

山岳トンネルデジタルツインプラットフォームの構築

Construction of a digital twin platform for mountain tunnel construction

山本 悟*

Satoru Yamamoto

瀬戸 善孝*

Yoshitaka Koketsu

本山 昇**

Sho Motoyama

要 約

山岳トンネル工事では、切羽崩落・突発湧水などの災害リスク、過酷な労働環境、人手不足などの深刻な課題が存在する。また、広範囲にわたる複数工種が同時進行する山岳トンネル工事において、少ない現場技術者で施工管理を行うには限界があった。

このような課題に対応するため、重機の位置・姿勢・稼働状況、環境データ、設備稼働状況、作業員のバイタルデータなどをリアルタイムに統合し、現場全体を俯瞰的に管理可能な「山岳トンネルデジタルツインプラットフォーム」を構築した。本プラットフォームは、①バーチャル空間への現場再現、②IoTを活用したダッシュボード機能、③生成AIによる監視・分析機能、④重機・作業員の位置表示による安全管理、の4機能を統合し、トンネル工事の効率化・安全性向上・生産性向上を実現するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. システム概要
- § 3. 各機能の詳細
- § 4. 現場導入事例（N-フィールド）
- § 5. システムの特長と効果
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

山岳トンネル工事では、地質条件の不確実性に起因する切羽崩落や突発大量湧水、狭隘な空間内での大型建設機械と作業員の輻輳作業による衝突・巻き込みなどの災害発生リスクが常に存在する。加えて、騒音・振動・粉塵・高温多湿などの過酷な労働環境、高齢化や若手入職者減少による人手不足が深刻な問題となっている。

従来、広範囲にわたって複数の工種が同時に進行する山岳トンネル工事において、少ない現場技術者で現場全体の施工管理を行うには限界があり、AIやIoT技術を活用した効率的な安全管理・工程管理・材料管理等が強く求められていた。

このような背景から、当社ではトンネル工事の無人

化・自動化施工システム「Tunnel RemOS」¹⁾の開発を推進し、遠隔操作による安全性・生産性向上に注力してきた。その開発の中で、現場全体の状況をリアルタイムに一元的に把握・管理するとともに、将来的にTunnel RemOSを含めた山岳トンネル工事の自動化に向けた統合プラットフォームが必要不可欠であると判断した。

そこで、重機の位置・姿勢・稼働状況、環境データ、設備稼働状況、作業員のバイタルデータなどをリアルタイムに統合し、現場全体を俯瞰的に管理可能な「山岳トンネルデジタルツインプラットフォーム」（以下、本プラットフォーム）を構築した²⁾。本稿では、本プラットフォームの概要・各機能の詳細・現場導入事例・特長と効果について報告する。

