

非 GPS 環境下でのドローンによるトンネル検査

山口 秀明¹・荻野 竹敏²・小西 真治³・石川 幸宏⁴

¹ 非会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: h.yamaguchi.x8g@tokyometro.jp

² 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: ta.ogino@tokyometro.jp

³ 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

⁴ 非会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: yuk.ishikawa@tokyometro.jp

東京メトロでは、トンネルの通常全般検査において、上床開口部等の高い部分の確認が必要になった際は、別日に足場や高所作業車を使用して確認を行っており、非効率な状態であった。そこで、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、ドローンの運用を開始した。運用するにあたっては、非GPS環境下での飛行、鉄道施設の防護等の課題があったため、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、社員が操縦を行った。実際の通常全般検査でドローンを運用した結果、近接目視と同等の精度で構造物の状態を確認することができ、よりも安全かつ効率的に作業を行うことができた。一方で、ドローンの可搬性や、狭隘箇所で発生する風の影響等の課題が明らかになったため、改善に向けて今後更なる検討を進めていく。

Key Words: drone, Non-GPS, periodic inspection, subway, UAV, Maintainance

1. はじめに

東京メトロが保有する構造物は、トンネル、高架橋、橋りょう、土工等からなり、このうち約 85%がトンネル部分である(表-1)。

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目視および必要箇所の打音を行う通常全般検査や、20年ごとに高所作業車上からトンネル上床等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構造物の状態を確認している。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・措置のサイクルを回すことで、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」)の一部にドローンの運用を開始したので紹介する。

表-1 東京メトロの各路線

路線名	本線延長	トコ延	全通年次
銀座線	14.5km	14.1km	1939年
丸ノ内線	28.0km	25.8km	1962年
日比谷線	20.7km	17.3km	1964年
東西線	31.4km	17.1km	1969年
千代田線	25.0km	19.1km	1979年
有楽町線	29.3km	26.4km	1988年
半蔵門線	16.8km	16.8km	2003年
南北線	21.4km	21.4km	2000年
副都心線	8.8km	8.8km	2008年
計	195.9km	166.8km	—

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にて行い、必要に応じて打音を行っている。打音が必要になった際、手の届く範囲はその場で確認を行っている。一方で、トンネルの上床開口部等の高い部分で手の届かない範囲は、目視

とは別日に**写真-2**のように足場や高所作業車を使用して確認を行っており、作業が非効率な状態である。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、トンネル内の鉄道運行に係る施設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運用の可能性について検討を開始した。



写真-1 トンネル検査

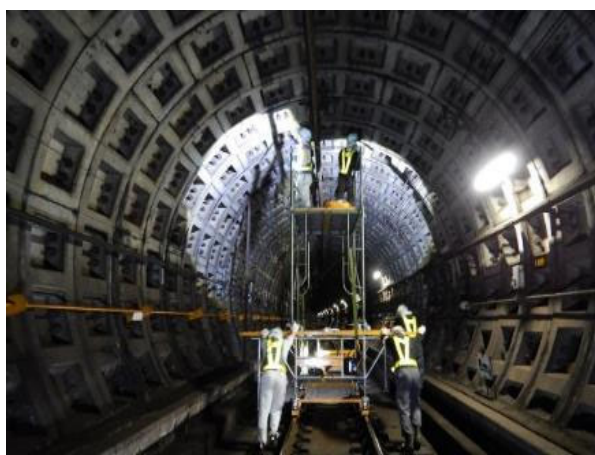


写真-2 足場による確認

3. ドローン運用における課題検討

トンネル検査でドローンを運用するにあたっての主な課題は(1)非 GPS 環境下での飛行、(2)鉄道施設の防護、(3)暗所での変状確認精度の3点であり、以下に課題解決に向けた取組みを紹介する。

(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行っている（以下、「ホバリング制御」）。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、離陸できないことがあることや、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る、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にした。

(2) 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設置してある。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。また、ドローンの上部にはカメラや照明を、下部にはバッテリーを搭載していることから、ドローン自体も防護する必要がある。そこで、カメラ等の機器を含めドローン自体を完全に囲う球殻フレームを採用することとした。

(3) 暗所での変状確認精度

トンネル検査では、**写真-2**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、さらに、撮影した画像をトンネル検査の結果を登録する検査用モバイルアプリケーション（タブレット端末）²⁾にその場で登録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、球殻フレームが干渉しないよう角度や位置の調整を行った。

