山岳トンネル工事における非 SLAM 型自律飛行ドローンの実用化

戸田建設(株)　正会員　○福間　優作
戸田建設(株)　正会員　辻川　泰人

１．目的

建設業界では熟練技術者の高齢化と若年入職者の減少による人手不足が深刻化しており，時間外労働の上限規制（2024 年問題）への対応も相まって，抜本的な生産性向上が求められている．山岳トンネルの現場は狭隘かつ長大な閉鎖空間で昼夜を問わず掘削が行われ，大型重機と作業員が輻輳するなか，従来の施工管理は人力や目視に大きく依存し，多大な移動時間と人的リソースを要してきた．

これら業務負荷の軽減手段として自律飛行ドローンの活用が期待されるが，実用化には大きな技術的障壁がある．最大の課題は，坑内が GNSS 電波の届かない非 GNSS 環境という点である．閉鎖空間での自己位置推定には通常 SLAM 技術が用いられるが，高濃度の粉塵，薄暗い照明，単調で特徴点の乏しい壁面といった過酷な条件が重なり，従来型 SLAM では自己位置を見失うリスクが高く，長距離の安定飛行が困難であった．

本稿では，この課題を解決する非 SLAM 型のマーカー誘導型自律飛行ドローンを実施工現場に適用し，「坑内巡視」「切羽観察」「3 次元出来形計測」の 3 業務における自動化・省力化の効果について報告する．

２．自律飛行ドローンシステムの概要

（1）マーカー誘導型自律飛行制御システム

本システムには，(株)Spiral が開発した非 SLAM 型のマーカー誘導型飛行制御システムを搭載している．坑内の支保工等に一定間隔で設置した専用の ArUco マーカーを機体のカメラで連続的に読み取り，自己位置の把握と飛行指令の取得を行う．このマーカー誘導型システムの概要を**図-1** に示す．複雑な 3D マッピングや AI による環境認識に依存しないため演算処理負荷が小さく，過酷な環境下でも長距離の安定飛行が可能である．あわせて LiDAR による物体検知を備え，飛行経路上の重機や作業員を自動検知して回避・滞空するフェールセーフ機能を実装した．

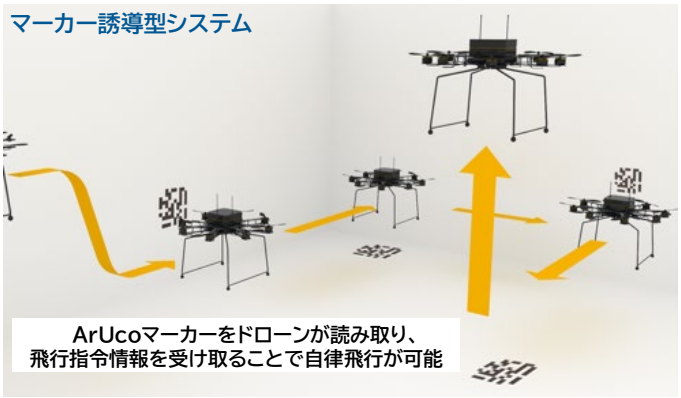


図-1　マーカー誘導型自律飛行制御システム

（2）トンネル特化型ドローン「LISA」

実証に用いた機体「LISA」は，坑内特有の粉塵・湿潤環境に耐える防塵・防水設計を施した専用ドローンである．「LISA」の外観を**写真-1** に示す．主な諸元は，機体寸法 800×800×240mm（プロペラガードを含む），総重量 4.5kg 以下，連続飛行時間 15 分，搭載カメラ 4K 対応（30fps）である．GNSS モジュールを排した閉鎖空間専用の設計とし，全方位プロペラガードにより接触時の安全性もハードウェア面から確保している．

