

八千代エンジニアリング株式会社 正会員 ○石井 明, 栗飯原 稔, 平嶋 智希
非会員 繁田 淳吾, 権神 侑貴

1. はじめに

ダムで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し、点検結果に基づいた補修や対策検討等を行うことで、ダムの安全性や機能を長期にわたって維持している。ダムの点検は調査範囲や項目が多岐にわたっており、今後大きく変化すると想定される社会構造や自然環境下においても適切にダムの安全性や機能を維持していくために、最新技術を活用した点検の省力化や効率化、データに基づく点検の高度化が必要となっている。

本稿では宮城県にある鳴子ダム（国土交通省東北地方整備局）の堤体に発生しているコンクリートの劣化現象の一つであるポップアウトに着目している。これまでポップアウトの調査は双眼鏡やスケッチ等の人手で行っていたが、筆者らは無人航空機（UAVUnmanned Aerial Vehicle）の自律航法による空撮¹⁾と人工知能

（AI:Artificial Intelligence）を活用した画像認識^{2), 3)}により、客観的かつ定量的な指標で経年変化を確認できる手法について研究を進めている。しかし、堤体表面の画像からではポップアウトの経年的な個数変化・発生有無しか把握できないため、一度発生したポップアウトはメカニズム的に拡大しないとされているが、奥行き方向の劣化の実態は確認できていない。またロープやゴンドラ等を利用して点検技術者がアクセスする方法での計測は困難で、LiDARによる計測も堤体面の計測結果バラつくためノイズ処理や精度確保が課題であり、ポップアウトの形状把握が困難だった。そこで本稿では、堤体の安全性に問題はないが、ポップアウト形状を捉えてより客観的に安全性評価を今後実施するために、近接で撮影した高解像度の空撮画像から三次元形状を復元し、ポップアウトによる欠損ボリュームを推定した試行結果を報告する。

2. 欠損ボリュームの推定

2. 1. 手順の概略説明

以下①～④の手順にてポップアウトの欠損ボリュームを推定する。なお各手順の具体内容は、以降の節にて本稿における作業内容と併せて説明する。

①空撮画像からポップアウトを含む堤体の三次元復元（点群化）を行う。

②ポップアウト欠損箇所の堤体平面形状推定する。

③ポップアウトの点群抽出および推定平面からの距離 d_i を算出する。

④1点あたりの支配面積 A_i を算出し、距離 d_i を乗じてポップアウトのボリュームとする。

2. 2. ポップアウトの三次元復元（点群データ）

鳴子ダムでは堤体の上下流面に拳大～人頭大まで様々なサイズのポップアウトが多数確認されているが、本稿では最大クラスのポップアウトの1つに注目する。これは、鳴子ダムの形式がアーチ式であり、堤体の平面形状が単調ではないためである。着目したポップアウト付近の堤体画像を、トータルステーション航法の自律航行¹⁾により堤体から約15m離隔させて2mm/pixelの高解像度にて等距離正対で空撮した。そして、その連続・重複空撮画像からStructure from Motion（以下「SfM」という。）解析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た。三次元復元した結果を図-1に示す。なお、本稿でのSfMの解析はMetashapeを利用している。



図-1 ポップアウトを含む堤体の三次元復元結果

（水平方向からの鳥観図）

（真上方向からの鳥観図）

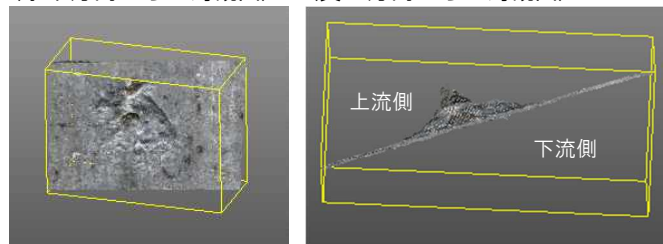


図-2 ポップアウトの切り出し結果

キーワード ダム, ポップアウト, SfM, Point cloud data, 体積推定, 欠損ボリューム

連絡先 〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CS タワー 八千代エンジニアリング株式会社 TEL 03-5822-6844

次に、点群処理ソフトウェア CloudCompare⁴⁾を利用して作成した堤体の三次元点群データからポップアウトエリア（図-1の黄色枠）を手動にて切り出した（図-2）。点数は22,520点で、図-2より堤体面が欠損しているポップアウトの形状が確認できる。

