ドリルジャンボの遠隔化・自動化に関する取り組み
Initiative on Remoteization and Automation of Drilling Jumbo

綴綱　善孝*　　辻岡　高志*
Yoshitaka Koketsu　　Takashi Tsujioka
種田　智憲**　　岡村　貴彦**
Tomonori Taneda　　Takahiko Okamura

要　約

当社では，将来的な労働力不足に対応するために山岳トンネルで用いられる各種重機の無人化・自動化施工システム『Tunnel RemOS』の構築を進めている．今回，施工中の山岳トンネル現場において全自動ドリルジャンボによる自動削孔の適用や無線遠隔操作の試行を実施し，動作性を確認するとともに運用にあたっての課題を見出した．今後も取り組みを継続していき，切羽作業の無人化の実現を目指す．

目　次

§1. はじめに
§2. 概要
§3. 自動削孔の適用
§4. 無線遠隔操作の試行
§5. おわりに

§1. はじめに

建設業では，ベテラン技術者の引退や若手入職者の減少によって，将来的な施工品質の低下や労働力の不足が懸念されている．また，山岳トンネル工事では切羽における肌落ち災害がたびたび発生しており，作業員が切羽に立ち入る機会の削減（切羽作業の無人化）が求められている．しかし，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機械を使用する複雑な作業が必要とされているため，無人化技術の開発や導入が進んでいないのが現状である．

そのような背景から当社では山岳トンネルの各種施工重機を対象とした無人化・自動化技術『Tunnel RemOS（Tunnel Remote and automated Operation System，トンネルリモス）』の構築を進めており，複数の重機のうち本稿ではドリルジャンボに関する取り組みを紹介する．具体的には，全自動ドリルジャンボを用いた自動削孔やドリルジャンボ遠隔操作システム『Tunnel RemOS-Jumbo』に関して，試行状況や見出した課題について述べる．

* 技術研究所土木技術グループ
** 北日本（支）新幹線磐石（出）

§2. 概要

2—1 『Tunnel RemOS』の概要

当社では，今後の取り組みのひとつに「施工の自動化に向けた技術導入・技術開発，自律化（AI）施工技術開発」を掲げている．その一環として，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，一次支保作業に使用する吹付機等の各機械・設備を遠隔や自動で操作するための技術開発を進めており，2027 年度までの坑内主要作業の無人化施工技術の実用化を目指している．これらの技術を『Tunnel RemOS』（**図—1**）と総称しており，①駐機場所から作業場所までの重機の移動（走行），②作業場所における動作（作業），③遠隔操作に必要な計測・ガイダンスの 3 分野の要素技術で構成している[1)]．将来的には本技術を活用して複数のトンネル現場の特殊重機を一拠点から遠隔操作することで，大幅な生産性向上が期待される．

図—1 『Tunnel RemOS』の概要

2—2　工事概要

今回のドリルジャンボに関する取り組みは，当社施工中の北海道新幹線，磐石トンネル（北）他工事にて実施した．本工事は，北海道新幹線新青森起点 184 km165 m～190 km880 m（延長 6,715 m）の磐石トンネルのうち中央の工区であるトンネル区間 185 km750 m～188 km900 m の本坑（延長 3,150 m）と横坑（延長 450 m）を新設するものであり，概要は以下の通りである．

工事件名：北海道新幹線，磐石トンネル（北）他
工事場所：北海道二海郡八雲町地内
発 注 者：(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構　北海道新幹線建設局
請 負 者：西松・淺沼・中山・岸本　特定建設工事共同企業体
工　　期：平成 29 年 10 月 4 日～令和 6 年 10 月 21 日
請負金額：10,878,120 千円（税抜き）第 14 回変更
工事内容：本坑掘削・支保工・覆工・インバート工・地下排水工・路盤工　L＝3,150 m
横坑掘削　L＝450 m
本坑設計掘削断面積　73.5 m^2
発破掘削方式，連続ベルトコンベヤ方式
補助ベンチ付き全断面工法

