

# ダム堤体画像データ取得の再現性向上を 目指したUAVの自律飛行

いしいあきら あまがたまさずみ すがわらひろあき ふじいじゅんいちろう おざきこうへい  
石井明<sup>1</sup>・天方匡純<sup>1</sup>・菅原宏明<sup>1</sup>・藤井純一郎<sup>1</sup>・小篠耕平<sup>1</sup>

<sup>1</sup>八千代エンジニアリング（株）技術創発研究所（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）

急速に老朽化する社会インフラを限られた人的・財的社会的環境下で適切に維持管理していくためには、ICTやAI等の最新技術を活用した点検手法の適用が今後進展していくと想定される。

UAVで空撮した画像を用いてダム堤体の調査・点検を効率化するためには、空撮画像データの取得再現性を向上させる必要がある。そこで本稿では、トータルステーションを活用した非GNSS環境下のダムにおけるUAVの自律航法、三次元点群データがない場合における精度の高い飛行ルートの作成方法、均質かつ鮮明なジオタグ付きの等距離正対の高解像度画像取得方法を提案する。提案手法は宮ヶ瀬ダムで実証し、その有用性を示した。

**Key Words** : ダム, UAV自律飛行, 非GNSS, トータルステーション, 均質画像, ジオタグ

## 1. 研究の背景・目的

近年、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) は小型化・低価格化、機体性能の向上とGNSS (Global Navigation Satellite System) 測位を利用した機体位置および姿勢制御が可能になったことで急速に普及した。建設分野でも限られた人的・財的社会的環境下で生産性を向上させるキーテクノロジーの1つとして、i-Constructionをはじめ多方面での活用が進んでいる。また、2019年2月に改訂された「道路橋定期点検要領」<sup>1)</sup>では点検として初めて、従来の人による近接目視と同等の安全性診断を行える方法による目視点検が認められた。近年の人工知能 (AI: Artificial Intelligence) 解析技術の高まりもあり、UAVで空撮した画像は点検・診断等の様々な作業の効率化、省力化に活用され、今後もこの動向は各分野に広がっていくものと想定される。

ダム堤体表面の調査・点検において、仮設足場、ゴンドラやロープで点検技術者が直接アクセスする方法では、アクセスのための作業準備コスト・時間の非効率、危険な高所作業、広範囲調査による長時間作業の課題があった。また、点検技術者の力量差により評価が異なることで正確な劣化情報の位置、形状、数量等の経年変化を把握できない課題もあった。UAVによる空撮であれば時間短縮とコストダウンが図れ、また、仮設足場も必要ないため出水期の調査も可能である。しかし、山間域に位置するダム

では衛星補足数が少なく、また、堤体のような高い構造物付近はマルチパス効果の影響によりGNSS測位情報が低い。そのため、UAVの飛行はパイロットの手動操縦に頼らざるを得なく、常に墜落・衝突リスクと隣り合わせである。高度な操縦技術や極度の緊張と集中力を要し、パイロットの負担が大きい。パイロットがより安全で簡便にUAVを飛行させて画像撮影が実施できることが必要である。

また、AIによる画像解析精度は空撮画像の品質に依存する。パイロットの経験や技術に左右された手動操縦飛行では、空撮画像が不均質や不鮮明であったり、不規則な飛行ルートは撮影抜け等の人為的なミスも生じたり、AIによる画像解析を前提とした画像取得になっていない。

そこで本稿では、ダムでより安全に精度よく効率的にUAVを飛行させるための自律飛行技術の確立と、自律飛行で点検・診断用の画像データ取得の再現性を向上させた成果について紹介する。

## 2. 本稿の技術的な特徴

ダム堤体の空撮画像の取得再現性を向上させるためには、非GNSS環境下におけるUAVの自律航法、堤体から一定距離を確保した正確な飛行ルートの作成、安定かつ精度の高い自律飛行による均質かつ鮮明な高解像度画像の撮影、空撮画像を用いた写真測量技術の精度向上の4つを結集して体系化することで実現される。本稿のそれぞれの技術特徴を以下に示す。

