

非 GPS 環境下における UAV の自律飛行実験

— AI によるコンクリート護岸点検・診断用画像の効率的な撮影のために —

○石井 明^{*1}, 天方 匡純^{*1}, 菅原 宏明^{*1}, 藤井 純一郎^{*1}, 小篠 耕平^{*1}, 六門 直哉^{*2}

Autonomous flight experiment of UAV under non-GPS environment

-- To take images efficiently for concrete revetment inspection and diagnosis using AI --

Akira Ishii^{*1}, Masazumi Amakata^{*1}, Hiroaki Sugawara^{*1}, Junichiro Fujii^{*1}, Kohei Ozasa^{*1},
and Naoya Mukado^{*2}

^{*1} 八千代エンジニアリング株式会社, 技術創発研究所,
Yachiyo Engineering Co., Ltd., Research Institute for Infrastructure Paradigm Shift
^{*2} 株式会社自律制御システム研究所, 事業推進ユニット,
Autonomous Control Systems Laboratory, Business Operations

本稿は, コンクリート護岸で覆われた河川空間内において Visual SLAM を活用してドローンの自律飛行により護岸画像データを収集した実験の報告である. なお, 都市河川空間という厳しい環境下でも飛行は安定し, AI による護岸の点検・診断に活用可能な鮮明かつ高分解能の画像を撮影することができた.

Key Words : UAV, 自律飛行, 非 GPS 環境, Visual SLAM, 河川護岸点検

1. はじめに

1.1 研究背景 我が国の高度経済成長を支えたインフラ整備の一つに河川整備がある. 河川整備は洪水被害を低頻度化させ, 地域住民は安全・安心効果の恩恵を享受してきた. 効果維持のためには日々の維持管理が重要になるが, 人口減少や高齢化が急激に進む我が国では整備時点と社会構造が大きく変化しており, 今後は点検技術者の担い手不足や厳しい財政状況の中で長大な河川を効率的かつ適切に維持管理することが必要になってくる. また, 近年の気候変化に伴い自然環境も大きく変化し, 激甚化した局地的・集中的な降雨は, 時に整備水準を上回る河川流量を発生させ堤防や護岸を破壊する. しかし, 施工時期が古くても施設状態が正常であれば社会経済被害最小化や情報伝達時間確保等の一定効果を発現することが期待できたり, 仮に被災した場合でも迅速な災害復旧を実施しなければならず, 日々の点検結果のデータ蓄積や長寿命化計画に基づく診断結果から予防型保全対策型の維持管理が強く求められている.

このような背景のもと, 今後の河川の維持管理や防災等の分野ではロボットが短時間に大量で精細な点検画像を取得し, ICT や IoT 技術を活用したデータ蓄積重視型の河川管理の取組が進んでいる.

1.2 研究目的 都道府県や市町村が管理する都市域を貫流する中小河川は, 厳しい用地制約のため限ら

れた川幅で必要な流下断面積を確保するため, 平時水位が地盤高より低い掘込断面で, 高低差のある急勾配法面をコンクリートで覆った護岸整備が多く実施されている (Fig. 1) .



Fig. 1 A urban river covered with concrete revetment

河川護岸の点検や劣化診断評価は国土交通省の要領⁽¹⁾に則り実施するが, 技術者による目視点検が前提のため膨大な手間を要したり, 技術者の経験や力量によって調査結果がバラつくという問題がある. 近年の急速な ICT や AI 技術進展はそれに代わる新たな点検・診断手法として注目され始め, 実験や研究が活発になっている. 天方・藤井らは深層学習を活用し河川護岸画像からひび割れや劣化検知について成功^{(2), (3)}してい

ることから、効率的で高精度の護岸画像撮影が実施できれば、河川護岸の点検・診断の全体作業が効率化し、社会課題解決に繋がる。そこで本稿では、デジタルカメラを搭載した無人航空機（以下、UAV : Unmanned Aerial Vehicle）で市街部の護岸で覆われた河川空間内を安定的に自律飛行させ、AIで護岸の点検・診断を実施可能な画像を効率的に撮影することを目的とする。

