

34. 自律飛行ドローンによるトンネル坑内自動巡視システム

「坑内の網羅的な情報収集による巡視」と「無人切羽点検」

株式会社フジタ ○ 松岡 祐仁
株式会社センシンロボティクス 大畑 成史
株式会社センシンロボティクス 高瀬 悠介

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、土工を皮切りに主に測量分野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. 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、機体やペイロードの高機能化、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が必須となる。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、一般に、掘削（削孔/装薬/発破）、ずり出し、コンクリート吹付け、支保工建込み、ロックボルト打設というサイクルが昼夜繰り返され掘削が

進む。測量や計測等の施工管理や巡視・点検は、サイクル間の限られた時間内に職員により行われている。また、掘削前線である切羽においては、発破後や作業間に残薬、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。また、トンネル坑内は、非GNSS環境であることは元より、屋外に比べて暗所であり、機械設備など障害物が多く、大型重機が稼働していることから、ドローンの飛行にとって厳しい環境である。

本稿では、トンネル坑内のドローンによる巡視・点検システム開発についての取り組みについて報告する。

3. 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、一般職員が日常かつタイムリーに運用できる自律飛行機能が望まれる。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3D-LiDARを追加センサーとして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。

3.1 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図-1に示す。ドローン本体は、DJI MATRICE™ 300 RTK (以下、MATRICE 300) 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、画角は 90 度、計測距離は最大 50m、重量 475g 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コンピュータとして Manifold™ 2 を搭載し、3D-LiDAR、MATRICE 300 と接続して必要な情報を送受信可能となっている。さらに、Manifold 2 には Wi-Fi レシーバーが搭載されており、オペレーターが持つ 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パソコン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になっている。

以上の機器を MATRICE 300 上部に艀装し、自律飛行のための機器 (1.2kg) と後述する 360 度カメラ、ハイブリッドカメラ搭載時の合計重量は 2.6kg (最大積載重量 2.7kg) となった。



図-1 坑内自律飛行ドローン

3.2 ソフトウェア構成

本検証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-2 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 MATRICE 300 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。

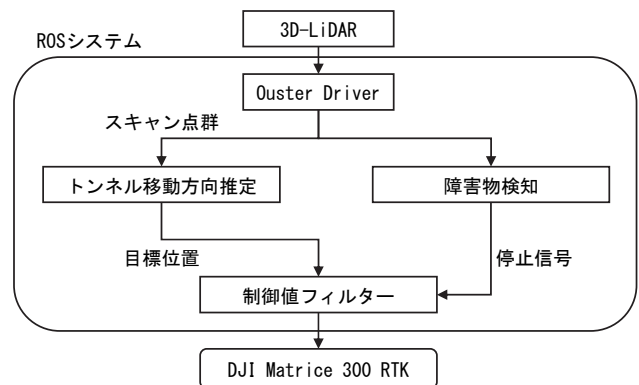


図-2 坑内自律飛行システムソフトウェア構成

(1) 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-3)。

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する (図-4)。

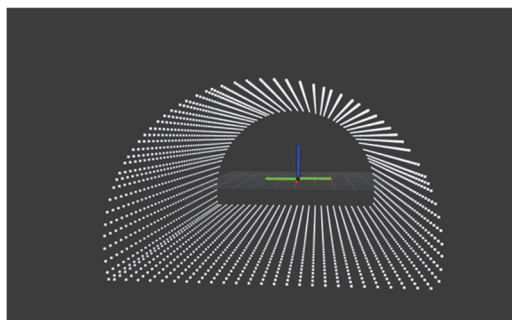


図-3 テンプレート点群

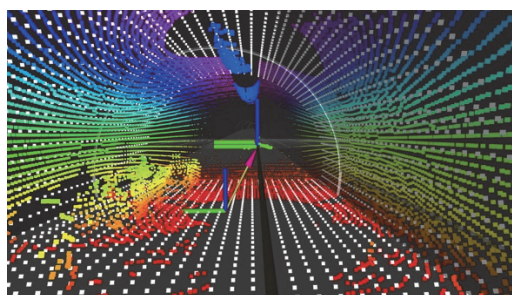


図-4 テンプレート点群とスキャン点群の重畳

(2) 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。

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。そこで急制動が起こらないよう、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 $1m/s$ とし、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、MATRICE 300 に指令値として与えられ、MATRICE 300 搭載の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。