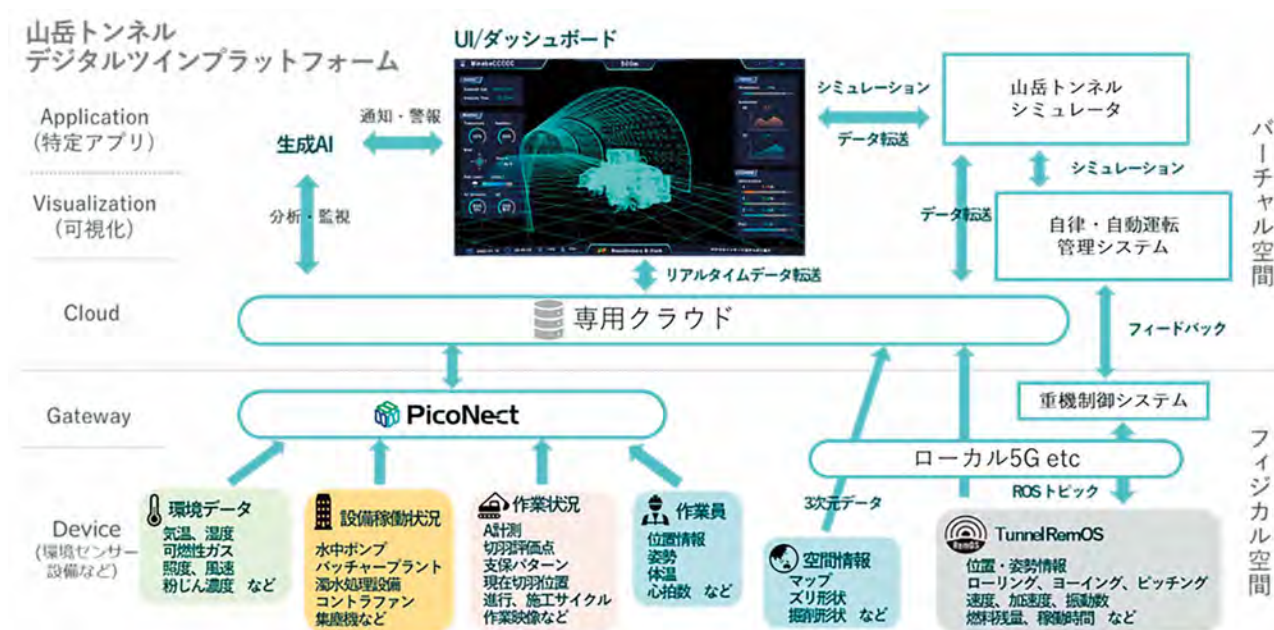
§ 2. システム概要

本プラットフォームは、フィジカル空間（現場）で取得した各種データを、IoTゲートウェイを介して専用クラウドにリアルタイムに収集し、バーチャル空間上で統合・可視化するシステムである（図-1）。「Tunnel RemOS」で得られる重機の位置・姿勢・走行速度などのROS（Robot Operating System）データと、坑内環境・設備稼働・作業員バイタルなど20種類以上のセンサデータを統合し、現場全体を遠隔地からリアルタイムに把握できる点が最大の特徴である。

従来の山岳トンネル工事では、現場技術者が坑内を直

* 技術研究所 土木技術グループ

** 技術研究所 先端技術グループ



図一1 山岳トンネルデジタルツインプラットフォーム構成図

表一1 本プラットフォームの主要機能

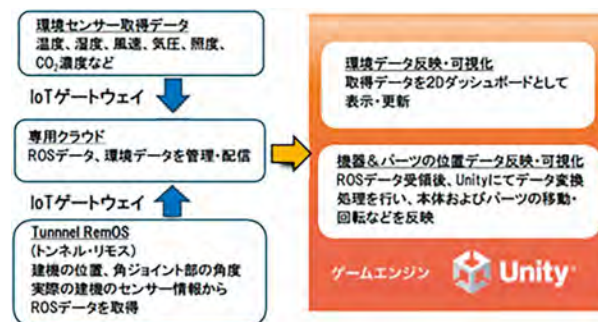
機能	概要
① バーチャル空間再現	重機 ROS データをゲームエンジンで変換し、仮想空間上に 3 次元映像としてリアルタイム表示（遅延約 1 秒以内）
② ダッシュボード	環境・設備・バイタル等 20 種超のセンサデータを一元的に可視化・管理し、任意のデータを配置可能
③ AI 監視・分析	生成 AI がクラウドデータを常時監視し、異常検知時にリアルタイムで通知・警報を発信、現場管理を自動化
④ 安全管理	重機・作業員の位置情報をリアルタイム表示し、近接時に警報を発して接触災害を防止

接巡回して安全確認・進捗管理・材料確認を行うことが標準的な施工管理手法であった。しかし、トンネル延長が長大化するほど巡回に要する時間と労力は増大し、管理の漏れや遅れが生じやすくなるという構造的な問題があった。本プラットフォームはこの課題を根本的に解決するものであり、現場のあらゆる状態をデジタル空間上にリアルタイムで再現することで、遠隔地からでも現場全体を一元的に把握・管理できる環境を提供する。

現場側では、「Tunnel RemOS」搭載の遠隔操作重機から ROS データを取得するとともに、坑内に設置した各種センサから環境データ・設備稼働データ・作業員位置・バイタルデータ等を収集する。これらのデータは IoT ゲートウェイ (PicoNect³⁾) を介して現場クラウドに集約されたのち、専用クラウドにリアルタイムにアップロードされる。バーチャル空間 (クラウド) 側では、収集したデータをゲームエンジン (Unity) によって処理し、バーチャル空間上に現場全体を 3 次元映像としてリアルタイムに再現するとともに、各種センサデータを統合ダッシュボードとして可視化する (図-2)。さらに、生成 AI がクラウド上のデータを常時監視・分析し、異常を検知した場合は自動で通知・警報を発信する。