2—3　全自動ドリルジャンボ

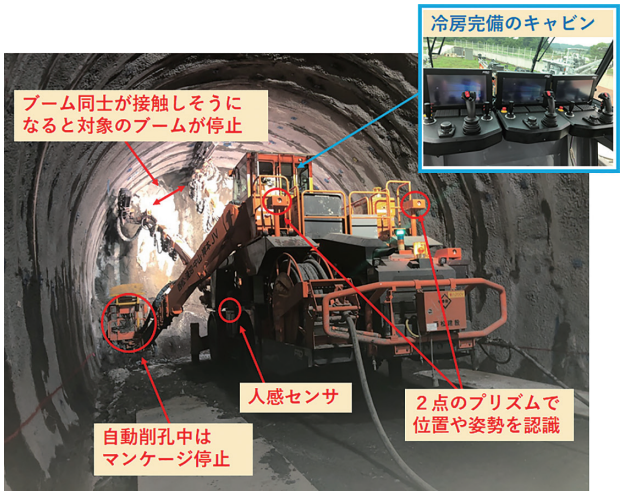
本工事では，古河ロックドリル株式会社製の全自動ドリルジャンボ『J32 RX-Hi ROBOROCK®』を導入している（**図—2**）．機体の後部に搭載されている 2 点のプリズムを坑内に常設した自動追尾式トータルステーションで自動測量することで機体の位置や姿勢が認識され，さらにシリンダの伸縮量や関節の角度を基に各ブーム，ガイドセル，ビットの位置が三次元的に把握される．これにより，従来のドリルジャンボと同様の“手動削孔”に加え，事前に設定した発破パターンに従って孔口の位置や削孔の角度・深さをコンピュータ制御する“自動削孔”が可能となっている．自動削孔機能を活用して削孔の精度向上を図ることで，余掘量の低減による生産性向上が期待される．それとともに，装薬孔の孔尻を揃えることが発破後の切羽面の平滑化につながり，切羽の安定性向上や浮石の発生抑制による肌落ち災害の防止が期待される（**図—3**）．なお，自動削孔中にブームやガイドセル同士が設定した距離よりも接近すると，干渉防止のために削孔が中断される．

§3.　自動削孔の適用

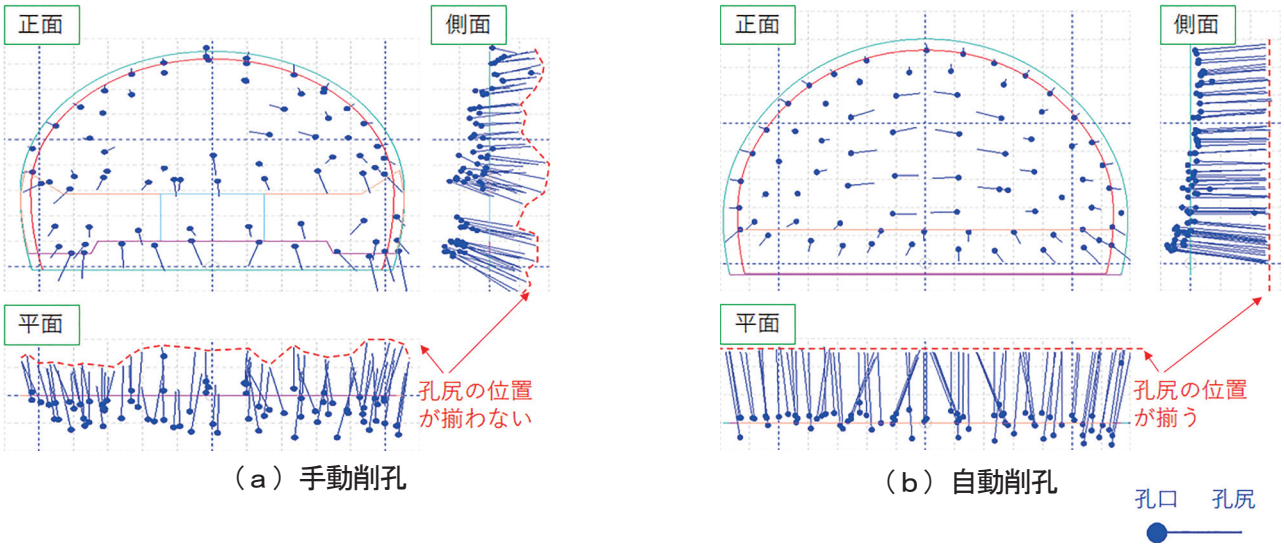
本工事では装薬孔の自動削孔を行った．その結果，孔尻の位置が揃うことで発破後の切羽は平滑になったものの（**図—4**），運用にあたっての課題が見出された．

