

UAVの自律航行と空撮画像を活用した ダム堤体点検の効率化・高度化に関する研究

石井 明¹・菅原 宏明²・小篠 耕平³・天方 匡純⁴

¹正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術開発研究所 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8)
E-mail:akri-ishii@yachiyo-eng.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術開発研究所 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8)
E-mail:sugawara@yachiyo-eng.co.jp

³正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術開発研究所 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8)
E-mail:kh-ozasa@yachiyo-eng.co.jp

⁴正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術開発研究所 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8)
E-mail:amakata@yachiyo-eng.co.jp

大量の社会インフラの老朽化が今後急速に進展するため、適切な維持管理のもと機能を維持していく必要がある。しかし、限られた人的・財的社会的環境下において、従来の点検や診断方法では対応できなくなる懸念がある。そのため、最新技術を活用し、効率化・高度化した新たな点検手法の適用が今後進展していくものと想定される。

そこで本稿では、効率的なダム堤体の点検・診断・管理の実現を目指し、トータルステーションを活用した非GNSS環境下のUAVの自律航行の確立と、自律航法によるジオタグ付きの等距離正対空撮画像を活用した写真測量技術の精度改善およびAIによる画像劣化情報検知手法を提案する。また、提案手法は宮ヶ瀬ダムで現場実証し、その有用性を示した。

Key Words: ダム, UAV, 自律飛行, トータルステーション, 写真測量, CycleGAN

1. はじめに

(1) 研究の背景

近年、無人航空機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)は小型化・低価格化、機体性能と操作性の向上で高度な飛行が可能となったことで急速に普及した。その有用性から様々な分野で活用¹⁾が進む他、空の産業革命に向けたロードマップ²⁾で示されている利活用レベルの達成に向けて周辺環境整備や技術開発・法整備も急速に進んでいる。建設分野では、人がアクセスすることが困難な高所や広範囲の作業場や災害現場等でUAVの活用が図られてきている。搭載したデジタルカメラ等のセンサーを用いて安全・簡便に短時間で大量の高解像度・高密度なデータを取得できるため、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、建設生産システム全体の生産性向上をめざす取組み「i-Construction」³⁾において活用が推奨されている。

また、高度経済成長期以降に大量に整備された社会イン

フラの老朽化が今後急速に進展⁴⁾するため、異常が発生してから対応する事後保全型ではなく、データ(日常点検、定期点検、総合点検)に基づく診断結果からの予防保全型維持管理手法が強く求められている。これにより、維持管理に係る長寿命化計画のもと全体のライフサイクルコストを削減させ、適切にインフラを持続させていくことが重要になっている。しかし、人口減少や少子高齢化社会の中では、団塊世代の経験豊富な技術者の大量離職や建設分野への就業環境の悪いイメージが根強いことによる就業者数低下が、現在の社会インフラを維持管理する点検技術者の人材不足やこれまで培ってきた技術が適切に継承されないといった問題を引き起こすことが懸念されている。

このような背景のもと、社会インフラ点検を的確かつ効率的に実施するために、情報通信技術(ICT)や人工知能(AI: Artificial Intelligence)等の新技術が活用されていくと想定される。2019年2月に改訂された「道路橋定期点検要領」⁵⁾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。道路橋の「近接目視点検」は今後、「近接目視」が UAV による空撮と、「点検」が AI 等を活用した画像解析に置き換わる動向である。更に、この動向は道路橋点検のみならず様々な点検に広がっていくと推考され、新技術は今後も開発と実証を繰り返し、点検の基準や方法を変革させて現場への適用・活用が図られていくものと想定される。

(2) 研究の目的

ダム堤体のコンクリート表面の調査・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労力、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。これに対し、クラックスケール内蔵光波測量器を用いた調査方法⁹⁾では、点検作業者の力量差はなくなり経年変化把握も可能になった。しかし、機器を高所設置する場合の安全性や手間、機器設置が不可能で点検範囲が制限される場合もあり、必ずしも全てのダムで全体を網羅できるとは限らず課題解決に至っていない。

近年、AI 解析技術の高まりもあり、UAV で空撮したダム堤体の画像を解析することで堤体の劣化検知が可能⁷⁾になった。しかし、UAV は GNSS (Global Navigation Satellite System) 測位が正常に受信できることを前提として高機能性を実現しており、山間域の谷間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の影響により、GNSS 測位の精度は低いとされている。筆者らはダム堤体付近の GNSS 測位コンストレーション低下を確認するため、図-1 に示すように堤体下流側の下地面の水叩き部を離陸地点とし、堤体から約 15m 離れた地点から UAV を垂直に約 100m 上昇し下降させた時の UAV 機体側での GNSS 測位受信結果を確認した。この飛行では、UAV 自体の水平方向移動がないにも関わらず受信 GNSS 測位座標が常に $(X, Y) = (0, 0)$ にプロットされておらず、最大で 20m 程ずれていることを示した。このような環境下において UAV に搭載したデジタルカメラでダム堤体を空撮する作業は、パイロットが UAV を GNSS 測位による機体の位置および姿勢制御が効かない手動操縦でダム堤体に近接させて実施するしかない⁸⁾。そのため、常に墜落・衝突リスクと隣り合わせであり、高度な操縦技術や極度の緊張と集中力を要し、パイロットへの負担が大きい。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。そのため、パイロットの経験や技術に左右された手動操縦飛行で空撮された画像は不均質や不鮮明であったり、不規則な飛行ルートによる撮影漏れが発生していたり、AI による画像解析を前提とした画像取得方法になっていないため改善が必要である。更には、ダム堤体の広範囲の中から様々な劣化情報を抽出できる異常検知手法やそれを継続監視していく技術も十分ではない。

そこで本稿では、ダム堤体の点検・診断・管理を効率的に実施するために、UAV の自律航行による画像撮影、写真測量技術、AI を活用した劣化情報検知手法を提案する。また、提案手法を現場実証した結果についても報告する。