通信インフラについては、トンネル坑内では一般に電波が遮蔽されるため、ICT施工に不可欠な通信ネットワ

ークを確保することが難しい。本システムでは、無線通信機器とIoTシステムのゲートウェイ機能を一体化したPicoNectを組み込んだシステム構成とすることで、この問題を解決している。PicoNectはローカル5G、IOWN、Starlinkなどあらゆる通信規格に対応しており、現場の通信環境に応じて柔軟に選択・組み合わせることができる。また、国土交通省データプラットフォームやPLATEAUともSDK・APIで連携可能である。本プラットフォームは主に表1の4つの機能で構成される。



図一2 Unity によるデータ処理フロー



図ー3 山岳トンネルデジタルツインダッシュボード

§ 3. 各機能の詳細

3-1 重機稼働状況の仮想空間上への再現

「Tunnel RemOS」で取得した建設機械の位置・姿勢・走行速度などの ROS データを、ゲームエンジンを用いて変換処理し、3D モデル化した重機本体やパーツに反映することで、仮想空間上において建設機械の移動・回転などの動きを高品質なリアルタイム 3D グラフィックスとして再現する（図ー3）。データ取得から仮想空間上での表示までの遅延は約 1 秒以内であり、リアルタイムに坑内作業を俯瞰的に管理することが可能である²⁾。

画面表示は「俯瞰視点」「運転席視点」「追従視点」「切羽側視点」等への切り替えが可能であり、実際の現場ではカメラ設置が困難な視点も含め、様々な角度から現場状況を把握できる（図ー4）。

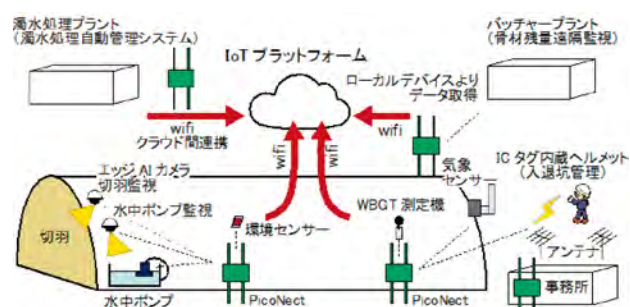


図ー4 デジタルツイン表示例（切羽側）

3-2 IoT ダッシュボード機能

坑内環境（気温・湿度・照度・CO₂・WBGT 値）、作業員のバイタルデータ（心拍数・体温）、重機の稼働状況、濁水処理設備の放流水の pH、濁度、パッチャープラントの資材残量（セメント・骨材など）をはじめ、現状では 20 種類以上のセンサと連携し、各種施工管理データをリアルタイムに一元的なダッシュボードとして表示する（図ー3）。

IoT センシング技術を使用して取得したデータは IoT ゲートウェイ「PicoNect」を介して専用クラウドに収集される。PicoNect は無線通信機器と IoT システムのゲートウェイ機能を一体化した装置であり、電波が遮蔽されやすいトンネル内においても安定した通信を確保する。



図ー5 IoT によるデータ収集

また、これまで当社で開発した水中ポンプ監視システム「N²ewt」⁴⁾やパッチャープラント自動管理システム「BP-Tracker」⁵⁾、濁水処理設備自動調整システム「Flock Track」⁶⁾など、山岳トンネル工事における仮設備の自動化・監視システムと連携することが可能である（図ー5）。

3-3 生成 AI による監視・分析機能

IoT ゲートウェイを介して専用クラウドに収集された各種データを生成 AI がリアルタイムに監視・分析し、異常を検知した際に通知・警報を発信する。現在の主な監視対象は濁水処理設備放流水の pH、濁度、バッチャープラント資材残量、坑内環境データの基準値超過（CO₂ 濃度、WBGT 値など）などである。

警報はメールや専用アプリへの通知のほか、坑内警報設備への連携も可能であり、現場技術者が現地にいなくても異常を即座に把握し対応できる。山岳トンネル特有の広範囲な確認作業を省略することで、現場技術者の負担軽減と迅速な判断・対応を支援する。

3-4 重機・作業員の位置表示と安全管理

重機・作業員の位置情報をリアルタイムに表示し、両者が近接した場合は AI が検知して警報を発することで、坑内での接触災害を未然に防止する。また、バイタルデータの監視と組み合わせることで、作業員の健康状態の急変にも即応できる体制を構築できる。

