

# ダム堤体劣化調査のデジタル点検における 三次元復元精度の確保方法に関する検討

石井 明<sup>1</sup>・菅原 宏明<sup>2</sup>・藤井 純一郎<sup>2</sup>・天方 匡純<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

今後、大量の社会資本設備の本格的な維持管理フェーズが到来する。現在の維持管理手法は人による作業を前提としているが、今後社会構造が変化していく中においても適切に維持管理していくために ICT や AI の新技術を活用した新たな点検・維持管理手法の導入が必要になっている。本稿ではダム堤体点検に着目し、UAV 空撮画像による三次元復元精度の確保方法を検討した。ダムでは三次元復元精度確保のための標定点は、天端など限られた平地のみにしか設置できない物理的制約がある。そこで点群データ等の座標計測結果と写真測量を掛け合わせて三次元復元精度を確保する方法を提案し、その有用性を検証した。

**Key Words:** Dam, UAV, SfM, LiDAR, Ground Control Point

## 1. はじめに

### (1) 背景

我が国では高度経済成長期に集中整備された大量の社会資本施設の本格的な維持管理フェーズ時代が今後到来する。ダムのコンクリートの堤体や洪水吐きでは、ポップアウト、ひび割れ、剥離等の劣化が経年的に進行し、顕在化していく。そのため、ダムは日々の日常点検の他、3年毎の定期検査、30年毎の総合点検を実施<sup>1)</sup>し、点検結果に基づいた対応検討や補修により、長期的な安全性や機能保持を目指した維持管理・運用が行われている。

ダムの堤体点検は、仮設足場、ゴンドラやロープにより点検技術者が堤体へ直接アクセスする方法で実施されており、アクセスする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といった課題があった。また、図面への手書きメモに基づいた点検調査結果の整理や、点検技術者の力量差により点検結果の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があった。このように従来のダム堤体点検・維持管理は人海戦術にて点検を実施できていたが、今後少子高齢化が進み、労働力人口の減少や経験豊富な熟練技術者の大量離職の中では、限られた予算、人材確保、技術継承しながら、点検・維持管理を持続的に実施していくことが必要である。そのため情報通信技術 (ICT) や人工知能 (AI: Artificial

Intelligence) の新技術を活用した新たな点検・維持管理手法を導入していくことが求められている。

2019年2月に改訂された「道路橋定期点検要領」<sup>2)</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。また、デジタル臨時行政調査会<sup>3)</sup>ではインフラ点検で目視を義務付けているアナログ規制の見直しが行われており、今後更にデジタル点検の導入が広がっていくものと推測している。

### (2) 本研究の目的

このような背景のもと筆者らはダム堤体の効率的な点検・診断・管理の実現を目指して、無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, 以下「UAV」という。) の自律航法による空撮と AI を活用した画像認識による堤体の劣化診断 (コンクリートダムのポップアウトや剥離の分布状況<sup>4) 5)</sup>、ロックフィルダムのリップラップ材の風化状況<sup>6)</sup> を組み合わせたデジタルデータに基づく点検手法について研究を進めている。

ダム堤体全体を UAV で空撮し、その連続・重複空撮画像から、Structure from Motion (以下「SfM」という。) によりダムの三次元形状と空撮位置を求め、各空撮写真の特徴点を自動で抽出し、写真間の特徴点マッチングによりダムの三次元形状を復元している。経年的なダム堤体の劣化変化を捉えるためには、空撮画像からの三次元

形状の再現性および三次元復元精度確保が重要であり、AIによる画像認識の劣化診断結果にも影響を及ぼすことがあることから UAV による空撮は飛行が安定する自律飛行で良質な画像撮影を実施することが必要であった。一般的な UAV 機体において GPS/GNSS 測位を活用した自己位置推定技術で自律航行可能であるが、ダム堤体近接は試験飛行結果<sup>7)</sup>や GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, QZSS のマルチコンステレーションで Spirent 社製 GNSS フォーサイトサービス (国内販売代理店丸文株式会社)<sup>8)</sup>による高解像度衛星画像から復元したダム堤体地形に対して 5m 上空の水平精度のシミュレーションした結果 (図-1) から、GPS/GNSS 測位を正常に受信できないことが確認できる。そのため、筆者らはダム堤体近接の自律飛行に追尾式トータルステーションによる UAV の自己位置推定技術を用いた TS 航法を適用<sup>9)</sup>し、人の操縦では再現できない飛行精度で、ダム堤体全体を等距離正対で均質に高解像で空撮できることを示し、実用化した。