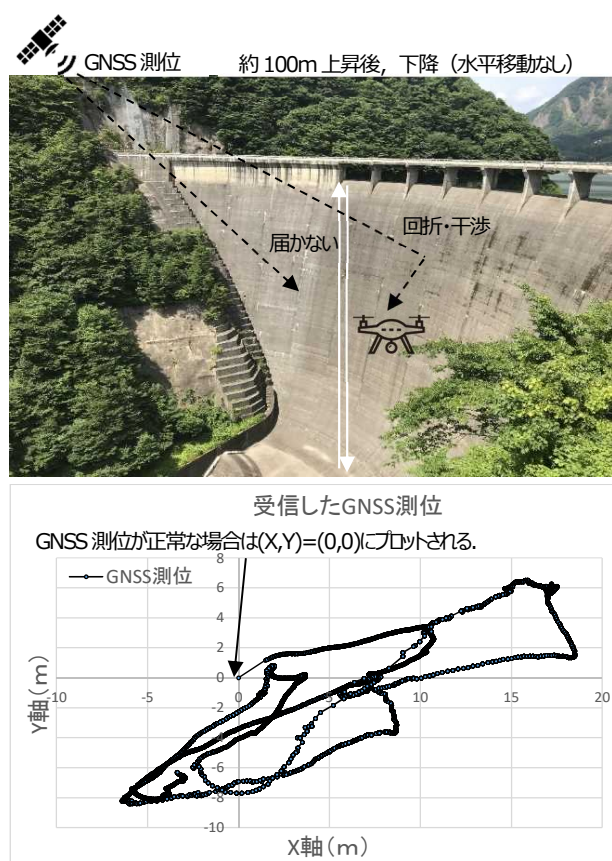


図-1 ダム堤体下流側のGNSS測位の精度検証

2. 既往技術・関連研究と本研究の位置づけ整理

UAV に搭載したデジタルカメラによりダム堤体を空撮した画像を活用してダムの点検・診断・管理を効率化するためには、空撮画像の取得再現性向上のための規則的で正確な UAV の飛行ルート設定、飛行ルートを確実に安定して航行する非GNSS環境下の UAV の自律航法、空撮画像を用いた写真測量技術、AI を活用した異常検知手法の 4 つを結集して体系化される必要がある。それぞれの既往技術の概要と本研究の位置づけを以下に整理した。

(1) フライトプラン（飛行ルート）の作成

フライトプラン（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地点づつ作成し、それが連続的に配置・連結することで形成されている。WP の作成方法は、手動作成、座標計算による設定、飛行座標軌跡を用いた設定の3つのアプローチがある。

a) 手動作成

一般的なオートパイロットソフトを利用して三次元空間を認識し、1地点1地点もしくはソフト機能を利用して一括でWPを設定する。しかし、オートパイロットソフトで利用可能な標高データは基本オープンデータであり、航空レーザ測量の基盤地図情報（数値標高モデル）5mDEM が最も高解像度である。この空間解像度ではダム堤体形状をきめ細かく表現するには不十分で、また、水域や橋梁下の標高は周辺地盤高と同標高と処理されており、このデータを利用して UAV を離陸地点から低い位置を飛行させるような飛行ルートの作成は出来ない。

従って、ダム堤体上流側の貯水面付近や、ダム堤体とその周囲の複雑な形状部分の飛行ルートは、手動で作成することは困難である。

b) 座標計算による設定

ダム堤体の三次元点群データがあれば、座標計算で堤体面から一定離隔させたWPを精度よく作成することが可能であり、有用な方法である。しかし、ダムの三次元点群データは、計画・設計からCIM（Civil Information Modeling）が導入されているようなダムに限られる。多くのダムはCIMが導入する以前に建設されており、また、地上レーザースキャナTLS（Terrestrial Laser Scanner）やLiDARによる三次元点群情報作成は非常に高価であるため、竣工後に三次元点群データを作成しているダムはごく一部に限られる。

そのため、ダム堤体の三次元点群データがない場合において高価で手間のかかる三次元点群測量作業を実施しなくても、飛行ルートを簡便に精度よく作成できることが必要である。

c) 飛行軌跡を用いた設定

DJI等の汎用機体に付随する商用のオートパイロットソフトの一部では飛行軌跡を記録できる機能⁹⁾があり、それをもとに飛行ルートを作成することも可能である。また、飛行軌跡を数多く収集・分析し、そこから飛行可能な経路を生成・計画する方法¹⁰⁾もある。

しかし、機体の位置および姿勢制御が効かない非GNSS環境下の手動操縦では飛行軌跡は安定していなく、また、得られた軌跡のGNSS測位もノイズが多く精度が低いことから、このまま点検のための飛行ルートに適用できない。非GNSS環境下でも飛行軌跡を精度よく把握

可能であれば適用できる技術である。

(2) UAVの自律航法の自己位置推定技術

UAVの自律航法は、事前設定した緯度、経度、標高、進行方向、飛行高度、飛行速度などのパラメータを細かく設定したWPを連続的に並べたフライトルートを、自らの飛行位置（座標）を認識しながらセルフコントロールで航行することで実現している。UAVの一般的な基本構造は図-2のとおりであり、GNSS等の自己位置推定技術による位置情報と、慣性計測ユニット（IMU：Inertial Measurement Unit）の加速度計、ジャイロセンサー、コンパス、気圧計等の様々なセンサーからの計測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。自律航法は自己位置推定技術の違いで分類されるが、未だどんな環境にも適用できる完全な自律航法は確立されておらず、それぞれの特徴を活かし、飛行環境に適した自律航法を選択することが重要となっている。