### (1) 非GNSS環境下のダムにおける自律航行

UAVの一般的な基本構造を図-1に示す。GNSS測位情報と、慣性計測ユニット（IMU：Inertial Measurement Unit）の各種センサー情報をフライトコントローラーで統合して、UAVは自己位置を認識する。非GNSS環境下のダムで自律飛行を実現させるために、GNSS測位情報の代わりにトータルステーション（TS）で機体に装着したプリズムを計測した座標を用いた。また、汎用機体ではフェイルセーフ機能を解除できず非GNSS環境下の飛行には高度や制御に制限があるため、オープンソースのフライトコントローラーを利用した。本稿のTS航法のイメージを図-2、使用した機体・機器を表-1にそれぞれ示す。

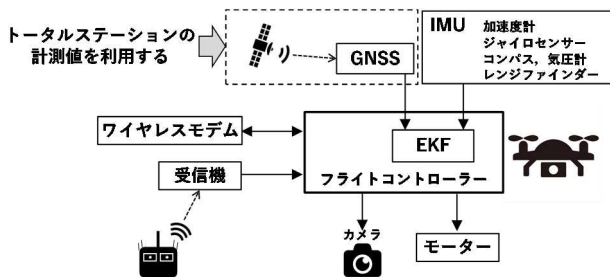


図-1 UAVの基本構造

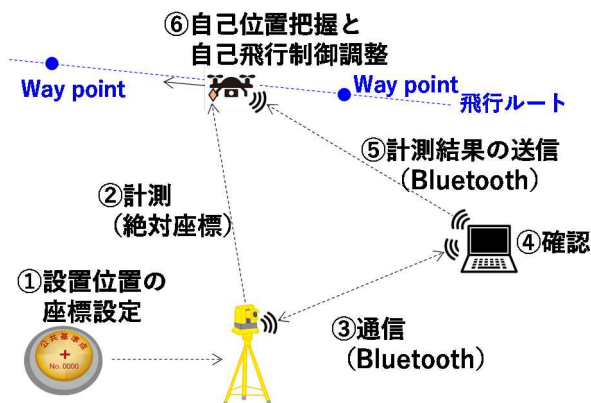


図-2 TSを利用したUAVの自律航法イメージ

表-1 使用機体・器機一覧

項目	使用製品
UAV機体	エンルート製QC730
Flight Controller	Pix hawk
トータルステーション	TOPCON GT-1005
プリズム	LeicaGeosystems GRZ101
カメラ・レンズ	Sony α 6300・SEL35F28Z

### (2) 堤体から一定距離を確保した飛行ルートの作成

飛行ルートは、WP（Way Points）と呼ばれる緯度、経度、標高のUAVが飛行する位置情報とその時の機首方向変更や飛行速度方向等のアクションを1地点ずつ作成し、それを連続的に配置・連結することで形成される。

本稿では、TSで追尾したUAVは非GNSS環境下の手動操縦でも位置および姿勢制御が可能となり飛行が安定する特徴を利用し、距離センサーで堤体との距離

を計測しながら飛行させ、UAVが推定している自己位置を飛行ルートとして設定した。これにより堤体の三次元点群データが無くても精度の高い飛行ルートが作成でき、同じルートで繰り返し飛行が可能となる。また、飛行軌跡はTSを公共測量成果で座標設定すれば、絶対座標で管理できる。更には、飛行軌跡は熟練パイロットの操縦技術の結晶でもあり、その技術をデジタルデータに残して自律航法で利用することは、誰でも熟練パイロットと同じスキルの飛行が再現できることになり、技術継承にも繋がる。

### (3) 均質かつ鮮明な高解像度画像の撮影

堤体との距離を一定に保った飛行ルートをUAVが自律飛行することで、機体が安定して飛行することが可能になる。これにより、均質で鮮明な高解像度の堤体画像の空撮を実現できる。

### (4) 空撮画像へのジオタグ情報付加

TSでのUAV追尾を、飛行位置把握だけでなく空撮位置の特定にも活用する。これにより非GNSS環境下でも空撮位置を絶対座標で画像データに付加することができ、SfM技術等による三次元復元の際にダム堤体の形状を歪めて推定する問題を解消した。

## 3. 現場実証

### (1) 飛行概要

国土交通省相模川水系広域ダム管理事務所（宮ヶ瀬ダム）で現地実証した。宮ヶ瀬ダムは重力式コンクリートダム、ダム高は156.0m、堤頂長は375.0mである。表-2に現地実証した飛行内容の概要を示す。飛行作業は、①堤体下流左岸側、②堤体下流左岸側～中央部、③堤体上流左岸側の3つのエリアで実施した。飛行エリアの詳細を図-3の上段に示す。