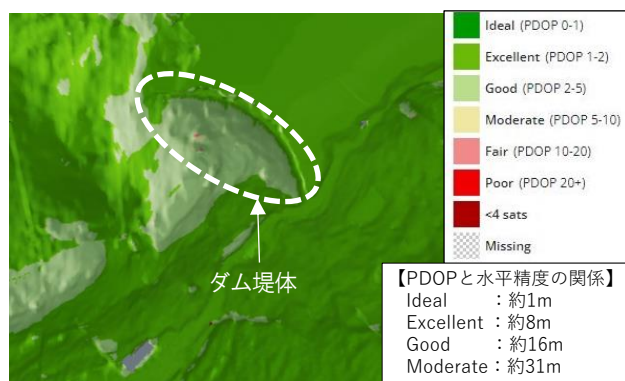


図-1 ダム堤体下流面の GNSS シミュレーション結果

しかしながら、このような精度の高い空撮技術を適用したとしても屋外空間にある巨大なダムでは点検空撮毎に天候・時間帯・時期が異なってしまい、カメラ設定 (F 値, ISO, シャッター速度) だけでは空撮画像の写り方を統一することは困難である。これにより空撮位置情報を正しく保持していても写り方の違いで SfM による三次元復元形状が異なってしまうことが挙げられる。そのため空撮画像から三次元復元する際に調整点となる標定点が必要となるが、山間谷間の狭隘部にあるダムでは、標定点の設置個所が天端や下地面などに限定されることが多く、また重力式アーチダムなどダムの構造によっては堤体の複雑な形状や、ダムに付帯する構造物も多くあることから、ダム堤体内の変化・変曲点も抑えつつ、三次元形状を緻密に復元することが課題である。

そこで本研究では、ダム堤体の標定点の設置の違いによる三次元復元精度を確認する。そして、標定点が設置できない箇所においては、空間的特徴点を活用した三次元復元により精度を確保する方法を検証する。

## 2. 基準および既往研究事例

### (1) 公共測量における精度確保方法・基準

UAV の連続した空撮画像から三次元化を行う写真測量ソフトウェアが汎用化され、誰でも手軽に三次元復元を実施できるようになった。多くの利用シーンは公共測量ではない場合が多いが、公共測量成果として精度確保する場合は、「UAV を用いた公共測量マニュアル (案)」<sup>9)</sup> (以下、「マニュアル」) に基づいて作業を実施することが求められている。

マニュアルにおける三次元復元精度を確保するための標定点及び検証点の設置方法を図-2 および表-1 に示す。外側標定点は計測対象を囲むように配置し隣り合う外側標定点の距離は 100m 以内である。内側標定点は最低 1 点とし内側標定点とそれを囲む標定点との距離は 200m 以内となっている。また検証点は標定点数の総数の半数以上とし、計測対象範囲内には均等に配置するように示されている。更に外側標定点は 3 点以上、内側標定点は 1 点以上設置する他、最も標高の高い地点及び最も標高の低い地点には標定点を設置することを標準とするなど、公共測量として三次元復元を実施する際には標定点および検証点の設置に細心の留意を払っている。

ダム堤体に対してマニュアルに準拠して標定点や検証点を配置しようとする時、例えば上流面は水面であり、下流面は山間域の谷間に建設され下地面にアクセスできないようなダムも多い。また、広大なダム堤体面内に対してもアクセス困難なため内側標定点や検証点は配置できない。そのため、確実に標定点を設置できる場所は天端に限られる。マニュアルのとおり標定点や検証点を設置できないことによる三次元形状復元精度確保が課題である。

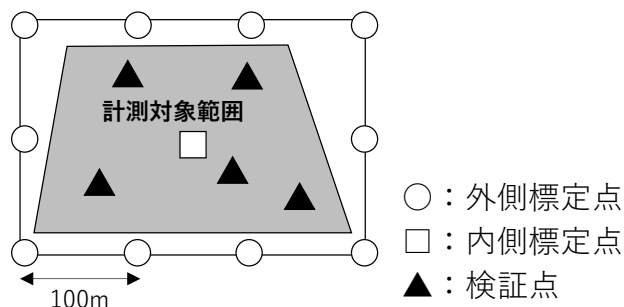


図-2 標定点および検証点の配置図

表-1 標定点の設置間隔

位置精度	隣接する外側標定点間の距離	任意の内側標定点とその点を囲む各標定点の距離
0.05m 以内	100m 以内	200m 以内
0.10m 以内	100m 以内	400m 以内
0.20m 以内	200m 以内	600m 以内