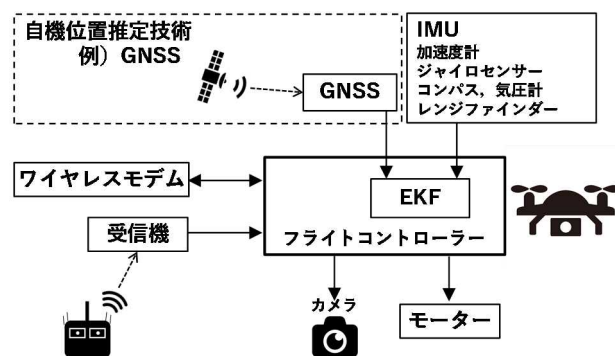


図-2 UAVの基本構造

a) GNSS航法

GNSSからの位置情報をUAVに搭載した小型で廉価なセンサーで受信して利用する方法である。広く普及した通信技術を利用し、最もポピュラーな自律航法技術として確立しているが、GNSSが正常に受信できる環境でしか利用できない。

汎用機体は、非GNSS環境下では離陸そのものができなかつたり、離陸できたとしてもフェールセーフ機能により飛行高度が制限される等の安全対策が施されている。インフラの点検や調査箇所ではGNSS測位を常に正常に受信できる飛行エリアは限られていることが多く、本稿で対象としているダム堤体に近接させた飛行では図-1のとおり利用することができない。また、GNSSの位置誤差は数m以上あるとされ、精度が求められる飛行にも適さない。RTK（Real Time Kinematic）測位を利用した位置精度改善の技術も実用化されているが、そもそもダム堤体付近の飛行ではGNSS測位が正常に受信できないため利用することができない。

b) SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 航法

SLAM 技術は、センサー信号処理を中心としたフロントエンド処理部と、ポーズグラフの最適化を中心としたバックエンド処理部からなり、移動体の自己位置推定と三次元の空間地図構築を同時に行う技術である。フロントエンド処理部の違いにより Visual SLAM と LiDAR (Light Detection and Ranging) SLAM の 2 つに大別される。

Visual SLAM は、カメラ・イメージセンサーからの画像の一つ一つのピクセルが持つ色や明暗の特徴点、LiDAR SLAM はレーザーセンサー（距離センサー）による点群でマッチングすることで空間把握を行い、移動量を逐次推定し、積算することで自己位置推定を行っている。また、Visual SLAM はステレオカメラで、LiDAR SLAM はレーザーセンサーで前方の対象物と UAV との距離を計測し、一定距離保持や障害物回避を実現している。

非 GNSS 環境下においても自律航行が可能な技術であるが、飛行中の位置推定の誤差は蓄積されクリアされない・真値から離れていく、特徴抽出に失敗し自己位置をロストする、処理・最適化の計算コストが高くバッテリー消費し飛行時間が短くなるといった技術的な課題に加え、ダム堤体の特徴点を消失しないように飛行するために対象物により近接した飛行にならざるを得なく、安全性確保や面角が狭くなるため撮影効率が低下するといった運用面の課題がある。

c) Total Station Navigation (TS 航法)

トータルステーション (TS) は、距離測定的光波測距儀と角度測定のスェットライトを組み合わせた測量機器の一つである。この手法は、UAV にプリズムを装着して飛行させ、TS で飛行位置を計測し、その測定結果を UAV にフィードバックすることで UAV が位置情報を認識する仕組みである。元々、非 GNSS 環境下でも自律飛行を可能とする方法として、汎用機体を用いて屋内飛行を中心に技術開発¹¹⁾されていた技術である。

飛行位置をほぼ誤差なく計測できるため他手法に比べて位置情報の精度が高く有用な技術である。しかし、汎用機体ではフライトコントロール制御部にブラックボックスが多く、フェイルセーフ機能を完全に解除することができないため、飛行高度や制御に制限がかかってしまうという課題がある。また、光波到達範囲内のみの UAV の誘導、TS の設置手間、プリズムで太陽光が反射することによる計測ロストの可能性といった課題もある。

d) Cooperative 航法

この手法は 2 機の UAV を利用し、1 機目は GNSS 測位が正常に受信できる上空に、2 機目は非 GNSS 環境下にそれぞれ同時飛行させる。そして 2 機目は、1 機目の光学追跡で推定した位置情報をリアルタイムで送信し、低レイテンシーで処理することで自己位置把握を実現する方法¹²⁾である。

2 機目を確実に光学追跡するためには 1 機目の飛行制御も必要で 2 機同時の高度な管制技術や、高演算処理に伴う高い計算負荷はバッテリー交換を早めるため 2 機同時のメンテナンスが必要であり、運用面上の課題も多い。

e) マーカー認識航法

この手法は飛行ルート上に配置した AR マーカーや QR コード等を UAV に搭載されたカメラで読みとり、マーカー内の情報（飛行位置、飛行方向、進行距離等）を受け取って飛行制御を行う方法¹³⁾である。

これにより非 GNSS 環境下でも自律飛行が可能となる。しかし、屋内での利用ならば紙にマーカーを印刷し、壁に張ることで準備が容易だが、屋外のダムのような大規模なインフラでは、マーカー自体を設置することが困難であり、また屋外環境によるマーカーの管理・メンテナンスも別途必要になるため不適と考えられる。

(3) 空撮画像を用いた写真測量

空撮された画像からでは絶対的な長さ、大きさが不明であることから、写真測量により三次元復元を行う必要がある。従来の写真測量では、アナログ、デジタル図化機を用いたステレオペアや人の目による 2 枚の写真の立体視による三次元認識で三次元復元を行っており、膨大な労力と時間を要していた。近年、SIFT (Scale-Invariant Feature Transformation) と呼ばれるアルゴリズム開発により、画像の特徴点抽出とマッチングやカメラレンズのキャリブレーション等が自動化され、多視点の画像群から特徴点の 3 次元位置とカメラの位置・姿勢を推定する技術 (SfM : Structure from Motion) や多視点ステレオ手法 (MVS : Multi-View Stereo) を用いて容易に三次元復元が可能になった。また、Metashape (Agisoft 社) や Pix4D (Pix4D SA 社) 等の三次元モデリングソフトウェアの登場は、デジタルカメラやスマートフォン等で撮影した画像からも廉価で容易に三次元復元を可能にし、技術普及を後押ししている。

