みについて報告する。

1 はじめに

「ヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD）」は、エンターテイメントでの利用を目的とした機器であるが、近年、様々な業界より注目されている機器である。**写真-1**にHMDの例を示す。建設業界において、従来から行われている遠隔システムの視覚支援の方式は、複数のカメラと大型ディスプレイを利用した方式が基本であり、この方式の場合、遠隔操作を行う側に大型の資機材が必要となる（**写真-2**参照）。また、得られる映像データが2次元であるため、操作を十分に行えるようになるまでに相当のスキルが必要となる。そこで、筆者らは、HMDを利用するることにより、これらの課題を解決させることを目標として、2023年度より開発を進めてきた。本報では、山岳トンネル掘削用ドリルジャンボを対象として実施してきたその結果、および今後の展開について報告する。



写真-1 ヘッドマウントディスプレイ

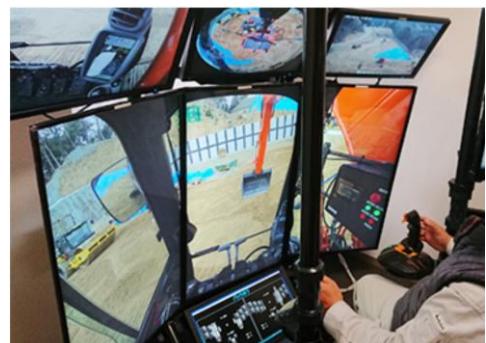


写真-2 従来型遠隔操作の例

2 システム概要

2.1 開発の経緯

本技術開発は、2023年度から検討を開始し、四国にて施

* 技術センターICT推進部, ** 土木事業本部 技術推進部

工を行っていた実トンネル工事において実証試験を行った。システムの内容は、以下の A, B を組み合わせたものである。

A : 機械操作の遠隔（重機メーカ主体で開発）

B : 視覚支援の遠隔（当社主体で開発）

実証実験は、下記に示したその1～その3まで完了し、2025年9月現在、その4を試行中である。経緯を以下にまとめる。

その1 : 2024年6月

「A, B」ともに有線遠隔操作 → 成功

その2 : 2024年8月

「B」視覚支援のみ無線 → 成功

その3 : 2024年10月

「A, B」ともに無線遠隔操作 → 成功

（2024年11月特許取得、新聞発表）

遠隔操作システムは「有線」からスタートし、その3に示したとおり、2024年10月に「無線（Wi-Fi）」による遠隔操作を実現することに成功した。

2.2 システム構成

ドリルジャンボ本体の遠隔操作は、古河ロックドリル（株）が担当した。当初は、実績がある「有線」による遠隔操作にて実証を行った。写真-3は、ドリルジャンボの運転席にある操作ユニットを、切羽から150m 後方に設置した遠隔操作室（写真-4参照）に移設した状況である。なお、ドリルジャンボは「有線=LANケーブル」3本で接続している。

視覚支援は、ドリルジャンボに設置した2種類のカメラと、HMD のパススルーカメラを組み合わせたシステムとしている。以下に、システムの構成を示す。

① 魚眼レンズカメラ（写真-5参照）

切羽の仮想現実の映像をヘッドトラッキング機能により360度見渡すことができる。これにより映像の向き（画角）、拡大縮小、映像の切り替え操作が不要となるだけでなく、違和感のない距離感で実際のドリルジャンボの操作室にいる感覚で操作できることが特徴である。

② 拡大縮小用 PTZ カメラ（図-1参照）

操作時に切羽の部分拡大が可能なように PTZ（パン・チルト・ズーム）カメラを設置している。

③ パススルーカメラ

HMD のパススルー（自身の目で確認できる映像を、カメラを通じて HMD 上に映す機能）を利用して、ドリルジャンボ操作ユニットを表示する。

これら3つの映像を合成し、HMD 上に表示することにより、HMD に映し出された映像を確認することでドリルジャンボを遠隔操作することが可能となる。システム構成図を図-2に示す。図-3は PTZ カメラにより、見たい場所を拡大縮小する機能である。首を振って向きを決めて専用ステイックで拡大縮小する操作を実現している。