## (2) 既往研究における三次元復元精度の検証状況

UAVの空撮写真による三次元復元精度検証は、SfMのソフトウェアのアルゴリズムがブラックボックスであることから UAV テストサイトを利用し、種々の条件で精度検証を行った事例<sup>10)</sup>がある。UAV の空撮画像は真下撮影を基本として、標定点の数や配置を変更したり、斜め写真を追加することで標定点の精度確認を行っている。標定点の数を増加させることで精度向上するが、その解析結果はSfMソフトウェア毎に傾向が異なることから、検証点を用いて精度が確保されているかを確認する必要があるとされている。また標定点の観測（撮影）数はSfMの再現性確保の観点から、標定点が撮影されている全画像を用いることが推奨されている。斜め写真の追加は多視点情報の追加により三次元解析の信頼性が向上して精度向上に寄与する一方、撮影時間や処理時間が増大することが課題となっており、目標精度を検討して追加の必要性を検討することが必要とされている。

しかし、これは単調な真下画像とテストサイトという限られた範囲での検証であり、ダムのような地形に対して三次元復元する際の標定点の配置の違いによる三次元精度について確認した事例は見当たらない。そのため、今後ダム堤体のデジタル点検が展開されていく上で、三次元復元精度を検証しておくことは必要である。

## 3. 標定点の配置による三次元復元精度検証

### (1) 検証ダムとデータの概要

標定点の配置の違いによるダム堤体の三次元復元精度の確認を、秋田県にある森吉山ダム（国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所森吉山ダム管理支所）で実施した。森吉山ダムはダム高が156.0m、堤頂長が375.0mのロックフィルダムである。そのためダム下流の下地面へアクセス可能であること、また堤体の外部変形監視のため天端に13点（DK1～13）、堤体内に21点（上流面U1～U8の8点、下流面L1～L13の13点）の基準点があり、3級基準点測量により計測が行われている。天端上の基準点は約50m間隔、堤体内の基準点は鉛直方向に約50m、水平方向に約100mの間隔で配置されている。

UAVによる堤体空撮は筆者らの飛行方法（TS航法）を利用し、2021年10月に6日間かけて撮影を実施した。空撮はUAVに搭載したデジタルカメラ（SONY α7IV）と地上解像度3mm/pixelとして撮影し、堤体から約27m離隔させて堤体全体を等距離正対で自律航行にて実施した。空撮画像は全部で6,121枚となり、基準点34点に1点（DK15）加えた合計35点を標定点として、sfmソフトウェアMetashapeを利用して空撮画像から三次元復元を実施した。復元した三次元形状と併せて、標定点とし

た基準点の配置を図-3に示す。なお以降の三次元復元の検討においてもMetashapeを利用している。

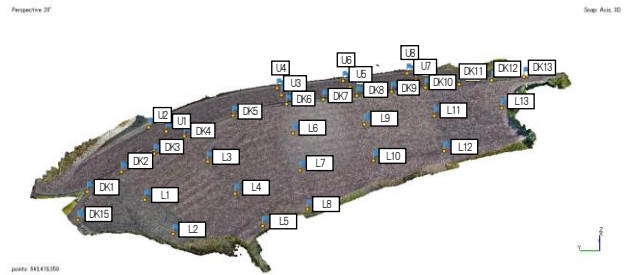


図-3 三次元復元結果および基準点の配置

### (2) 検証ケース

三次元復元に利用できる基準点は全部で35点ある。ここではこの限られた基準点を表-2に示す9ケースの標定点と検証点に分けてそれぞれ三次元復元を実施した。

Case1は空撮画像の位置情報のみで復元精度を確認する。デジタルカメラ自身にはGPS機能はないがトータルステーションを活用して自律飛行しているため、空撮位置の把握が可能であり、その空撮座標と画像の写り方のみで復元した場合を想定している。Case2およびCase3はダム堤体天端のみ標定点を設置した場合であり、多くのダムで適用されると想定されるケースである。Case4およびCase5は堤防天端の標定点に加えて堤体上流面および下流面の基準点について天端から2段下のラインの基準点を標定点に加えたケースである。上流面側は水面であり基準点設置は困難な場合が多いが、下流面側は平地になっていれば設置できるケースを想定している。Case6およびCase7はCase4およびCase5のそれぞれに堤体上流面および下流面の中段にある基準点を標定点に加えたケースである。Case8は外側の3点を追加したケースで、Case9は全基準点を標定点にしたケースである。