4. 機体製作

機体の製作は、課題検討と並行して行った。課題検討で示唆された要件を基に市販品パーツを選定、プロトタイプを製作し検証を開始した。検証は、まず体育館等の広い屋内でドローンの飛行確認や機器の動作確認を行い、

その後、トンネル内で検査を模擬した運用面の確認を行った。検証を通して見つかった課題や要望は、その都度改善方法を検討し、適宜、パーツの変更や機器の調整を行った。このような検証と改善を繰り返し行うことによって、トンネル検査に運用できる水準まで機能を向上するに至った（写真-3）（表-2）。なお、製作したドローンは、狭隘かつ暗所といったトンネル内の特性を踏まえ、カメラや照明等の機器の調整や交換等を容易に行えるようにした。



写真-3 トンネル検査に導入したドローン

表-2 ドローンの仕様

対角寸法(機体)	220mm
対角寸法(球殻フレーム)	400mm
球殻フレーム素材	プラスチック(市販品)
重さ(機体+フレーム)	1.15kg
GPSモード	非搭載
最高速度	60km/h
最高到達高度	50m
電波到達距離	1,000m
飛行可能風速	風速5.0m/s以下
バッテリー容量	4s/2,000mAh/14.8V
最大使用可能時間	5分

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を基本に、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、独自のカリキュラムを策定した。このカリキュラムに則り、関係法令やバッテリーの取扱い等、ドローンを運用する上で必要な知識の習得（写真-4）および、実際にホバリング制御を有しないドローンを使った実技研修にて操縦技術を修練し（写真-5,6）、最終的に効果確認試験を行い、習熟度を確認した。



写真-4 操縦者育成（座学）



写真-5 操縦者育成（屋内実技）



写真-6 操縦者育成（トンネル内実技）

6. トンネル検査におけるドローン運用

前章までの取組みを経て、非GPS環境下でのトンネル検査におけるドローン運用を2020年2月から半蔵門線で開始した。

(1) トンネル検査の概要

半蔵門線のトンネル検査は、渋谷駅から押上駅までの全区間（図-7）を2020年1月から3月までの3か月の間で行うものである。ドローンにより確認する場所は、①上床開口部（トンネル上部に設置されているトンネル換気用の通風孔）、②立坑（トンネルを掘削する際のシールドマシンの発着跡）、③トンネル上部（複線シールドトンネルの上部）である（写真-8,9,10）。



図-7 半蔵門線路線図

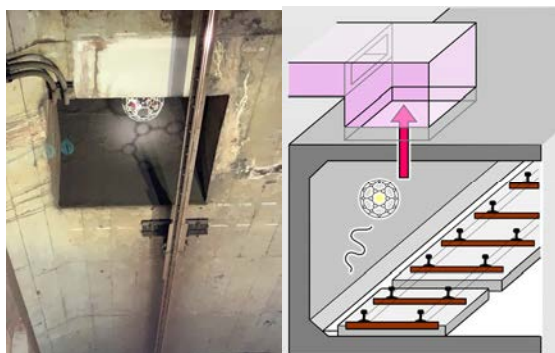


写真-8 上床開口部

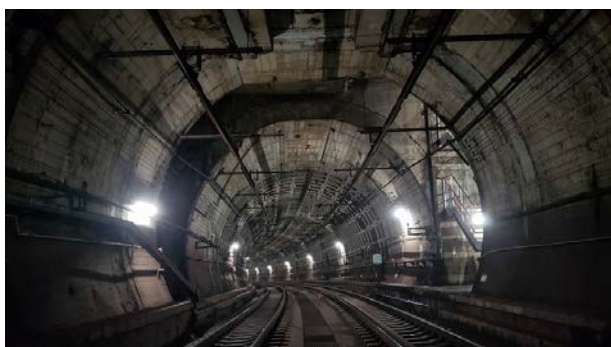


写真-9 立坑



写真-10 トンネル上部

(2) ドローン運用の成果と今後の取組み

実際のトンネル検査の流れの中でドローンを運用し、構造物の状態を確認することができた（写真-11）。また、ドローンで撮影した映像は、近接目視と同等であり（写真-12）、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。なお、ドローンで撮影した映像の一部を、検査の結果として前述した検査用モバイルアプリケーションに登録した。一方で、狭隘箇所が発生する風の影響や、撮影部位に応じてカメラや照明の角度の微調整、トンネル検査の前後で事務所と現場との往復におけるドローンの可搬性等の課題も見つかった。

