

トンネル坑内自動巡視システムの開発

自律飛行ドローンによる点検・巡視作業の効率化、高度化

松岡 祐仁・吉井 太郎

建設現場においてドローンは、その機動性、高所からの視点を活かして、測量の他、維持・点検等その活用の幅は年々広がっている。一方、トンネルや屋内では、GNSSの位置情報に基づく自動／自律飛行が困難なため、その利用は限られていた。本稿では、非GNSS環境であるトンネル坑内において、自律飛行ドローンを用いた現場職員の点検・巡視作業代替による生産性、安全性向上を図るトンネル坑内自動巡視システム開発の取り組みについて報告する。

キーワード：ドローン、トンネル、非GNSS環境、自律飛行、巡視・点検

1. はじめに

建設現場では、国土交通省が推進する「i-Construction」の3本柱の一つである「ICT技術の全面的な活用」により、土工を皮切りに測量や維持・点検においてドローンを活用した取り組みが広く行われている。一方、近年の建設業界を取り巻く環境、社会経済情勢の変化から、ロボットやAI等を活用して業務プロセスを変革し、建設現場の生産性を飛躍的に向上させる社会的要請への対応として更なる技術開発が求められている。

著者らは、これまで建設現場において、ドローンを活用して人的作業を代替することによる効率化や生産性向上に着目し、「全自動ドローンシステム」¹⁾によるAIを組み合わせた巡視・点検や測量作業の自動化、非接触での検査・確認を行う遠隔臨場にドローンのリアルタイム映像を提供する「遠隔臨場ドローンシステム」²⁾の開発を行ってきた。

2. トンネル坑内自律飛行システム

(1) 非GNSS環境下におけるドローン活用の課題

建設現場におけるドローンの活用は、機体やパイロットの高機能化、高精度GNSS測位による測量精度の向上や飛行制御の高度化、通信機能の統合とともに発展してきた。しかし、GNSSの電波を受信できない環境では、予め設定されたルートで自動／自律飛行できず、飛行が不安定になることから、高度な操作技術を有するドローンオペレーターによる手動操作が必

要となる。このため、ドローンによる効率性・生産性向上に最も寄与する自動／自律飛行の活用は、主にGNSSが受信可能な環境に限定されていた。

今回、ドローンによる巡視・点検対象とした山岳トンネル工事においては、昼夜繰り返される掘削施工サイクル間の限られた時間内で、測量や計測等の施工管理や巡視・点検が行われている。また、掘削の最前線である切羽においては、発破後や作業間に残葉、浮石、支保工裏面の状況を確認するため、目視点検が行われているが、肌落ち、崩落等のリスクが存在し、安全かつ効率的な巡視・点検技術が求められている。一方、トンネル坑内は、非GNSS環境であることに加え、機械設備など障害物が多く存在することから、ドローンを日常的に活用するには厳しい環境である。

(2) トンネル坑内自律飛行システムの開発

トンネル坑内での管理ツールとしてドローン活用を推進するためにも、高度な操縦技術を有する専門オペレーターではなく、一般職員が日常のかつタイムリーに運用できる自律制御による飛行支援機能が望まれる。しかし、坑内は、非GNSS環境であるため、GNSSに基づいた自己位置情報を用いた自律飛行は不可能である。そのため、追加のセンサーなどを搭載することでGNSSに依存しない自律飛行システムを構築する必要があった。

この問題への対処として、暗所でも精度良く周囲環境との距離を計測できるLiDARを追加センサーとして採用することとした。LiDARには単一レイヤーで周囲を計測できる2D-LiDARと複数レイヤーで計測

可能な 3D-LiDAR がある。2D-LiDAR では、一つの水平面に対してのみしか計測ができないため、トンネル坑内の自律飛行に必要な位置情報を得るために、限られた飛行積載重量に収まるよう複数の 2D-LiDAR を取り付けることになるといった課題がある。一方、3D-LiDAR であれば周囲のトンネル形状を 3 次元的に計測できることから、本開発では、追加センサーとして 3D-LiDAR を採用することとした。