一般的な UAV は、単独測位の GNSS を利用しているため、UAV に搭載したデジタルカメラで空撮した画像の位置情報は正確性が低い。そのため、三次元復元時に地上基準点 (GCP : Ground Control Point) による補正が必要であり、GCP の設置・測位が必要であった。しかし最近、RTK (Real Time Kinematic) -GNSS を搭載した UAV が登場 (2018 年 10 月、DJI 製 Phantom 4 RTK) し、空撮写真の位置情報の正確度が大幅に向上することで GCP 作業が不要となることが期待されている¹⁴⁾。

ダム堤体付近は GNSS 測位の精度が低く、RTK-GNSS も利用できない空撮位置を正確に把握することが困難である。また、GCP はダム天端や下地面等の限られた平地にしか設置できないことから、画像の特徴点のみに頼った三次元復元は、GCP で補正したとしてもダム堤体の形

状を歪めて推定してしまうという問題があった。正確性が低いと劣化箇所の管理が行えないため精度改善が必要である。

(4) AI を活用した異常検知手法

AI の画像解析を活用した劣化情報の検出は、「教師あり学習」が最も一般的である。教師あり学習は、コンクリートのひび割れ等の劣化情報をアノテーション（ラベル付け）した教師情報を AI に学習させることで、未知の画像に対して検出できるようにする方法である。しかし、教師情報しか判断できないため、既に劣化が発生しており監視・抽出対象が明確な劣化情報にしか活用できない。

ダムでは堤体の損傷画像が蓄積されておらず学習に利用できるデータが少ないこと、また、広範囲の堤体の中には様々な損傷状態が潜んでおり、予め学習させて抽出する方法では、未知の劣化予兆情報を発見することはできない。様々な異常を検知する手法の適用が必要である。

3. 提案手法

(1) ダムにおける UAV の自律航法

非 GNSS 環境下のダムにおける UAV の自律航法として、飛行位置をほぼ誤差なく把握することができ、点検頻度や公共測量成果との親和性がある TS 航法を選択する。本稿の TS 航法のイメージを図-3、使用した機体・機器を表-1 にそれぞれ示す。本稿の TS 航法は、まず、TS 側にダム管理で用いられている公共測量成果や GCP 等の測量成果から、設置位置の位置座標（緯度・経度、標高）とレンズの方角と鉛直角を設定する。次に、UAV にプリズムを装着して飛行させ、その飛行位置を自動追尾式トータルステーションで追尾計測し、その計測結果を UAV にフィードバックする。最後に、UAV が飛行位置と IMU の情報を拡張カルマンフィルター（EKF : Expand Kalman Filter）で統合して自己位置を推定し、その自己推定位置と WP との乖離を確認しながら自分で飛行調整して事前設定した飛行ルートを自律航行する仕組みである。汎用機体を用いた TS 航法の場合は、最後の UAV 側での自己による飛行調整が実施できない。

また、機体に装着するプリズムは、全球型・半球型のプリズムは入手困難なことから、汎用の太鼓型を使用した。そのため、軸方向に 30 度傾斜の円錐型の不感帯があり、そのまま縦向きに機体に装着すれば高仰角の追従は出来ず、また横向きに装着すれば水平の追従は出来ないという課題があった。そこで、本稿では図-4 に示すプリズムを横向きに置いて TS の方向に向けるトラッキング方式を開発し、水平飛行および高仰角飛行の追従を可

能とした。なお、プリズムは TS から計測可能な機体位置に取り付ける必要があり、上角追従の時は機体の下側に、下角追従のときは機体の上側に取り付け、死角を少なくして様々な箇所から追従できるようにした。

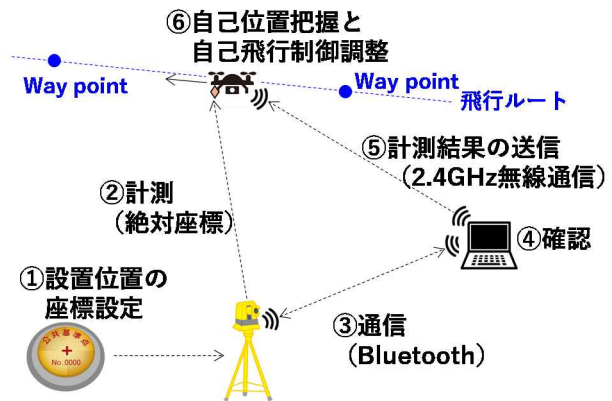


図-3 本稿のTS航法のイメージ

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
フライトコントローラー	Pix hawk
トータルステーション	TOPCON GT-1005
プリズム	LeicaGeosystems GRZ101
搭載センサー	加速度計, 気圧計 コンパス, ジャイロセンサー 距離測定センサー



図-4 機体に装着したプリズム（横向き）

(2) 飛行ルートの作成

飛行ルートは AI の要求解像度を確認し、使用するデジタルカメラの性能を考慮して複雑なダム堤体面から一定距離を離れた WP を精度よく作成できることが必要である。ダム三次元点群データが整備されている場合と整備されていない場合に分けた作成方法を以下に示す。

a) 三次元点群データがある場合の作成方法

座標計算により、堤体面から一定距離隔させた WP を発生させルートを設定する。ただし、点群情報時期から期

間が経っている場合、その後の追加施設や環境変化で周辺環境が変化している場合もあり、飛行時は常に最新状況を確認し、問題ないか確認することが必要である。

b) 三次元点群データがない場合の作成方法

三次元点群データの整備は非常にコストがかかるため、本稿ではパイロットの手动操縦の飛行軌跡を活用した廉価で効率的に精度の高い飛行ルート作成方法を提案する。

TSで追尾したUAVは非GNSS環境下の手动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。この安定した飛行を利用し、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(WP)として設定する。また、一度、手动操縦で飛行させて画像撮影を行えば、写真測量技術を活用して三次元復元が行えるため、点群情報を用いて飛行ルートの精度向上・更新も図ることができる。

