第VI部門

2026年9月4日(金) 13:00 ~ 14:20 | 5号館6階60（北海学園大学）

山岳トンネル（ICT・自動化）(6)

座長：山上 順民（大成建設）

13:40 ~ 13:50

[VI-1593] 自律飛行ドローンとSfM技術を用いたトンネル出来形管理の自動化

*辻川 泰人[1]、福間 優作[1]、石井 孝明[2]、藤田 吉臣[3] (1. 戸田建設株式会社、2. 株式会社Ｓｐｉｒａｌ、3. アイセイ株式会社)

キーワード：山岳トンネル、自律飛行ドローン、SfM、帳票自動作成、生産性向上

山岳トンネルの出来形計測は、GNSSが使えない閉鎖環境ゆえに人力依存度が高く、作業効率や安全性が課題でした。筆者らは、特徴点が少ない坑内でも自律飛行できる「非SLAM型マーカー誘導型ドローン」を活用し、省人化を推進してきました。本稿ではさらなる生産性向上を目指し、データ取得から帳票作成までを自動化する「3次元出来形自動計測システム」の構築状況を報告します。併せて、実用性担保のための「信頼性を考慮した帳票提示手法」についても詳述します。

© 2026 Japan Society of Civil Engineers

自律飛行ドローンと SfM 技術を用いたトンネル出来形管理の自動化

戸田建設株式会社　正会員　○辻川泰人，正会員　福間優作
株式会社Ｓｐｉｒａｌ　非会員　石井孝明
アイセイ株式会社　非会員　藤田吉臣

１．はじめに

山岳トンネル工事の出来形計測業務は、GNSS の利用が困難な閉鎖環境下で行われるため、従来は人力による測量作業に大きく依存してきた 。これらは多大な時間と人員を要するだけでなく、施工サイクルタイムの増大や、狭隘な坑内で重機と作業員が輻輳することによる安全上のリスクが大きな課題であった。

筆者らは、特徴点の少ない坑内でも安定した自律飛行が可能な「非 SLAM 型」のマーカー誘導型ドローンを用い、計測の省人化・安全化を推進してきた。本稿では、さらなる生産性向上を目指し、データ取得から帳票作成までを一貫して自動化する「3 次元出来形自動計測システム」の構築状況と、実用性を担保するための「信頼性を考慮した帳票提示手法」について報告する。

２．システム構成とワークフロー

（１）ハードウェア構成と自律飛行

本システムは、自律飛行ドローン、４K 解像度を有する撮影用カメラ、および解析用クラウド基盤で構成される。機体はトンネル内の粉塵や湿潤環境に対応した高い耐環境設計を施している。自律飛行の制御には、壁面の支保工等に設置した航法用マーカー（ArUco マーカー）を読み取るマーカー誘導方式を採用した。これにより、事前のマッピング作業が不要となり、一般的な坑内自律飛行ドローンに比べ現場負担が軽減される。また、複雑な計算処理をドローン側で必要とせず、特徴点の少ない環境においても撮影画像のブレを抑制し、確実な自己位置推定を維持しつつ、一定速度での安定飛行を実現している。

図-1 使用機体の外観

（２）自動解析ワークフローの設計

解析の前提条件として、事前に設計 CAD データから飛行区間の 3D 設計モデルを作成する。ドローンで撮影した動画データは着陸後に自動抽出・クラウド転送され、SfM-MVS 技術による 3 次元点群生成が実行される。その後、設計モデルとの差分解析（NuBas：3 次元点群データの編集・解析・モデリングを行う点群処理ソフトウェア）が実行され、座標情報と出来形数値が紐付けられる構成としている。

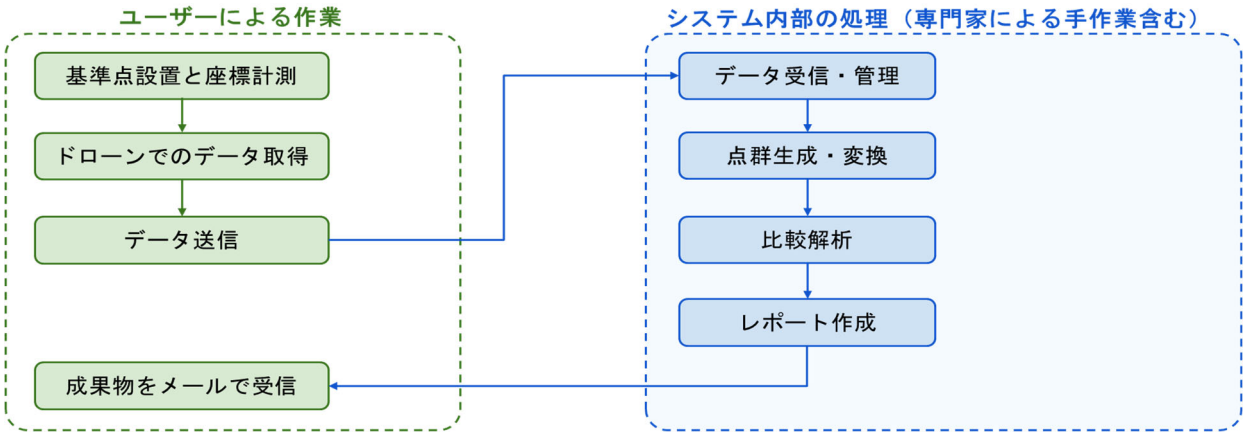

図-2 出来形計測・帳票化のワークフロー

キーワード：　山岳トンネル，自律飛行ドローン，SfM，帳票自動生成，生産性向上
連絡先　〒104-0031　東京都中央区京橋 1-7-1　戸田建設株式会社　土木設計技術部　TEL：03-3535-1354