2. 河川区域内自律飛行の課題

UAVは一般的に、水平面位置座標は全地球測位システムGPS (Global Positioning System)などの衛星測位システムGNSS (Global Navigation Satellite System)の位置情報、高度位置座標は気圧センサーによる気圧変化情報、機体方向はデジタルコンパス (衛星)の方角情報を利用して、人の操縦なしで事前プログラミングの設定ルートを自立飛行する。筆者らはこれまで汎用機体を利用して幾つかの河川で自律飛行実験を試みたが、安定的な自律飛行の成功には至らなかった。これまでの経験から、コンクリートで覆われた河川空間で画像解析に用いる護岸の点検・診断を実施するための画像を安定的な自律飛行で撮影するための課題を下記に整理した。

① 非GPS環境下での自律飛行

一般的にコンクリートで覆われた空間ではGPS測位情報の空間乱反射によるマルチパスが発生する。一例としてFig. 2に、コンクリートダム堤体下流の減勢工内を離陸地点としてUAVを単純に約100mまで上昇し下降させたUAVにおけるGPS測位受信状況をXY平面にプロットした図を示す。UAV自体の水平方向移動はないため、受信したGPS測位が常に $(X, Y) = (0, 0)$ の状態であれば正常に自己位置を正しく把握していることになるが、この飛行では最大で20m程ずれることが確認できている。コンクリートで覆われた河川空間でも同様な現象は確認している。また、市街地を

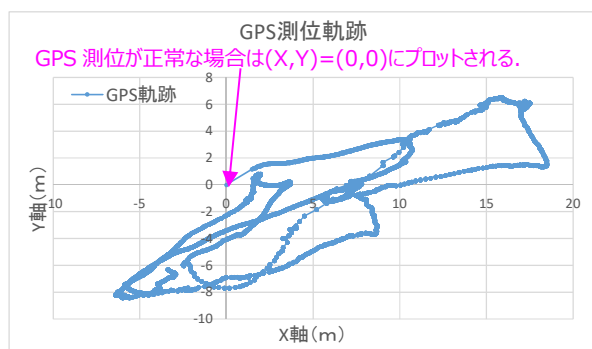


Fig. 2 GPS trajectory near the concrete dam body

貫流する河川は、河川を横過する数多くの橋梁下の空間、河川に隣接した建物付近の空間、高压電線付近の空間があり、このような空間もGPS測位が正常に受信できないためGPSに依存しない自律飛行手法を用いることが必要である。

② 撮影対象物と一定距離による飛行

河川空間は風の通り道になり風速が早く、河川沿線の建物回りや河川を横過している橋梁回りは編流が起きやすい。また、コンクリート護岸には鉄筋が入っており近接するほど磁気場が乱れるため、河川空間内の厳しい環境下ではUAVの安定飛行が難しい。しかし、そのような環境の中でAIによる点検・診断用の画像を一定品質で撮影することが必要であり、撮影対象の護岸と一定距離を確保した安定飛行を実現させることが課題である。

③ マイナス標高での飛行

GPS制御では離陸からプラス高度で飛ぶ事が想定されているため、離陸地点を0mとして対地高度がマイナスになる地点を飛行させる場合はフェイルセーフ機能により高度が下がったと判断しプラスへ補正する動きをしながら高度を自動補正するためうまく飛行しない。また、標高データを基にルート作成するアプリ等では対地高度マイナス問題はクリアになるが、標高データは航空レーザ測量の基盤地図情報(数値標高モデル)がベースであり、河川区域内の水域や橋梁下の標高は正しく取得されず周辺地盤高と同標高と処理設定されているため、地盤高より低い掘込断面を飛行ルートとして設定することはできない。そのため、UAVを河川区域外のランディング地点の標高よりも低い位置で飛行させることが課題である。