また、飛行軌跡はTSを公共測量成果等で座標設定しているため、絶対座標で統一して管理できる点もメリットである。その上、GNSS測位を利用した手动操縦の飛行では離陸からプラス高度で飛ぶ事が想定されており、離陸地点を0mとして対地高度がマイナスになる飛行はフェイルセーフ機能により高度がマイナスにならないように高度が自動補正されるため飛行させることができないが、本稿の手法では絶対座標管理のため問題なく飛行させることが可能である。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であり、技術継承にも繋がる。

(3) 写真測量成果の精度向上

広大なダム堤体に対してGCPは天端や下地の限られた場所にしかないため、SfM技術による三次元復元の際に、ダム堤体の形状を歪めて推定してしまうという問題があった。

そこで本稿では、空撮位置をUAVを追尾しているTSで計測することで、図-5に示すとおり非GNSS環境下でも画像の位置情報を活用した三次元復元を可能にした。

(4) AIを活用した異常検知手法

異常検出アルゴリズムとしてGAN(Generative Adversarial Network)のような教師なし学習が進展している。教師なし学習は、正常状態(平常)の概念をAIが学習し、そこから変化(異常)があった場合の情報を検出する方法である。これにより、実際の損傷画像から健全な状態の画像を再構築し、差分により損傷を抽出することができる(図-6)。

幾つかのGANフレームワーク^{15) 16) 17)}がある中、本稿ではダムの損傷画像はデータ数が少ないことを考慮し、

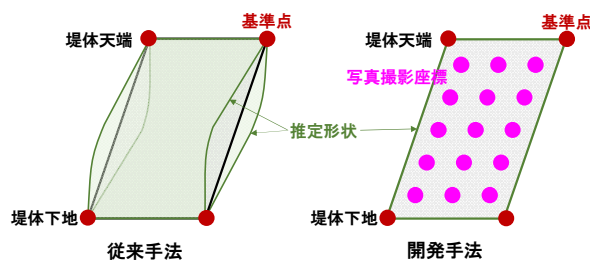


図-5 TSによる空撮位置情報を活用した三次元復元方法

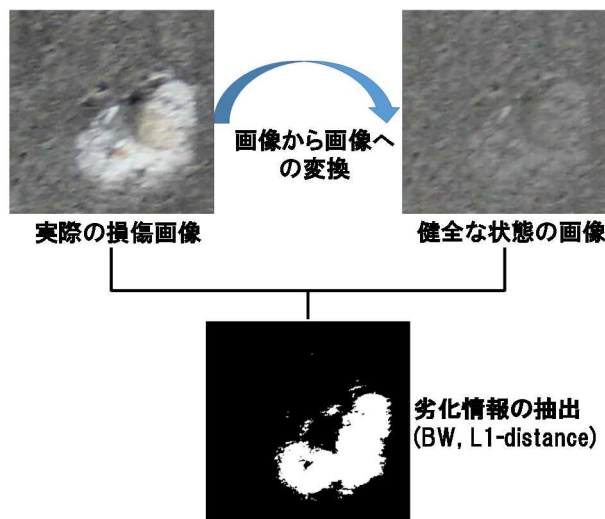


図-6 教師なし学習における劣化検知のイメージ

実際の損傷画像と健全な状態の画像数がそれぞれ異なる場合でも、End-to-Endの教師なし学習を最適にすることが可能なCycleGANフレームワーク^{18) 19)}を適用する。

4. 現場実証

前述で提案した手法を、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-8の上段に示す。

なお、ダムでUAVを飛行させるにあたっては、事前にダム管理者へ河川区域の一時使用届を提出して許可・承認を受け、飛行当日は一般者が飛行エリア(離発着地点含む)へ立ち入らないような誘導、飛行監視員を配置した堤体への衝突防止、飛行前機体点検等の安全対策を十分に実施した上で飛行を行った。

(1) 飛行ルート作成

パイロットの手动操縦による軌跡から飛行ルートの作成を行った。作成する飛行ルートは、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・レンズの仕様が表-3であることを考慮し、ダム堤体から約 18m 離す方針とした。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。なお、デジタルカメラは UAV 本体に直接設置せず、揺れを抑制する 3 軸ジンバルに設置した。

手動操縦の軌跡から作成した飛行ルートを図-8 の中段に示す。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良い飛行ルート作成が実施できた。

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作成
自律航行	作成したWPで実施
空撮位置座標付加	TSで計測

表-3 デジタルカメラの仕様

項目	内容
カメラ製品名	Sony α6300
カメラレンズ	SEL35F28Z
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

(2) 自律飛行の精度

作成した飛行ルートを自律航行させた飛行結果を図-8 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て精度よく自律航行ができたことが確認できた。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航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航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で、手動操縦により飛行ルートを作成できた。更に、プリズムを機体上側に装着し下角で追従するため、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も懸念されたが問題なく追従することが確認できた。

また、飛行エリア 3 箇所全 WP の 579 地点を対象に自律航行の飛行座標と最も近接した時の乖離距離を図-9 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、安定した自律航行を実現できた。なお、自律航行では設定 WP の半径 2.0m 以内に自己推定位置が入れば一致とみなし、次の WP 検索へ向かうように検索の閾値を設定している。この閾値を小さくすれば乖離距離は小さくなる一方、検索時間がかかり飛行時間が長くなるトレードオフ関係にあるため、飛行精度と飛行時間のバランスをみて閾値を決定する必要がある。

(3) 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-10 に示す。撮影画像からは絶対的な幅・長さは把握できないが、打設目間隔が約 800mm であり、約 2mm/pixel の解像度でダム全体を均質かつ鮮明に撮影することができた。

また、宮ヶ瀬ダムでサイドラップ・オーバーラップ率 60% で空撮した画像を、SfM 画像解析ソフトウェア Metashape に入力し、三次元復元を行った。非 GNSS 環境下でもトータルステーションで計測した空撮座標位置を利用した画像のアライメントが可能となった (図-7)。