3—1　ガイドセルと鋼製支保工の接触の防止

余掘りを低減するためにはトンネルの輪郭に沿って外



図—2　全自動ドリルジャンボ



図—3　削孔実績の例

周孔を精度良く削孔する必要があるが，支保工設置区間においては，システムで認識されている設計上の鋼製支保工の位置と建て込み誤差が生じた実際の位置に乖離が生じるため，ガイドセルが鋼製支保工に接触して自動削孔を行えなくなる恐れがある．

これを解決するための方法として，エレクター付き吹付機に対して全自動ドリルジャンボと同様にプリズムを搭載して機体の位置・姿勢やブームの位置を認識するガイダンスシステムを導入し，鋼製支保工の建て込み誤差を軽減することが考えられる．併せて，過年度に開発した掘削形状モニタリングシステム[2] を活用する等の方法でアタリを確実に除去することによって，アタリが発生することで建て込み位置がずれることや，アタリ取り作業のやり直しで生じた作業の遅れを挽回するために建て込み作業が粗雑になることを防ぐことも重要であると考えられる．また，3D スキャナや LiDAR で実際の建て込み位置を把握して発破パターンを修正することで，ビットやガイドセルの接触を防ぐことも可能であると考えられる．

3—2　ブーム同士の干渉の防止

自動削孔の最中に目詰まりが生じた場合には，各ブームの削孔のタイミングがずれてブーム同士が接近し，干渉防止のために自動削孔が中断される恐れがある．

本工事では目詰まりの発生頻度を低くするためにフィード圧や打撃圧の調整を頻繁に行ったが，将来的には削岩機の各種油圧，削孔速度，水量等のデータから AI で設定を最適化することが可能になれば，更なる自動化が成されるとともにブーム同士の干渉も軽減されることが期待される．

図—4　自動削孔で孔尻を揃えて発破した切羽

§4.　無線遠隔操作の試行

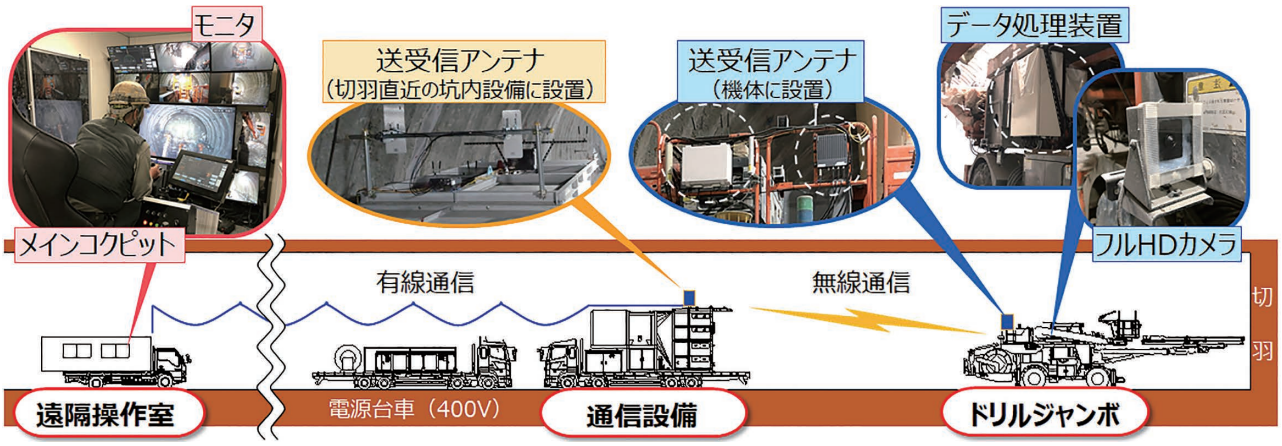
本工事で試行を行ったドリルジャンボ遠隔操作システム『Tunnel RemOS-Jumbo』（**図—5**）は，『Tunnel RemOS』の構成技術のひとつであり，切羽から離れた位置に配置した遠隔操作室からドリルジャンボを遠隔操作することで削孔作業中の切羽への立ち入りを削減することを目的としている．

