

地下鉄トンネルの全般検査へのドローン活用

菅原 健¹・石川 幸宏²・田中 大介³

¹ 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)

E-mail: ken.sugawara@tokyometro.jp

² 正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)

E-mail: yuk.ishikawa@tokyometro.jp

³ 正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)

E-mail: d.tanaka@tokyometro.jp

近年，様々な分野においてドローンの活用が検討されている．東京地下鉄株式会社（以下，東京メトロという）は，2018年から3年間の検討，準備期間を経て，地下鉄トンネルの通常全般検査へのドローン活用を始めた．これにより，トンネル内の高い場所を，従来の軌道上からの徒歩による目視より精度良く確認できるほか，ドローンによる検査データを蓄積することにより質の高いトンネルの検査が可能となる．なお，トンネル内は非GPS環境下であることから，現場に適したドローンを製作するとともに，操縦者の育成を行い運用している．

Key Words: drone, subway tunnel, maintenance, general inspection, under non-GPS environment

1. はじめに

東京メトロは，東京圏を事業基盤として，9路線，営業キロ195kmで運営している．保有する土木構造物は，トンネル，高架橋，橋りょう，土工等からなり，このうち約85%がトンネルを占める．

トンネルの維持管理にあたっては，国土交通省「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」に基づき2年ごとに軌道上からの目視および必要箇所の打音を行う通常全般検査や，20年を超えない周期で高所作業車上からの近接目視および必要箇所の打音を行う特別全般検査等によりトンネルの状態を確認している¹⁾．また，検査結果等により必要な箇所に対する監視や補修等の計画を立案するとともに，計画に基づく補修工事等の措置を行う．これらの検査・計画・措置のサイクルを着実に実施することで，トンネルの安全を確保している．

本稿では，トンネルの通常全般検査（以下，トンネル検査という）の一部にドローンの運用を開始したことから，導入までの流れとその取り組みについて記載する．

2. 背景と目的

東京メトロでは，トンネル検査を写真-1のように，軌

道上から構造物の状態の確認を目視で行い，必要に応じて打音検査を行っている．打音が必要になった際，手の届く範囲はその場で確認をしている．一方で，トンネル内の立坑（写真-2）や上床開口部等の高所で手の届かない範囲は，目視とは別日に写真-3のように足場や高所作業車を使用して確認をしており，作業の効率性に課題があった．このようなことから，トンネル内の高い場所を効率的に確認するための方法の一つとして，トンネル内の鉄道施設（例えば，架線や通信ケーブル等）を避けて対象まで接近し，動画像を取得できるドローンの利用について2018年から検討を進め，2020年2月から運用を開始した²⁾³⁾．



写真-1 トンネル検査



写真-2 立坑



写真-3 足場による確認

3. ドローン飛行における関係法令

ドローンの運用を目指すにあたって、まずは関係法令の確認を行った。ドローンの飛行にあたっては、安全を確保するため法令を遵守する必要がある。代表的なものとして、航空法と小型無人機等飛行禁止法があり、利用目的に合わせて許可申請等の対応を適切に行わなければならない。

(1) 航空法

航空法は、民間の航空機の飛行の安全および航空機の航行に起因する障害の防止等を目的とする法律である。2015年に無人航空機の定義が追加され、人口集中地区での飛行の禁止や、飛行の方法について記載されている。

(2) 小型無人機等飛行禁止法

小型無人機等飛行禁止法は、重要施設付近（国会議事堂、首相官邸等）上空でのドローンの飛行を禁止する法律であり、国政の中枢機能等の維持や公共の安全の確保のために制定されている。

これらの法令は、屋内等の囲まれた空間でドローンを飛行する場合は適用されないが、地下鉄トンネルは坑口

が地上と繋がっており、完全に囲まれた空間ではないことから、屋外と同様に法令に沿った手続きが必要となる。まずはじめに、国土交通省に対してドローン情報基盤システム（以下、DIPS という）による飛行許可申請を行う。飛行許可申請とは、飛行許可を得るため、飛行期間、飛行経路、飛行機体、操縦者等の申請を行うものであり、飛行開始予定日の 10 開庁日前までに行う必要がある。申請に不備があった場合は、さらに審査に時間を要することもあるため、東京メトロでは、トンネル検査の 1 か月前を目途に申請を行っている。さらに、実際にトンネル検査でドローンを使用する日ごとに、DIPS の飛行情報共有機能（FISS）で飛行計画の登録を行う必要がある。飛行情報共有機能とは、飛行許可申請により飛行許可を得た上で、飛行日、飛行時間、飛行範囲等の詳細な飛行計画を登録するものである。国土交通省のホームページで、緊急用務空域や期限付き限定区域が飛行範囲に該当しないことを確認した上で、検査当日までに、登録を行っている。