④ 長距離飛行

延長の長い河川で効率的に画像撮影を実施するためには、1回のバッテリー充電で飛行時間が長く確保できバッテリー交換回数を減らせること、安定飛行により不明瞭な画像撮影を防止することが必要である。

3. 非GPS環境下の自律飛行方法

3.1 Visual SLAM

非GPS環境下の自律飛行の一つにトータルステーションを使ったトラッキングシステムがあるが、汎用機体では制御システムがブラックボックスであり、GPS機能を完全に遮断できずフェイルセーフ機能により飛行できない場合や、トータルステーションからのレーザが到達する範囲のみでしか自律飛行できないため延長

が長く障害物が多い市街地を貫流する河川の自律飛行では不向きである。そこで本稿では、UAVの自己位置推定に Visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) の画像処理技術を採用する。この技術は、前向き搭載のステレオカメラとオンボードの GPU 処理で実現する (Fig. 3)。単眼カメラの画像からは、一つ一つのピクセルが持つ色や明暗の情報を処理し、画像内の特徴点 (Fig. 4) をリアルタイムで抽出することで、UAVの自己位置・方角を認識する。また、ステレオカメラは前方の対象物と UAV との距離を計測し、一定距離を保持する。これら技術により、非 GPS 環境下において UAV の安全な自律飛行を可能としている。これにより前述の課題①～③の解決が図れる。



Fig. 3 Stereo camera for SLAM and distance control

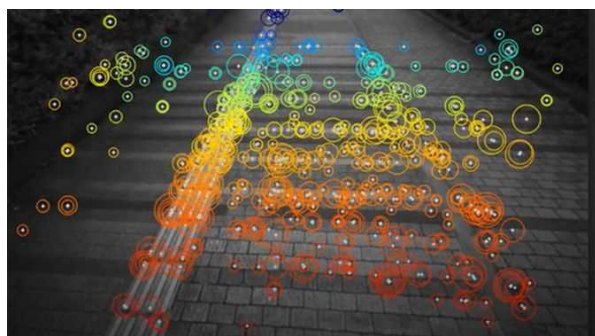


Fig. 4 Feature point extraction



Fig. 5 UAV (PF1-Vision, ACSL products)

3.2 使用 UAV およびカメラ 本稿で使用する UAV 本体の概観を Fig. 5 に、UAV および搭載カメラの機器諸元を Table 1 および Table 2 にそれぞれ示す。本稿で使用する UAV の飛行可能時間は 45 分であり、一般的な汎用機体に比べて約 2 倍の飛行時間を確保している。これにより前述の課題④の解決が図れる。

Table 1 Specifications of UAV

項目	内容
重量	6.4kg (機体本体 3.6kg)
大きさ	全長 1,173mm, 高さ 542mm
ペイロード	3kg
飛行可能時間	45 分
耐風性能	10m/s

Table 2 Specifications of digital camera

項目	内容
製品名称	Sony α 6000
重さ	285g (本体のみ)
焦点距離	単焦点 16mm
カメラ画素数	2,430 万画素

4. 飛行実験概要

4.1 飛行実験箇所 飛行実験は千葉県内の代表的な都市河川である県北西部に位置する支川延長含む流路延長 37.6km, 流域面積 65.6km² の一級河川真間川⁽⁴⁾で実施した。対象区間は、入江橋から菅野橋区間の 1.7km (両岸 3.4km) (東京外郭自動車道路橋を含む前後区間は工事中のため除く) とした (Fig. 6)。同区間は東京湾の感潮区間であり堤内地盤高と水面高の差は 3m 程度, 川幅は 10m 程度 (Fig. 7), 河川を横架する橋梁は 9 橋ある。なお, 同区間で UAV を飛行させるためには下記 3 点に留意する必要がある。

