

(39) 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

藤田 真司¹・石田 仁²・前田 智之³・森屋 陽一⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒320-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: shinji.fujita@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒320-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: hitoshi.ishida@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 東北支店 (〒980-8605 仙台市青葉区二日町 16-20)
E-mail: tomoyuki.maeda@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒320-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: yoichi.moriya@mail.penta-ocean.co.jp

建設業の労働者不足に対し、国土交通省は PRISM の枠組みの中で「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導入・活用に関するプロジェクト」の公募を実施している。この取り組みの一環として、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の代替技術として、自律飛行ドローンの適用を試みた。トンネル環境内での SLAM による自己位置推定技術や 3D モデルを生成するための点検用写真撮影に関して、実運用のための具体的な課題と課題に対する対策案の整理を行った。

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、深刻な労働者不足になっている。国土交通省では、内閣府・官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) の枠組みの一つとして「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」の公募があり、当社は 2018 年度、「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、生産性向上を図る技術、品質管理の高度化を図る技術を工事現場に導入した。

その中で従来は高所作業車を用いて技術者による目視点検を行っていた山岳トンネル工事における初期ひび割れ点検に着目し、この作業の省人化・効率化を進める技術として、自律飛行ドローンの適用を試みた。

通常、覆工コンクリートは全断面スライドセメ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メントルが移動する。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、高所作業車を用いて移動しながら全体を目視点検を行っている。点検時にクラックを発見したら、位置と長さ、幅をスケッチや写真を撮り記録し、その後ブロック毎にクラック調書を作成し、まとめるのが一般的であり、時間と多くの人員を

必要とする作業になっている。

一般の土工事などにおいては、点検の省人化・効率化技術として、ドローンの適用が進められている。ドローンを用いたコンクリート面の点検は、橋梁において、多くの実績が報告されている。ドローンを適用した技術の一例として非 GNSS 環境での対応の技術も報告されている^{1,2)}が、山岳トンネルでの調査事例は示されていない。なお、山岳トンネル工事における点検事例としては、計測車にカメラやレーザーを搭載した計測技術が示されているが、工事中のトンネルにおける路面舗装されていない状況で現実的な方法とは言えない。

そこで、本研究では、非 GNSS 環境でありかつ暗所となる山岳トンネル工事において、覆工コンクリート初期ひび割れ点検に自律飛行ドローンの適用を試み、SLAM による自己位置推定技術や 3D モデルを生成するための点検用写真撮影に関して、実運用のための具体的な課題と課題に対する対策案の整理を行った。

なお、「国道 106 号与部沢トンネル工事」は、岩手県内、一般国道 106 号宮古盛岡横断道路の改築事業の一環として北上山地のほぼ中央に位置する延長 1,039m の与部沢トンネルを NATM 工法により構築する工事である。

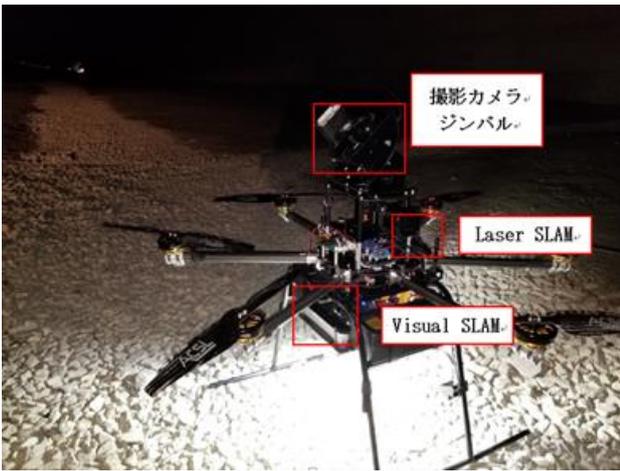


写真-1 自律飛行ドローン (ACSL 社製)