§ 4. 現場導入事例

4-1 N- フィールドの概要

本プラットフォームの実証・検証フィールドとして、当社が栃木県那須塩原市に整備した山岳トンネル技術開発拠点「N- フィールド」を活用した（表-2、写真-1）。N- フィールドは 2023 年 11 月に運用を開始した研究開発拠点であり、「Tunnel RemOS」の開発・試行・実験環境として整備されている。N- フィールドの最大の特徴は、実物大の模擬トンネル（断面約 66m²、幅 11m×高さ 7m×延長 47m）を有する点である。この断面サイズは実際の山岳トンネル工事で用いられる標準的なサイズに相当しており、実現場と同等の条件下でシステム検証を行うことができる。また、遠隔操作室には遠隔操作コクピット 2 台と簡易操作ユニット 1 台が設置されており、複数の施工機械を同時に遠隔制御する実験環境が整備されている。

4-2 実証内容と確認された効果

N- フィールドの模擬トンネル内に遠隔操作仕様のホイールローダおよび油圧ショベル（それぞれ Tunnel RemOS-WL, Tunnel RemOS-Excavator）を配備し、本プラットフォームの各機能を実環境に近い条件下で実証・検証した。主な実証内容と確認された効果を以下に示す。

(1) バーチャル空間再現

ホイールローダ・油圧ショベルの ROS データをゲームエンジンで変換し、模擬トンネル内の動作をリアルタイム 3D 映像として遠隔操作室のモニタに表示することを確認した。データ取得からバーチャル空間上での表示までの遅延は約 1 秒以内であり、実用上十分なリアルタ

表-2 N- フィールド施設概要

項目	内容
名称	N- フィールド
所在地	栃木県那須塩原市高林字下川原林 701 番地 8
模擬トンネル	断面約 66m ² （幅 11m×高さ 7m×延長 47m）
遠隔操作重機	ホイールローダ・油圧ショベル・ エレクター一体型吹付機・計測台車
通信設備	長距離無線 LAN・Wi-Fi・光回線・Starlink



写真-1 N- フィールド全景

イム性を確保している。また、俯瞰視点・運転席視点・追従視点・切羽側視点などの視点配置・切り替えが実際の運用においても有効であることを確認した。

(2) ダッシュボード機能

模擬トンネル内に設置した各種 IoT デバイスから得られる環境データ（気温・湿度・CO₂ 濃度・WBGT 値）と重機の稼働状況データを統合し、ダッシュボードとしてリアルタイムに表示可能であることを確認した。また、N- フィールドには配置されていないバッチャープラントや濁水処理設備、水中ポンプ等についても、N- フィールド以外の実現場で収集しているデータをバーチャル空間上でリアルタイムに統合して一元管理可能であることを確認した。なお、デジタルツインダッシュボードは遠隔操作室以外のインターネット回線からもアクセス可能であり、本社・支社等からの一元監視体制を確立することが可能である。

(3) AI 監視機能

坑内環境の基準値超過・重機の異常稼働を想定した場合において、生成 AI が異常を検知し、自動通知（ダッシュボード・メール・direct 等）がリアルタイムに発信されることを確認した。通知の遅延は概ね 30 秒以内であり、現場での実用には十分な応答性を有しており、目視確認の省人化に向けた有効性を確認した。

(4) 安全管理機能

重機・作業員（ウェアラブル端末装着）の位置情報をリアルタイムにダッシュボード上に表示し、設定した近接距離を下回った際に警報が発信される。模擬トンネル

という狭隘な環境での検証により、実現場においても接触リスク低減への有効性が期待される。

§ 5. システムの特長と効果

5-1 リアルタイム性と高い拡張性

ROS データの取得から仮想空間上での再現まで約 1 秒以内というリアルタイム性を実現している。従来のシステムでは、データ収集・処理・表示に数秒から数十秒の遅延が生じる場合があったが、本プラットフォームではゲームエンジン (Unity) による高速なデータ変換処理と専用クラウドの活用により、この遅延を大幅に短縮している。このリアルタイム性は、重機の遠隔操作支援や緊急時の迅速な判断において重要な要素であり、実現場への適用における安全性向上が期待される。

センサの拡張性についても、現状で 20 種類以上のセンサと連携可能である。現場条件やニーズに応じて必要なセンサを選択し、ダッシュボード上の表示項目をカスタマイズできる自由度の高いシステムとなっている。センサ・重機の ROS 情報取得装置はすべて後付けが可能で、既に稼働中の現場にも比較的容易に導入可能である。今後も新たなセンサを順次採用していき、山岳トンネル現場の全てのデータをデジタルツイン上に再現することを目指していく。

