

民生用デジタルカメラによる写真測量の 高精度化に関する研究

田中 龍児¹・岡林 巧¹・山本 健太郎²

¹第一工業大学 (〒899-4332 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

E-mail: r-tanaka@daiichi-koudai.ac.jp

²鹿児島大学工学部 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: yamaken@oce.kagoshima-u.ac.jp

IMPROVEMENT ON ACCURACY OF PHOTOGRAMMETRY BY POPULAR DIGITAL CAMERAS

Ryoji TANAKA¹, Takumi OKABAYASHI¹ and Kentaro YAMAMOTO²

¹Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Daiichi Institute of Technology (〒899-4395 1-10-2

Kokubu-chuou, Kirishima, Kagoshima)

²Assistant professor, Department of Ocean Civil Engineering, Kagoshima University (〒890-0065 1-21-40 Korimoto, Kagoshima)

Abstract: 3D surface of topography is getting popular by SfM(Structure from Motion) technology in the field of computer vision. But the accuracy is not currently enough compared with that of conventional photogrammetry. Also, it is very difficult to conduct the survey of steep slopes accurately by using only ground survey. In this study, we investigate the availability in the survey of steep slope by combining the technology of conventional photogrammetry with that of SfM technology.

Key Words: *topographical survey, sfm, steep slope*

1. はじめに

写真測量は、撮影した写真から対象物の三次元座標を得る技術である。従来、写真測量を行うためには高価な測定用カメラと図化機が必要であったが、最近の民生用デジタルカメラ(以下、デジカメ)は解像度が大幅に向上し、価格も安くなったため、手軽に計測に利用できる技術として実用化研究が進められている。また、それに併せてソフトウェアも進歩し、デジカメとパソコンによる三

次元計測が可能となっている。

しかしながら、ほとんどのシステムは撮影方法の制約(条件)が多いため操作が難しいことや、高度な専門知識が必要であり、誰でも使えるリーズナブルなシステムになっているとは言い難い。

田中¹⁾、²⁾は、市販のデジタルカメラを用いた海岸地形測量を、自由な姿勢で撮影した複数の写真を用いて、かつ撮影対象物にGCP(Ground Control Point)を設定せず、概算の座標値のみの入力でカメラ座標と傾き

を精度良く計算している. これに対して, コンピュータビジョンの分野では, SfM (Structure from Motion) などの二次元である画像から, 三次元の地形や人物などの幾何学的形状を復元する技術の開発研究が進んでいる. SfM もカメラの位置と姿勢を求めてから対象位置を再現するという点においては, 従来の写真測量と同じであるが, 目視に依らずほとんど自動で行われている. ただし, 精度の面では従来の写真測量に比べて十分とは言えない³⁾.

本稿では, デジカメ写真から, 従来の写真測量技術と SfM の技術を組み合わせることにより, レーザデータと同じような写真の画素単位に近い点群データを取得し, 地上測量では困難な急傾斜地測量における利用可能性の検討について述べる.

2. 従来の写真測量と SfM の組み合わせによる三次元再構成の方法

写真測量の計算の中心は, バンドル調整法(図-1 参照)という最小二乗法の原理から成っている. 簡単には, 画像の点と対応する地上の位置・高さが既に分かっている複数の標定点 (GCP : ground control point) があるべく一致するように, 未知数(カメラの内部パラメータ, 外部パラメータ, および三次元形状)を探索することである. 通常カメラの内部パラメータは, 事前に求められることが多い. 2枚の重複部分にある同一点を1点ずつ手操作で計測するため精度良く計測できるが, 計測点が多くなるとそれだけ時間を要する.

一方, SfM は基本的には写真測量と同じように, バンドル調整法により内部パラメータと外部パラメータを同時に算出するが, 比較的自由的な姿勢で撮影された複数枚の写真から, 図-2 に示すような三次元画像を簡単かつ自動的に作成することができる. コンピュータの処理能力にもよるが, 数万点という点群データを短時間に出力できる. ただし, 精度面において問題があり, 本研究の検証でも十分な精度が得られていない.

本研究では, 写真測量で計測した点を用いて, SfM により三次元再構成されたモデルのローカル座標をワールド座標に対応(ジオリファレンス)させた. 図-3 は本稿で提案する写真測量と SfM の利用の流れであり, 図-4 はジオリファレンスの流れである. また, その手順の詳細について次に示す.