© Japan Society of Civil Engineers

3．帳票自動生成における工夫

自動計測システムにおいて、算出された数値の信憑性をユーザーが迅速かつ客観的に判断できることが重要である。

（1）視覚的エビデンスの同時提示

自動生成される帳票には、計測された施工幅員や基準高さの数値に加え、設計断面との差分を示す 3D ヒートマップ、および解析に用いた元カメラ画像を並置している。これにより、異常値が検出された際、それが実際の施工不備によるものか、あるいは照明や配管等の付帯物による認識エラーかを視覚的に容易に判別可能としている。

（2）ウェブビューワーによるセルフチェック機能

帳票上のリンクから、ブラウザベースの点群ビューア（Potree）へ直接アクセス可能な仕組みを構築した。管理者はマウス操作により、任意の断面における点群密度や形状を詳細に確認できる。この「計測プロセスの可視化」により、自動計測結果に対する現場担当者の納得感を醸成し、意思決定の迅速化を図っている。

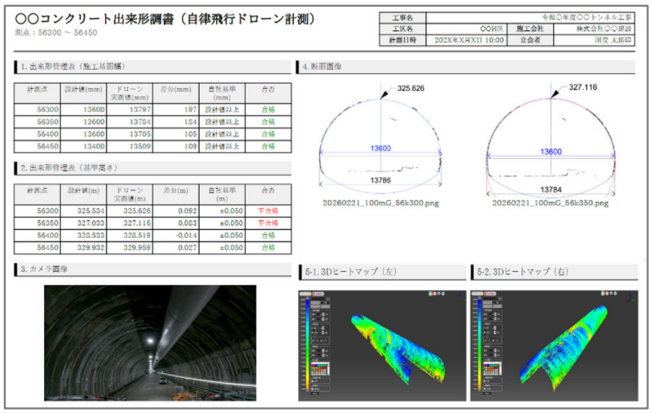

図-3 自動生成された出来形管理帳票（案）

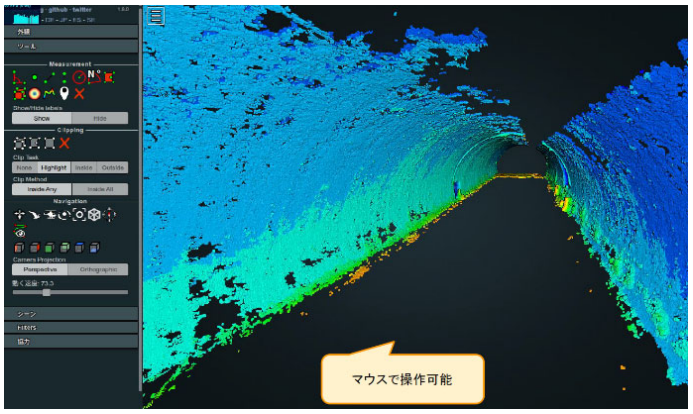

図-4 管理者が点群を操作するビューア

4．実施工トンネルにおける実証実験

（1）実験の概要と計測精度の最適化

実工事の施工サイクルにおける本システムの適用性を評価するため、施工中のトンネル内の 200m 区間を対象とした実証実験を実施した。標定点設置には、着脱が容易なマグネット式治具を採用し、ドローン視点に合わせた角度調整を行った。事前調査において天井付近の照明等による死角やハレーションの影響を確認し、標定点 6 点、検証点 8 点を配置した。

坑内の暗環境下での SfM 精度向上を図るため、自動シャッター設定に露出補正を組み合わせることで、照明付近の白飛びを抑制し、より密な点群再構成を実現した。ハレーションにより点群が欠落した箇所については、周囲の壁面形状から円形で断面を推定・補完するアルゴリズムを適用し、基準高さの特定を可能とした。

（2）運用結果と段階的自動化の検証

200 m の往復自律飛行を 10 回実施し、撮影データのクラウドアップロードから帳票出力に至る一連の運用フローを確認した。飛行準備からデータ転送までを現場担当者のみで完結できることを確認し、実務における省人化効果を確認した。

現在は精度検証フェーズのため SfM 処理の一部に専門家が介在しているが、解析後の帳票出力プロセスについては既に自動化を実装しており、実務上の運用性に支障がないことを確認した。今後は解析アルゴリズムの改良により、SfM 工程を含めた完全自動化ワークフローへの移行を順次進める予定である。

5．おわりに

本研究により、本検証フィールドにおけるデータ取得から帳票作成までのシームレスな運用の基盤が確立された。今後は、人手によるスポット計測と本システムの面的計測における「測定定義の相違」について精査を継続し、さらなる精度向上を図る予定である。今後、詳細な精度解析結果を報告予定である。

© Japan Society of Civil Engineers