ドローン技術は、いまだ発展途上であり、発展とともに法整備が行われている状況である。東京メトロでは、各種法令の動向に着目しながら、ドローンの運用を行っている。

4. ドローン運用における課題検討

トンネル検査でのドローン運用を開始するにあたっての主な課題は(1)非 GPS 環境下での飛行、(2)暗所での変状確認精度、(3)鉄道施設の防護の 3 点であり、以下に課題解決に向けた取組みについて記載する。

(1) 非 GPS 環境下での飛行

一般的なドローンは、GPS との連携で自らの位置を把握し、高さ等の制御を自動的にに行っている（以下、ホバリング制御という）。しかしながら、トンネル内においては GPS を受信することができないため、ホバリング制御が困難である。その他、トンネル内での実証実験により、狭隘な環境やトンネル内の鉄道施設に障害物センサーが反応し、離陸できない可能性があることや、トンネル壁面に接近できないことが分かった。そこで、ホバリング制御や障害物センサーを搭載しないドローンを製作することとした。このことにより、従来制御装置が行っている役割を操縦者が実行する必要があり、一般的なドローンを飛行させる場合より高い操縦技術が求められるため、操縦者を育成することとした。

(2) 暗所での変状確認精度

トンネル検査では、写真-1のとおり、台車に大型の投光器を設置し、必要な明るさを確保しているが、ドローンで確認しようとしている高い場所は、軌道上からの距離が比較的離れており、投光器の光が届きにくい。そこで、変状の状態をより精度よく確認するためには、新たに照明が必要であり、ドローンに照明を搭載することとした。搭載する照明は、撮影した画像が白飛び（画像の明るい部分で階調が失われて真っ白になった状態）せずに変状の状態が確認できる仕様の LED ライトを採用することとした。また、変状を撮影するカメラは、変状の状態を把握できる精度を有し、リアルタイムで映像が確認できるアクションカメラを採用することとした。なお、これらのライトやカメラをドローンに搭載する際には、フレームが干渉しないよう角度や位置の調整を行った。

(3) 鉄道施設の防護

トンネル内には架線や電気ケーブル、軌道等、鉄道の運行に係る重要な施設が存在している。トンネル内でドローンを飛行させるにあたり、ドローンのブレードや本体が鉄道施設に衝突し、損傷することを防止するため、プロペラ等を防護する必要がある。そこで、ドローン自体を完全に囲うフレームを採用することとした。

これらの課題検討で示唆された要件を基にプロトタイプ（写真-4）を製作した。プロトタイプは、ホバリング制御や障害物センサーを搭載せず、ドローン全体を球殻フレームで囲う仕様を採用した。



写真-4 プロトタイプのドローン

5. 操縦者育成

操縦者の育成は、国土交通省航空局標準マニュアル⁴⁾を基本に、非GPS環境下およびホバリング制御を有しないドローンの操縦技術を習得できるよう、表-1のような独自の研修プログラムを策定した。研修プログラムは、ドローンを操縦するにあたり必要な知識を学ぶ「座学（2日間）」、体育館にて教育用ドローンを使いドローンの操縦技術を学ぶ「実技昼間（6日間）」の2部構成とした。