3D-LiDAR を使用した自己位置推定では、事前に作成した点群地図とリアルタイムに取得したスキャン点群との位置合わせによる手法が多く採用されている。しかし、トンネルのように一部を切り取った際の形状の変化に乏しい環境では LiDAR SLAM などにより事前地図を精度よく生成することが難しい。また、自己位置推定自体も困難であることが想定される。

このため、トンネル断面に着目した場合、一定の形状が連続するトンネルの特性から、後述するテンプレート点群とリアルタイムスキャン点群を比較することでドローンの移動方向を算出し、それをもとに自律飛行を行う手法を採用した。

(3) ハードウェア構成

トンネル坑内の自律飛行で用いたドローンを写真 1 に示す。ドローン本体は、DJI Matrice 300 RTK を用いた。機体単体では、機体に搭載された複数のカメラ、IMU を組み合わせたビジュアルオドメトリにより、自己位置・姿勢推定が行われる。また、上下に搭載されたライトが、暗所でもビジュアルオドメトリを実現する際の補助となる。

追加センサーの 3D-LiDAR は、Ouster OS 0-64 を採用した。64 レイヤーのレーザーが出力され、垂直画面角は 90 度、計測距離は最大 50 m、重量 475 g である。

加えて、追加の自律飛行システムを動作させるドローン搭載型 PC を搭載し、3D-LiDAR、ドローンと接続して必要な情報を送受信可能となっている。さら

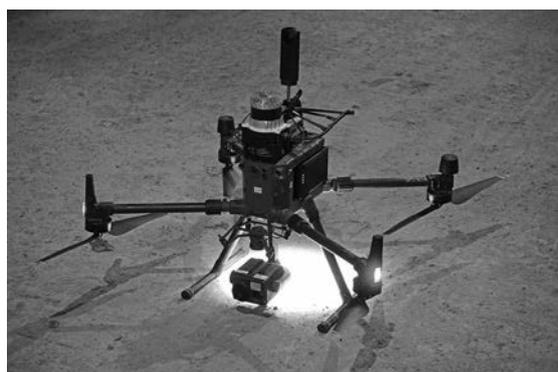


写真 1 トンネル坑内自律飛行ドローン

に、搭載型 PC は、オペレーターが持つノート型 PC と無線通信を行い、自律飛行開始指示の受け取りや周辺環境の情報をノート PC に送信することが可能となっている。また、ドローン本体に付属する送信機からの特定操作により、自律飛行とマニュアル飛行の切り替えが可能となっている。

以上の機器をドローン上部に艤装し、自律飛行のための機器 (1.2 kg) と後述する巡視・点検のための 360 度カメラ、ハイブリッドカメラ搭載時の合計重量は 2.6 kg (最大積載重量 2.7 kg) となった。

(4) ソフトウェア構成

本開発で用いた自律飛行システムは、Robot Operating System (ROS) ベースのシステムとなっており、図 1 に示す機能ごとに実装したモジュールが双方に情報をやり取りすることでシステム全体が動作する。

主要な機能モジュールは、トンネル移動方向推定、制御値フィルター、障害物検知の機能となる。LiDAR によるスキャン点群は、Ouster Driver から ROS システムに取り込まれ、トンネル移動方向推定モジュールと障害物検知モジュールに入力される。トンネル移動方向推定モジュールは、トンネル内移動に適した目標位置をドローンの姿勢に応じて推定し出力する。求めた目標位置は、制御値フィルターに入力され、滑らかに移動が可能となる目標速度を決定する。また、障害物を検知した際は、障害物検知モジュールから停止信号が制御値フィルターに送られ目標速度を 0 にする。最終的に、制御値フィルターによる目標速度をドローンに入力することで目標速度を達成する制御をドローンが行い移動を行う。

