(65) 砂防堰堤の点検写真管理への携帯端末を用いた３次元再構成アプリ活用に関する研究

山野　亨[1]・荒木　義則[1]・河村　圭[2]

[1] 正会員　中電技術コンサルタント（株）先進技術センター（〒734-8510 広島県広島市南区出汐二丁目 3 番 30 号）
E-mail:yamano@cecnet.co.jp, araki@cecnet.co.jp

[2] 正会員　山口大学（〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1）
E-mail: kay@yamaguchi-u.ac.jp

高度経済成長期に集中的に整備された社会資本は一斉に老朽化が進むため，今後は施設の維持管理が課題であり，点検結果の適切な可視化による現地状況把握は重要である．著者らは砂防堰堤の変状部位に接近して撮影する点検写真を砂防堰堤３次元モデルに貼り付けることで，施設全体に対する変状の位置・方向・大きさを把握する手法を開発したが，点検写真を SfM/MVS 処理（以下，SfM 処理と呼ぶ）で後処理する必要があるという課題があった．そこで本稿では，携帯端末を用いた３次元再構成アプリにより生成される３次元モデルと SfM 処理により生成される３次元モデルを比較するとともに，３次元モデルを GIS に取り込む手法を検討した．

Key Words: *3D models, SfM/MVS, LiDAR,GIS*

1. はじめに

近年の気候変動により毎年のように全国各地で土砂災害が発生している．土砂災害を防止するための砂防関係施設は，適切な維持管理により長期にわたって施設の性能を維持していくことが求められる．また，高度経済成長期に集中的に整備された社会資本は一斉に老朽化が進むため，今後は施設の維持管理が課題である．

砂防堰堤は土石流発生時に下流の人家の被害軽減のため設置される施設であり，山中に設置されることが多い．そのため，砂防堰堤の点検時には徒歩で現場に移動する必要があり，持参する機材の小型・軽量化が求められる．

著者らは「ICT（Information and Communication Technology）技術を活用した調査効率化支援ツール（以下，スマート調査と呼ぶ）」を開発し，施設点検のデータベース化と GIS（Geographic Information System）化を実現した． スマート調査を用いた現地調査では，写真撮影・点検結果の記録・自己位置発信等にスマートフォンを利用している．

さらに著者らは，開発したスマート調査に，砂防堰堤を対象として３次元モデルを適用し，点検写真に記録された変状の位置・方向・大きさを現地に行くことなく確認するための手法を提案した[1]．本手法では，UAV 撮影写真から生成した砂防堰堤３次元モデルと，現地で点検者が撮影した点検写真３次元モデルを，３次元 GIS 上で重ね合わせて表示している．

この提案手法では，点検写真を３次元モデル化する際に，SfM/MVS（Structure from Motion / Multi-view Stereo）を用いた．SfM/MVS は，対象物を異なる方向から複数枚撮影して，３次元形状を復元する技術[2]である．処理する写真の枚数によるが，点検写真を３次元モデル化するためには数時間を要する．これに対して，2020 年春，Apple 社が LiDAR（Light Detection And Ranging）センサを搭載したタブレット（iPad Pro）を発売し，同年 10 月にはスマートフォン（iPhone 12 Pro）を発売した．これらのタブレット・スマートフォンに搭載された LiDAR を用いて３次元モデルを生成する方式を用いることで，現場でスキャニング後，数分間で３次元モデルを生成することが可能である．

本研究では，現地点検写真３次元モデルを作成する機能を，スマートフォンを用いて実現するために，スマートフォンの LiDAR 機能を用いて３次元モデルを生成するアプリ（以下，LiDAR アプリと呼ぶ）によって生成さ

れる３次元モデルとSfM処理によって生成される３次元モデルを比較した．さらに，LiDARアプリによって生成される点検写真３次元モデルを，砂防堰堤３次元モデルに貼り付ける手法を提案する．

2. LiDARアプリについて

本研究で使用したLiDARアプリは，Scaniverse v1.9.3である．モバイルスキャン協会が公開している iPhone 3Dスキャンアプリまとめ [3]において，無料スキャンアプリの中では一番 LiDAR スキャンの性能が高いと評価されていることから，本アプリを採用した．実験に使用したスマートフォンは，iPhone12 Proである．