2. 3. 堤体平面形状の推定

切り出したポップアウトの点群データから、RANSAC (Random Sample Consensus) を用いて堤体の平面方程式 $aX + bY + cZ + d = 0$ の変数を推定する。なお本稿では python の open3d ライブラリの RANSAC を使用し、推定平面との最大距離の閾値を 0.01、ランダムサンプリング点数を 1,000 点、サンプリングによる平面の確認回数を 3,000 回で推定した平面方程式を式 1 に示す。また図-3 に推定された平面上にある点を赤色で示した。

$$0.9348X + 0.3228Y - 0.1483Z - 0.4554 = 0 \quad (\text{式 1})$$

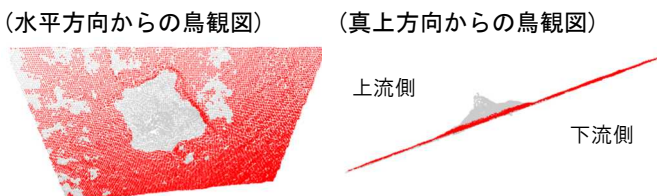


図-3 ポップアウト近傍の堤体平面形状の推定結果

2. 4. 距離推定

推定した平面形状から上流側にある点群をポップアウトの点群として抽出（点数：3,361点）した（図-4）。抽出した点群は、式2より点 (x_i, y_i, z_i) と推定した平面（式1）との距離 d_i を計算した。その結果、平均距離は 0.050m、最大距離は 0.165m となった。

$$d_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (\text{式 2})$$

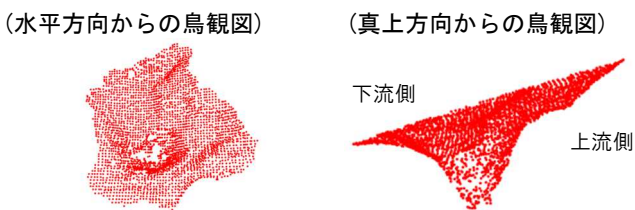


図-4 ポップアウトの点群抽出結果

2. 5. 欠損ボリュームの推定

上述でポップアウトの点毎に推定平面との距離が確認できたことから、1点あたりの支配面積 A_i が設定できればボリュームが算定できる。そこで1点あたりの支配面積 A_i は、まず以下の手順にてポップアウトの点群を XY 平面に回転させて、全ての点を水平面に投影する。

- ・推定した平面（式1）と XY 平面のそれぞれの法線ベクトルの単位ベクトルを算出する。
- ・2つの単位ベクトルのなす角（回転角）を算出する。
- ・2つの単位ベクトルから回転軸の単位ベクトルを外積

で算出する。

- ・ロドリゲスの回転公式を利用して、回転軸回りにポップアウトの点群データを回転させる。
- ・全ての点を XY 平面に投影する（Z 座標をゼロにする）。

次に、XY 平面に分布した点をもとにポロノイ分割で空間を分割して、点毎に区切られた各領域の面積を計算し、その各領域の面積の平均を支配面積 A_i とする。その結果、1点あたりの支配面積 A_i は $0.450 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{)}$ となり、推定体積は $0.760 \times 10^{-2} \text{ (m}^3\text{)}$ となった。この推定体積を平均距離で割った面積の1辺の長さは約 0.389(m) となり、概ねポップアウトの最大クラスの同程度のサイズになっていることが確認できた。

3. まとめ・今後の課題

本稿では近接で撮影した高解像度の空撮画像から三次元形状を復元し、ポップアウトの欠損ボリュームを推定した。着目したポップアウト周辺部の空撮画像のみで三次元形状復元を実施したため絶対的なスケールは合っていないが、想定したボリューム量からのポップアウトの大きさ（長さ）は概ね想定されるサイズと同等となり推定方法は妥当であったと考える。そのため、今後堤体にある全ポップアウトの欠損ボリュームを推定できれば、ダム安全性をより説明力のあるものにする事が可能になると考え、今後の課題として取り組むべき内容を下記に示す。

- ・現地計測結果との比較による推定方法の検証
- ・三次元復元形状のスケール設定
- ・堤体全体での評価のための、点群形状からのポップアウト範囲の自動抽出
- ・経年的なポップアウト形状の比較

謝辞

新しい試みに理解を示して頂き、データ提供のご協力を頂きました国土交通省東北地方整備局鳴子ダム管理所の皆様には謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 嶋本ゆり, 安野貴人, 栗飯原稔, 藤井純一郎, 大久保順一, 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.
- 4) CloudCompare Project: CloudCompare, <<http://www.cloudcompare.org/>>, (入手 2023.3.1)