(a) トンネル移動方向推定

トンネル坑内で自律飛行を行うためには、まずドローンがどの方向に進めば良いのか確定する必要があるが、本開発では、トンネル形状のテンプレート点群

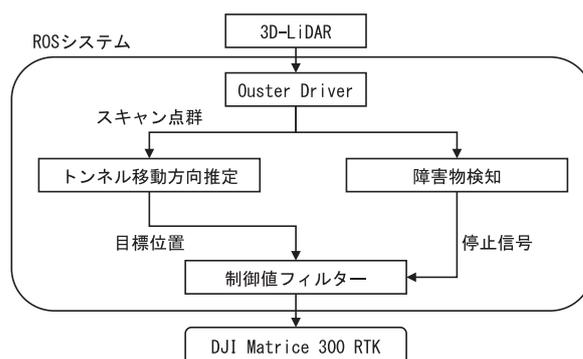


図 1 坑内自律飛行システムソフトウェア構成

を用いて進行方向を得る手法を用いた。

トンネルは、平面的、縦断的に線形が変化するが、パターンにより多少の違いはあるものの、線形を軸とした断面の連なりで表現される。今回対象とした道路として供される断面の大きなトンネルでは、線形 (= ドローンの進行方向) に沿って一部を切り取ると馬蹄形状になる。このトンネルの設計形状を簡易化して、半径、高さ、密度、長さの4つのパラメータから表現されるテンプレート点群をプログラムにより自動生成することとした (図-2)。

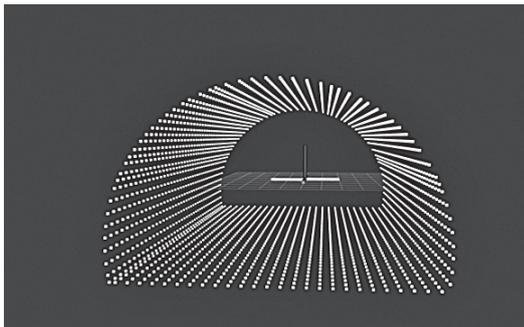


図-2 テンプレート点群

トンネル形状のテンプレート点群を生成した後、センサーから得られる点群とテンプレート点群を比較して位置合わせを行う。この際、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いて二つの点群の位置合わせを行う。

テンプレート点群、トンネル内でセンシングした点群両方ともトンネル中心線方向の変化に乏しい形状をしているため、前後方向の位置関係や、差分を位置合わせにより推定することは非常に困難となる。そのため横方向、高さ方向、向き (y, z, yaw) は、ICPにより推定を行うが、進行方向位置 (x) の推定値は使用しないこととした。

このような点群同士の位置合わせを新たなスキャンが得られるたびに行うことで、テンプレート点群座標中におけるドローン横・高さ方向位置・トンネルに沿った向きをリアルタイムに推定可能とする (図-3)。

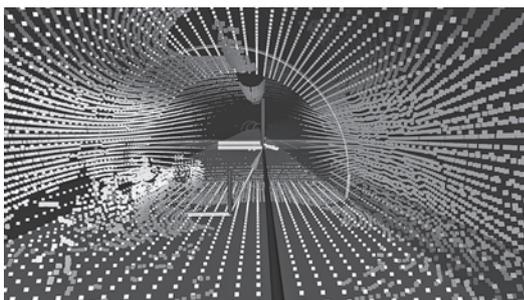


図-3 テンプレート点群とスキャン点群の重畳

(b) 制御値フィルター

飛行制御は、目標地点と現在地点の差から目標速度を決定することで行う。

現在地点は、テンプレート点群との位置合わせにより得た位置を用いる。一方、目標地点は、生成したテンプレート点群の床面を高さ0、テンプレート点群中心が $(x, y) = (0, 0)$ とし、ドローンを飛行させたい高さ、中心からの横方向距離を事前にパラメータとして設定する。例えば、トンネルの内空高さ Z m に対して、目標飛行高さ $h (= Z-a)$ m、仮設備等の障害物が左側に寄せてあることから、中心線から右に b m ずれた位置を目標横方向位置とするなどして決める。