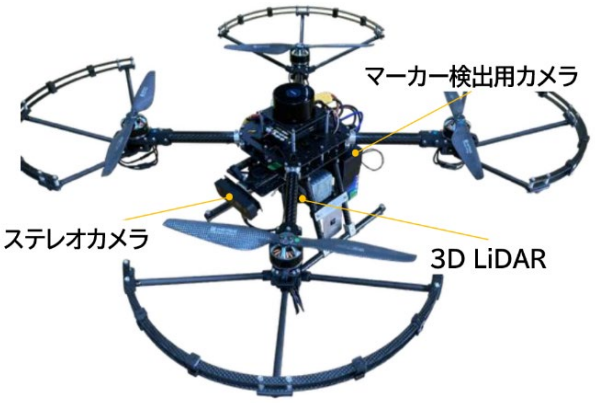


写真-1　トンネル特化型ドローン「LISA」

キーワード　山岳トンネル，自律飛行ドローン，非 SLAM，切羽観察，施工管理 DX
連絡先　〒104-8388　東京都中央区京橋一丁目 7 番 1 号　戸田建設株式会社　TEL 03-3535-1354

（3）自動充電ポートと運用フロー

運用面では，機体の待機・給電を担うメンテナンスフリーの自動充電ポートと，遠隔操作・管理用アプリケーションを備える．管理者が坑外の事務所から観察対象を選び離陸を指示すると，ドローンはマーカーを追従してデータを取得し，再び自動充電ポートへ帰還する一連のサイクルを全自動で実行する．安定稼働には，離着陸箇所での良好な通信環境（-50dBm 以上）と飛行経路の平均照度（70lx 以上）の確保が必要条件となる．

３．坑内自動巡視機能

地山や支保工の変状を早期発見するための日常巡視は不可欠だが，トンネルの長大化に伴い坑口から切羽までの移動負担が増大し，夜間・休日は人員配置も難しい．そこでドローンを動く監視カメラとして活用し，管理者が坑内に立ち入ることなく遠隔から状況を把握できる自動巡視機能を開発・実装した．遠隔・自動巡視システムの全体構成を**図-2** に示す．

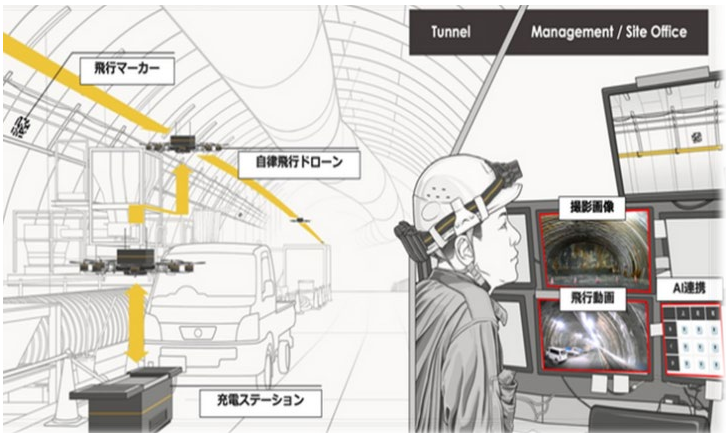


図-2　遠隔・自動巡視システムの全体構成

システムは，坑外の管理用アプリケーション，坑内の自動充電ポート，閉鎖空間専用ドローン「LISA」から構成される．管理者はあらかじめ登録した複数の巡視ルートから経路を選択して遠隔指示を送信し，自動充電ポートがハッチを開放してドローンを離陸させる．機体は側壁の支保工に設置した ArUco マーカーを連続認識しながら所定経路を飛行し，4K カメラで坑内全域を動画撮影する．

現場検証では，ドローンがマーカー誘導により自己位置を維持しながら巡視経路を自律飛行し，経路内に仮置きした模擬障害物を LiDAR で検知して自動回避した後，自動充電ポートへ帰還・着陸することを確認した．取得した 4K 動画はクラウドへ自動アップロードされ，管理者は移動を伴わず坑内状況を詰所のモニターで確認できた．これにより，離陸から帰還までの一連の業務を，坑内への技術者の立入りを要さずに実施可能であることが示された．始業前や休日など無人時間帯の巡視を可能とすることで，安全管理の死角を低減し，地山崩落や支保工等の変状の予兆を早期に検知できる体制構築につながる．また取得映像を発注者や技術部門と遠隔共有する運用により，坑内への移動を伴わない遠隔立合いに活用できる可能性がある．これにより，技術者の身体的・時間的負担の軽減が期待される．