表-1 自律飛行ドローンの保有機能

機能	内容
Visual SLAMによるトンネル縦断方向の制御	<ul style="list-style-type: none"> ・可視光カメラで地面の特徴点を抽出して縦断方向の自己位置を推定 ・カメラの精度確保のため、LEDを下向けに照射して暗所に対応
Laser SLAMによるトンネル横断方向の制御	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザセンサー (2D Laser) を用いて、トンネル横断方向を2次的に測距
自動撮影	<ul style="list-style-type: none"> ・一眼カメラ (SONY α 6000) を装備 ・1軸ジンバルで上下方向の角度を調整 (手動) ・IR (赤外線) シャッターを用いて任意の場所で撮影 ・ストロボを用いて暗所でも適正露出で撮影

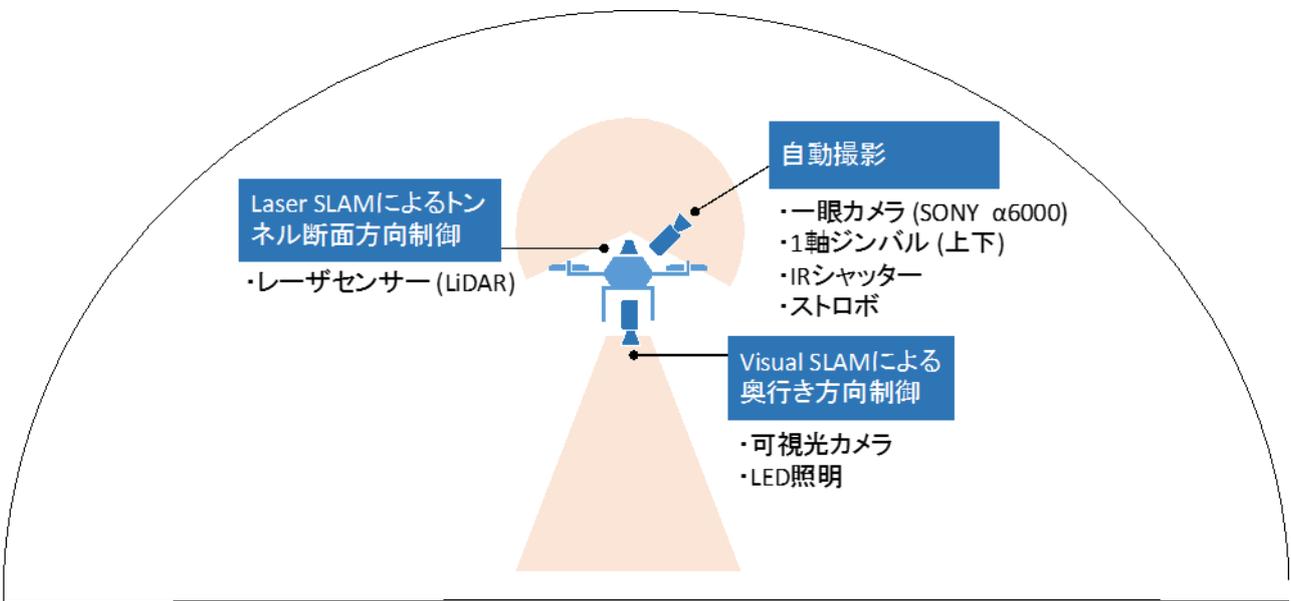


図-1 自律飛行ドローンに保有機能の構成 (本実験時)

2. 自律飛行ドローンの技術概要

山岳トンネル坑内の非 GNSS 環境下でドローンの自律飛行を実現するために、写真-1 に示す SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を用いた ACSL 社製のドローンを使用した。

具体的には、工事中山岳トンネル内の暗所においても、自己位置を把握して計画経路を飛行するために、Visual SLAM によるドローンの位置検出を行うとともに、覆工コンクリート面から一定の離隔を保ちながら高解像度でブレのない写真の撮影を自動で行うために、Laser SLAM による覆工コンクリート面とドローンの一定の離隔の確保を行った。図-1 および表-1 に保有機能の構成を示す。