4—1　システム構成

(1)　遠隔操作室

遠隔操作室は 12 m^2 程度の広さであり，メインとサブの 2 台のコクピットを設置している（**図—6**）．メインコクピットには，前方に 12 台のモニタ，正面に実機と同じ削孔用コンソールやタッチパネル，足元にペダル，手元に制御盤を設置しており，ドリルジャンボの走行と削孔作業を遠隔操作することができる．サブコクピットにはモニタと削孔用コンソールを設置しており，メインコクピットと合わせて 2 名体制で削孔作業を遠隔操作することができる．各コクピットの操作内容は，室内の PC を介して操作信号としてドリルジャンボへ伝送される．

なお，メインコクピットの下には 3 本の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各シリンダを伸縮させて機体の傾斜や振動を再現することで，走行中に傾きを把握して逸走やスタック等を防ぐことや，削孔作業中に振動を把握して手応えを感じることを可能にしている（**図—7**）．



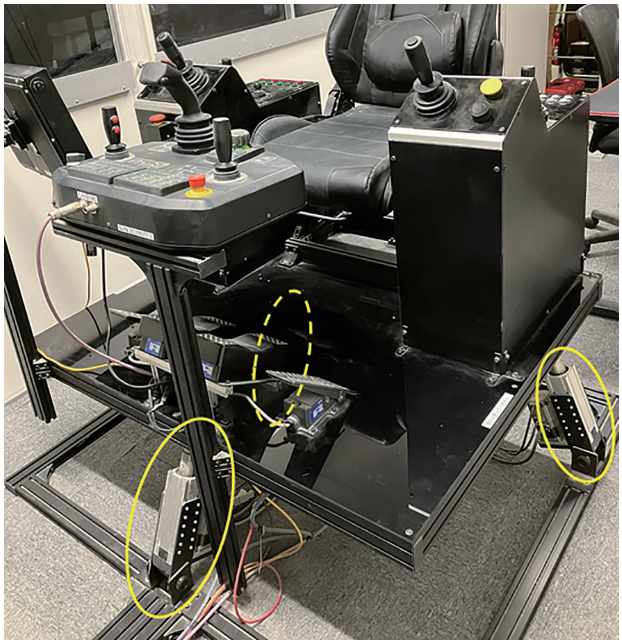
図—5　ドリルジャンボ遠隔操作システム『Tunnel RemOS-Jumbo』の構成

図―6　遠隔操作室

また，制御盤のボタンで設定を変更することで，共通の設備を用いてドリルジャンボ以外の重機も遠隔操作することが可能となっている．この機能は，将来的に複数の重機を遠隔化・自動化することを見据えて実装したものである．

(2)　ドリルジャンボへの設置機器

機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基に，電気信号でドリルジャンボを操作する．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．機体後方には左右 2 台のデプスカメラを設置しており，後進時に 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ている．



図―7　メインコクピットの電動式シリンダ

(3)　通信設備

遠隔操作室からの操作信号やドリルジャンボからのカメラ映像，音声，機体の稼働状況，削孔データ等のデータは，坑内やドリルジャンボに設置した通信設備を介して伝送される．ドリルジャンボの稼働範囲で無線通信を行うために切羽直近の坑内設備とドリルジャンボに送受信アンテナを設置し，遠隔操作室から送受信アンテナまでの区間のみで有線通信を採用している．なお，現段階ではシステムの試行中のため遠隔操作室を坑内に配置しているが，将来的には光ケーブル等で通信区間を延長して坑外や現場外から遠隔操作を行うことを想定している．