４．切羽観察作業の自動化

切羽面の状況を評価する切羽観察は支保・掘削工法の決定に重要だが，防護のない暴露状態の地山直近へ技術者が立ち入る必要があり，肌落ち等の労働災害リスクを伴う苦渋作業であった．加えて，撮影から詰所での帳票作成までを手作業で行う負荷も大きい．そこで，画像取得から帳票作成までを無人化・自動化する切羽観察システムを開発した．ドローンによる切羽観察の全体概要を**図-3** に示す．

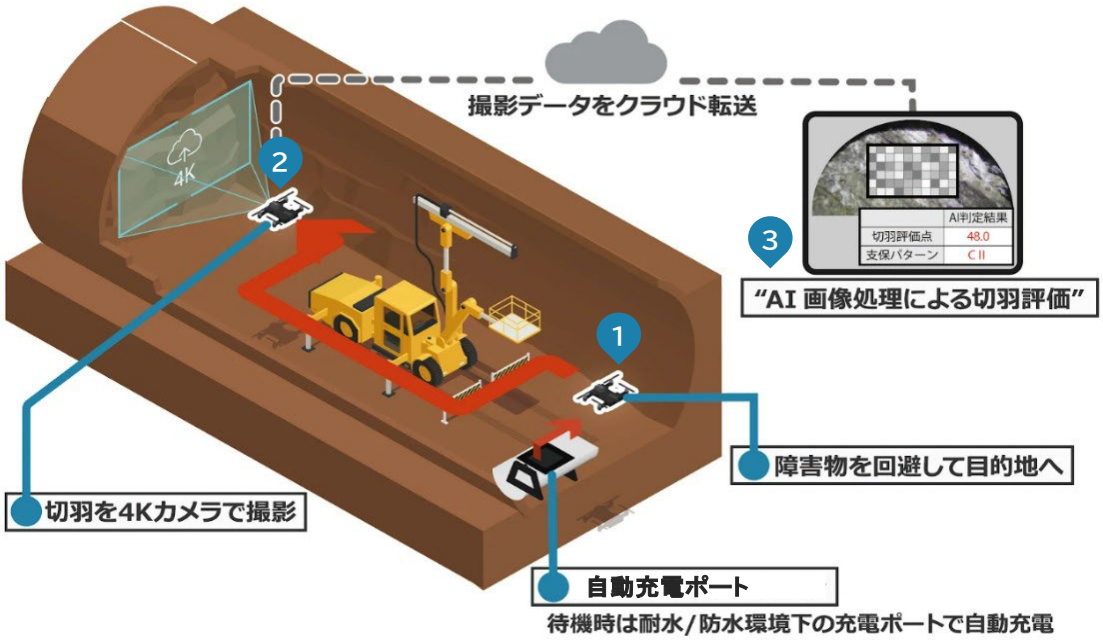


図-3　ドローンによる切羽観察の全体概要

撮影では LiDAR による平面検出とステレオカメラによる最寄りマーカーからの移動距離推定を組み合わせ，非 GNSS 環境でも切羽撮影位置を高精度に推定する．ドローンは切羽近傍で LiDAR により障害物を検知しつつ安全な離隔を保ってホバリング撮影（4K 動画）を行い，帰還後に AI が画質・構図の不良を除いて切羽面が最適に写るフレームを自動抽出する．抽出画像は AI が岩盤状態に関する評価候補を抽出し，修正可能な Excel 形式の切羽観察簿として出力する．自動生成された切羽観察簿の例を**図-4** に示す．