3. 現場実験

(1) 予備実験

自律飛行ドローンの保有機能の適用性として、トンネル坑内での Visual SLAM の正常な動作を確認するため、予備実験を実施した。

写真-2 は予備実験の状況である。工期的に覆工コンクリート打設前であったため、トンネル側面は吹付けコンクリートを施工した状況のままである。

予備実験の結果から、Visual SLAM に側面の画像を用いた場合、取得画像の照度のムラのため画像中の特徴点の検出が不安定になった。



写真-2 SLAM動作確認のため予備実験状況
(吹付けコンクリート面で実施・手動操作)



写真-4 自律飛行ドローンによる撮影写真の例

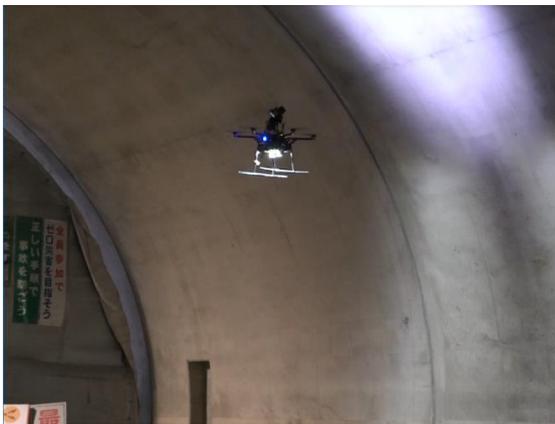


写真-3 本実験状況 (覆工コンクリート面で実施・自動撮影中)

そこで、LED および Visual SLAM 用カメラを下向きに取付け、Visual SLAM にトンネル下面の画像を用いることとした。また、それに合わせて点検用写真撮影用カメラおよびカメラジンバル、Laser SLAM 用機器のドローンへの取り付け位置の調整を行った。

(2) 本実験

本実験の実施状況を写真-3に示す。

Visual SLAM に下面の画像を用いることで、予備実験時に比べ安定した飛行が可能になった。また、Laser SLAM も正常に機能し、ほぼ覆工コンクリート面とドローンの離隔距離を一定に保つことができた。

自律飛行ドローンによる撮影した写真の例を写真-4に示す。明るさのムラはあるものの、精細な写真を撮影することができた。(図-2 参照) 各写真の明るさムラの原因については(3) 実験結果に示す。

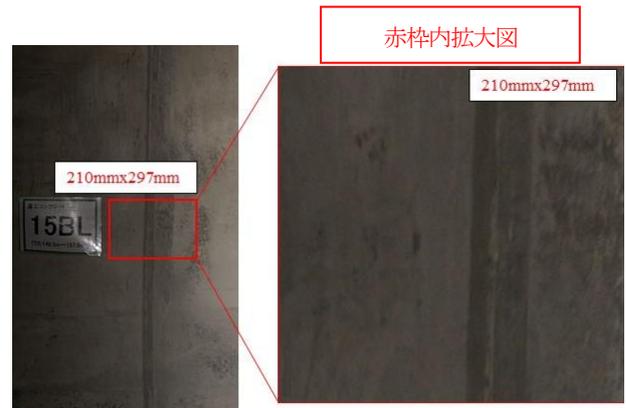


図-2 撮影写真の詳細さ

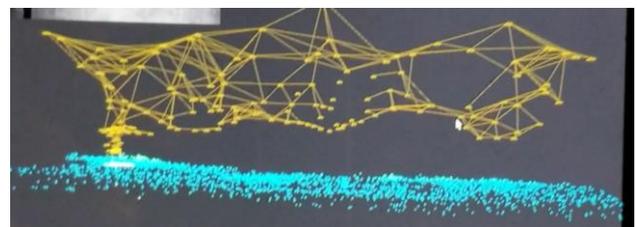


図-3 Visual SLAM による 3D マップ
(黄：自己位置およびキーフレーム、青：地面)