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いる．具体的には，カメラ映像や音声の通信においては，遠隔操作室で遅延なく確認できることを重視して V バンド帯高速無線（60 GHz）や小電力無線（2.4/5.0 GHz）を採用している．一方，操作信号や機体の稼働状況，削孔データ等のデータの通信においては，途切れがなく安定的に通信できることを重視して 4.9 GHz 帯長距離無線 LAN を採用している．

各種データは坑内ネットワークを通して坑外にある詰所のデータ保存用 PC に蓄積されるため，地山評価データや将来的に自律施工の検討に活用するための施工データの取得が可能となっている．

4―2　システムの特長

(1)　走行や削孔作業の遠隔化

エンジンの始動，切羽までの移動，作業位置での停止，アウトリガの張り出しや収納，ケーブルリールの操作等の走行に関する全ての動作を遠隔操作することが可能である．また，削孔作業は，全自動ドリルジャンボの機能である手動削孔と自動削孔の両方を遠隔操作することが

可能である．走行や削孔作業が遠隔化されて切羽への立ち入りが削減されることにより，安全性の向上や労働環境の改善が期待される．

⑵　リアルタイム地山評価

削孔の進捗や削岩機の稼働データ等のデータは自動的に収集され，各孔における掘削体積比エネルギーや岩盤強度等の地山評価値が算出される．掘削体積比エネルギーは単位体積の地山を削孔するために費やされた打撃エネルギーであり，式⑴に従って毎秒算出される．岩盤強度は経験式⑵によって求められる．

$$E_{dnf} = (E_i \times bpm \times T_{rod}) / (V \times A) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (E_{dnf}/C)^2 \quad (2)$$