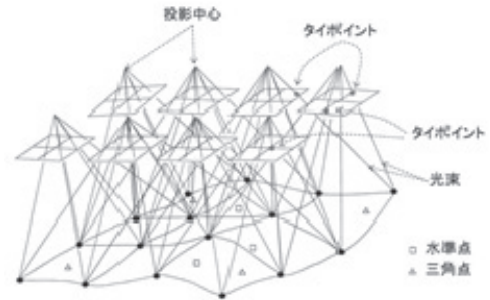


図-1 バンドル法概念図



図-2 阿蘇斜面崩壊跡の三次元再構成

- SfM のソフトには, カメラの内部パラメータを三次元再構成と同時に処理できるものがあるが, 計算速度や精度が不明であるのでなるべく事前に求めておく. 一度計算すると, 同一カメラでは焦点距離を変えない(固定焦点)限り, 同じ内部パラメータを使用できる.
- 対象物の撮影は, 重複度 60%以上でほぼ平行に撮影する. 被写体からの距離や面積, デジカメの画素数にもよるが, 撮影写真枚数が 5 枚程度でも点密度の濃い点群データが得られる. また, 可能な場合は被写体を取り囲むように撮影する.
- この時点で三次元構成された点群データの座標はローカル座標であるから, ワールド座標とする場合は, 基準点に設置したノンプリズム型トータルステーションや GNSS 測量などにより GCP 座標を実測し, さらに, 変化が大きく認められる特徴点を写真測量で計測する.
- SfM で取得したローカル座標に写真測量で計測した座標を対応させ, 三次元アフィン変換を施し, ワールド座標とする.
- ワールド座標系での点群データが取得できれば, GIS で TIN (Triangulated Irregular Network) を作成し, 等高線の描画や地形解析が可能になる.