「座学」では、ドローンについての、基礎知識や仕組み、飛行・操縦に関する法律や規制、使用する電波とその特性、飛行に伴う申請や登録手続き等について教育を行っている。

「実技昼間」では、はじめの4日間はドローン操作に慣れるため、高度維持機能のあるドローンによる操作研修を行い、その後残りの2日間で、トンネル内の非GPS環境下を想定した高度維持機能のないドローンによる操作研修を行っている。トンネル内の鉄道施設がある中でも操縦を可能とするため、写真-5のような障害物を多く設置したコースによる訓練も行っている。また、日ごとに研修の最後に効果確認テストを実施し、その日に習得すべき技量が備わっているかを確認している。さらに、非GPS環境下での細かな操作感を覚えるため、実機の技術習得訓練の合間等を利用して、シミュレーターによるホバリングやプロポ（送信機）操作の練習も行っている。そして、研修最終日には実技試験を行い、各々の習熟度を確認し、合格した者をドローン操縦者として認定した。

表-1 研修プログラム

科目	日数	研修内容
座学	2日間	ドローンの基礎知識について
実技	1日目	- 高度維持機能あり - 後方視点操作によるホバリング維持 - 各種移動（前後左右、斜め、四角、円）
	2日目	- 高度維持機能あり - 全方位視点操縦（側面、対面）による各種移動（4方向ホバリング、斜め、四角）
	3日目	- 高度維持機能あり - 全方位視点操縦（側面、対面）による進行方向への各種移動（四角、円）
	4日目	- 高度維持機能あり - 全方位視点操縦（側面、対面）による8の字飛行
	5日目	- 高度維持機能なし - 後方視点操作によるホバリング維持、各種移動（前後左右、斜め、四角）
	6日目	- 高度維持機能なし - 後方視点操作による円移動
実技夜間	1日間	- 夜間トンネル内の飛行 - 上床開口部の飛行



写真5 障害物を設置したコース

6. 現在までの運用と新たな課題への対応

前章までの取り組みを経て、東京メトロでは、トンネル検査におけるドローン飛行に関する安全管理や緊急時の対応等を定めたマニュアルを整備した上で、2020年2月から半蔵門線のトンネル検査へのドローンの運用を開始した。トンネル検査には、タブレット端末を使用しており、検査用モバイルアプリケーション（以下、検査アプリという）で過去の検査情報を閲覧しながら、現在の状態の確認を行うとともに、変化のあったところを記録している。その中で、目視での確認が困難な場所があった場合にドローンを飛行させ、搭載したカメラの映像をタブレット端末上で、リアルタイムで状態を確認している。確認した変状の写真を検査アプリに取り込み、検査の結果として記録を残している。

このように、実際にトンネル検査の流れの中でドローンを運用し、有効であることを確認した。また、ドローンで撮影した映像は近接目視と同等であり、足場や高所作業車を用いるより、安全かつ効率的にトンネルの状態を確認することができた。

一方で新たな課題と改善事項が見つかったため、さらに以下の検討を行った。

(1) 研修プログラム見直しの検討

トンネル検査でドローンを飛行させる際は、構造物の状態をより詳細に確認するため、壁際を飛行させる必要がある。また、トンネル検査で使用するドローンは、研修で使用している教育用ドローンと比べて重量があり、それに伴ないドローン自身が発生させる風が大きいので、壁際を飛行させた際に、風が壁に跳ね返る影響で、機体を安定させるのが難しい。このことから、壁際での安定した飛行が新たな課題となり、研修プログラムの見直しを行った。

研修では、教育用のドローンを使用し、体育館での訓

練を行っているため、実際にトンネル検査で飛行させる場合とは環境に大きな差がある。そこで、実際にトンネル検査で使用する機体を用い、夜間トンネル内で研修を行う「夜間訓練」を研修プログラムに追加することとした。これにより、実際にトンネル内で壁際や開口部等の狭隘な場所での飛行訓練も行うことができ、さらなる飛行技術の向上が期待できる。また、昼間の飛行とは違い、薄暗い中での飛行となるため、明暗差からの遠近感の違いにも慣れることができ、さらに、多くの鉄道施設がある環境で飛行させることで、実際のトンネル検査と同じ緊張感を体験することができる。

(2) トンネル内で使用可能なセンサーの検討

トンネル内では、GPSを受信できないこと、狭隘な環境で鉄道施設が多いことから、ホバリング制御や障害物センサーを搭載しないドローンを使用する必要があった。しかし、そのようなドローンは操縦に高い技術を要するため、さらにトンネル検査では、鉄道施設へ接近して飛行する必要があることから、操縦者の負担が大きいことが課題となった。そのため、少しでも操縦者の負担を軽減できるよう、トンネル内でも搭載可能なセンサーについて、検討を行った。

