

トンネル坑内自動巡視ドローンシステムの開発

松岡 祐仁*1

概 要

LiDAR を用いた飛行制御により、非 GNSS 環境下かつ暗所でも安定した自律飛行が可能なドローンシステムによる自動巡視技術を開発した。

本報では、施工中のトンネル現場において、目視しづらい高所を含む坑内全体の現況を、360度 VR 空間として短時間で自動生成し、網羅性の高いデータをもとに時系列や BIM/CIM との比較・連動が可能で高度な巡視・点検を実現した事例を報告する。

Development of autonomous drone system for automatic patrol in tunnels

Abstract

An automatic patrol technology using a drone system has been developed, enabling stable autonomous flight in non-GNSS environments and in dark places by flight control using LiDAR.

In this paper, a case study of a tunnel site under construction is reported, in which a 360-degree VR space was automatically generated in a short time to show the current status of the entire tunnel, including high locations that are difficult to see, and highly comprehensive data was used to enable comparison and linkage with time series and BIM/CIM, thereby realizing advanced patrol and inspection capabilities.

キーワード：ドローン、トンネル、LiDAR、巡視・点検

*1 土木本部 土木エンジニアリングセンター

§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。

当社では、これまで建設現場において、ドローンが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て、巡視・点検や測量作業を自動化する「全自動ドローンシステム」、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」などの開発を行ってきた。

本稿では、非GNSS環境であるトンネル坑内でのドローンによる巡視・点検システムの開発、現場試行の取り組みについて報告する。

§2. トンネル坑内自律飛行ドローン

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では、掘削施工サイクル間の限られた時間内で、現場職員による測量・計測等の施工管理業務が行われている。また、掘削最前線である切羽では、発破後や作業間に残葉、浮石、支保工裏面の状況の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、効率のかつ安全な巡視・点検技術が求められている。ドローンにとってトンネル坑内は、GNSSによる自動／自律飛行のための位置情報を取得できないことに加え、機械設備や大型重機など飛行の障害になるものが多く存在するため、日常的に活用するには厳しい環境である。

2.1 自律飛行システムの開発

トンネル坑内での施工管理ツールとしてドローン活用を推進するために、高度な操縦技術を有する専門オペレーターではなく、現場で日常のかつタイムリーに運用できる飛行支援機能が望まれる。そこで、非GNSS環境である坑内においてドローンの自律飛行を実現するシステムを株式会社センシンロボティクスと共同開発した。

坑内でドローンの自律飛行を実現するため、暗所でも高精度で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した。LiDARを使用した自律制御では、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り自己位置推定を行う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く、施工進捗に伴い掘削延長や重機配置が頻繁に変わる環境では、SLAMにより事前地図を精度よく生成することや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、一定の形状が連続するトンネル断面に着目して、設計断面を基にしたテンプレート点群とLiDARによるリアルタイムスキャン点群を比較・位置合わせ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(図1)。

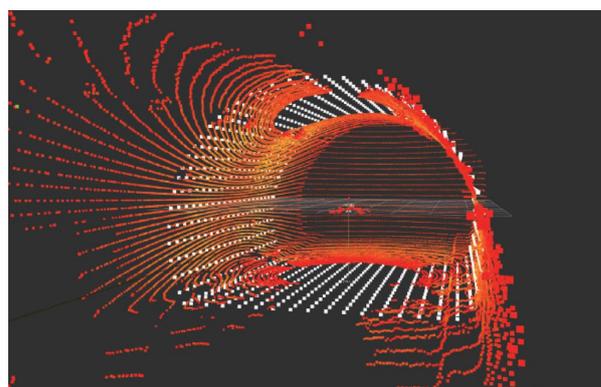


図1 テンプレート点群(白)とスキャン点群

2.2 ハードウェア構成

ドローン本体は、最大ペイロード2.7kgを有する産業用機体を用いた。LiDARは、水平360度、垂直画角90度で64レイヤーのレーザー出力、最大計測距離50mの3D-LiDARを採用した。ドローン上部に搭載した自律制御PCにより、LiDARとドローンを接続し、自律飛行に必要な情報の相互通信を可能とした。さらに、自律制御PCは、無線LANによりオペレーターが持つ自律飛行制御タブレットと通信を行い、タブレットから自律飛行開始・終了の指示や周辺環境、飛行状況のモニタリングを行う。また、ドローン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である(写真1)。

