

(35) 自律飛行ドローンを用いた覆工コンクリートの初期ひび割れ点検の省力化について

藤田 真司¹・石田 仁²・森屋 陽一³・前田 智之⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 ICT 推進室 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: shinji.fujita@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 ICT 推進室 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

³正会員 五洋建設株式会社 ICT 推進室 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁴正会員 五洋建設株式会社 東北支店 (〒980-8605 宮城県仙台市青葉区二日町 16-20)

建設業の労働者不足に対して、国土交通省は ICT 等を活用して建設現場の生産性向上を図る「i-Construction」を提唱し、革新的な技術の現場導入を推進している。本研究では、従来の高所作業車を用いた覆工コンクリート初期ひび割れ目視点検に代わる技術として、自律飛行ドローンによる自動撮影技術と、SfM(Structure from Motion)に着目し、山岳トンネル工事に適用した。また、撮影写真の整理に AI を適用するとともに維持管理に利用可能な CIM(Construction Information Modeling)技術と連携することにより、施工段階だけでなく維持管理段階まで、一連の業務を対象に省力化の効果を示した。

Key Words: autonomous flight, unmanned aerial vehicle, crack inspection, tunnel concrete lining

1. はじめに

建設業は社会の少子高齢化が進む中で、深刻な労働者不足という課題がある。そこで国土交通省は、建設現場の生産性向上を目指す i-Construction と、統合イノベーション戦略 (H30.6.15 閣議決定) を受け、「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」(通称: PRISM) を 2018 年度より実施している。当社は、2018 年度と 2019 年度に「国道 106 号与部沢トンネル工事」においてこの公募に採択され、2018 年度から生産性向上を図る技術の一つとして、著者らは自律飛行ドローンによる覆工コンクリートの初期ひび割れ点検を実施した¹⁾。

通常、覆工コンクリートは全断面スライドセントルを使用してコンクリートを打設し、脱型後は直ちに次工程にセントルが移動する。そのため、養生後の初期ひび割れ点検時には足場が無い状況になり、点検者は高所作業車に搭乗して、ブロック全体を近接で目視点検を行っている。そして点検時にクラックを発見した場合は、位置、長さ、幅をスケッチや写真で記録し、ブロック毎に調書を作成している。作業は、点検に 3 名、調書作成に 1 名が必要である。従来の点検記録には以下の問題が挙げられる。有害なクラックは記録されるが、それに満たないクラックは記録されない、点検者が気付かなかった場合

には記録が残らない、供用後、不具合発生時には初期状況の記録が無いため比較ができない。それに対し著者らが提案している自律飛行ドローン点検では、全体の記録が残る仕組みとなるため、維持管理段階にも有効である。

本研究は自律飛行ドローンによる自動撮影と SfM 処理に対応する写真撮影を可能にする。さらにクラックの変状抽出に AI 診断を行なうことで、クラック抽出のためのデータ整理・分析の省力化を目的とした。新たに撮影画像の高度化利用として SfM 処理をした、3D モデルを作成し、CIM 連携のデータとして利活用を目指す。

2. 既往の研究と取組み

ドローンの位置取得に通常使われている GNSS (Global Navigation Satellite System) は、トンネルのような上空が閉鎖している空間では衛星からの電波を受信することができないため使用できない。このような“非 GNSS”環境における適用事例としては、橋梁の上部工、下部工の壁面の変状確認^{2),3)}や、トンネル壁面の変状確認^{4),5)}が報告されている。ただし、トンネルでの適用事例では、ドローンの機体の安定性、撮影条件、変状の定量的な評価については十分な議論がなされていない。その他、車両にカメラやレーザーを搭載し、変状を計測し