### (3) 検証結果

三次元復元した各Caseの標定点および検証点における誤差を表-2に整理した。なおこの誤差算出は元画像の解像度を縦横半分とするダウンサンプリングにて実施し、各Caseの平均解析処理時間は245分（OS:Windows 10 pro, CPU:Intel Core i7-7820X 3.60GHz, RAM:128GB, GPU:NVIDIA GeForce GTX1080Tiの環境にて解析を実施）であった。また図-4に横軸を表-3のケース名、左縦軸を誤差、右縦軸を使用した標定点および検証点の点数としたグラフを示す。

表-3および図-4より標定点の数が増加するにつれて、検証点の精度も向上していくことが確認できた。Case1の空撮位置情報のみで復元した結果は、三次元復元は可能であるが他と検証点の誤差のオーダーが異なっており、基準点による調整がなければ三次元復元精度は確保されず、経年的な比較を行う三次元形状の精度としては問題

表-2 三次元復元検証ケースの設定

Case Name	概要	標定点		検証点	
		点数	番号	点数	番号
Case1	空撮画像位置のみ	0	—	35	DK1~13,15, U1~U8, L1~L13
Case2	天端 100m 間隔のみ	6	DK2,4,6,8,10,12	29	DK1,3,5,7,9,11,13,15, U1~U8, L1~L13
Case3	天端 50m 間隔のみ	14	DK1~13,15	21	U1~U8, L1~L13
Case4	Case2+堤体最下基準点	15	DK2,4,6,8,10,12, U2,4,6,8, L2,4,7,10,12	20	DK1,3,5,7,9,11,13,15, U1,3,5,7, L1,3,5,6,8,9,11
Case5	Case3+堤体最下基準点	23	DK1~13,15, U2,4,6,8, L2,4,7,10,12	12	U1,3,5,7, L1,3,5,6,8,9,11,13
Case6	Case4+堤体中央基準点	24	DK2,4,6,8,10,12, U1~8, L1~4,6,7,9~12	11	DK1,3,5,7,9,11,13,15, L5,8,13
Case7	Case5+堤体中央基準点	32	DK1~13,15, U1~8, L1~4,6,7,9~12	3	L5,8,13
Case8	Case6+最外側点 3点	27	DK2,4,6,8,10,12, U1~U8, L1~L13	8	DK1,3,5,7,9,11,13,15
Case9	全既知点を標定点	35	DK1~14,15, U1~U8, L1~L13	0	—

表-3 誤差評価

Case Name	標定点		検証点	
	点数	誤差(m)	点数	誤差(m)
Case1	0	7.904	35	0.083
Case2	6	0.026	29	0.075
Case3	14	0.026	21	0.427
Case4	15	0.035	20	0.083
Case5	23	0.035	12	0.075
Case6	24	0.036	11	0.087
Case7	32	0.036	3	0.086
Case8	27	0.036	8	0.073
Case9	35	0.036	0	—