2.3 自律飛行制御ソフトウェア構成

自律飛行制御システムは、自律制御PC内でRobot Operating System (ROS)上に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自律制御が動作する。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」となる。LiDARによるスキャン点群は、ROSシステムに取り込まれ、各モジュールで決定された目標速度、移動



写真1 トンネル坑内自律飛行ドローン

量をドローンに入力して制御を行う。その他の機能として、障害物を自律飛行で回避するリルート機能、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を実装する。

§3. トンネル坑内自動巡視システム

ドローンに搭載した3D-LiDAR、自律制御PC／システムとオペレーター側の自律飛行制御タブレットから構成される自律飛行システムは、ドローンによる自律飛行の対象をトンネルに絞ることで、SLAM制御を必要とせず、トンネル坑内を坑口から切羽まで特別な操作技術がなくとも障害物検知や回避飛行により安全で安定した自律飛行を実現した。本システムは、現場職員が日常的に行っている目視での巡視・点検時の安全確保、データ取得・整理の効率化、高度化を目指し、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と統合することとした。

3.1 坑内の網羅的な情報収集・共有

現場職員が日常的に行う坑内全線の巡視・点検は、ドローン上部に搭載した360度カメラにより代替して行

う。360度カメラは、現場モニタリングシステム OpenSpace (Open Space Labs, Inc) と連携する目的で使用する。本システムでは、事前に読み込んだ平面図上で、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。例えば、飛行距離 600 m、飛行速度 1 m/s 設定時は、0.5 m 毎に 1 枚 (0.5秒間隔)、計1200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分で完了する。これを人の手で整理することは不可能だが、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15分程度で生成する。生成された坑内VR空間は、インターネット環境があれば場所を問わずWebブラウザから閲覧・確認が行える(図2)。

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・共有が可能となる。

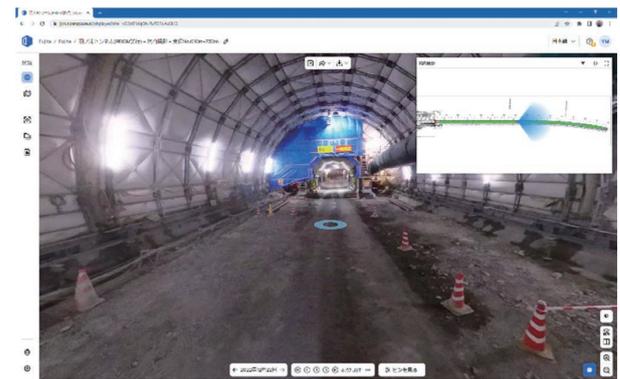


図2 現場モニタリングシステム (Webブラウザ画面)

3.2 切羽の遠隔(無人)点検

現場モニタリングシステムの坑内の網羅的な情報収集に対し、切羽面に対象を絞った詳細な情報収集手段として、複合カメラを採用した。

自律飛行で切羽到達後、自動でホバリング状態に移行したドローンをマニュアル操作に切り替え、ドローン下部に搭載した複合カメラの向きやズームを遠隔で操作して切羽の任意箇所の画像／映像の取得を行う(写真2)。このカメラは、ズーム、ワイド、熱赤外線画像／映像を同時記録できる。ワイドで全体、その中心部の詳細をズーム、全体の温度情報を熱赤外線記録・確認する使い方が可能である。



写真2 切羽の遠隔（無人）点検状況

3.3 遠隔臨場ドローンシステム

飛行撮影時のカメラ映像は、オペレーター手元の送信機上でモニタリングできるが、リアルタイムに坑外の事務所、母店等の遠隔拠点にいる関係者に映像共有できれば、安全面や迅速な情報共有の面からデータの価値が向上すると考え、冒頭で紹介した遠隔臨場ドローンシステム「SENSYN CORE Monitor」（株式会社センシンロボティクス）を活用することとした。