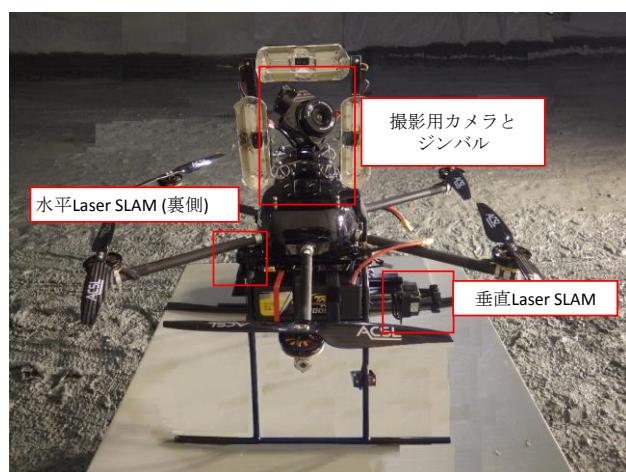


図-1 ドローン機体全景 (ACSL 社製)

ている事例はみられるものの、施工中のトンネルのように、路面に不陸がある場合には、車体が揺れるために適用は難しい。また、路上からの撮影や計測となるため、風管等の障害物がある場合には、陰になる部分の情報が取れない。そこで著者らは、施工中の山岳トンネルを対象として、非 GNSS 環境用の自律飛行ドローンを用いて覆工コンクリート初期ひび割れ点検への適用を試みた³⁾。2018 年度の研究¹⁾では、点検作業における省人化の効果は得られたが、以下の課題があった。

- ・機体、カメラジンバルの揺れの影響で撮影した写真がブレる場合がある
- ・撮影時に使用したストロボの発光タイミングとシャッターのタイミングに若干のずれが生じる場合があり、光量不足により照明ムラとなり、写真が鮮明に写らない場合がある。
- ・離着陸時は、手動操作が必要となるため、熟練した専門の操縦者が必要となる。

3. 自律飛行ドローンの概要

2018 年度の研究¹⁾で得られた課題に対して機体改良を行なうと共に予備実験を実施して機体、カメラの調整と撮影条件の確認を行なった。今回使用した自律飛行ドローンを図-1 に示す。

(1) 2018 年度の研究での課題と改良点

a) 機体の安定性向上

低重心化をするためにカメラを一般的な一眼レフカメラから小型軽量の産業用カメラに変更した。一眼レフカメラでは内臓ストロボ、ファインダーなどがあり機器の重心が高くなっている。ジンバルが稼働した際の重心の変動抑制した。(上側から 90 度動かため)

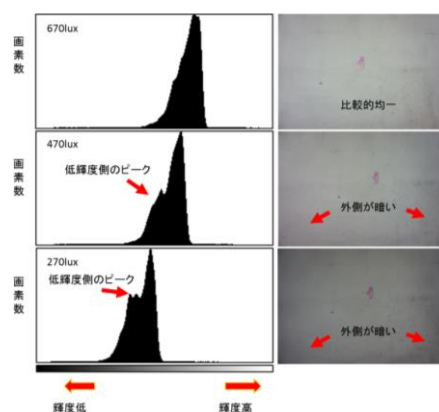


図-2 輝度の度数分布と写真の明るさのむらの関係

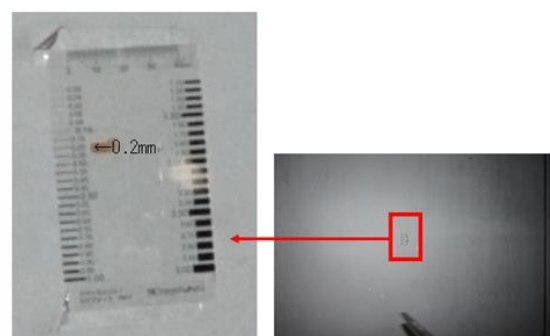


図-3 クラックスケールの撮影画像

b) カメラ振動の抑制

サーボジンバルから動作が滑らかで、振動の小さい、ブラシレスジンバルに変更して振動を抑制した。

c) ストロボ発光とシャッターの同期ズレ

常時発光をする、高輝度 LED ライトを機体に搭載して、ストロボを廃止した。よってシャッタータイミングとの同期を不要とした。

d) 離着陸時の手動操作

離着陸時の手動操作には熟練操縦者が必要とされていたが、これらを自動化するために V-SLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping) の認識性を向上した。

以上の改良を施してトンネル仕様の機体を製作した。

(2) 予備実験 (撮影条件の確認)