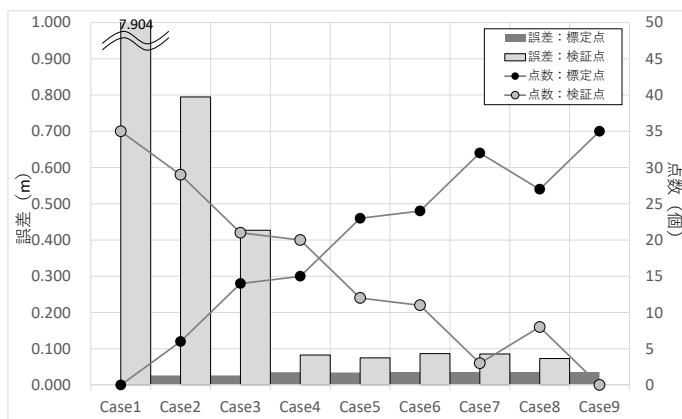


図-4 標定点および検証点の誤差変化

凡例  
 青線 : Case1  
 緑線 : Case3  
 白線 : Case9  
 ■ : 基準点

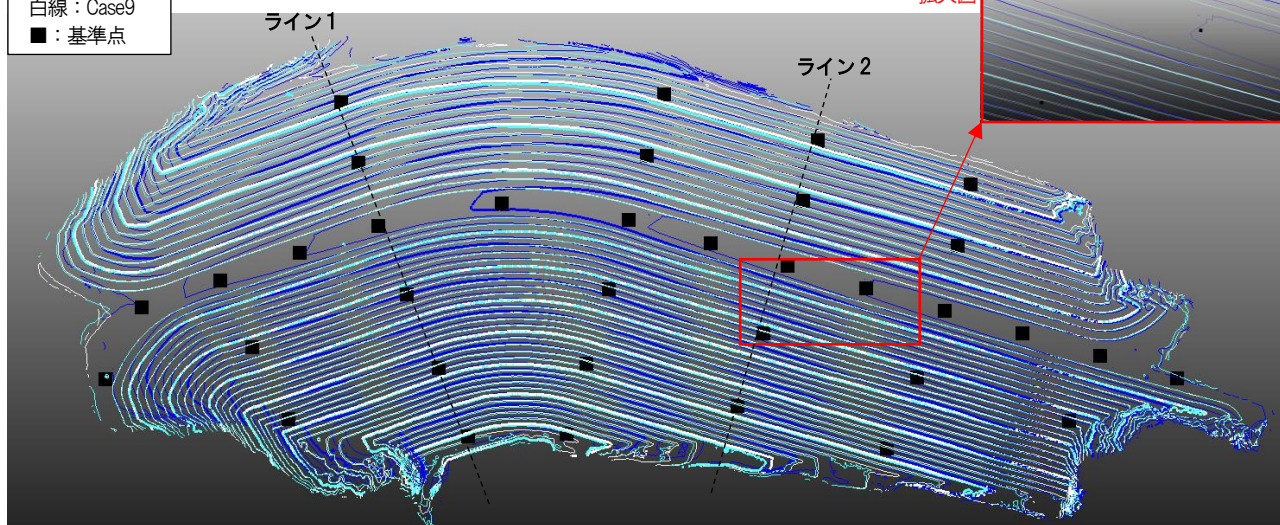


図-5 標高コンター図

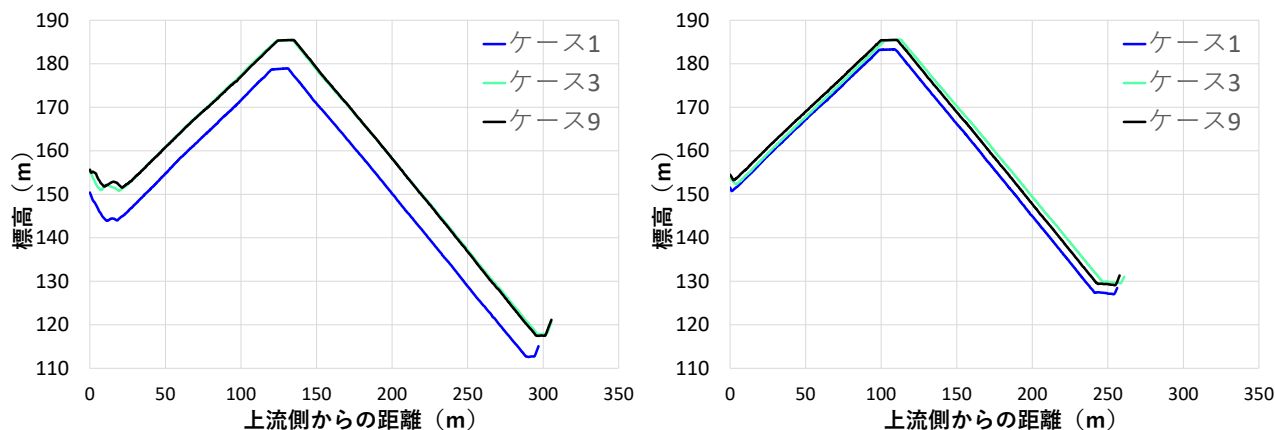


図-6 横断図 (左図 : ライン1, 右図 : ライン2)