本システムは、ドローン搭載カメラの映像を送信機から坑内に設置したWi-Fi網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（写真3）。



写真3 坑内遠隔確認状況（タブレット端末）

§4. トンネル坑内自動巡視システム

前述のシステム群を統合したトンネル坑内自動巡視システムの現場試行を、トンネル掘削中の「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11~12月に実施した。

トンネル坑内の自律飛行は、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、飛行速度は1m/sを基本とした。坑口で自律飛行開始の指示を与えた後は、粉塵の影響で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た。また、施工重機の駐機位置が

飛行経路上にある場合は、リルート機能で回避しながら切羽手前まで問題なく自律飛行することを確認できた。

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かった。セントルのような狭小断面でも、テンプレート点群を断面に応じた設定に切り替えることで、安定した飛行ができることが確認できた。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。

また、自律飛行時は、ドローン搭載の自律制御PCとオペレーター側の自律制御タブレットの通信状態を確保する必要があるため、曲線区間や障害物が多く電波環境が悪化しやすい区間では、ドローンとオペレーターの距離を100~200mに保つ必要があるが、視通の良い直線区間では、300m以上離れていても、飛行指示や状況の確認が可能であった。

4.1 作業人員・時間の縮減効果

現場モニタリングシステムによる試行は、坑内作業を行っていない朝礼前の時間帯に実施し、全9回のデータ取得を行った。坑口から10mの位置から飛行を開始し、切羽を認識して飛行が自動停止する掘削延長710~745mまでの区間を記録した。取得データのクラウド上での処理は、試行初期段階にはプレビュー処理完了まで数時間要したが、日々のデータの蓄積によりAIが学習し、試行7回目以降は15分程度で処理が完了するようになった。現行の現場職員による巡視・点検は、徒歩による坑内全線の目視点検と写真記録から事務所に戻りデータ整理と資料作成で概ね2時間を要する。本システムを活用することで、データ収集から結果の閲覧可能まで30分で完了する。現場職員により、同様の巡視・点検~データ整理までを毎日行うには困難ではあるが、本システムを活用することで、作業時間は75%縮減、作業人員は87.5%縮減の効果が見られ、日常的な活用も可能であると考え（図3）。

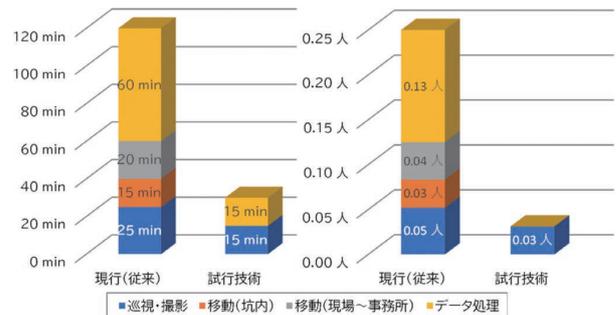


図3 作業時間・人員の縮減効果

4.2 切羽点検時の安全性向上

自律飛行ドローンを用いた遠隔切羽点検では、昼夜勤の交代時やずり出し終了後等の切羽作業が空くタイミングで本システムによる試行を全15回行った。いずれの場合も、オペレーターは切羽後方 100 m 以上離れてドローンに自律飛行の指示を与え、切羽点検のための画像、映像撮影操作を行ったが、データの取得に問題はなかった。目視による切羽点検では、細心の注意を払って切羽面の確認が行われるが、肌落ち、崩落等のリスクをゼロにすることはできず、近接して点検するにも限度がある。本システムであれば、切羽近傍は無人でも切羽の詳細な画像、映像の遠隔記録が可能となり、切羽点検時の安全性確保に有効であることが確認できた。

4.3 品質面での効果

ドローン搭載の複合カメラは、1回のシャッターでワイド、ズーム、熱赤外線の各画像／映像を同時に記録できる。ドローンのジンバル機構により、低照度下、送気と吸気で切羽付近の気圧が不安定で機体が揺れる環境においても、ブレのない精細なデータの取得が可