また、安定した自律飛行で空撮した画像は鮮明かつ均質であることから、推定されたカメラの外部・内部パラメータに基づき密な特徴点マッチングにより三次元復元が実施できた。堤体下流左岸側を対象に手動操縦時の空撮画像と自律飛行時の空撮画像をそれぞれ復元した三次元点群データを図-11 に示す。ただし、もともとカメラレンズに直接プリズムを装着していないため、空撮位置からだけでは正確な座標で三次元点群データを復元できない。そのため、GCP を用いた全体補正が必要であるが、本実証では GCP 資料が不足しており全体補正や検証点との精度比較は実施できない点は課題である。しかし、図-11 に示す異なる飛行の空撮画像でそれぞれ作成した三次元点群データで、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-4)。

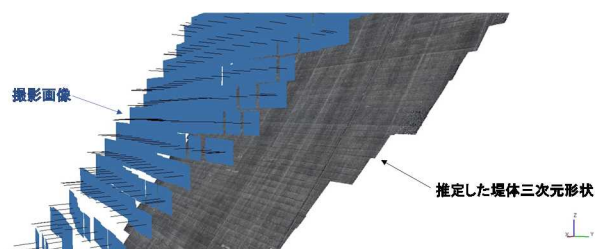


図-7 TSで計測した空撮座標を利用した写真アライメント

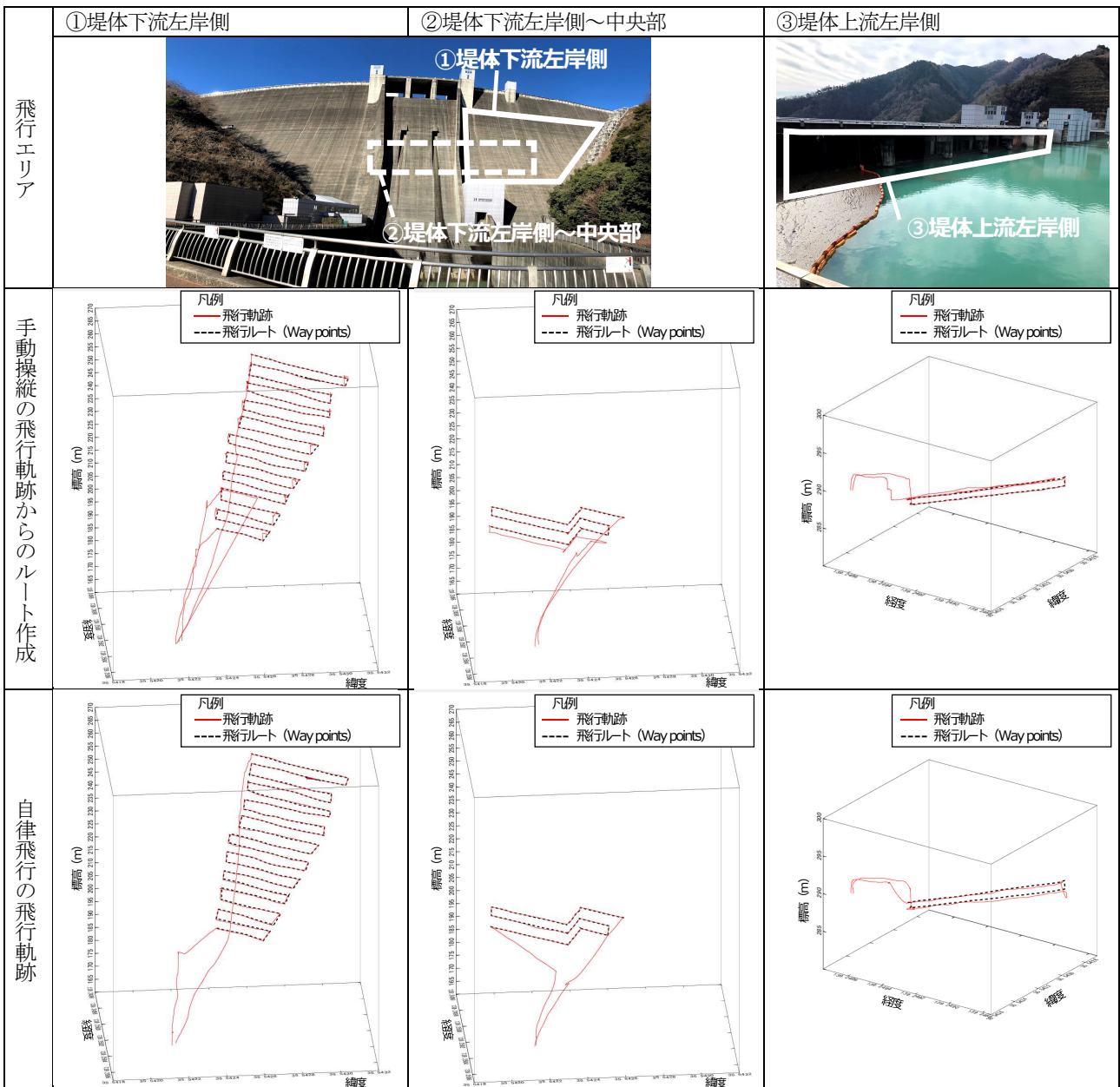


図-8 飛行エリア毎の飛行軌跡からのWP作成と自律飛行の飛行軌跡 上段：飛行エリア，中段：手動操縦の飛行軌跡と飛行軌跡から作成した飛行ルートの重ね合わせ図，下段：飛行ルートと自律飛行の飛行軌跡の重ね合わせ図。