表-2 飛行作業内容概要

項目	飛行作業内容
飛行作業エリア	堤体下流面：①左岸、②左岸～中央部 堤体上流面：③左岸
離発着地点（TS設置位置）	堤体下流面：下地面（①、②共通） 堤体上流面：天端（③）
WP作成	手動操縦の飛行軌跡からWP作成
自律飛行	作成したWPで実施
空撮位置座標	TSで計測

### (2) 飛行結果

#### a) 飛行ルートの作成

図-3の中段にパイロットの手動操縦による軌跡から作成した飛行ルートを示す。手動操縦でも位置および姿勢制御が行え、安定した飛行により精度の高い飛行ルートを作成できることを確認した。

なお、作成した飛行ルートは、AIの画像解析の要求画像解像度が2mm/pixel、UAVに搭載するデジタルカメラ・レンズの仕様を考慮し、ダム堤体から約18m離れた。また、飛行ルートは鉛直飛行に比べて

水平飛行の方がバッテリー負荷が少なく飛行時間を多く確保できるため、水平方向→鉛直方向→水平方向→鉛直方向を繰り返したルート作成を基本とした。

**b) 自律飛行の精度**

作成した飛行ルートを自律飛行させた結果を図-3の下段に示す。

①堤体下流左岸側は、堤体厚が鉛直方向の上から下にかけて徐々に厚くなる複雑な形状でも、飛行ルートをなぞるようにトレースし、精度の高い自律飛行を実現できた。フライト時間も飛行ルート作成のために実施した手動操縦に比べて自律飛行では約半分の時間で飛行することができ、安全でより効率的なフライトが実施できた。

②堤体下流左岸側～中央部は、洪水吐きの突起周りも一定距離離隔させて自律飛行ができることを確

認した。

③堤体上流左岸側は、天端を離発着地点として対地標高がマイナスとなる下角追従となるため、プリズムを機体上側に装着した。そのため、プリズムが直に太陽光に照らされ、反射により追従がロストすることが懸念されたが問題なく自律飛行できた。

また、飛行エリア3箇所の全WPの579地点を対象に自律飛行の飛行座標と最も近接した時の乖離距離を図-4に整理した。乖離距離の最大は1.55m、最小は0.02m、平均値は0.35m、中央値は0.30mであり、乖離距離0.62m以内に全体の90%がカバーされる結果であった。手動操縦では実現不可能な飛行精度で、安定した自律飛行を実現できた。