目標地点、現在地点の差分から、目標速度、 V_y, V_z, V_{yaw} を定める際、点群同士の位置合わせには一定のノイズなどが含まれるため、得た推定値をそのまま使えば不安定な挙動を引き起こす制御値を得てしまう。そこで急制動が起らないよう、加速度や速度に制限をかけるフィルターを導入し、滑らかで安定した制御を実現した。

フィルターは V_x, V_y, V_z 成分に適用し、 V_x のフィルター適用前の目標値は常に 1 m/s 、角速度は、最大値・最小値を定め適用した。フィルターを経て得た目標速度は DJI Onboard SDK を経由しドローンに指令値として与えられ、ドローン本体が内部に持つビジュアルオドメトリシステムにより得られる相対速度情報と与えられた目標速度情報の差分から実際の加速や停止、旋回が実行される。

(c) 障害物検知

障害物検知機能は二つの役割を持つ。一つは、ドローンがトンネル内の障害物に近接し過ぎた場合やトンネル移動方向推定に失敗した場合に、そのまま移動して障害物やトンネル壁面に衝突する事態を防止する役割である。二つ目は、切羽まで自律飛行で到達した際に、自動的にトンネル切羽手前でドローンの移動を停止させる役割となる。

飛行中に得た LiDAR 点群に対して検出範囲を設定し、範囲内に複数回連続で障害物を検出した場合は、停止信号を出す処理としている。また、停止信号が送られるとドローンへ指示する目標速度が全て0、すなわちその場にホバリングする指令値が送られる仕様とした。

(d) その他の実装機能

上記の主なモジュールによる自律制御の他、後退飛行して機体を手元まで戻すリターン機能、飛行停止後に自律飛行を再開するリスタート機能、自律飛行と手動飛行の切り替え、障害物を自律飛行で回避するリ

ルート機能（開発中）を実装する。

(5) 現場検証

自律飛行システムの適用性を確認するため、現在施工中の令和元～4年度横断道羽ノ浦トンネル工事（発注者：国土交通省四国地方整備局）において、2022年1月、6月に現場試行を行った。

試行時点でのトンネル掘削延長400m（2022年1月）、600m（同6月）を対象に「坑口から自動離陸を行い、トンネル坑内の自律飛行を行った後、切羽に辿り着くと自動で停止（ホバリング）する」ことを目標に自律飛行の検証を行った。

トンネル坑内の自律飛行計画は、地面からの飛行高度3m、トンネル断面の飛行位置はセンターを基本とし、日々の重機や機械設備等の配置状況を踏まえて、適宜左右にオフセットして設定した。前方の障害物検知は、障害物との保安距離や切羽手前での停止距離を踏まえて検知距離5～20mの間で状況に応じて設定し、左右の検知距離は1.5mとした。飛行速度は、1m/sに設定した。

坑口でスタートの指示を与えた後は、粉塵の影響や障害物を検知して一時停止することがあったものの自律飛行をリスタートすることで、事前に立てた飛行計画通りの位置を進行し、切羽手前まで問題なく自律飛行することができた。坑内の自律飛行状況を写真—2に示す。

また、自律制御において、テンプレート点群との照合の障害となる重機や機械設備等で飛行環境に変化がある場合でも、誤作動を起こすことはなく、安定した飛行が確認できた。また、万が一に備えて、自律飛行中のオペレーターによるマニュアル操作での介入を確認したが、問題なく制御を切り替えることができた。



写真—2 坑内の自律飛行状況

3. トンネル坑内自動巡視システム

本開発では、現場の職員が日常的に行っている目視での巡視・点検時のデータ取得・整理の効率化、高度化、安全性確保を目指し、トンネル坑内を自律飛行するドローンのアプリケーションとして、次の情報収集手段を採ることとした。

(1) 坑内の網羅的な情報収集・共有

坑内全線の情報収集は、自律飛行するドローン上部に艤装した360度カメラにより行う。360度カメラは、現場モニタリングシステム Open Space（Open Space Labs, Inc.）と連携する目的で使用される。本システムでは、事前に読み込んだ平面図を携帯端末のアプリ上で呼び出し、撮影開始位置を指定して、360度カメラを移動するだけで、平面図上に撮影した経路と経路上に画像が自動プロットされる。