写真撮影するために必要な照明について検証をした。撮影照明を 270lux, 470 lux および 670lux の輝度について撮影実験をした。照明の輝度の度数分布と、撮影写真を対比した結果を図-2 に示す

(3) 予備実験 2 (カメラ・機体の調整)

撮影パラメータを決め予備実験を実施した。

その結果 ISO 感度(800), シャッタースピード(1/400), F 値(3.5), 撮影距離(1.5m)を採用した。壁面に貼ったクラッ



写真-1 撮影状況

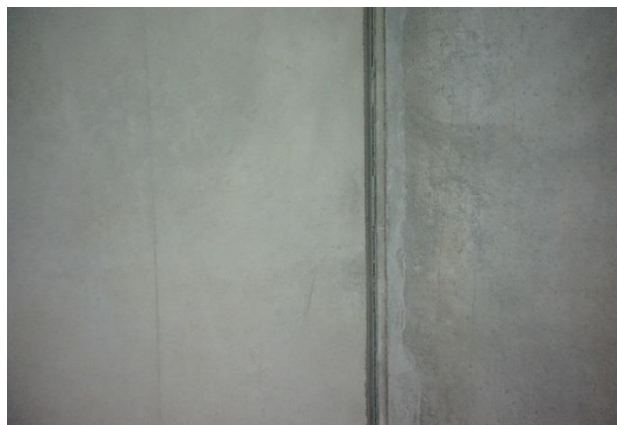


写真-2 自律飛行ドローン撮影結果

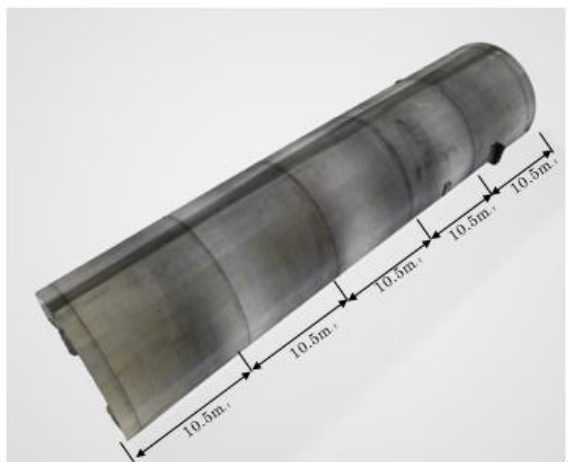


図-4 全点検範囲の3Dモデル(L=52.5m)

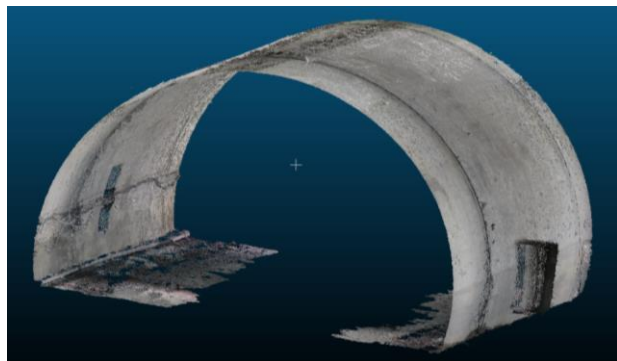


図-5 3D点群モデル

クスケール（図-3 参照）の 0.2mm 部分が撮影できることや、SfM 処理の解析状況にあわせ設定値を採用した。

照度 670lux の場合、比較的均一な輝度分布となり、写真も全体的に明るい。しかし 470lux と 270lux は、ドローンの照明が当たる写真の中心部は明るいものの、外側が暗くなっており、写真の明るさにムラが生じている。この結果から、670lux 程度の明るさを確保する必要があることがわかった。

4. 現場実験

現場における、自動撮影状況を写真-1 に示す。撮影時、ドローンの照明に追加して移動式照明機(400w×4 灯×4 台)を設置した。なお撮影範囲はトンネル延長方向に 10～12m 区間とした。撮影結果の一例を写真-2 に示す。全体的に十分な明度、かつ明度のむらのない良好な画像が得られた。撮影時の輝度について 670lux 程度は確保されていた。