ここで，

E_{dnf}　：掘削体積比エネルギー（J/cm^3）

E_i　：削岩機のピストンの各打撃で発生した弾性波エネルギー（J/blow）

bpm：打撃数（blow/s）

T_{rod}　：ロッド中の弾性波エネルギーの伝達係数（%）

V　：削孔速度（cm/s）

A　：孔の断面積（cm^2）

σ_c　：岩盤強度（MPa）

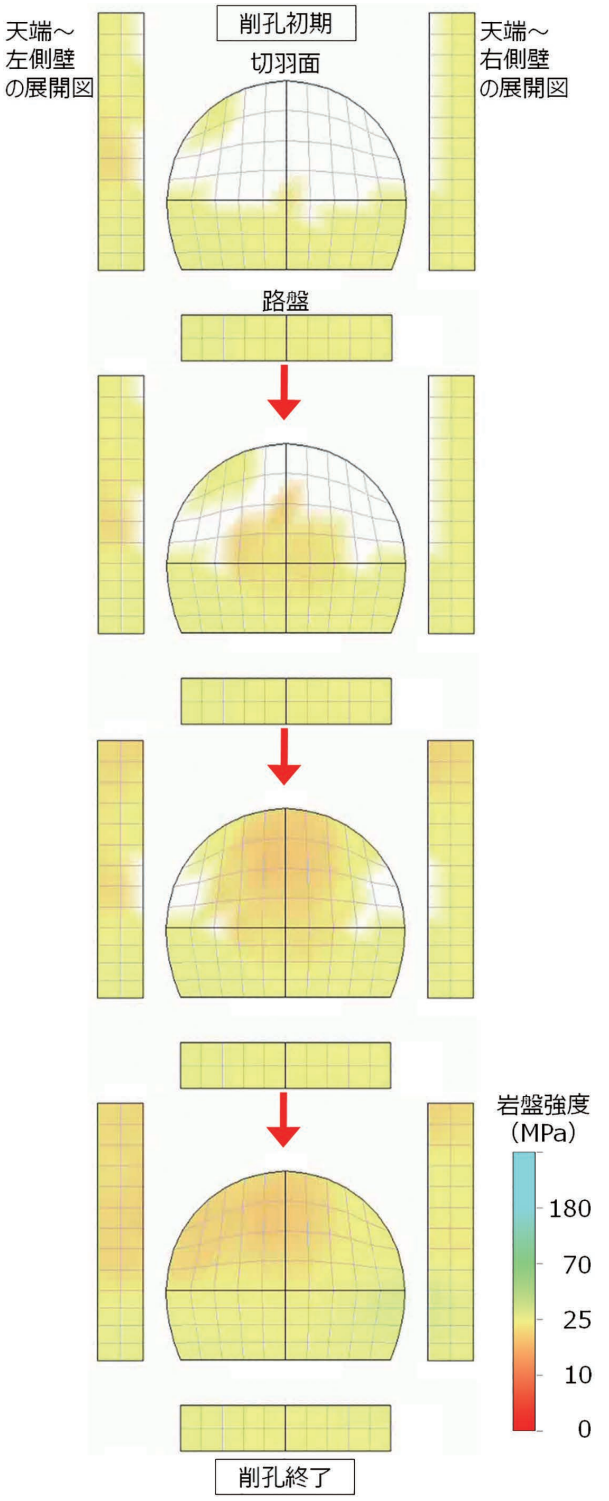
C　：定数（MPa$^{0.5}$，30～40 程度）

さらに，逆距離加重法を用いてトンネル周辺地山全体における地山評価値の分布が計算され，切羽面，側壁，路盤における結果がモニタに表示される（**図―8**）．削孔初期で地山評価がまだ行われていない領域は白色，削孔が行われた領域は評価値に応じて暖色～寒色で色分け表示される．これらの計算は削孔の最中に自動で行われ，モニタ上の表示は 10 秒間隔で更新される．定量的かつリアルタイムな地山評価システムを活用することで，客観的な地山評価や危険箇所の早期把握が可能である．

4―3　試行結果

本システムを用いてドリルジャンボの走行や削孔作業の無線遠隔操作を試行した結果，施工に影響を及ぼす通信上の不具合は生じず，ドリルジャンボによる一連の施工動作を無線で遠隔操作可能であることを確認することができた．

今回の遠隔操作と普段の運転席での操作による削孔作業の時間の比較を**表―1** に示す．装薬孔の作業時間は 1 断面分の上半の削孔に要した時間を示している．運転席での操作時には手動削孔を実施したのに対し，遠隔操作時には基本的に自動削孔を実施し，目詰まり等で自動削孔を行えない場合には手動削孔に切り替えた．遠隔操作の結果，自動削孔の機能が問題なく動作し，普段の運転席での操作と同程度の時間で作業を実施可能であること



図―8　リアルタイム地山評価の更新例

表―1　削孔作業に要した時間の比較

作業内容	運転席操作		遠隔操作
装薬孔			
上半削孔	29分 58秒	+6%	31分 54秒
ロックボルト孔			
ビット位置調整	48秒	+189%	2分 19秒
削孔	1分 35秒	-6%	1分 30秒

※装薬孔は1断面分，ロックボルト孔は1孔当たりの平均

が確認された．

ロックボルトの作業時間は，複数の孔を手動削孔した際にビットの位置調整と削孔自体に要した１孔当たりの平均の時間を示している．遠隔操作の結果，削孔自体に要した時間は普段の運転席での操作と同程度であったが，ビットの位置調整には多くの時間を要した．その原因として，削孔自体は実機と同じコンソールを用いることで普段と同程度の作業時間で操作できたのに対し，ブームを動かす際にはカメラ映像だけで奥行き方向の距離感を把握することが難しいためブームやガイドセル同士が干渉しないように慎重に操作を行ったことが考えられる．また，手動削孔時にビットを孔口に合わせる際に，ブームやガイドセルに遮蔽されてビットの着岩を確認できない場合があることも一因であると考えられる．

4―4　今後の課題

⑴　カメラ映像の改善

ブームやガイドセルに遮蔽されて孔口の状況を確認できない場合があることから，今後はカメラの追加や設置位置の再検討を行う予定である．切羽の各所にある孔口の状況を確認するためには，PTZ カメラや自動追尾型カメラが有効であると考えられる．