(3) 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。

(4) その他の実装機能

前述した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。

4. 自律飛行時の情報収集と遠隔での巡視点検手法

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。

4.1 現場モニタリングシステム

現場モニタリングシステムには、360 度カメラによる撮影画像より、現場内をウォークスルー可能な VR 空間を生成できる

「OpenSpace」(Open Space Labs, Inc) を採用した。

このシステムでは、スマートフォンのアプリ上で現場の平面図上のスタート地点を指定すると、アプリと接続した 360 度カメラで撮影が開始される。撮影が終わり、撮影画像をクラウド上にアップロードすると、平面図上に撮影した経路上に画像がプロットされる。この処理後に、アプリや Web ブラウザでアクセスすると、連続した 360 度画像で表現される VR 空間内を自由に動き回り、BIM/CIM モデルや過去画像と連動比較しながら現場を確認できる。

4.2 ハイブリッドカメラ

自律飛行中にトンネル施工中全線の情報を網羅的に自動収集する現場モニタリングシステムに加え、ピンポイントの詳細情報を取得、記録する手段として、追加のカメラについて検討を行った。

カメラは、ドローン飛行中に向きや倍率の変更操作を任意で行い、切羽等の点検対象を詳細に確認できるようにするため、ハイブリッドカメラ DJI Zenmuse™ H20T を採用することとした。

本カメラは、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。画角、倍率の異なる 2 種類の RGB 画像に熱赤外線画像による温度情報を加えることで、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。

5. トンネル坑内自動巡視システム

5.1 現場検証

本システムを実現場で運用する際の適用性を探るため、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、及び 6 月に現場検証を行った。

検証時点でのトンネル掘削延長約 400m (2022 年 1 月)、約 600m (同 6 月) を対象に「坑口(開始点)に静止した状態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(終了点)に辿り着くと自動で停止(ホバリング)する」ことを目標に飛行検証を行った。飛行速度は、低照度下で写真撮影を行うことを踏まえ、ブレ対策として 1m/s に設定した。また、坑内に照明が設置されているものの、屋外と比べて絶対的に暗く、ドローン内蔵のビジュアルオドメトリで相対速度を推定する際に不利に働く可

能性がある。加えて、坑内には、重機や機械設備が駐機・設置され、天端には風管が存在するが、それらの配置は日々変わる。また、このため、自律制御に用いるテンプレート点群との照合が行えるかも検証項目とした。

5.2 坑内の自律制御によるドローン飛行

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、重機や機械設備等の障害物が左側に偏っていることと日々の配置状況を踏まえて、センターから右に 0.75m、または 1.5m を適宜切り替えて設定した。障害物検知は、Matrice 300 に備わっている障害物センサーは停止し、自律飛行システムの機能を使うこととした。前方の障害物検知は、進行方向に障害物がある場合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 20m とし、左右の検知距離は 1.5m と設定した。

検証を開始すると、前方に障害物がない状況で障害物検知が発動し、飛行が停止する状況が発生した。飛行ログを解析すると、ビジュアルオドメトリ等から得ている機体の飛行速度を 0m/s と誤認し、指定する 1m/s まで加速する際に機体が過度に傾斜、その際、水平方向の障害物の有無を確認している LiDAR が、機体の傾きとともに地面を照射し、障害物検知が発動していることが原因と推測された。施工中の坑内の地面は、照明はあるものの屋外に比べ照度が低く、照明直下と照明間では照度が一定ではない。また、地面に轍はあるものの特徴に乏しくビジュアルセンサーには不利な状況にある。このため、機体搭載の下方ライトを点灯して飛行することで、機体のビジュアルオドメトリを補助し、速度の誤認が起こらないように対処した。上方ライトについては、後述する 360 度カメラに光が写り込むため、常に消灯とした。



障害物の誤検知があったものの対処後の自律飛行自体は、坑口でスタートの指示を与えた後は、事前に立てた飛行計画通りの位置を進行し、予め指定した切羽 20m 手前まで問題なく飛行することができた。坑内の自律飛行状況を -5、切羽を認識してホバリングしている状況を -6 に示す。テンプレート点群との照合の障害となる重機、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による介入を確認したが、制御を問題なく切り替えることができた。



図-5 坑内の自律飛行状況



図-6 切羽認識による自律飛行停止

5.3 坑内の網羅的な情報収集と共有

坑内全線の情報収集は、自律飛行するドローンから360度カメラにより行う。坑内は、照明とその陰で明暗差が大きく、移動するドローンから撮影することため、画像にブレや白飛び・黒潰れが発生する恐れがある。このため、360度カメラは、センサーサイズが1型と大きく暗所耐性が高いRICOH THETA Z1を採用し、ドローン上部に艀装した。