**c) 撮影画像の品質**

自律飛行で空撮した堤体画像の一例を図-5に示す。

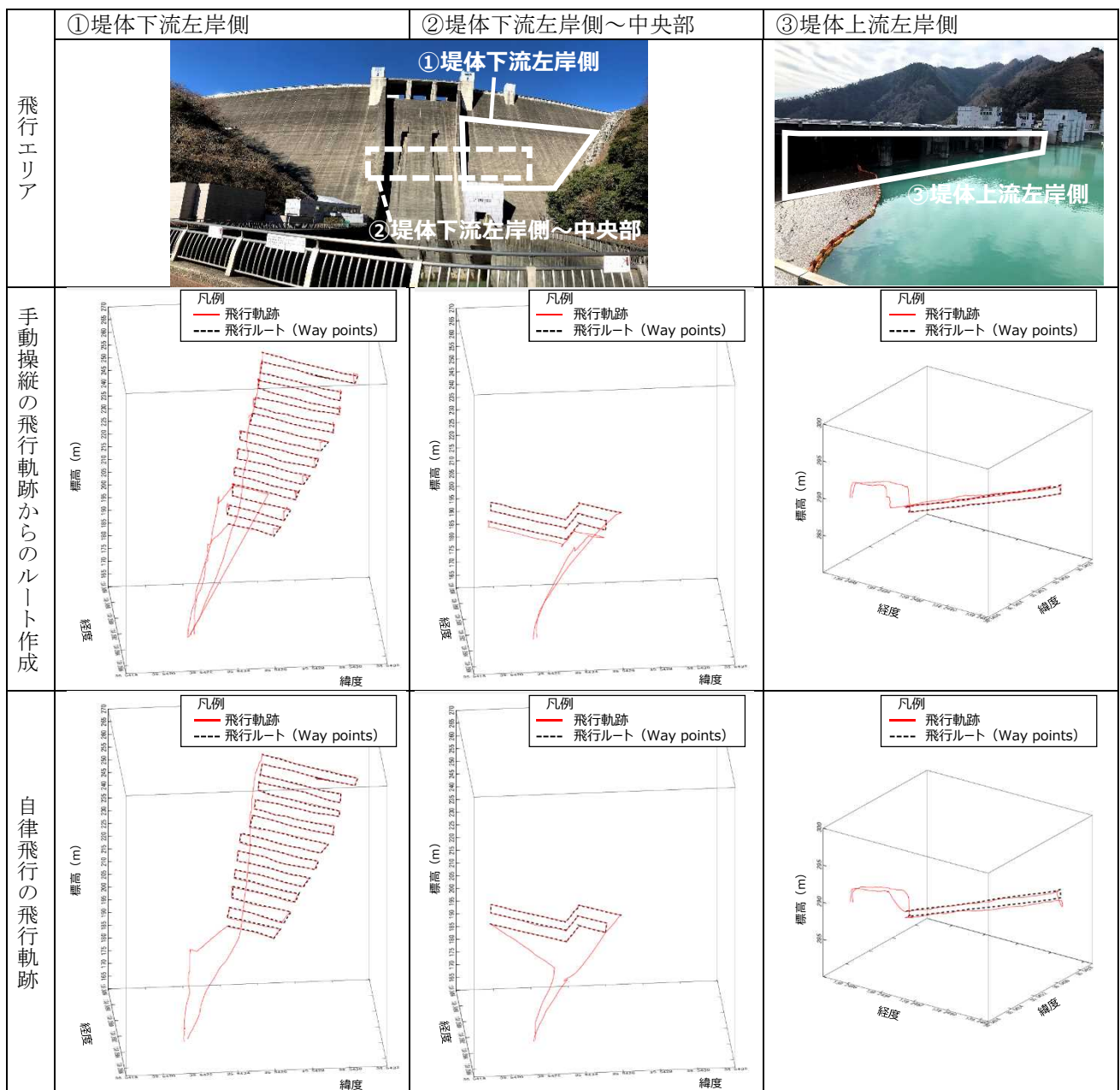


図-3 飛行エリア毎の飛行軌跡からのWP作成と自律飛行の飛行軌跡 上段：飛行エリア，中段：手動操縦の飛行軌跡と飛行軌跡から作成した飛行ルートの重ね合わせ図，下段：飛行ルートと自律飛行の飛行軌跡の重ね合わせ図。