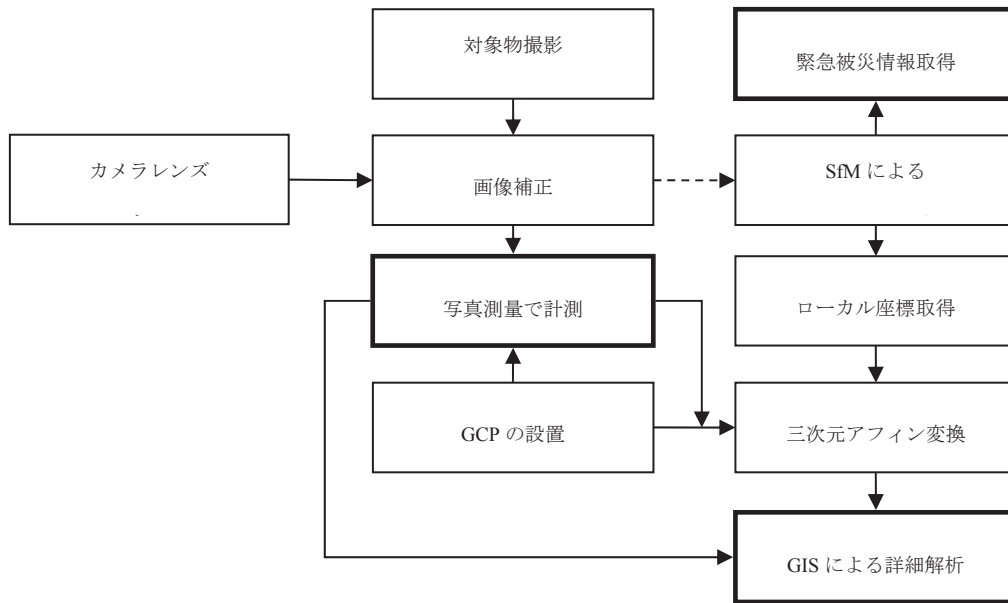


図-3 写真測量と SfM の利用の流れ

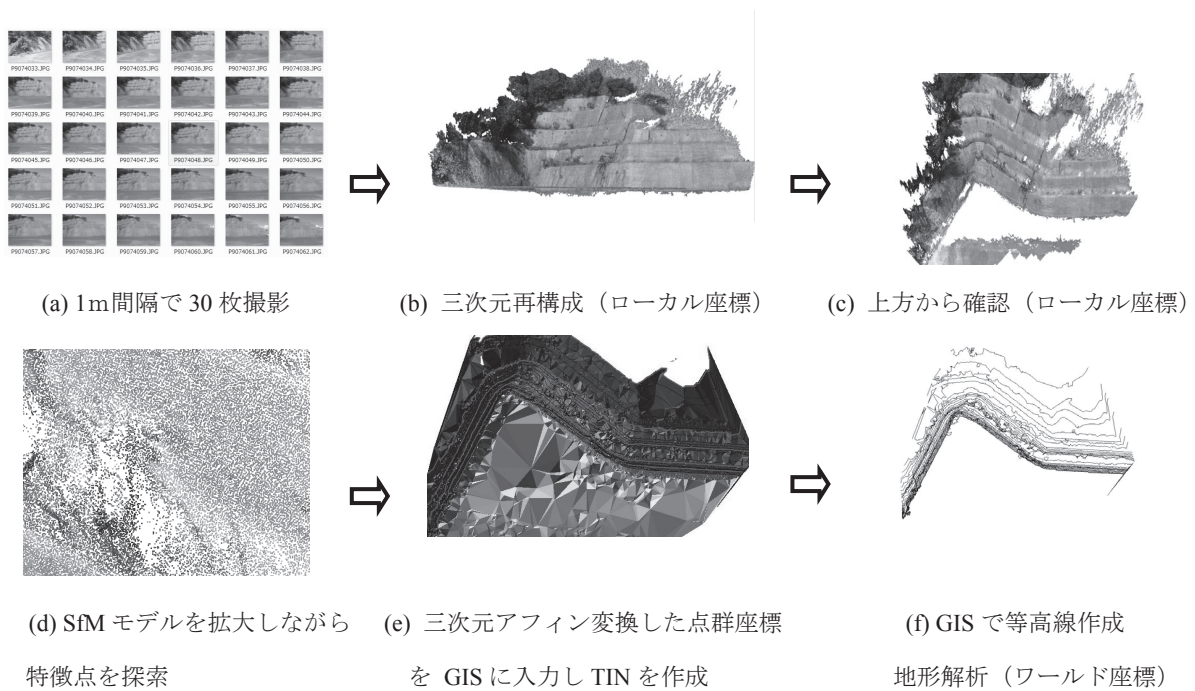


図-4 SfM のジオリファレンスの流れ

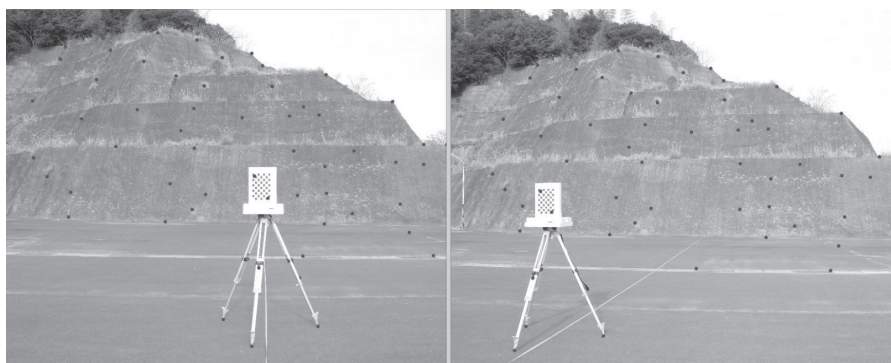
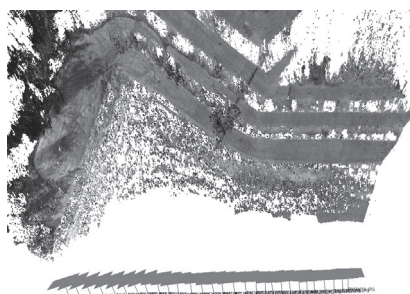
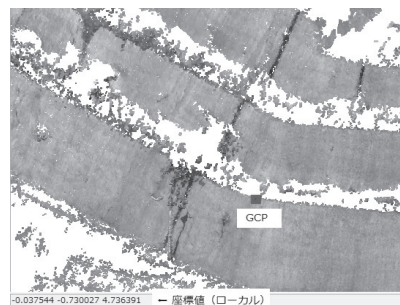