LiDARアプリで物体をスキャンし，モデル作成処理を実行すると，テクスチャ付きの３次元サーフェスモデルが生成される．作成したモデルから，点群データを含む様々なファイルフォーマットへエクスポート可能となる．

3. 提案手法の流れ

UAV 撮影写真により作成された砂防堰堤３次元モデルと，人が撮影した部分的な現地点検写真を組み合わせることで，効果的な点検写真管理を実現する手法について，従来手法と提案手法の比較フローを，**図-1**に示す．

従来手法と提案手法のいずれも，砂防堰堤の全体写真と部分的な現地点検写真の２種類の３次元モデルを用いる．それぞれの３次元モデルを３次元地図（３次元 GIS）に投入することで，砂防堰堤上に点検写真を貼り付けて表示することが可能となり，点検写真に写っている変状の位置・方向・大きさを砂防堰堤と対比して確認できる．



図-1　従来手法と提案手法の比較

砂防堰堤３次元モデルは，UAV を使って撮影した写真をSfM処理により生成したモデル（以下，SfMモデルと呼ぶ）とする．

現地点検写真３次元モデルは，従来手法では点検者がデジタルカメラやスマートフォンで撮影した写真をSfM処理により生成して作成した．これに対して提案手法では，LiDARアプリで３次元モデル（以下，LiDARモデルと呼ぶ）を作成する．

4. 手法の比較

(1) 実験内容

従来手法と提案手法を比較するため，SfM モデルとLiDARモデルを取得し，点検写真として利用する際の精度・解像度を確認する観点で実験した．

実験は，2022年8月7日と11日に，広島市南区出汐二丁目のアスファルト舗装された駐車場で実施した．実験内容は次に示すとおりである．

1)スマートフォンにインストールされたLiDARアプリを用いて，駐車場をスキャンして LiDAR モデルを作成した．

2)1)と同じスマートフォンで撮影した写真とMetaShape1.7.0（以下，MetaShapeと呼ぶ）を用いてSfM処理を行い，SfMモデルを作成した．

3)撮影範囲を２種類（2m×3m，2m×10m）設定し，標定点から離れた場合の影響を確認した．

4)生成した３次元モデルの表示および計測には，MeshLab v2022.02（以下，MeshLabと呼ぶ）を使用した．

実験場所の状況を**図-2**に示す．また，実験場所全景の３次元モデルを上空から俯瞰した図を用いて，標定点および計測場所を示したものを，**図-3**に示す．

(2) 実験結果

まず点検写真としてどの程度地物を識別可能か確認するため，モデルに写りこんでいるコンベックスの目盛りについて，LiDAR モデル・SfM モデル・写真の３つを比較した．その結果，SfM モデル・写真では読み取り可能な文字が読み取れない場合があることが判明した．

次に LiDAR モデルと SfM モデルを，MeshLab で表示し，モデル上でコンベックスの 10cm の目盛りを計測した．それぞれの計測場所で２か所の目盛りを計測し，その平均値で評価した．計測結果は**表-1**，**表-2** に示すとおりであり，SfM モデルは標定点に近い場所よりも標定点から離れた場所の誤差が大きかった．LiDARモデルは，

逆に標定点から離れた場所の誤差が小さかった．

次に標定点１から２の距離を３次元モデル上で計測し，実測値と比較した．実測値は，標定点１と２の間に設置したエスロンテープの目盛りを利用した．比較結果を**表-3** に示す．