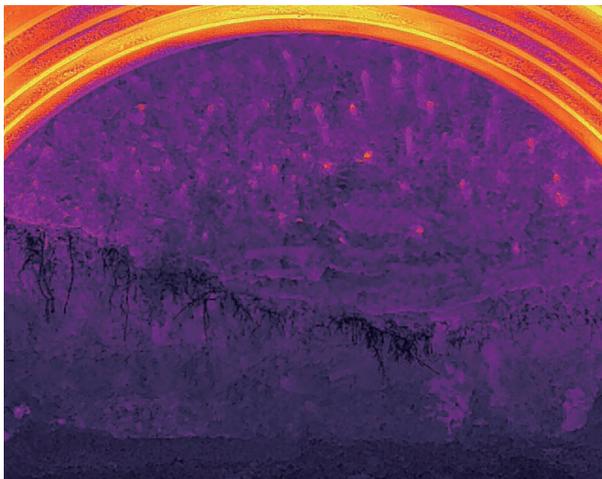


写真4 切羽点検取得画像の一例
(上：ズームカメラによる格子撮影、
下：熱赤外線センサーによる切羽の熱画像)

能であった。ワイドカメラで全景を記録し、ズームカメラでワイドカメラの画角を格子状に分割して高精細に記録した一連の画像の取得が1度の操作で可能で、より詳細な切羽状況を確認することができた。また、熱赤外線カメラでは、材質やコンクリートの硬化熱などによる温度の差異が確認できる(写真4)。試行中、切羽面からの水の滲出はほぼなかったが、温度情報から水の滲出する亀裂位置の特定や、鏡吹付けコンクリート背面の水の存在の有無等の確認に有効であると考える。これらの詳細画像や温度といった取得データから、次掘削の作業指針、対策工の検討資料としての活用が期待できる。

4.4 施工管理の効率化、高度化に関する効果

現場モニタリングシステムでは、地上からの撮影と異なり、人の目線では死角になる箇所や目の届きにくい天端付近の状況も網羅的にデータ取得できることを確認した。また、人による作業では不可能な情報量の360度画像データを高速に処理し、クラウドを通して作業所のみならず遠隔地の母店や本社からでも30分程度のタイムラグで坑内のVR遠隔巡視が実施できた。坑内VR空間上では、空間上にコメントやデータ等を追加することで、指摘等の着目点を関係者と共有できる。また、当日の撮影画像のほか、過去画像やBIM/CIMモデルと並べて連動比較することで、施工進捗により不可視になる区間の施工管理記録としての活用や施工進捗、設計との差異の確認も可能であった(図4)。

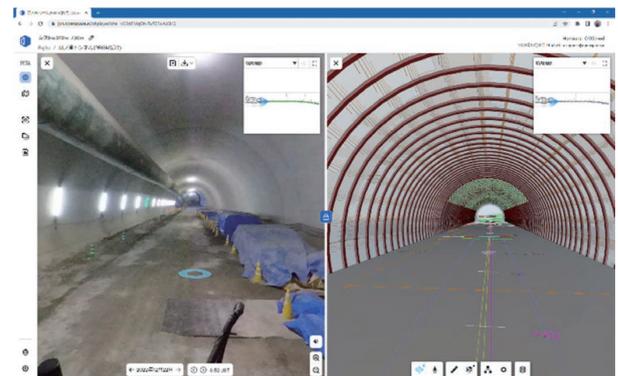


図4 現場モニタリングシステムによる現況
-BIM/CIM 重畳比較

切羽点検のみならず、飛行中のドローン搭載カメラを遠隔臨場ドローンシステムに接続してWeb会議システムと連携することで、ドローンによる坑内の遠隔臨場も可能である。試行では、ほぼ遅延のない高精細な映像での通信による遠隔臨場が実施できた(写真5)。