図-5 写真測量による計測

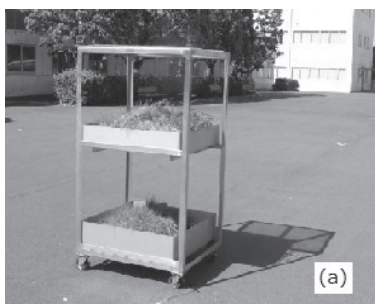


(a)上方から見た撮影位置(手前の横1列)

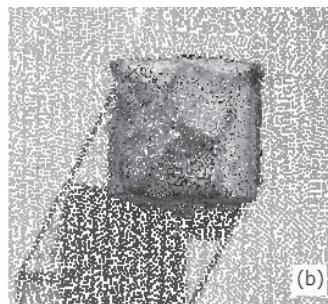


(b) SfM モデル上での GCP 座標取得

図-6 撮影位置と GCP 座標取得



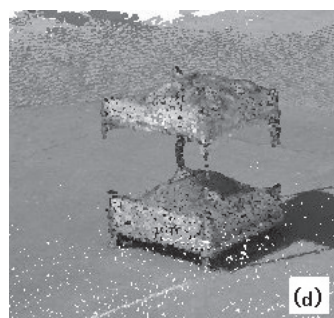
(a)



(b)



(c)



(d)

図-7 SfM の精度検証

3. 写真測量による計測

デジカメのレンズはひずみが大きいいため、キャリブレーションが必要である。キャリブレーションとは、カメラの内部パラメータ(焦点距離, レンズのひずみ補正係数, 画像中心など)と外部パラメータ(カメラの傾き, 位置など)を求めることであるが, 本研究では Zhang⁴⁾の手法を用いた。Zhang の手法は簡単には, 紙にマーカを印刷したものをいろいろな方向から複数枚撮影し, 各画像のマーカの対応付けの情報より, 撮影位置や傾きなどの外部パラメータや, カメラの内部パラメータを推定するという手法である。本手法を用いると, キャリブレーション用のマーカは, 三次元の物体である必要はなく, 二次元の物体で可能となっている。ソースプログラムも Open Source Computer Vision Library に公開されており, その有効性も確認されている⁵⁾。

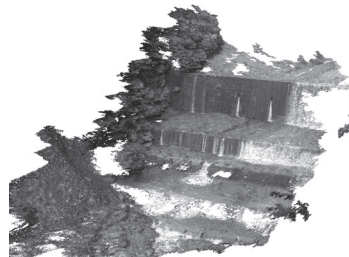
図-5 は, モルタル吹き付け斜面(カメラとの距離 30m 前後)を少しずらして撮影した 2 枚の写真から, 特徴点(赤点)をクリックし座標を取得している様子である。GCP (理論上は 5 点必要)の計測は標識など設置せず, 地形の特徴点を, ノンプリズム型トータルステーションを用いて 6 点計測(他に検証のための点も計測)した。

また, 明瞭に撮影された複数枚の写真を用いて, SfM による三次元再構成の座標をジオリファレンスするためのポイントとして用いるために, 地形変化点などを手動で指示しながら, 写真測量で三次元座標を計測した。

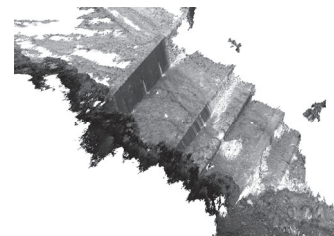
焦点距離 14mm, 水平・垂直方向解像度 314dpi で撮影した計測点(カメラとの距離は約 30m)の精度は奥行方向が最大 20 cm の誤差を生じたが, ほとんどが 10 cm 程度の精度であった。また, カメラから約 5m 離れた位置に設置した 500×400mm のターゲットでは, 最大 30mm の精度であった。