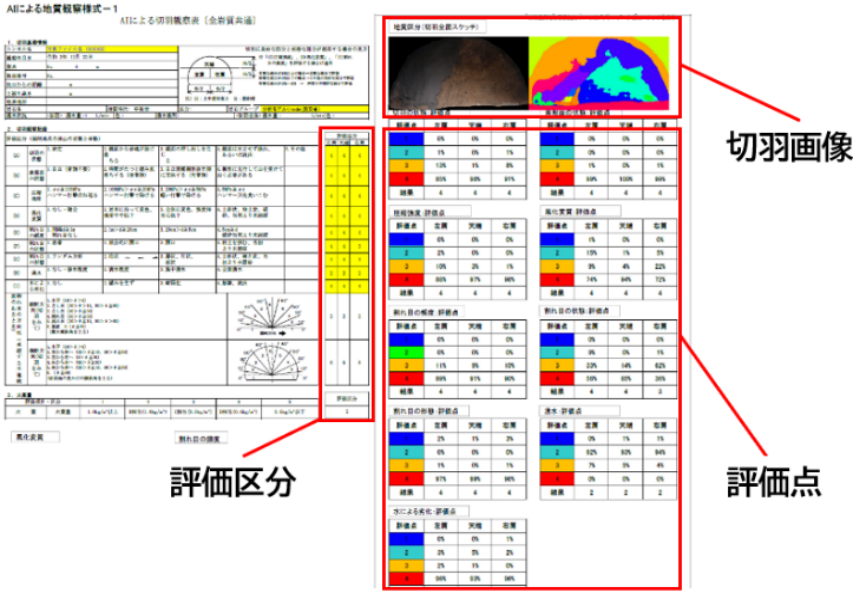


図-4　自動生成された切羽観察簿

現場実証の結果，離陸指示から観察簿の自動作成，管理者による最終確認までの一連のプロセスが約 17 分で完了した．従来手作業で 1 サイクル約 120 分を要していた一連の切羽観察・事務プロセスと比べ，作業時間を約 86%短縮できた．単なる省力化にとどまらず，最も危険な作業の一つである暴露切羽直下への立ち入りを回避でき，安全衛生水準の向上に寄与する．

５．3 次元出来形計測の実用化検証

従来の出来形計測はトータルステーション（TS）による点計測が主流である．このため，多大な人員・時間を要し，計測時には重機の停止が必要となる．また，点計測では，壁面全体の連続的な形状や凹凸を捉えにくい課題があった．これに対し，ドローンで撮影した映像から SfM（Structure from Motion）・MVS（Multi-View Stereo）技術で高密度な 3 次元点群を生成し，面的な出来形管理を行う手法を検証した．実大トンネルの延長 140m 区間を対象に，飛行経路・標定点間隔・飛行速度の各パラメータを最適化した．

標定点には SfM ソフトウェア上で画像から自動検出が可能な測量用の ArUco マーカーを用いた．坑内で確実かつ迅速に設置するため，鋼製支保工にワンタッチで固定できるマグネット式治具を使用し，マーカー面を壁面に対して約 45 度に配置した．また画像アライメント（複数の写真をつなぎ合わせて位置を整合させる処理）の安定性を高めるため，左右の壁面で標定点の高さを交互（千鳥状）に配置した．非 GNSS・暗所・粉塵という坑内条件下で施工管理に必要な計測精度を確保するには，画像アライメントを安定させるとともに，絶対座標に対する幾何補正を適切に行う必要がある．そこで本検証では，計測精度に影響を及ぼす飛行経路，標定点間隔および飛行速度に着目し，これらの条件を比較した．