360度カメラは、現場モニタリングシステムOpenSpaceと連携する目的で使用しており、自律飛行開始前にスマートフォンのアプリにより遠隔から指示を出すことで撮影が開始される。撮影は、0.5秒間隔で行われ、自律飛行速度1m/s設定時は、1m毎に2枚、飛行距離400mの場合、800枚の360度画像が取得される。撮影時間に要する時間は、ドローンの自律飛行時間と同じで、約7分程度で完了した。この枚数を人の手で整理することは不可能であるが、OpenSpace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空間を生成する。通常、人による撮影では、シャッターを切る着目点のみの画像が残るが、本撮影方法であれば、飛行経路上の状況を網羅性のある形で記録することができる。また、地上からの撮影と異な

り、空中からの撮影のため、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る。

OpenSpaceでの処理は、撮影画像をサーバーにアップロードすることで始まり、初期の処理には半日程度かかる。しかし、数回分処理を行うことでAIにより処理が最適化される。本検証では、最終的に10分程度に処理時間が短縮され、結果の迅速な確認が可能となった。

生成された現場のVR空間上では、当日の撮影画像はもちろん、過去画像やBIM/CIMモデルと並べて連動した比較ができる。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(図-7)。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-8)。

この結果は、遠隔地であってもWebブラウザを使ってシステムにログインすることで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できるため、遠隔地からの点検、検査や、受発注者間において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。



図-7 OpenSpace 時系列連動比較

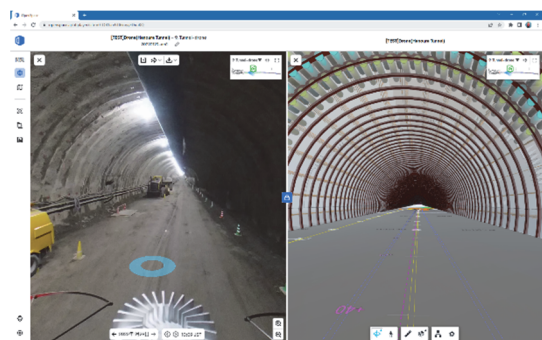


図-8 OpenSpace BIM/CIMモデル連動比較

5.4 切羽の無人点検

現場モニタリングシステムでは、坑内の網羅的な情報収集が可能な反面、切羽面等対象を絞った詳細な情報収集は難しい。そこで、ドローンに搭載したハイブリッドカメラにより、人が切羽に近づくことなく、情報収集が可能であるか検証を行った。

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画像/映像の取得を行う。この時、ハイブリッドカメラは、ズーム、ワイド、熱赤外線画像/映像を1回のシャッターで同時記録することができる(図-9)。ワイド画像で全体、その中心部の詳細をズーム画像、全体の温度情報を熱赤外線画像で記録でき、動画も同様に記録可能である。坑内では、カメラセンサーにと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。

通常、ワイドやズームの画像単体では、色情報からしか状況を判別することができない。これに同時撮影した熱赤外線画像の温度情報を組み合わせることで、水の滲出状況の検出が確認できた。検証期間中は、切羽面からの水の滲出はなかったが、切羽面亀裂や鏡吹付け裏面から水が滲出していた場合は、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。



図-9 ハイブリッドカメラによるワイド画像(左)/熱赤外線画像(右)

これらの記録情報は、ドローン送信機のモニター上で随時確認することができる。通常であれば、ドローン操縦者のみが確認できる情報であるが、リアルタイムに坑外や事務所等の遠隔拠点にいる作業員、職員、発注者等に映像を共有できれば、安全性確保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⁾を活用することとした。本システムは、ドローンから送られてくる映像情報を送信機から坑内Wi-Fiを通して、クラウドサーバ

ー上にアップロードし、遠隔地のPCやタブレットのWebブラウザから、クラウドサーバにアクセスすると、リアルタイムで現地の情報を閲覧できる技術である。映像遅延は、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ほぼリアルタイムで確認することができた(図-10)。



図-10 PCによる坑内ドローン点検リアルタイム確認

6. 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情報のリアルタイム配信を組み合わせることにより、発破直後や作業間に、自律飛行で切羽監視を行うことができ、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状況を把握可能となった。

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UI(User Interface)の改善等を行い、熟練のオペレーター不要で現場職員が坑内を手軽かつ安全に飛行させて活用できることを目標に現場実装に取り組んでいる。

今後は、開発と併せて、現場での運用を進め、他現場への水平展開を図る計画である。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。

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