狭隘箇所が発生する風の影響については、ドローン自身が発生させる風の影響により、機体製作の段階で行った現場検証時よりも操縦が困難な場所もあった。全路線への展開を目指すにあたり、操縦者の負担を軽減したいため、GPS との連動が必要ない気圧センサーやレーザー等による高度維持の方法について、検討を行い改善を図りたい。

また、部位に応じたカメラや照明の角度調整については、開口と開口の間が梁の構造になっている箇所（写真-13）等は、開口部及び梁の側面と梁の上面で、カメラや照明の角度を変更する必要がある。変更は、手動で行っており、その都度ドローンを降下させるため、時間を要していた。そこで、飛行中でも遠隔で角度の変更ができるよう改善を図りたい。

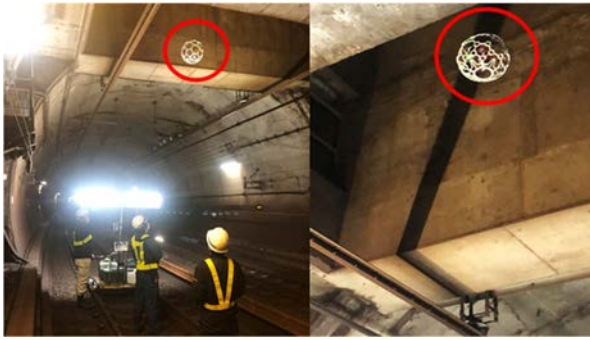


写真-11 ドローンをを用いたトンネル検査



写真-12 ドローンで撮影した画像

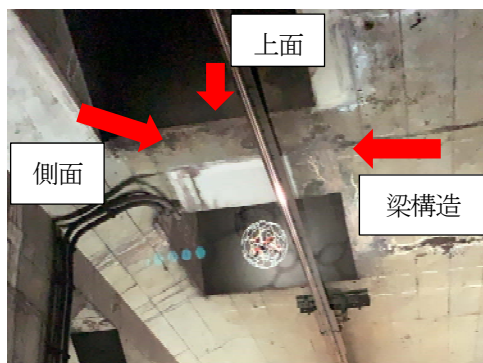


写真-13 梁構造を含む開口部

7. おわりに

半蔵門線のトンネル検査におけるドローンの運用から得られた知見や課題を今後の検査に活かすため、さらなる検討を進めていく。また、2020年度は、丸ノ内線のトンネル検査での運用を予定しており、それに向けた準備も進めていく。将来的には、対象路線を拡充し全路線への展開を目指す。

謝辞:最後に本取組みを進めるにあたり、(株)ベシスコンサルティング（代表取締役：泊 三夫）および東京大学大学院情報学環コビキタス情報社会基盤研究センター（特任教授：石川 雄章）の皆様には多大なるご協力をいただいた。この場を借りて謝意を表する次第である。

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.
- 2) 榎谷祐輝：地下鉄トンネルにおける ICT を活用した土木構造物の維持管理，JREA，Vol. 58. No10, 2015.

INSPECTION OF SUBWAY TUNNEL USING DRONE WITHOUT GPS

Hideaki YAMAGUCHI, Taketoshi OGINO, Shinji KONISHI and Yukihiro ISHIKAWA

Tokyo Metro Co., Ltd. Carries out periodic inspection of subway tunnels once every two years by visual observation from railway track. Recently, to increase the accuracy of inspection for high places in tunnels, new inspection method using a drone was considered. However, there was some problems, shown in the following. 1. Control of the drone operation is extremely difficult, because inside of tunnel is under the environment where GPS can't be used. 2. Because there are several important facilities for train service in the tunnel, such as the overhead wires, cables, railway track, etc., it needs to prevent damage of them by impact of the drone. 3. It needs to take clear images by a camera and lights loaded on the drone. Therefore, we developed the drone machine suitable for the tunnel site and trained some Tokyo Metro employees as operators. We consider that quality inspection After the preparation, inspection with the drone operated by the operators was started. High quality inspections can be realized due to accumulation inspection data by using the drone. The paper describes contents of consideration and action items from planning to practical use.