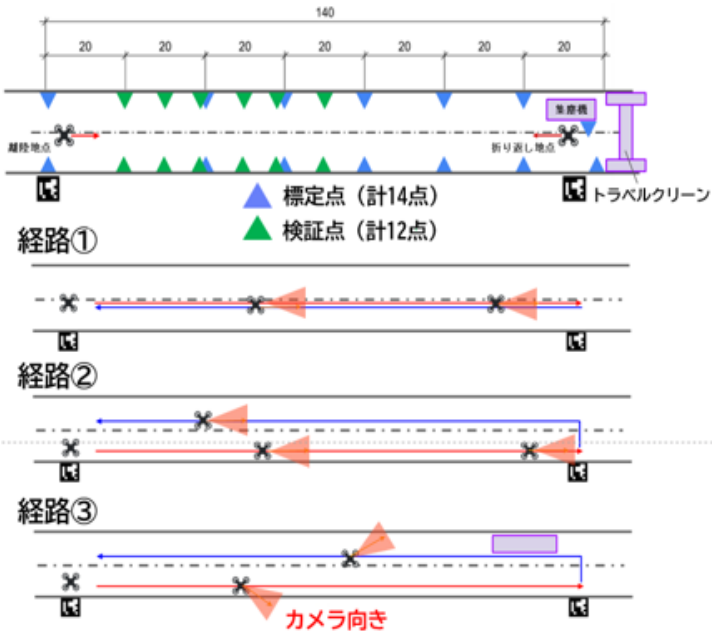


図-5　検証環境の概要

本検証の実施環境および比較した飛行経路を**図-5** に示す．延長 140m 区間にて，中央飛行（経路 1），壁寄り飛行（経路 2），壁寄り＋カメラ旋回（経路 3）の 3 パターンを比較した．

（1）標定点間隔の最適化

標定点間隔については，TS による出来形計測と同等の数㎜級精度を最終目標としつつ，本実証実験では平均 RMS 誤差 30 ㎜以下を現段階の実用目標に設定した．この実用目標を満たす標定点間隔の上限を検証した．本実証実験における標定点間隔と計測誤差の推移を**図-6** に示す．トンネル中央部を飛行する経路 1 では，標定点間隔 100m 以下で誤差が目標の 30 ㎜以下に安定して収まった．一方，120m以上に広げると誤差が 500 ㎜を超え，点群の構築が破綻した．これは，標定点間の距離が長くなり，アライメント誤差が累積したためと考えられる．この結果から，標定点間隔 100m以下を運用指針とすることの妥当性を確認した．

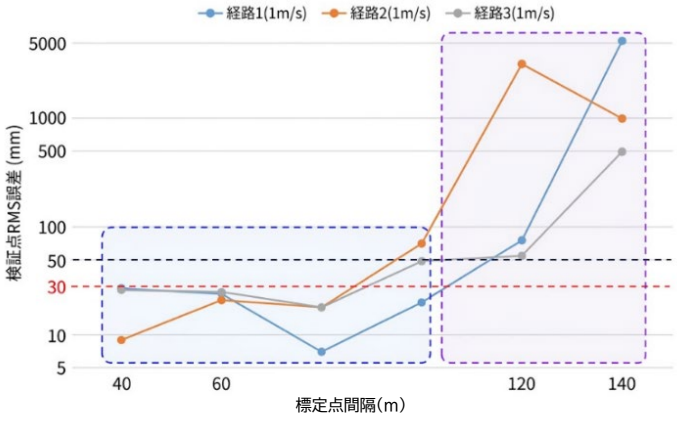


図-6　検証結果（標定点間隔比較）

（2）飛行速度と飛行経路の最適化

飛行速度については，経路を中央飛行に固定して 0.75・1.0・1.75m/s を比較し，1.0m/s で最も滑らかな高精度点群が得られた．1.75m/s ではシャッタースピード低下に伴うモーションブラーで特徴点マッチングが悪化し，0.75m/s では画像の過剰重複により微小なマッチング誤差が累積してドリフトが生じた．

