

ドローンを用いたトンネル内 3 次元座標取得の検証

戸田建設（株） 正会員 ○辻川 泰人
正会員 吉田 勇介

1. はじめに

昨今の建設業では少子高齢化に伴う技術者不足が問題となっており、働き方改革による生産性向上が求められている。山岳トンネルにおいても同様であり、狭隘な空間内で重機と作業員が輻輳している環境下において、従来の目視観測や計測業務は多くの人員や時間を要し、同時に多くの危険を伴うため、その改善技術が期待されている。最近では GNSS が届かないトンネル坑内において、SLAM 技術を取り入れた自律飛行ドローンの利活用といった試みも多く試行されているが、山岳トンネル坑内のような特徴点の少ない場所において、従来の SLAM 技術では精度を確保することが難しいことも問題となっている。

本稿では、SLAM 技術を使用しない自律飛行ドローンの利活用を目的としたトンネル内 3 次元座標取得の検証結果と、今後の展開について報告する。

2. 自律飛行システム

自律飛行における制御機構は、spiral 社の「MarkFlexAir（マークフレックスエアー）」を使用した（写真-1）。本システムは、飛行情報を記憶させた専用マーカーをマーカー検出用カメラが読み取ることで自律飛行を可能とするものである。マッピングや AI といった複雑な技術を必要としないため、山岳トンネルのような特徴点が少ない場所においても高速かつ長距離飛行が可能となり、より多くの情報を取得することができる。

また飛行中は接触防止センサおよび距離/高度計測センサによって障害物を回避し、搭載したカメラ画像（4K/30fps）による情報は Wi-Fi を介して、専用アプリケーション上でリアルタイムに監視することも可能である。

3. 3 次元座標の検証方法

3 次元座標は、約 340m（往復）の自律飛行を行い、機体進行方向（切羽方向）に向けて搭載したステレオカメラで撮影した画像を用いて、ポイントクラウド（3 次元点群）を作成し、その座標を確認することで検証を行った（写真-2）。ステレオカメラを用いることにより、2 つのカメラの距離から、ポイントクラウド上での座標の算出が可能になる。

離陸地点の飛行用マーカーに紐づけた座標情報をもとに、飛行経路のポイントクラウドを作成し、着陸地点に設置したテストマーカー間との実距離と計測距離の比較を行った。

また、運用時のリアルタイム性や精度を検討する目的で、ポイントクラウドの作成には、3 パターンの処理手法で対比を行った。各処理方法の詳細について表-1 に示す。



写真-1 使用機器

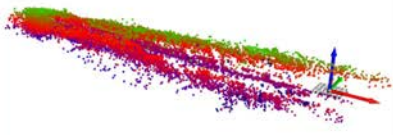
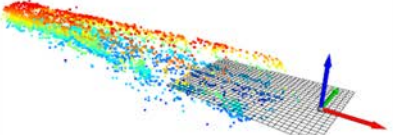
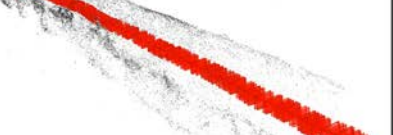


写真-2 検証状況

キーワード 山岳トンネル、ドローン、非 SLAM、三次元座標

連絡先 〒104-0032 東京都中央区八丁堀 2-8-5 戸田建設株式会社 土木 ICT・AI 推進部推進 1 課 TEL 080-2944-7806

表-1 処理方法の比較一覧表

名 称	① Original-SLAM	② ORB-SLAM	③ SfM
特 徴 ・ 概 要	独自要素を追加することで、一般的な Visual SLAMにかかる処理を簡略化した手法。Visual SLAMはカメラで撮影した画像の中の特徴点を抽出し、カメラ（ドローン）の自己位置特定と3次元マップの作成を同時に行う技術。今回は、ステレオカメラを用いることにより、特徴点とカメラの距離が算出できるため、3次元マップ上での距離も計測が可能となる。	Visual SLAMの一種で、特徴点の移動量を用いた手法。カメラで撮影した1フレームの画像から、物体のコーナー部分の特徴点として検出する。時間（フレーム）が進むにつれ2次元の画像中をどのように移動するか追跡し、その移動方向、移動距離から3次元空間での座標を計算する（3次元マップ作成）。そこから逆算して、3次元空間に配置された特徴点中のどこに自分がいるかを計算することが可能となる（自己位置推定）。	複数の視点から撮影した画像を用いて、カメラの姿勢と特徴点の3次元位置を特定する手法。写真測量等に用いられる技術で、画像取得したものを専用のソフトウェアで処理することにより、3次元点群データやオルソ画像等を作成することができる。連続する画像同士のみでなく、すべての画像間での特徴点の対照を行うため処理時間は長くなるが、正確に特徴点の位置や相関を表現することが可能となる。
処 理 画 像			
処 理 時 間	オンボード(ドローンに搭載) リアルタイム（飛行中に作成）	オンボード(ドローンに搭載) リアルタイム（飛行中に作成）	4-5時間
PC 条 件	(Jetson TX2 NX) CPU Dual + Quad core RAM 4GB GPU 256 cores OS Linux	(Jetson TX2 NX) CPU Dual + Quad core RAM 4GB GPU 256 cores OS Linux	SfM処理ソフト(COLMAP) CPU Intel 8-core RAM 32GB GPU なし OS Linux
誤 差	21.84m (12.8%：飛行距離比)	4.64m (2.7%：飛行距離比)	4.35m (2.5%：飛行距離比)

4. 結果と考察

以下に記すように、離陸地点を基準としたポイントクラウドの作成手法では、飛行距離に対して 2.5%～12.8%と大きな誤差が生じる結果となった。なお、本ポイントクラウドは自律飛行の制御には使用していない。

① **Original-SLAM** は飛行時の処理速度を速めるためにアルゴリズムをシンプル（特にバンドル調整手順を省略）にしたことが原因で 21.84mと誤差が大きくなったと推測される。

② **ORB-SLAM** については、①と比較して僅かに処理速度が落ちるものの、飛行時のリアルタイム処理が可能となり、誤差も 4.64mと大幅に改善された。

③ **SfM** では処理方法の特徴より、精度の向上を期待していたものの、②と同等の誤差が生じる結果となった。

現在は、全ての飛行用マーカの座標情報を標定点として点群を補正するアルゴリズムを構築することで、数cm程度の誤差精度の実現を目標に実証実験を継続している。また三次元座標取得のリアルタイム性や精度といった、使用目的に合わせた処理方法の選定も行っていく必要がある。

5. まとめ

トンネル内における、SLAM 技術を使用しない自律飛行ドローンの適用と、3次元座標取得の検証結果について報告した。今回の検証で、自律飛行によるトンネル情報取得の可能性について確認することができた。情報の精度面では、現時点では施工段階での適用は難しいところではあるが、今後飛行用マーカを標定点としたポイントクラウドの処理方法を構築することで、高精度な 3次元座標の取得を可能とし、AI 技術と連携した新たな生産性向上技術の開発に努めていく所存である。