がある。Case2およびCase3の天端のみに標定点を設置したケースでは、標定点の誤差は位置精度 0.05m 以下の結果となったが、堤体内の検証点の誤差はマニュアルの位置精度基準を大きく上回っており、堤体中央や下部では精度が確保できていない。Case4～Case9は、標定点および検証点の誤差が位置精度 0.10m 以内に収まっている。この空撮画像作業は公共測量として実施したものではないが、標定点配置をマニュアルのとおりとすれば、位置精度の確保は可能であることが確認できる。

また三次元復元形状全体の評価として Case1, Case3, Case9の3ケースについて2m間隔毎の等高線コンター図を重ね合わせた結果を図-5に示す。また基準点上のライン1およびライン2の横断図を図-6に示す。堤体面の正確な座標値(形状)は不明であるが、Case9の全基準点を利用した三次元復元形状を正解として比較すると、ロックフィルダム単調な堤体面においても形状に差異が生じていることが確認できる。重力式アーチダムのように形状が一様でないダムや、堤体に付帯構造物がある場合などにおいて三次元形状推定を正確に実施するためには、より多くの標定点設置が必要である。

#### 4. 構造物の特徴点を活用した復元方法の提案

##### (1) 提案手法の概要

ダム堤体空撮時の写りに依存しないで三次元復元精度を確保するためには、ダム堤体面に多くの標定点・検証点を設置することが好ましい。しかし堤体内への標定点設置は物理的に不可能な場合が多い。そこで、堤体内にある鈹、目地継ぎ目、付帯構造物設置角、コンクリート構造物角等の再現性が高く、変化がない箇所を特徴点として抽出し、その特徴点を標定点として三次元復元を実施する。例えば ISS<sup>1)</sup>など三次元点群から幾何学的に特徴点・特徴量を抽出するアルゴリズムも多くあるが、再現性が高く、変化がないといった情報をもとに抽出することは困難であるため、本稿では手動にて特徴箇所を選定する。また抽出した特徴点(標定点)の座標は地上レーザーによる点群計測結果やトータルステーションで計測した結果を活用し、人がアクセスできないような箇所にも標定点の座標設定を行う。これにより数多くの標定点を使って SfM による三次元復元を実施する。

##### (2) 提案手法の検証

本稿では関東地方にある二瀬ダムについて堤体下流面を地上レーザースキャナ(TOPCON社製 GLS-2000)を既知点に設置して堤体の一部を計測した点群データ(図-7)と、TS航法による自律航法で空撮した画像から空撮位置情報のみで作成した三次元復元形状(図-8)で検

証する。なお図-8の三次元復元結果は、空撮範囲内に人がアクセスして標定点を設置することは困難であるため、画像の特徴点のみで復元した結果である。

空撮範囲の中から表-4に示すとおり点群計測結果で確認できる付帯構造物の角(Point1およびPoint2)、目地継ぎ目とコンクリート構造物の交差点(Point3)、付帯構造物と目地継ぎ目の交差点(Point4)の特徴点を目視にて選定し、手動にて座標を抽出した。抽出した座標を標定点として三次元復元した結果を図-9に示す。

標定点座標と三次元復元結果の座標の誤差は、空撮画像の位置情報のみで復元した場合は0.492(m)であったの



図-7 地上レーザーによる堤体の点群計測結果



図-8 空撮位置座標のみによる三次元復元結果

表-4 特徴点の抽出結果(手動)

No.	空撮画像	点群座標
Point1		
Point2 (Point1)		
Point3		
Point4		

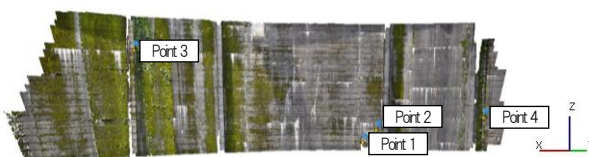


図-9 点群計測点を標定点として活用して三次元復元した結果

に対して、標定点を設置して復元した場合は 0.080(m)であった。このようにダム堤体の特徴点の座標と空撮写真を掛け合わせることで、一定の精度を確保した三次元復元結果が得られることを確認した。