5. ３次元 GIS 上での点検写真と砂防堰堤３次元モデルの対応付け

(1) LiDAR モデルの座標系

LiDAR モデルの座標系は独自座標系であり，３次元 GIS に取り込むためには座標変換が必要である．



図-2 実験場所（2022.08.11，範囲：2m×10m）

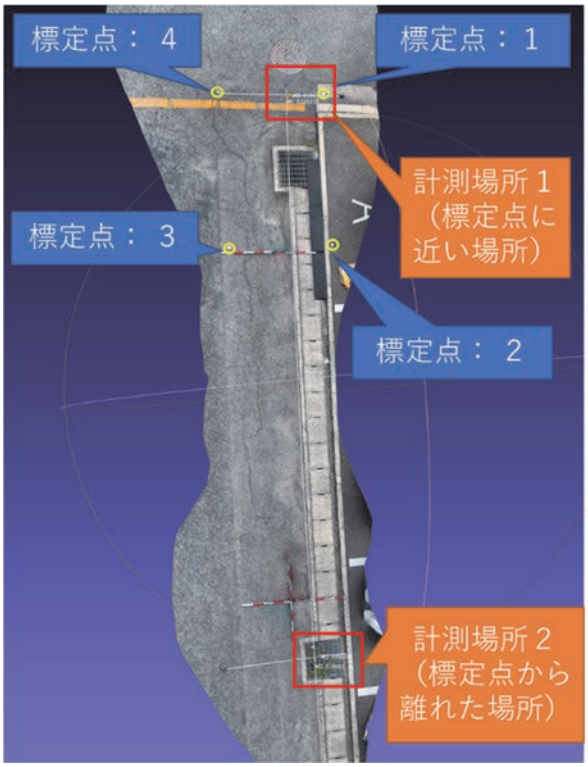


図-3 実験場所（標定点，計測場所）

Apple 社のドキュメントによると，**図-4** に示すとおり，重力方向がＹ軸の負の方向であり，データ取得開始時点のカメラの方向をＺ軸の負の方向とし，Ｙ軸とＺ軸から右手の法則を使いＸ軸の方向を決定している[4]．

LiDAR アプリが ARKit による３次元モデルの座標系を採用していると仮定し，データ取得開始時の方位が西であれば，Ｘ軸が北でＺ軸が東の３次元モデルが作成されることを実験により確認した．確認結果を，**図-5** に示す．次に，この座標系の３次元モデルを３次元 GIS に取り込んだ場合に意図したとおりに取り込まれることを確認した．３次元 GIS に取り込む際に利用する３次元モデルのファイル形式である COLLADA ファイル[5]には，「up_axis」と呼ばれる３次元モデルの上下方向の軸を指定する情報が含まれる．LiDAR モデルの COLLADA ファイルには，上方向の軸としてＹ軸が指定されていることを確認し，実際に３次元 GIS に取り込んだ際も，Ｙ軸が上下方向に取り込まれることを確認した．

以上より，座標軸は Ｘ 軸と Ｚ 軸がなす面を地表面とし，Ｙ 軸を上下（高さ）方向とした．また，平面直角座標系で位置合わせをすることから便宜的に，モデルのＸ軸を平面直角座標系のＸ軸（南北方向），モデルのＺ軸を平面直角座標系のＹ軸（東西方向）とした．

表-1 計測結果（計測場所１）（単位：m）

項目	LiDAR モデル	SfM モデル
測点 1	0.107	0.101
測点 2	0.106	0.100
平均値	0.107	0.100
実測値（0.1m）との差	0.007 **(7mm)**	0.001 **(1mm)**
実測値に対する誤差率	**7%**	**1%**

表-2 計測結果（計測場所２）（単位：m）

項目	LiDAR モデル	SfM モデル
測点 1	0.099	0.098
測点 2	0.101	0.095
平均値	0.100	0.097
実測値（0.1m）との差	0.000 **(0mm)**	0.003 **(3mm)**
実測値に対する誤差率	**0%**	**3%**

表-3 計測結果（計測場所１～２）（単位：m）

項目	LiDAR モデル	SfM モデル
アプリ上での計測値	11.330	10.832
実測値	10.954	10.954
実測値との差	0.376	0.122
実測値に対する誤差率	**3%**	**1%**

(2)　座標変換

３次元GISに点検写真LiDARモデルを取り込むために平面直角座標系への変換を次の手順に従い実施した.

1)LiDAR モデルを取得した場所に標定点を設けて，高精度 GNSS 測位装置を用いて測位した.

2)MeshLab 上で LiDAR モデルを表示し，MeshLab 内での標定点の座標を計測した.

3)1)2)それぞれで測位した 2 点の XY 座標から国土地理院測量計算サイト [6]を用いて方位角を求め，1)2)の差分を求めた．なお，方位角を求める際，LiDAR モデルの Z 座標を Y 座標と読み替えて計算した.

4)LiDAR モデルを 3)の角度で回転後，MeshLab 内で再度標定点の座標を 1 点計測し，標定点の実測値との差から，XYZ 座標値の平行移動量を算出した.

以上により，点検写真 LiDAR モデルを回転・平行移動することで，平面直角座標系への座標変換が完了した.

座標変換後の点検写真 LiDAR モデルと砂防堰堤３次元モデルを，３次元 GIS のレイヤとして取り込むことで，砂防堰堤３次元モデルに点検写真 LiDAR モデルを貼り付けることができる.