写真-3 ドリルジャンボ操作ユニット



写真-4 遠隔操作室



写真-5 ジャンボ運転席上部カメラ



図-1 HMD 表示イメージ

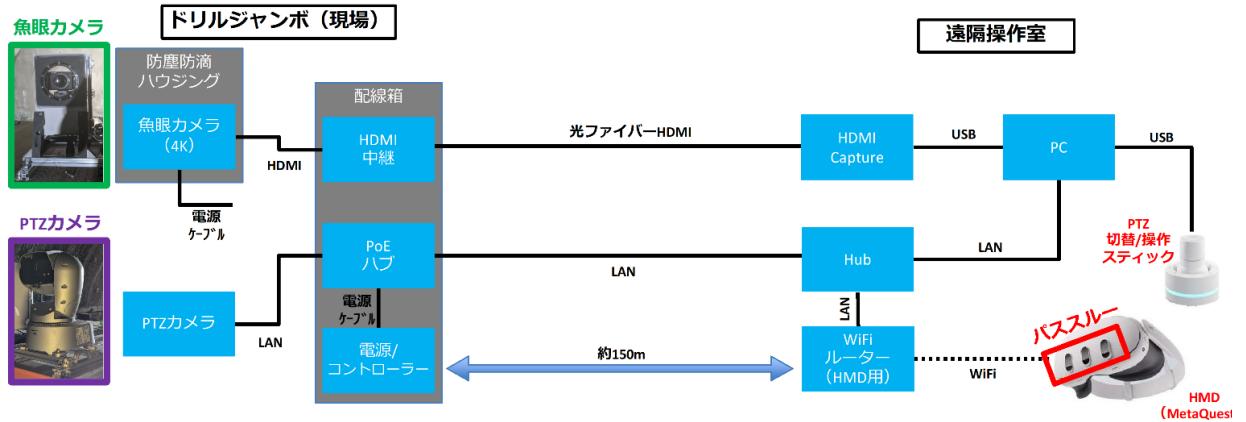


図-2 システム構成図（有線接続時）



図-3 PTZによる拡大縮小

3 実証結果

実証試験では、実際の切羽オペレータによる「フルオート発破穿孔作業」を行った。実証試験を行った実トンネルでは、「フルオートドリルジャンボ」を採用しており、計画した「発破パターン」をシステムに組み込み、スタートボタンを押すことで、3台のアームが自動で100孔程度の穿孔を行うシステムとなっている。操作は、手元のモニターすべてで実施することができる。さらに、1台の操作ユニットで、3台のアームのすべてをコントロールすることができる。HMD を装着した状態においても、上記操作を行うことが十分に可能であった。また、HMD 越しに切羽穿孔作業を手動で行うことも可能であった。

なお、フルオートでの操作の場合においても、孔詰りの解除などは手動での操作が必須であるため、手動による遠隔操作を行えたことは大きなポイントであったといえる。オペレータの評価については、操作性を含め、概ね良好であった（写真-6, 7参照）が、「切羽の音が聞こえない」、「アームが陰になり、見えない部分がある」といった課題があり、課題を解決するため、その2検証時において、「音」に関する対策としてマイクスピーカーを用意し対処した。

4 無線化

4.1 無線システム

遠隔操作を行うにあたり、有線（ケーブル3本）では、実



写真-6 オペレータによる操作



写真-7 オペレータによる手動操作

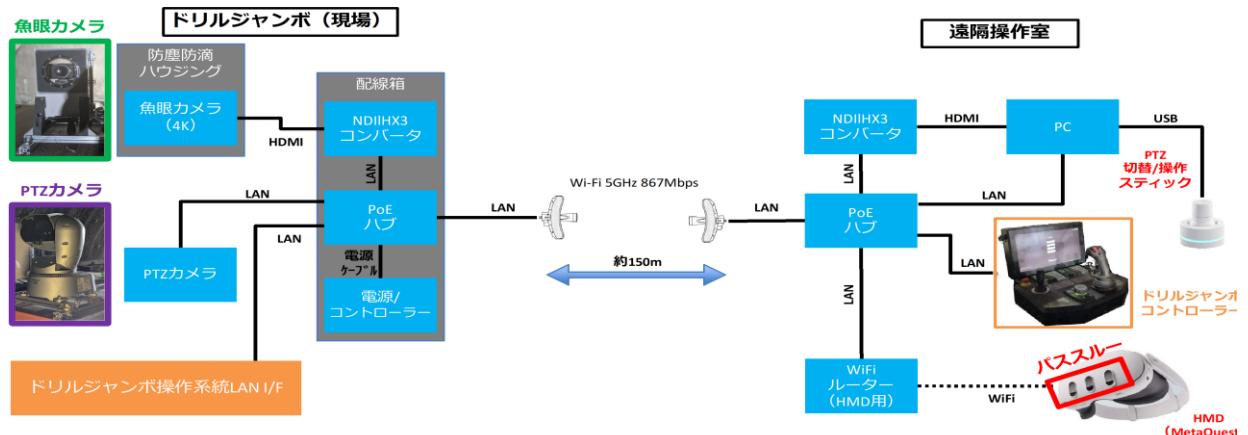


図-4 システム構成図（無線接続時）

際の施工時における手間が大きく、遠隔化のメリットがなくなるため、無線化を行うことが必須と考えた。そこで、実証その2、およびその3では無線化を試行した。無線化については、「専用 Wi-Fi ネットワーク」を利用することで実現した。

写真-8はジャンボ側の指向性アンテナである。実証実験のため、アンテナを機外に設置したが、現場導入時は機体にセットする形となる。図-4は無線化時におけるシステム構成図である。なお、ドリルジャンボの遠隔操作システムは「LAN接続」であったため、視覚支援のシステムと簡単に共有可能であった。

4.2 無線による遅延

無線化した場合、映像の遅延が懸念される。他社のシステム開発においても、その点が最大リスクと考えられており、一般的には、「0.5秒以内」とされている。本システムにおける遅延を計測した結果、魚眼レンズカメラ、PTZ カメラでそれぞれ0.5秒、0.2秒であった。操作を実際に行ったオペレータより、この程度の遅延であれば、問題なくドリルジャンボを遠隔操作することができるとの評価であった。今回、実証に利用したシステムは、初期導入機材であり、遅延を低減する手段は他にあることから、今後、さらなる遅延短縮の検証を行っていく計画としている（写真-9参照）。

5 今後の計画

2023年より開発を進め、現在、「HMD ジャンボの無線遠隔システム」の基本部分を構築することができ、HMD へ3画面投影するシステムについては特許出願中である。今後、本技術をブラッシュアップし、システムを改良していくことを計画している。また、本技術については、他重機への展開が可能と考えている。そこで、現在、明かりの工事現場において、後付け無線遠隔システムと開発したHMD 無線遠隔システムを組み合わせた実証実験を行っており、施工ロボット時代に向けて、開発を強力に進めていく（写真-10参照）。



写真-8 ジャンボ側アンテナ



写真-9 遅延計測状況



写真-10 HMD による重機無線遠隔操作