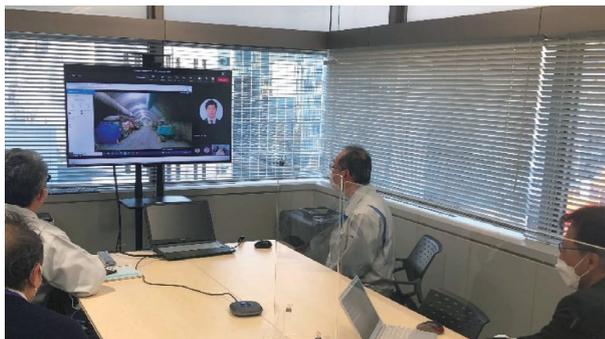


写真5 会議室での坑内遠隔点検・巡視状況

これらクラウドを利用した迅速な情報共有を活用することで、より多くの目で現場状況を把握することができ、遠隔拠点の熟練技術者などの移動・現場臨場を伴わない施工検討や課題の早期抽出が可能となり、施工管理の効率化、高度化に資するものと考えます。

§5. トンネル坑内自動巡視システム

現在、本システムは、自律飛行制御の最適化、高度化に加え、スキャン点群の出来高／出来形計測への活用に向け、システム改良を進めるとともに、現場実装に取り組んでいる(図5)。また、建設中のトンネルだけではなく、本システムの飛行支援機能を活用した覆工コンクリートの点検用途など維持管理段階への展開

も期待できる。本稿が、現場の安全管理や施工管理の生産性向上、高度化に資する技術として参考になれば幸いである。

最後に、本試行は、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」において、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）予算を活用して実施したものである。試行結果について、試行は十分な成果があり、技術の導入効果や社会実装の実現性について高く評価できるとのA評価をいただいた。試行にあたり、ご理解、ご協力いただいた関係各位にこの場を借りて御礼を申し上げます。

ひとこと

本システムがトンネル工事の生産性、安全性に寄与するよう、引き続き開発を進めていきたい。



松岡 祐仁

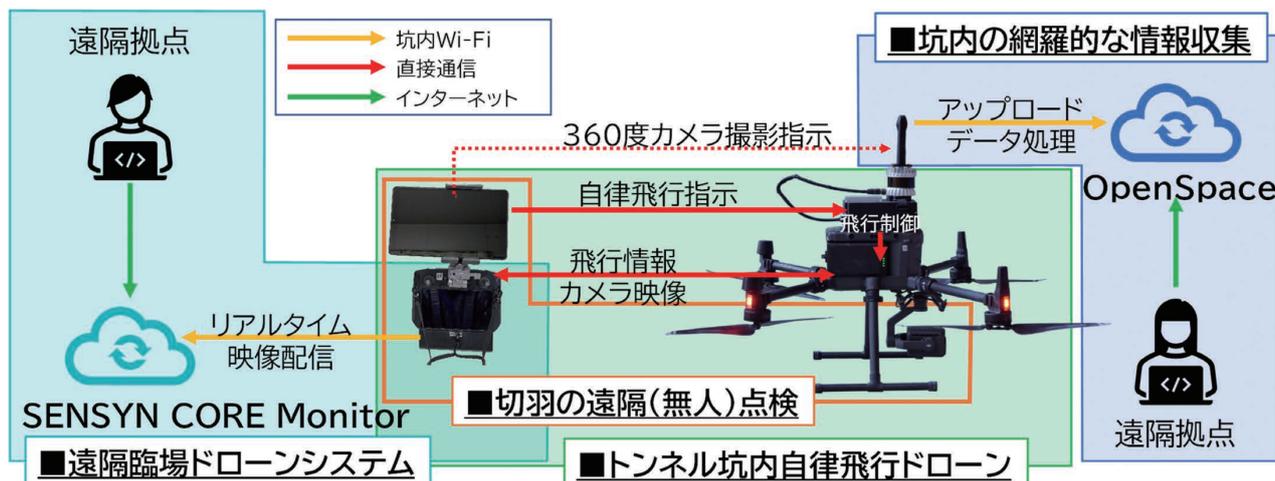


図5 トンネル坑内自動巡視ドローンシステム