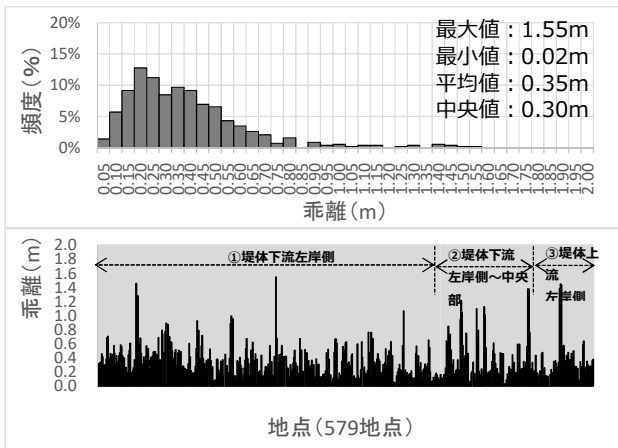


図-4 設定WP座標と飛行ログの乖離状況 上：頻度分布，下：地点毎の乖離状況。

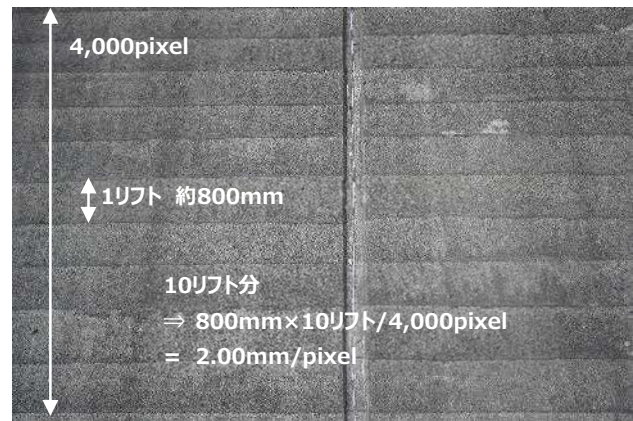


図-5 撮影画像の品質チェック結果一例（下流左岸側）

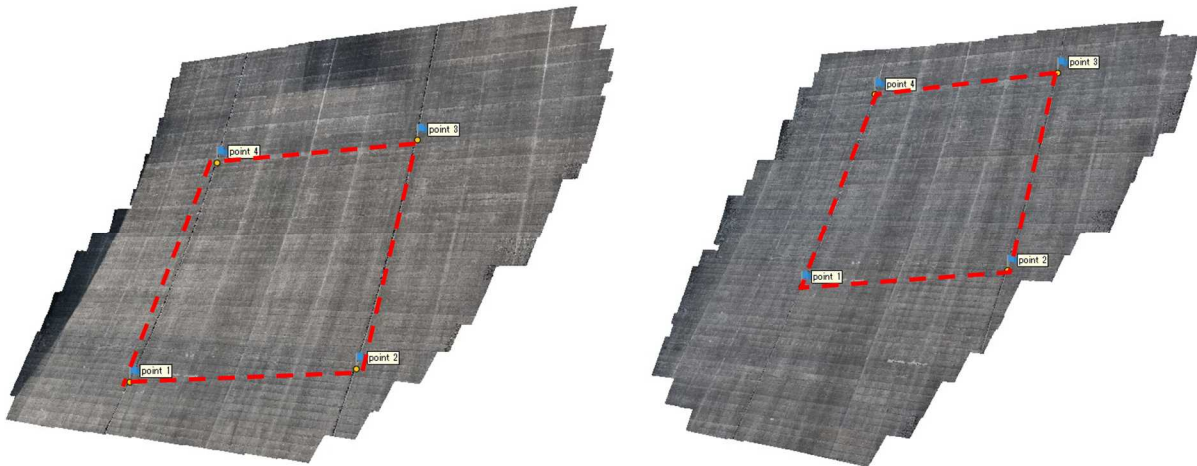


図-6 空撮画像による三次元復元 左：手動操縦時の空撮画像による復元，右：自律飛行時の空撮画像による復元

撮影画像からは絶対的な幅・長さは把握できないが、打設目間隔は約800mmであり、安定した自律飛行により約2mm/pixelの解像度で飛行エリア全体を均質かつ鮮明に空撮することができた。

また、非GNSS環境下でもTSで計測した空撮座標位置を利用して、異なる2回の飛行でそれぞれ作成した三次元点群データを図-6に示す。同一ポイント4点の座標値とポイント間の辺距離4本の長さをそれぞれ比較したところ、ダム堤体形状を大きく歪めて推定されることは確認できなかった（表-3）。

表-3 2時期比較の精度比較

比較項目	方向	較差(m)	平均(m)
Point座標	水平	0.255	0.454
	鉛直	0.203	0.152
辺の長さ	水平	0.250	0.134
	鉛直	0.210	0.111

#### 4. 今後の課題

本稿では、TSを活用して非GNSS環境下のダムにおけるUAVの自律航法を確立した。また、手動操縦では実現不可能な飛行精度、三次元点群データがない場合でも精度の高い飛行ルートを作成、ジオタグ付

きの等距離正対の堤体画像を高解像度で均質かつ鮮明に空撮することを実証した。画像データ取得の再現性を向上できたことは、ダム堤体の調査・点検や経年監視に有用である。今後の課題を以下に示す。

- ・様々な形式や構造のダムでの実用性検証と技術の頑健性の証明
- ・「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」<sup>2)</sup>の要求精度達成を目指した写真測量技術の洗練
- ・調査・点検の全体工程作業の円滑化のため、UAVで撮影した大容量画像の転送やAI解析のための前処理等の効率化
- ・堤体劣化情報の監視・管理、異常検知手法の開発

謝辞：国土交通省関東地方整備局相模川水系広域ダム管理事務所（宮ヶ瀬ダム）の皆様には、貴重な情報やフィールド提供等の協力を賜りました。深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：道路橋定期点検要領，[https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf) (2020/8/3確認)
- 2) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル（案），<https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf> (2020/8/3確認)