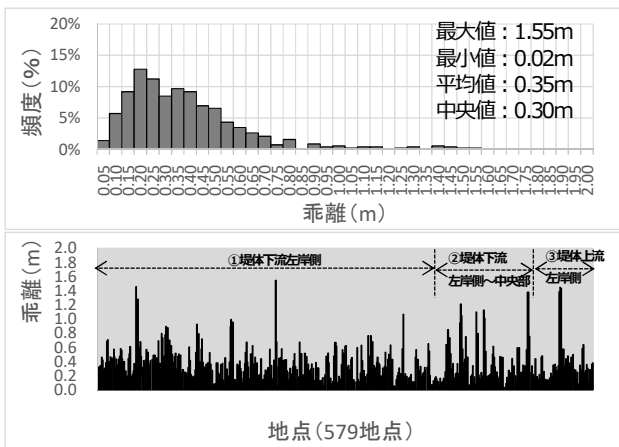


図-9 設定WP座標と飛行ログの乖離状況 上：頻度分布，下：地点毎の乖離状況。

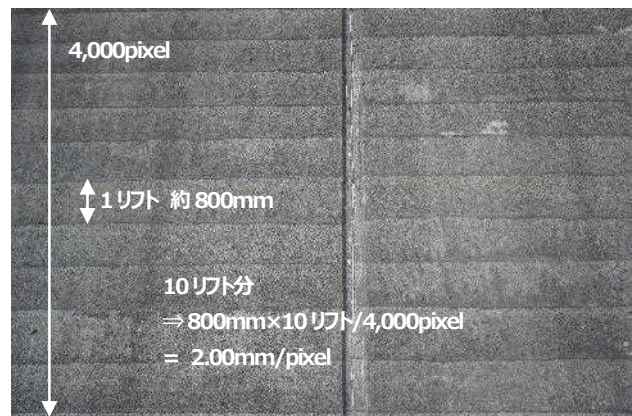


図-10 撮影画像の品質チェック結果の一例（下流左岸側）

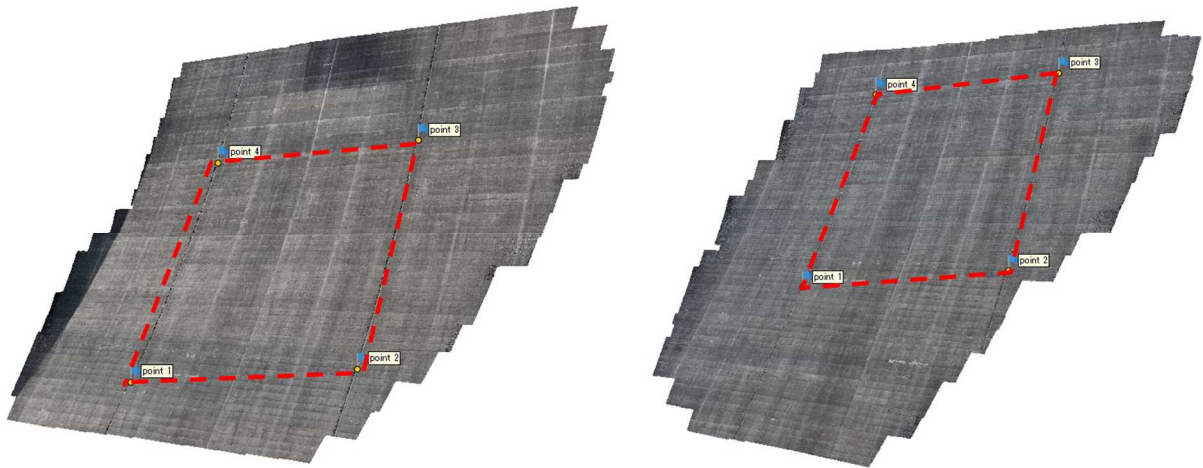


図-11 空撮画像による三次元復元 左：手動操縦時の空撮画像による復元，右：自律飛行時の空撮画像による復元

表-4 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) AI を活用した異常検知

空撮画像は 6,000pixel×4,000pixel の解像度であり，解像度を落とさず 5,888pixel×3,840pixel にリサイズし，更に 256pixel×256pixel サイズに分割した．次に，損傷の有無で 2つのグループに分類し，各グループ 222 個のデータセットを準備した．本稿ではそのデータセットを用いて CycleGAN のフレームワークを構築した．

構築した CycleGAN のフレームワークを，堤体下流左岸側の空撮画像に適用した異常検知結果を図-12 に示す．ダム堤体の安全面には問題ないが，剥離，初期のポップアウト，コンクリートに使用された骨材（砂利・砂等）に含まれた鉄分の滲み出しなど広範囲の中から人の目では気が付かないような表面の異常情報を検知することができた．なお，図-12 中の画像はリサイズ・分割後の 1 辺約 512mm の画像である．また，本稿の異常検知の閾値は元々の画像解像度である 2mm/pixel であり，ピクセル数をカウントすることで劣化情報の大きさを把握することができる．この異常検知手法の精度向上には平常時の健全状態の画像データが重要であり，明るさ，光の当たり方，画角等の撮影条件を統一した画像データを飛行機会を増やして蓄積していくことが望ましい．