なお、今回の実験を通じて、実験準備・片付けも含めた本技術の運用は1名で十分可能であることが確認できた。ただし、現場での安全性の観点から監視員を1名配置する必要があり、運用人員は2名とする。

(3) 実験結果

① 自律飛行のための自己位置推定

Visual SLAM に下面の画像を用いたことにより、画像特徴点の検出は安定し、図-3 に示すように、ドローンの自己位置およびそれらをリンクしたキーフレームによる 3D マップも適切に作成できていた。また、飛行状況から、Laser SLAM によるドローンと覆工コンクリート面

の離隔距離の保持も正常に実施できていたと考えられる。ただし、離着陸時は Visual SLAM 用カメラがローターで巻上げた粉塵により汚れ、機体制御が不安定になることが判明したため、安全性を考慮して離着陸を手動にて行っている。そのため、今回は離着陸時も含めた完全な自律飛行とはならなかった。

② 3Dモデルを生成するための点検用写真撮影

SfM 用画像のオーバーラップ率は長辺（鉛直方向）60%、短辺（水平方向）80%に設定した。取得した画像のオーバーラップ率の検証を行った結果、長辺は平均 76%（60～80%）、短辺は平均 78%（70～80%）となり、水平方向のオーバーラップ率がやや目標を下回る結果になった。

ドローンで撮影した点検画像だけでは、SfM による 3Dモデルの生成はできなかつた。実際に空撮画像のみ用いた 3Dモデル生成率は約 60%であった。

（４）実運用にあたっての課題

① 自律飛行のための自己位置推定

・ Visual SLAM の動作を現地で事前確認する必要がある。また、現場状況によっては SLAM の動作が不安定となり、手動操作が必要になる。

② 3Dモデルを生成するための点検用写真撮影

- ・ 機体、ジンバルの振動により写真に小さなぶれが生じる。
- ・ 気流によって生じる機体の位置ずれにより、写真のラップ率が変動する。
- ・ ストロボのチャージ時間ぎりぎりの撮影をしたため、わずかなタイミングのズレで撮影に十分な光量が得られなかった写真があった。また、振動によりストロボの照射方向にズレを生じ、撮影に十分な光量が得られなかった写真があった。

（５）課題に対する対策案

① 自律飛行のための自己位置推定

・ Visual SLAM については、ドローンの機体が無くとも映像を取得できれば現場事前確認が可能であるため、利用可否を自動判定する簡易なツールを開発することで、事前確認の負荷を低減できると考えられる。

② 3Dモデルを生成するための点検用写真撮影

・ 機体の振動による写真のぶれ対策としては、機体の改良によりカメラを機体重心に近付ける。

・ 機体が揺れてもカメラが揺れにくいように、ダンパーを設置する。また、現在使っているジンバルを安定性の高いジンバルに変更する。

・ 気流による機体の位置ずれは、低速飛行を行うか、あるいは撮影の計画ラップ率を大きくとり、撮影箇所がずれても十分なラップ率が確保できるようにすることが考えられる。

・ ストロボについては、照射タイミングや方向のズレを防ぐために機体の改良が望まれる。照射タイミングについては、照射時間を長くするなどの対策が有効になる。

4. 結論

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の代替技術として、自律飛行ドローンの適用を試みた。トンネル環境内での SLAM による自己位置推定技術や 3Dモデルを生成するための点検用写真撮影に関して、実運用のための具体的な課題と課題に対する対策案の整理を行った。

完全なドローンの自律飛行の実現と点検用 3Dモデルの 100%作成とはいかなかったが、従来の高所作業車による点検に変る手法として、今後の実用化に向けた可能性は十分に示せたと考える。

謝辞：本研究は国土交通省「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、システムの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。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ（案），pp. 1-22, 2019.
- 2) 国土交通省：点検支援技術性能カタログ（案），pp. 85-104, 2019.