飛行距離600m、自律飛行速度1m/s設定時は、1m毎に2枚（0.5秒間隔）、計1,200枚の360度画像が取得される。撮影は、ドローンの飛行時間と同じで、約10分で完了した。これを人の手で整理することは不可能だが、Open Spaceは、AIによる自動処理で図面上にプロット・整理し、飛行経路上を任意の視点でフライスルー可能なVR空間を10分程度で生成できる。また、地上からの撮影と異なり、空中からの撮影では、人の目線からは死角になる箇所や目の届きにくい天端付近の状況も記録することができた。

生成された坑内VR空間上では、当日の撮影画像の他、過去画像やBIM/CIMモデルと並べて連動比較ができる。過去画像との比較では、経時変化の確認やトンネル工事の進捗に伴い施工される覆工等により不可視になる部分の施工管理記録としての活用ができる。また、BIM/CIMモデルと比較することにより、施工進捗や設計との差異の確認が可能となる（図—4, 5）。

この結果は、遠隔地であってもWebブラウザから確認することができる。空間上にコメントやデータ等を追加することで、遠隔地からの点検、検査や、受発注者間においても非接触での情報共有を迅速に行うことが可能となる。

坑内の自律飛行に本システムを組み合わせることで、撮影作業や画像整理を省力化して、坑内の網羅的な情報収集と迅速で高度な情報分析・共有が可能になるものと考えられる。

(2) 遠隔切羽点検

自律飛行中にトンネル施工中全線の情報を網羅的に

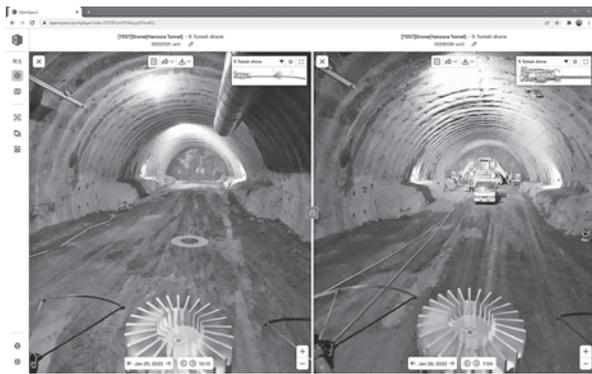


図-4 Open Space 時系列連動比較

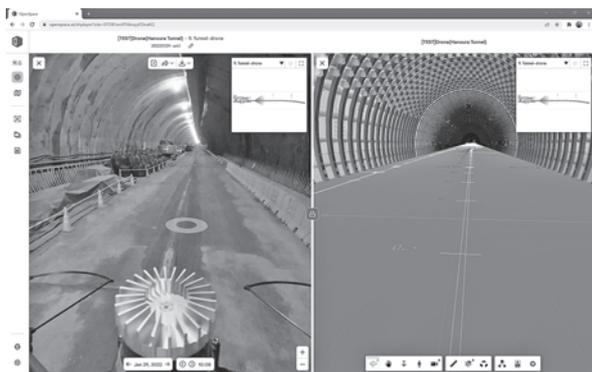


図-5 Open Space BIM/CIM モデル連動比較

自動収集する現場モニタリングシステムに加え、切羽面などピンポイントの詳細情報を取得、記録する手段として、ハイブリッドカメラ (DJI Zenmuse H20T) を採用することとした。このカメラは、ドローンの下部に装着する。ズーム、ワイド、熱赤外線カメラを一つの筐体に内蔵し、1回のシャッターで各カメラ画像/映像を同時記録することができる(写真-3)。ワイドカメラで全体、その中心をズームカメラで記録し、この画角、倍率の異なる2種類のRGB画像加えて熱赤外線カメラによる温度情報により、色情報だけでは判別できない情報が取得できることを期待して試行活用することとした。