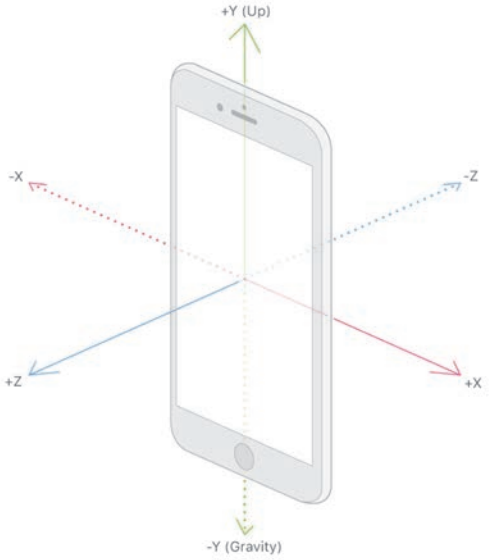


図-4　ARKit による３次元モデルの座標系 [4]

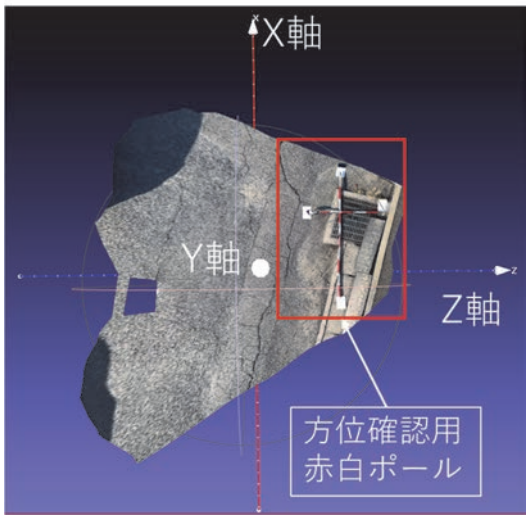


図-5　西向きでスキャン開始し生成した３次元モデル

6.　まとめ

本研究では，既往研究成果を用いて，砂防堰堤の３次元モデルを SfM 処理により作成し，３次元 GIS のレイヤとして取り込んだ．その後，点検写真の空間的な配置を把握しやすくするために，LiDAR アプリを用いて作成した点検写真３次元モデルの３次元砂防堰堤モデルへの貼り付け手法を提案した.

従来手法では，点検写真３次元モデルを SfM 処理により作成していたが，本研究では LiDAR アプリを用いて作成するために，SfM モデルと LiDAR モデルを点検写真として用いる際の違いを確認するための実験を行った.

画質に関しては，LiDAR モデルは SfM モデルに比べて画像解像度が低いため，必要な画像解像度に応じて，撮影距離を変更する等の対策が必要であることを確認した.

また精度に関しては，標定点に近い場所では SfM モデルの精度が高いが，標定点から 10m 程度離れた場所では LiDAR アプリの精度が高いことを確認した.

LiDAR モデルを３次元 GIS に取り込むために，アプリ独自座標系から平面直角座標系に変換し，３次元 GIS に取り込む手法を提案した.

参考文献

1)山野亨，荒木義則，桐山魁，白宇，河村圭：砂防堰堤点検写真管理への３次元モデルおよび GIS 活用に関する研究，土木学会論文集，Vol.79，No.22，22-22009，2023.3

2)織田和夫：解説：Structure from Motion(SfM)第一回 SfM の概要とバンドル調整，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，2016.

3)モバイルスキャン協会：iPhone3D スキャンアプリまとめ(9 月 16 日更新)，<https://mobilescan.jp/>，（入手　2022 年 12 月 28 日）

4)Apple 社：ARConfiguration.WorldAlignment.gravity_ Apple Developer Documentation，<https://developer.apple.com/documentation/arkit/arconfiguration/worldalignment/gravity>，（入手　2022 年 12 月 28 日）

5) Mark Barnes，Ellen Levy Finch，Sony Computer Entertainment Inc.：COLLADA - Digital Asset Schema リリース 1.5.0，<https://www.khronos.org/files/collada_spec_1_5_0_jp.pdf>，（入手　2022 年 12 月 28 日）

6)国土地理院：測量計算サイト，<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html>，（入手　2022 年 12 月 28 日）