⑵　ブームの干渉防止

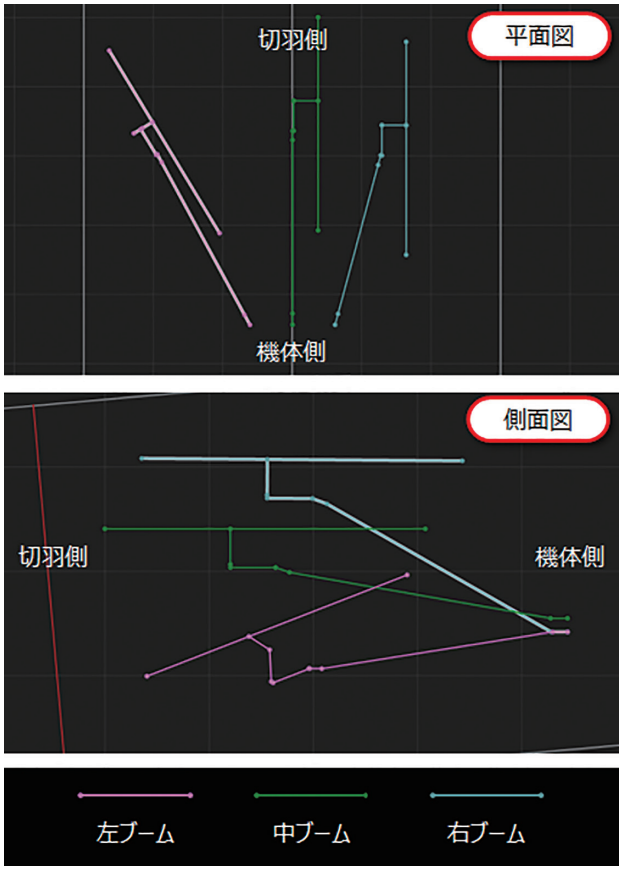
特にロックボルト孔を削孔する際には，各ガイドセルの軸が交わるため干渉が起こりやすい．遠隔操作室内においても干渉の確認を可能にするために，シリンダの伸縮量や関節の角度から各ブームの位置関係を算出し，モニタに表示するガイダンス機能の開発を進めている（**図―9**）．本機能を活用することで，カメラ映像だけでは把握しにくい奥行き方向の距離感を補えることが期待されるため，今後は試行や改良を行う予定である．

⑶　将来的な取り組み

今回は短期的に試行を実施したが，今後は長期的な運用を見据えた検証が必要であると考えられる．具体的には，発破振動や粉じん等に対する各種装置の耐久性の検証や，有線通信区間における配線の延伸方法の確立等が挙げられる．また，今回遠隔操作を試行した走行や削孔作業に加えて装薬やロックボルト挿入等の作業の遠隔化も必須であるものの，システムを全て自社で開発するためには相当の労力や期間を要することから，既に機械化されている他社技術を当社で無線遠隔化するという選択肢も視野に入れて導入を検討する．併せて，ドリルジャンボと同様に他重機の遠隔化や自動化にも取り組んでいく．

§5.　おわりに

今回，施工中の山岳トンネル現場へドリルジャンボの自動削孔や無線遠隔操作の技術を適用した．その結果，動作性を確認できたとともに，運用にあたっての課題が見出された．今後もドリルジャンボを含めた各種施工重機に関する取り組みを継続し，切羽作業の無人化の実現を目指す．



図―9　ブーム位置関係のガイダンス

謝辞．自動削孔の適用にあたっては古河ロックドリル株式会社，無線遠隔操作の試行にあたっては新幹線磐石出張所および共同開発社（ジオマシンエンジニアリング株式会社，古河ロックドリル株式会社，株式会社カナモト）にご協力を頂いた．関係者の皆様に深く感謝申し上げます．

参考文献

1）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.

2）山本悟，山下雅之，石垣純一，岡竜：高速 3D スキャナを用いた掘削形状モニタリングシステムの開発，西松建設技報，Vol. 44，No. 11, 2021.