(a) 撮影箇所



(b) 左岸より



(c) 右岸より

図-8 SfM による三次元再構成の例

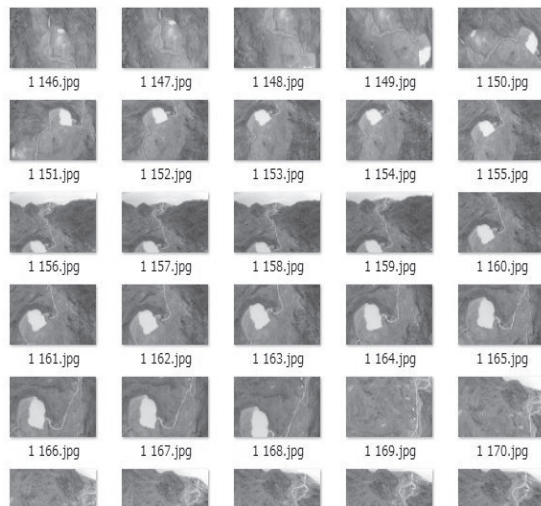
4. SfM による三次元座標取得

(1) 三次元再構成と座標取得の概要

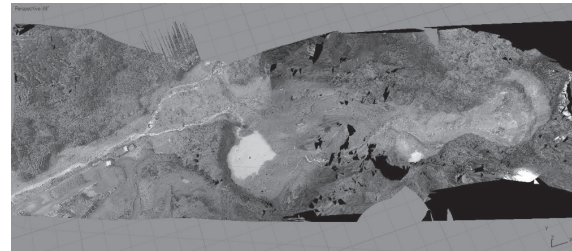
SfM の詳細な原理についての解説は省くが, 基本的に基準点の概念がなく, 隣り合う写真をマッチングさせ, バンドル法によりカメラの位置と傾きの外部パラメータと, レンズのひずみなどの内部パラメータを算出し, 二次元の画像から対象物の三次元再構成を行う。マッチングした点(点群データ)はローカルの三次元座標を持つので, GCP を基に対象物の地上座標系に変換できる。写真のマッチングは, 従来の写真測量における相互標定に相当し, 対象物の座標変換は絶対標定(対地標定)に相当する。ただし, 本来のコンピュータビジョンの目的が地形計測(測量)ではなく, ロボットの自律移動走行などに使われる技術であるため, 測量データ取得のための変換方法や精度などは確立されていない。本研究ではワールド座標への変換方法として, 三次元アフィン変換⁶⁾を用いた。図-6 は, 本研究での写真撮影位置(a)と SfM モデル上でのローカル座標取得の様子(b)である。

(2) 精度検証

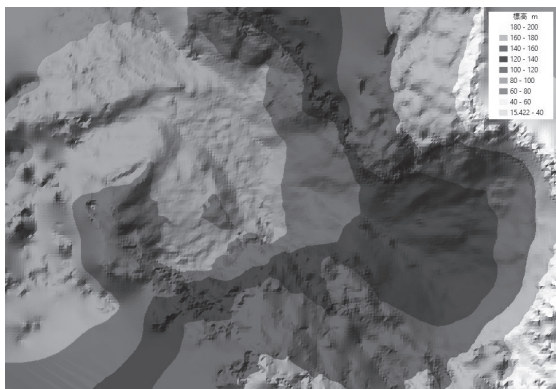
図-7 は, ステンレス製の台(800×900×1480mm)(a)を約 5m 離れて円状に回りながら, 30 枚の写真を撮影した後, SfM ソフト VisualSFM (Changchang Wu 開発)により三次元再構成を行い, ビューアとしてオープンソースの MeshLab を用いて表示(b~d)したものである。検証に使用したカメラは, 焦点距離 14mm(固定), CCD サイズ 17.3×13.0mm, 3264×2488 画素で, 計算上は被写体から 25m 離れて 10mm の解像度がある。しかしながら, 得られた三次元モデルは, 元の写真と比べると, 角が丸みを帯び, あるいは画像の欠けが見られた。ディスプレイ上で拡大計測し, 相対誤差を求めると 30%前後の誤差があった。



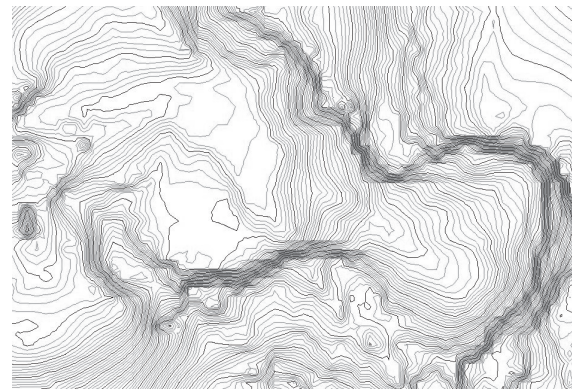
(a) 動画より切り出した画像



(b) SfM による三次元再構成



(c) TIN



(d) 等高線

図-9 土石流発生個所の UAV 動画による画像解析

(3) 三次元再構成の例

前節(2)で述べたように、SfMはカメラの解像度や内部パラメータの算出補正方法、あるいは撮影方法などにより誤差を生じ、そのまま測量に用いるためには基準点の配置など、さらなる研究が必要と考えるが、被災状況の迅速な情報提供を可能にするツールとして有効である。