情報収集は、自律飛行で切羽に到達してホバリング状態にあるドローンをマニュアル操作に切り替え、カメラの向きやズームを操作して切羽の任意箇所の画像/映像の取得を行う。坑内では、カメラセンサーによって照度が不足する場面もあるが、ドローン搭載のジンバルでのカメラ制御により、ブレのない鮮明な画像を取得することができた。熱赤外線画像からは、温度情報から水の検出が可能であった。検証中の切羽は、水のない状態であったが、切羽面亀裂や鏡吹付け裏面から水が滲出していた場合、次サイクルの施工時に留意すべき情報として活用できるものとする。

飛行撮影時の映像は、ドローン送信機上で確認する

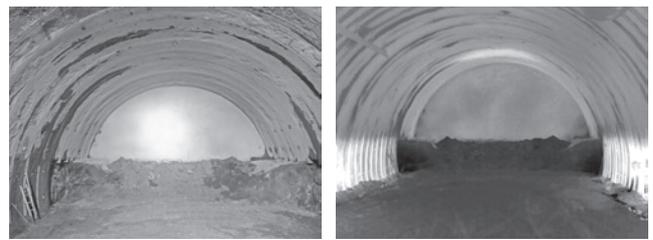


写真-3 ハイブリッドカメラによるワイド画像/熱赤外線画像



写真-4 遠隔臨場ドローンシステムによる坑内映像のリアルタイム確認

ことができるが、操縦者以外にも、リアルタイムに坑外や事務所等の遠隔拠点にいる関係者に映像共有できれば、安全や迅速な情報共有の面から情報の価値が向上すると考え、遠隔臨場ドローンシステム²⁾と連携することとした。本システムは、ドローンカメラの映像を送信機から坑内Wi-Fiを介してクラウド上にアップロードし、遠隔地のPCや携帯端末のWebブラウザから、リアルタイム映像を閲覧できる技術である。映像品質は、ネットワークの品質に左右されるが、検証期間中は、3~5秒程度の遅延があったものの鮮明な映像で坑内の状況をリアルタイムで確認することができた(写真-4)。

これまで、現場職員や作業員が、目視により行っていた切羽の点検を、ハイブリッドカメラを搭載した坑内自律飛行ドローンシステムに代替させることで、切羽に近接することなく坑外にいる関係者を含めた遠隔での点検に活用できるものとする(写真-5)。

4. おわりに

トンネル坑内自動巡視システムは、ドローンの自律飛行に現場モニタリングデータ処理の自動化を組み合わせ、現場職員が日常的に行っている巡視のデータ取得・整理の効率化、高度化を図ったものである。併せて、ハイブリッドカメラによる詳細な情報取得とそのリアルタイム配信により、発破直後や作業間に、自律



写真-5 ハイブリッドカメラによる遠隔切羽点検

飛行と組み合わせて切羽点検を行うことで、現場職員、作業員が切羽に近接することなく遠隔地でも的確に坑内の現状把握・確認が可能となった。

現在、本システムは、自律飛行制御の高度化に加え、搭載機器の防塵性向上、操作性の改善等を行い、現場職員が坑内をより手軽に、かつ安全に飛行させて、坑内の巡視・点検作業に活用できることを目標に現場実装に向けて取り組んでいる。

本稿が、現場の施工管理の生産性向上、安全管理の高度化に資する技術として参考になれば幸いである。

JCMA

《参考文献》

- 1) 上原広行, 松岡祐仁, 長尾健:「全自動ドローン」で測量と安全巡視を無人化, 建設施工と建設機械シンポジウム, 2021
- 2) 松岡祐仁, 林秀晃, 吉井太郎: 遠隔臨場ドローンシステムの開発, 建設施工と建設機械シンポジウム, 2021

【筆者紹介】



松岡 祐仁 (まつおか ゆうじ)
㈱フジタ
土木本部 土木エンジニアリングセンター設計部



吉井 太郎 (よしひ たろう)
㈱センシンロボティクス
社長室兼エバンジェリスト