5-2 生成 AI による現場管理の自動化

従来、現場に散在する複数の管理箇所（坑内環境、設備稼働、材料残量など）を監視するためには、現場技術者が定期的に各所を巡回して目視確認する必要があった。この作業は属人性が高く、確認漏れや対応の遅れが生じやすいという課題があった。

本プラットフォームでは、生成 AI が専用クラウド上のデータを 24 時間 365 日継続的に監視し、設定した閾値を超えた場合や異常パターンを検知した場合に、自動で通知・警報を発信する。これにより、現場技術者は異常が発生したときのみ対応すればよくなり、常時監視が必要なくなる。さらに、AI による総合的なデータ分析により、単一センサでは検知できない複合的な異常（例：高温・高湿・CO₂ 濃度上昇の同時発生による熱中症リスク上昇）も検出可能である。

5-3 汎用性と波及性

本プラットフォームは ROS2・商用センサ・商用クラウドサービスを活用して構築されており、他社での利用も想定した構成となっている。また、ローカル 5G, IOWN, Starlink などあらゆる通信規格に対応しており、通信環境による制約がない。さらに、国土交通省データプラットフォームや PLATEAU とも SDK・API で連携可能であり、国土交通省が掲げる i-Construction 2.0 にも対応している。

現在は山岳トンネル工事を対象としているが、今後はダム・造成工事等の他の土木工事にも適用範囲を拡大する予定である。

5-4 山岳トンネル自動化への基盤

本プラットフォームは、i-Construction 2.0 が推進する施工管理のオートメーション化（リモート化）に資するものである。遠隔地からの現場全体の俯瞰的管理、現場技術者の移動負担軽減、複数現場の一括管理を実現し、現場管理の多様化・省人化に対応できる体制を構築可能である。

さらに本プラットフォームを発展させることで、発破後のズリ形状や掘削形状といった空間情報を活用し、仮想空間上において最適な施工シミュレーションを実施することが可能となる。最終的には、シミュレーション結果をフィジカル空間（現場）における「Tunnel RemOS」へフィードバックし、重機の自動・自律制御を実現することで、山岳トンネル工事の完全自動化を目指している。

§ 6. まとめ

山岳トンネル工事の安全性・生産性・効率性向上を目的として、「山岳トンネルデジタルツインプラットフォーム」を構築し、那須塩原の N-フィールドでの実証を行った。本プラットフォームにより、以下の点の実現可能となった。

- ①重機の ROS データをゲームエンジンで変換処理し、仮想空間上に約 1 秒以内でリアルタイム 3D 表示することで、坑内作業の俯瞰的管理を実現。
- ② 20 種類以上のセンサデータを統合したダッシュボード機能により、施工管理に必要な情報を遠隔地からリアルタイムに一元的に確認できる体制を構築。
- ③生成 AI による監視・分析機能により、異常検知時の自動通知・警報を発信し、現場技術者の負担軽減と迅速な対応を支援できることを確認。
- ④重機・作業員の位置情報のリアルタイム表示と近接警報により、坑内での接触災害を未然に防止する安全管理機能の有効性を実証。

今後は、本プラットフォームを実現場に導入して山岳トンネル工事のさらなる安全性・生産性・効率性向上のための機能の追加・最適化を進めていく。また、山岳トンネルシミュレータによる仮想空間上での最適施工シミュレーションと実機制御のフィードバック、さらには重機の自律施工技術との統合により、山岳トンネル工事の完全自動化の実現に向けた取り組みを続けていく。また、本技術をダム・造成工事等の他の土木工事全体へ展開し、建設業界全体の DX 推進・担い手不足解消に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 山本悟，額瀨善孝：山岳トンネルにおける無人化施工への取り組み Tunnel RemOS の全要素技術の現場試行開始，土木施工，Vol.64，No.4，pp.87-90，2023
- 2) 山本悟：山岳トンネルデジタルツインプラットフォームの構築，土木学会第 80 回年次学術講演会，VI-1193，2025
- 3) 五十嵐貴之，鶴田大毅，坂口大樹：各種通信ニーズに対応可能な PicoNect の開発，西松建設技報，Vol. 48，2025
- 4) 山本悟：水中ポンプ監視システム「Newt」の開発，西松建設技報，Vol. 44，2021
- 5) 山本悟，塚田純一，高橋将史：バッチャープラント材料自動管理システムの開発，土木学会第 79 回年次学術講演会，VI-391，2024
- 6) 辻岡高志，山本悟，井上洸也，原圭太：濁水処理設備の自動化に関する取り組み，西松建設技報，Vol. 47，2024