5. おわりに

本稿では，ダム堤体の点検・診断・管理を効率的に

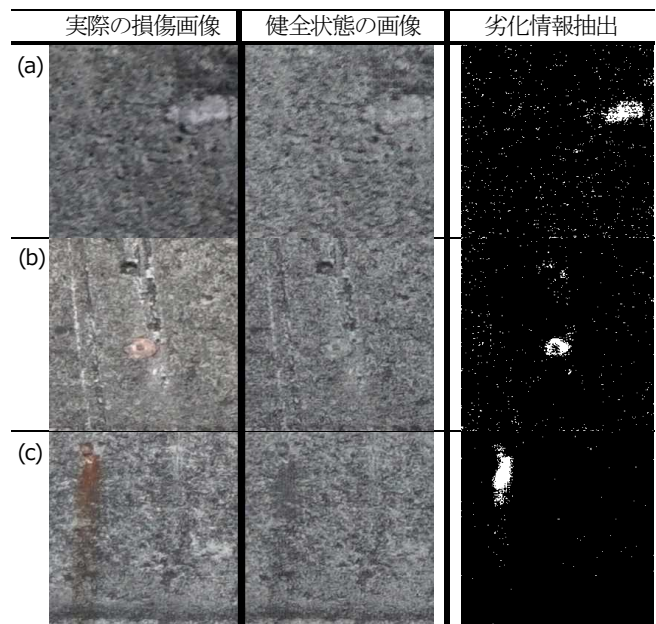


図-12 教師なし学習における劣化検知の試行結果 (a)剥離，(b)初期のポップアウト，(c)コンクリートに使用された骨材（砂利・砂等）に含まれた鉄分の滲み出し

実施するために，非 GNSS 環境下の UAV の自律航行の確立，ジオタグ付きの等距離正対の堤体空撮画像を活用した写真測量技術の精度改善，CycleGAN による劣化情報検知手法を提案し，宮ヶ瀬ダムで現場実証した．その結果，手動操縦では実現不可能な飛行精度で，ダム全体を高解像度で均質かつ鮮明に空撮できることを示した．また TS での UAV は，非 GNSS 環境下における手動操縦でも位置および姿勢制御が可能となり，ダム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できることを示した．更には，三次元復元の精度改善や広範囲のダム堤体の中から様々な未知の劣化情報を抽出できることを確認し，提案手法の有用性を示した．

今後は以下について取り組んでいく．

- ・ UAV を用いた写真測量技術は，従来の写真測量と比

べ十分に精度が得られるが、現状ではまだ解決されていない課題²⁰⁾もある。撮影ラップ率をより高めたり、GCP や標定点を用いた座標補正を行ったりして、「UAV を用いた公共測量マニュアル (案) 平成 28 年 3 月」²¹⁾の要求精度を確保する方法を検証していく。

- 様々な形式や構造のダムで実績を増やし実用性を検証する。特に、堤体下流下地側に TS を設置するスペースがないダムで、天端面からの下角追従のみで全体を網羅できるか検証が必要である。また、数多くのフライトにより平常時の堤体画像の蓄積を行い、健全な状態の画像を再学習し、異常検知手法の精度向上を図る。
- 赤外線カメラや LiDAR 等を搭載した UAV を飛行させ、様々なセンシング結果から多様な劣化情報を検知できるように汎用性を高めていく。

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) 春原久徳, 中畑稔, インプレス総合研究所: 第 2 章 産業分野別のドローンビジネスの現状と課題, ドローンビジネス調査報告書, pp.54-118, 2018
- 2) 経産産業省: 空の産業革命に向けたロードマップ 2019 ~小型無人機の安全な利活用のための技術開発と環境整備, https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/robot/drone.html (2020/6/30 確認)
- 3) 国土交通省: i-construction, <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (2020/6/30 確認)
- 4) 国土交通省: 社会資本の老朽化対策等, 国土交通白書 第 II 部 第 2 章 第 2 節, pp.110-112, 2019
- 5) 国土交通省 道路局: 道路橋定期点検要領, https://www.mlit.go.jp/road/si-saku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf (2020/6/30 確認)
- 6) 交久瀬磨衣子, 中庭和秀, 建山和由: クラックスケール内蔵光波測量器を用いたダム堤体のひび割れ調査について, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.305-306, 2010
- 7) 山本慎太郎, 石原篤, 新庄高久, 坂本和雄: UAV を用いたダム維持管理における堤体クラック調査の高度化・効率化に関する研究, 平成 28 年度 水源地環境技術研究所所報 調査研究 5-1, pp.63-69, 2017
- 8) 栗飯原稔, 権神侑貴, 安野貴人: 深層学習によるアーチダム表面変状の検出とその分布特性, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-777, 2019
- 9) DJI : DJI GS PRO, <https://www.dji.com/jp/ground-station-pro> (2020/6/30 確認)
- 10) Jeonghoon Kwak, Yunsick Sung : Autonomous UAV Flight Control for GPS-Based Navigation, IEEE Access, Volume 6, pp.37947-37955, 2018
- 11) ジツタ : ドローン誘導システム (TS ドローン), <https://www.jitsuta.co.jp/pickup/drone> (2020/6/30 確認)
- 12) Alexis Stoven-Dubois, Laurent Jospin, Davide A. Cucci : Cooperative Navigation for an UAV Tandem in GNSS Denied Environments, 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp.2334-2339, Sep. 2018
- 13) 山田樹, 田中秀幸, 松本吉央: AR マーカと高精度マーカを融合したドローンの誘導着陸システムの開発, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.431-432, 2019
- 14) 小花和宏之, 坂上清一, 八木隆徳: RTK-UAV を用いた地形計測の測位性能および省力効果, 地形 第 40 巻 第 2 号, pp.125-134, 2019
- 15) Langr J., Bok V. : GANs in Action, Deep Learning with Generative Adversarial Networks, Manning, 2019.
- 16) Yasuno T., Nakajima M., Sekiguchi T. : Synthetic image augmentation for damage region segmentation using conditional GAN with structure edge, 34th Journal of Society for Artificial Intelligence, May. 2020
- 17) Schlegl T., Seebock P., Waldstein S.M. et al. : Unsupervised anomaly detection with generative adversarial networks to guide marker discovery, Proceedings of IPMI 2017.
- 18) Zhu J-Y., Park T., Isola P. et al. : Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks, arXiv:1703.10593v6, 2018.
- 19) Isola, P., Zhu J-Y. et al. : Image-to-image Translation with Conditional Adversarial Network, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, July 2017
- 20) 早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸: UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証, 国土地理院時報 No.127, pp.107-116, 2015
- 21) 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> (2020/6/30 確認)

(Received June 30, 2020)
(Accepted July 31, 2020)

RESEARCH ON EFFICIENT AND ADVANCED DAM INSPECTION USING UAV AUTONOMOUS FLIGHT AND IMAGE TAKEN WITH UAV

Akira ISHII, Hiroaki SUGAWARA, Kohei OZASA and Masazumi AMAKATA

For efficient dam body surface inspection, we propose the UAV autonomous navigation in a non-GNSS environment using a total station, the accuracy improvement method of photogrammetry technology using images with geotag by autonomous navigation, and the aging detection of the dam body surface using the CycleGAN.

In addition, we implement a field study to demonstrate this proposed method, and show its usefulness.