図-8は、砂防堰堤を左岸道路より約2m間隔で撮影(地図の道路上の赤丸は撮影位置)した22枚の写真より三次元再構成したものである。撮影した箇所からだけでなく、反対側の右岸、あるいは上空からの状況も把握できる。

(4) 三次元座標取得の例

図-9は、土石流発生個所をUAV(無人飛行機)で撮影し、インターネットで公開している動画より108枚の画像を切り出し、SfMにより三次元再構成したものである。GCPは(a)の切り出した画像と、(b)のSfMによる三次元構成の画像を参照し、特徴点でハンディGPS(計測時の精度は3m前後)を用いて計測した。UAVに搭載されたカメラの性能諸元は不明であり、動画を静止画像に変換する画像処理を施しており、また撮影高度が高いため解像度の低下もあり計測精度の期待はできないが、人が立ち入れない災害現場の全体把握や、GISによる崩壊土量の概算値を求めるためには本解析の方法は有効と考えられる。

5. おわりに

これまで、航空レーザ計測が、微地形を高解像度で迅速に取得する有効な手法として普及してきた。写真測量と異なり樹木下の地表面のデータが得られることも広く利用されている理由のひとつである。レーザ計測から得られるデータは、点群データであり、主に GIS により DEM が作成され地形解析に利用されている。一方、SfM はコンピュータビジョンの形状復元問題の解法のひとつであり、応用範囲の広い基本的かつ重要な技術である。SfM から点群データが得られ、安価で誰でも簡単に利用できる技術として測量においても今後大いに利用されると考えられるが、その精度については、カメラの解像度が向上してきた現在でもまだ問題がある。

デジカメを用いた写真測量では、航空写真測量のように高価な GPS/IMU が取付けられないため、手間のかかるノンプリズム型トータルステーション等による GCP の計測が必要である。そのため、なるべく地上測量による GCP の設置数を少なくして写真を標定し、さらに写真測量で計測したポイントを SfM の三次元構成の点群データの変換に用いることが本稿の提案することである。

SfM の三次元構成におけるジオリファレンスには最低 3 点のポイントが必要であるが、判読できる特徴点のデータをなるべく多く入力することにより精度が向上すると考えられる。

UAV で撮影された動画はそれ自体だけでも災害現場の全体把握に役立つが、ハンディ GPS が利用できるならば、GIS による崩壊土量の概算など地形解析が可能になる。

謝辞：本研究は、平成 27 年度鹿児島県建設技術センターの助成を受けています。また、本論文の画像解析には、砂防エンジニアリング株式会社と株式会社日水コンが撮影した砂防堰堤の画像と、国土交通省九州地方整備局の撮影した UAV 動画を使用させていただきました。記して、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田中龍児・西隆一郎・幸哲也・二ツ町悟：民生用デジタルカメラを用いた浅海域地形の写真測量法の開発について、2006 年 7 月海洋開発論文集，第 22 巻，pp.911-916(第 4 章)。
- 2) 田中龍児・西隆一郎・佐藤道郎・高江洲剛：サンゴ礁海域を対象とした写真測量(測深)法の開発，2007 年 7 月海洋開発論文集，第 23 巻，pp.543-547(第 4 章)。
- 3) 内山庄一郎：自然災害研究における三次元形状取得のための SfM-MVS 技術の活用，高解像度地形情報シンポジウム 2014 論文集，pp.21-23。
- 4) Zhang Zhengyou : A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(11), pp.1330-1334, 2000.
- 5) 高橋康輔・延原章平・松山隆司：参照物体の鏡像を用いた線形外部キャリブレーション法，電子情報通信学会技術研究報告 111 号，pp.83-90, 2012.
- 6) 田中龍児・岡林巧・山本健太郎：傾斜地の迅速かつ経済的な地形測量法の提案，第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.1-6, 2014.