ドローンに搭載可能なセンサーには、GPSセンサーや気圧センサー等さまざまなセンサーがある。今回はそれらのセンサーの中で、実際にトンネル内でも有効と考えられるLiDAR（ライダー）センサーの搭載について検討を行った。LiDARセンサーとは、ドローン本体からレーザー光を地面に向けて照射し、跳ね返ってくるまでの時間を計測し、地面までの距離や方向を測定することで一定の高度を保つことができるものである。LiDARセンサーを搭載することで、自動的に高度を維持できるため、ドローンを静止させて特定の変状を確認する場面において、より安定した飛行ができることが分かった。一方、特定の変状にドローンを接近させるまでの飛行においては、トンネル内の道床面がレールやまくらぎ等の鉄道施設で平坦ではないため、高度維持が不安定になり、安定した飛行ができないことが分かった。これらのことから、ホバリング（空中の一点に静止した飛行状態）をする際の補助としてLiDARセンサーを活用することとした。

(3) カメラと照明の検討

ドローンをトンネル内で試行する中で、カメラや照明の種類によって、変状の見え方に差があることが分かった。そこで、トンネル内の変状を正確に確認できるよう、ドローンに搭載するカメラと照明の最適な組合せについて検証を行った。検証は、実際にトンネル内の壁面から30cm離れた場所にカメラと照明を設置し、壁面のひび割れを撮影、撮影した画像を実際の検査と同様にタブレ



写真6 仕様を満たした新たな機体



写真7 ドローンで撮影した画像

ット上で確認し、変状の確認しやすさについて評価を行った。カメラについては、市販のアクションカメラ等、数種類を比較した。照明については、色温度や明るさの異なる LED ライトを数種類比較した。その結果、カメラについては、4K 解像度以上の性能を有すものを使用しており、確認のしやすさで大きな差異は見られなかった。また、いずれのカメラにおいても、色温度 5000K、照度 200lx が人の目で確認しやすいことが分かった。

これらの検討を通して研修プログラムと機体の仕様を確立させた。そして、仕様を満たした新たな機体（写真-6）を用い、丸ノ内線のトンネル検査でドローンの運用を行い、高度維持機能を使用した場合の操作性と、カメラで撮影した画像（写真-7）での変状の確認精度を実際の運用に合わせた環境で確認し、新たな機体がトンネル検査に運用できる水準であることを確認した。



写真8 ドローンによる検査（上床開口部）

7. おわりに

東京メトロでは、トンネル検査の作業の安全性と効率性の向上の観点から、ドローンの運用を検討し、2020年2月からトンネル検査へのドローン活用を開始した（写真-8）。その結果、トンネル検査の中で、高所の変状を詳細に確認することができるようになり、構造物の安全性の向上につながった。

また、今後については、2021年の千代田線のトンネル検査での運用を経て、2022年度からの全路線への展開を目指している。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル、2007年
- 2) 榎谷祐輝：非 GPS 環境下でのドローンによるトンネル検査, JREA, Vol.63 No.8, pp.51-54, 2020年
- 3) 石川幸宏, 山口秀明：非 GPS 環境下でのドローンによるトンネル検査, 土木施工, Vol.62 No.7, pp.98-100, 2021年
- 4) 国土交通省：国土交通省航空局標準マニュアル, 2021年

(2021. 8. 6 受付)

UTILIZATION OF DRONES FOR GENERAL INSPECTION OF SUBWAY TUNNELS

Ken SUGAWARA, Yukihiro ISHIKAWA and Daisuke TANAKA

In recent years, the use of drones has been studied in various fields. Tokyo Metro Co., Ltd. (hereinafter referred to as Tokyo Metro) has begun using drones for general inspection of subway tunnels after a three-year study and preparation period from 2018. As a result, high places in the tunnel can be confirmed more accurately than by method by visual inspection with walking. Due to the effect and accumulating inspection data with drone, high quality tunnel inspection becomes possible. Since the inside of the tunnel is in a non-GPS environment, we manufactured special drones suitable for the site and trained operator. After the effort, we started practical use of drone for regular inspections.