経路ごとの精度差は，SfM 解析が成立する幾何学的条件に起因する．中央飛行では，同一視野内で左右壁面を同程度の解像度でバランスよく捉えられ，左右の位置関係が基準となってモデルの歪みを抑制できる．一方，壁面に近接する飛行では左右の解像度が不均等となりスケール不整合を招く．以上より，本検証条件では，飛行速度を 1.0m/s 程度とし，中央飛行を採用することが，歪みの少ない高精度点群の生成に有効であることを確認した．

（3）出来形帳票の自動生成

データ取得から帳票作成までを自動化し，設計断面との差分を色分けした 3D ヒートマップ、ドローンのカメラ画像および計測結果を掲載した出来形管理帳票を自動生成する仕組みを実装した．自動生成される帳票の例を**図-7** に示す．クラウド上の自動解析基盤では，生成した実測点群と設計 CAD データから作成した 3D リファレンスモデルを同一の絶対座標系で重ね合わせ，施工幅員および基準高さに対する差分を自動算出する．算出結果は 3D ヒートマップとして帳票に反映され，局所的な内空不足等の異常候補を把握できる．異常候補については，帳票に掲載したドローンのカメラ画像および帳票上のリンクからアクセスできるブラウザベースの点群ビューアを用いて確認する．これにより，施工上の不具合による差分と，仮設配管や照明器具等の付帯物が点群に含まれたことによる差分とを判別できるようにした．この確認機能により，計測結果および解析過程の可視化を図り，現場担当者による確認作業を支援する．

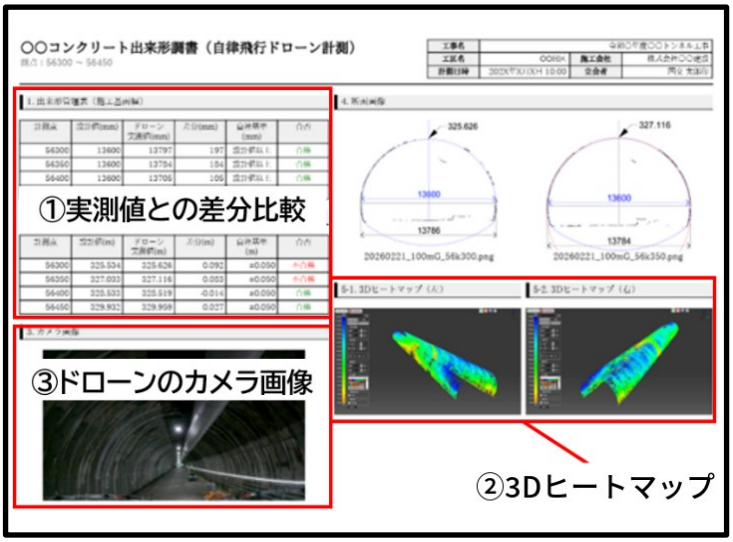


図-7　自動生成される出来形管理帳票の例

６．まとめと今後の展望

非 SLAM 型自律飛行ドローンを実現場に適用し，以下を確認した．

(1) 坑内自動巡視：遠隔操作と自動充電ポートにより，作業外時間帯の無人巡視を可能とし，監視体制と情報取得の高度化に有効であることを確認した．

(2) 切羽観察：ドローン撮影と AI 評価の連携により無人化し，1 サイクルの所要時間を 120 分から 17 分へ約 86%短縮するとともに，暴露切羽直下への立ち入り回避による安全性向上を確認した．

(3) 3 次元出来形計測：飛行経路・速度・標定点間隔の最適化により，長距離区間でも実用目標 30mm 以下の精度で面的計測が可能なことを確認し，帳票自動生成による省力化の見通しを得た．

本システムは本格運用に向けて実証を進めている．今後は実施工への適用を段階的に進めるとともに，高解像度カメラの採用等により出来形計測の精度を人手計測と同等の数 mm 級へ高めること，および坑内通信環境の整備を含めたシステム全体の改善を進めていく．デジタル技術を活用した省力化・無人化は今後の現場に不可欠であり，労働環境の改善とインフラ DX の実現に向けて継続的に技術開発を進める．