- 1) DID 地区のため, 事前の「無人航空機の飛行に係る許可・承諾書」の飛行許可証交付
- 2) 河川沿いの道路を一時的に占有して UAV を離発着させるため, 「道路使用許可申請書」の道路使用許可証交付
- 3) UAV の離発着時の安全な交通・人流誘導のため, 交通誘導員の配置

4.2 飛行条件 撮影画像の解像度は 2mm/pixel 以下, オーバーラップ率は 50% とし, 護岸から一定距離を保って自律飛行させる。また, 橋梁下の撮影も実施する。

4.3 飛行状況 飛行実験は2019年3月27日(水) 9:00~15:00 に実施した。当日の天候は晴れ、気温は19.5℃、最大風速は8.5m/s(橋梁上)の環境で飛行させた状況をFig. 8に示す。飛行は対象区間を8区間に分割して実施し、区間毎の距離や飛行時間の飛行結果をTable 3に整理した。

飛行中に撮影した護岸画像の一例をFig. 9に示す。撮影画像からは絶対的な位置(座標)と大きさ(幅・長さ)は把握できないが、撮影画像の中のブロック数と1ブロック当たりの長さから約6,000mmを6,000pixelで撮影できており、約1.0mm/pixelの解像度になっていることから、安定した自律飛行で鮮明かつ要求解像度以上の高分解能の画像撮影ができた。今後は、撮影画像をSfM (Structure from Motion) 解析で既知の座標点や撮影箇所の緯度経度情報を加味して三次元データ化し、スケールを持たせることが必要である。



Fig. 6 Flight location map



Fig. 7 Field situation (upstream from Tekona Bridge)



Fig. 8 Flight situation (around Sugano Bridge)

Table 3 Flight result (flight distance and time)

No.	左右岸*	区間 (方向, 距離)	飛行時間
1	右岸	手児奈橋⇒麓橋, 約 150m	8 分
2	左岸	麓橋⇒手児奈橋, 約 150m	6 分
3	左岸	手児奈橋⇒入江橋, 約 150m	8 分
4	右岸	入江橋⇒手児奈橋, 約 150m	7 分
5	右岸	麓橋⇒須和田橋, 約 840m	21 分
6	左岸	麓橋⇒須和田橋, 約 840m	22 分
7	右岸	外環上流側⇒菅野橋, 約 520m	12 分
8	左岸	菅野橋⇒外環上流側, 約 520m	9 分

*菅野橋から江戸川への流下方向に対して左右岸区分を設定



Fig. 9 Accuracy verification of photography image

5. おわりに

本稿は、これまで困難であったコンクリート護岸で覆われた河川空間内の自律飛行を、Visual SLAMを活用して成功させた。また、厳しい環境下でも飛行は安定し、AIによる護岸の点検・診断に活用可能な鮮明かつ高分解能の画像を撮影することができた。ただし、本稿の飛行実験箇所は都市河川の中でも比較的川幅が広く、現場条件は良好の方である。そのため、より狭小な都市河川で飛行実験を実施するなど、今後も様々な現場条件で飛行実験を繰り返し、安定した自律飛行のための知見を蓄積していく必要がある。

参考文献

- (1) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課, “堤防等河川管理施設の点検結果評価要領”, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/tenkenhyouka/index.html (2019/6/28 確認), 2019.
- (2) 天方 匡純, 吉田 武司, 藤井 純一郎, “深層学習方式を活用した河川のコンクリート護岸の劣化領域抽出”, 第73回年次学術講演会, 土木学会, 2018.
- (3) 藤井 純一郎, 嶋本 ゆり, 天方 匡純, 松川 正彦, 秋山 和也, 小原 洋, “SfM と Semantic Segmentation による河川護岸の劣化診断支援手法”, 人工知能学会全国大会, 人工知能学会, 2019.
- (4) 千葉県 土木部 都市河川課, “真間川流域整備計画”, <https://www.pref.chiba.lg.jp/c-katsunan/chisuitaisaku/index.html> (2019/6/28 確認), 2014.