5. 実験結果

(1) 3D モデル

今回の点検範囲 (L=52.5m) で取得した画像から SfM 処理によって作成した 3D モデルを図-4 に示す。3D モデルにクラックがある箇所の画像を抽出できるものの、今回の運用ではひび割れは検出されなかったため画像はない。実験時の目視点検でも有害クラックは確認できなかった。また 3D モデルは従来のクラック調書に記載される展開図の代替とするとともに、CIM データとしても活用した。点検写真データを SfM 処理し、作成した 3D 点群モデルを図-5 に示す。

(2) AI 診断

AI 診断のシステム検証をするために、AI 診断におけるひび割れ検出のパラメータ(コントラスト等)を調整し、セメント打設窓の跡をひび割れに見立て検出を再現した。



図-6 元の点検写真

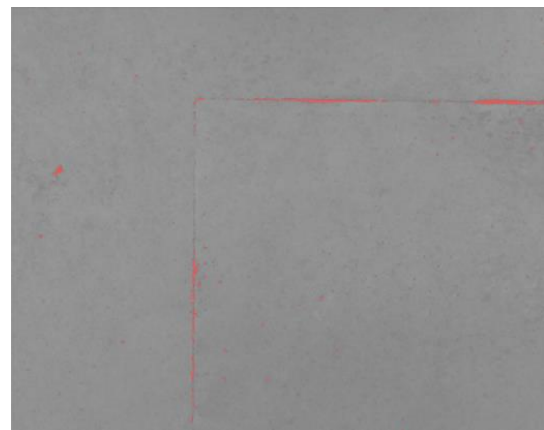


図-7 診断結果

元の点検写真を図-6 に示し、診断結果を図-7 に示す。図-7 にある赤色の線が AI 診断のひび割れと検出した結果である。今回のトンネル点検区間(52.5m)に対して、約 4,000 枚の撮影写真から、ひび割れが存在する可能性のある写真を自動抽出することで、写真の選別の手間は省略でき、生産性の向上に加えて、診断結果の客観性の確保にも有効と考えられる。

6. まとめ

本研究では、自律飛行ドローンによる自動撮影を実施し全体の省力化が可能になった。さらに客観的なデータは CIM データと連携して維持管理にも展開できると考える。

7. 今後の課題と対策

現場運用に向けて今後の課題と対策について下記にする。

- ・障害物の対処方法について、施工中の現場で実証したため、使用中の風管、萎んだ状態の風管、照明の配線などが飛行経路や Laser-SLAM と干渉することもあり、障害物の状態に応じて飛行経路と Laser-SLAM の動作を調整した。今回はトンネルの壁面、風管を想定し、Laser-SLAM の検出対象が動かない前提で位置の調整を行っている。動く可能性のあるものと不動点をあらかじめ区別して設定できれば、適用性はさらに向上するものと考えられる。

謝辞：本研究は 2018 年度と 2019 年度の国土交通省「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」において実施したものである。また、発注者である国土交通省 東北地方整備局 岩手河川国道事務所、システム開発元である日立システムズには、取り組み全般にわたり、多大なご協力を賜った。紙面を借りてここに深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤田真司, 石田仁, 前田智之, 森屋陽一：覆工コンクリート初期ひび割れ点検への自律飛行ドローンの適用, 土木学会, 土木情報学シンポジウム講演集 vol.44, pp.153-156, 2019.
- 2) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ（案）, pp.1-22, 2019.
- 3) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ（案）, pp.85-104, 2019.
- 4) 東京地下鉄株式会社：非 GPS 環境下におけるドローンを活用したトンネル検査を開始！将来を見据えた自律飛行型ドローンの開発に着手します, <<https://www.tokyometro.jp/news/2020/205666.html>> (入手 2020/6/10).
- 5) 株式会社ゼンリンデータコム・北海道旅客鉄道株式会社：非 GPS 環境のトンネル内で、ドローンを自動飛行させる実証実験を実施, <http://www.zenrindatacom.net/newsrelease/20191118_01.html> (入手 2020/6/10).
- 6) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ（案）, pp.85-93, 2019.