## 5. おわりに

本稿では UAV 空撮画像からダム堤体の三次元形状を復元する際の標定点の配置位置や数の違いによる三次元復元形状の差異を検証した。これよりダム堤体を精緻に三次元復元するためには数多くの標定点が必要であるが、ダムでは標定点設置が天端など限られた平地のみにしか設置できない場合が多い。そのため堤体内の再現性が高く、変化がない特徴的な箇所を標定点とし、点群データやトータルステーション等による標定点の座標計測結果と SfM を掛け合わせて三次元復元を実施する方法を提案し、経年的に写り方が異なっている空撮画像でも三次元復元精度を確保できる可能性を示した。

今後の課題として、堤体の特徴点を抽出する作業プロセスの省力化、その特徴点の座標取得方法の違いによる精度比較や抽出する特徴点の数や配置の規則検討がある。また現在検討しているダム堤体のデジタル点検は、自律飛行による UAV 空撮可能性調査、自律飛行による空撮作業、SfM による三次元復元処理、AI による劣化診断といった個別作業で検討している。SHM (Structural Health Monitoring) の提案フレームワーク<sup>12)</sup>に倣い、個々の作業をシームレスに連携し、診断結果をもとに予防保全・補修を実施するデジタルツインのシステム化もダム堤体点検の全体作業最適化を目指していくためには必要である。

謝辞：国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所森吉山ダム管理支所ならびに関東地方整備局二瀬ダム管理所の皆様には、貴重なデータやフィールド提供等の協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説 平成 25 年 10 月，2013.
- 2) 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) (2022/12/31 確認)
- 3) デジタル庁：デジタル臨時行政調査会の取組，<https://www.digital.go.jp/policies/digital-extraordinary-administrative-research-committee/> (2022/12/31 確認)
- 4) 嶋本ゆり，安野貴人，栗飯原稔，藤井純一郎，大久保純一，天方匡純：ディープラーニングによるポップアウトの自動検出の手法の提案，第 33 回人工知能学会全国大会，4C3-J-13-05，pp.79-82，2019.
- 5) 石井明，菅原宏明，小篠耕平，天方匡純：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，AI・データサイエンス論文集，vol.1 J1，pp.613-622，2020.
- 6) 藤井純一郎，平嶋智希，栗飯原稔：ロックフィルダムの堤体点検への画像認識 AI の適用，人工知能学会全国大会論文集，JSAI2022 巻，p. 4Yin231，2022.
- 7) 石井明，菅原宏明，藤井純一郎，天方匡純：ダムサイトにおける自動追尾式トータルステーションを利用した UAV の自律飛行実験，第 28 回計測自動制御学会中国支部学術講演会講演集，4B-3，pp.99-100，2019.
- 8) Spirent Communications：GNSS Foresight Service，<https://www.spirent.com/products/gnss-foresight-forecasting> (2022/12/31 確認)
- 9) 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)平成 28 年 3 月(平成 29 年 3 月改正)，2016.
- 10) 菅井秀翔，宮地邦英，中村孝之，南秀和，橘克己：UAV を活用した写真測量の精度検証，国土地理院時報，No.129，2017.
- 11) Y.Zhong：A shape description for 3d object recognition，In IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops，689-696，IEEE，2009.
- 12) Kamyabi Zandi：A Framework for Digital Twin of Civil Infrastructure Challenges & Opportunities，*Structural Health Monitoring* 2019，10.12783/shm2019/32288，2019.

(Received December 31, 2022)

(Accepted February 28, 2023)

## STUDY ON HOW TO ENSURE THE ACCURACY OF 3D MODEL IN DIGITAL INSPECTION OF DAM BODY DEGRADATION SURVEY

Akira ISHII, Hiroaki SUGAWARA, Junichiro FUJII and Masazumi AMAKATA

Current maintenance management methods are based on human work, but new inspection and maintenance management methods utilizing new technologies such as ICT and AI are needed to ensure appropriate maintenance management even as the social structure changes in the future. This paper focuses on dam body's inspections and examine how to ensure the accuracy of 3D reconstruction using images taken by UAV. Although many ground control points are necessary to ensure accuracy, ground control points can only be placed in limited locations, such as at the top of a dam, in a dam. Therefore, we proposed a method to ensure 3D reconstruction accuracy by combining coordinate measurement results such as point cloud data and photogrammetry, and verified the usefulness of this method.