

小型 UAV と SfM による断層変位地形の詳細マッピング - 根尾谷断層水鳥断層崖の事例

Mapping active faults by using small unmanned aerial vehicle and structure from motion: a case study on Midori fault

内山庄一郎^{1*}; 中田 高²; 井上 公¹; 熊原 康博²; 杉田 暁³; 後藤 秀昭²; 井筒 潤³; 福井 弘道³; 鈴木 比奈子¹; 谷口 薫⁴
UCHIYAMA, Shoichiro^{1*}; NAKATA, Takashi²; INOUE, Hiroshi¹; KUMAHARA, Yasuhiro²; SUGITA, Satoru³; GOTO, Hideaki²; IZUTSU, Jun³; FUKUI, Hiromichi³; SUZUKI, Hinako¹; TANIGUCHI, Kaoru⁴

¹ 独立行政法人防災科学技術研究所, ² 広島大学, ³ 中部大学, ⁴ 独立行政法人産業技術総合研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²Hiroshima University, ³Chubu University, ⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

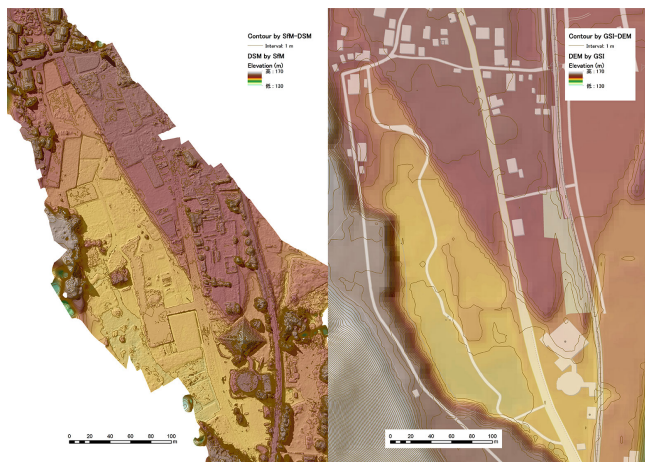
近年のラジコン技術の進歩によって、非軍事用の小型 UAV (sUAV: small Unmanned Aerial Vehicle) の操縦安定性の向上と低価格化が進み、自らが機材を操作して低空空撮を行うことが可能となりつつある。我々は、根尾谷断層水鳥地震断層崖周辺で電動マルチコプター Phantom を用いた低空空撮を行い、109 枚の画像を撮影した。さらに、これらの画像を基に SfM (Structure from Motion) による画像解析を行った。その結果、メッシュサイズ 0.09 m の DSM (Digital Surface Model) および地上解像度 0.03 m のオルソ画像を生成した。さらに、DSM から 1 m 間隔の等高線を生成し、精密な地形図を作成した。

小型 UAV と低空空撮画像を組み合わせた手法は、各種の地形研究や災害後の調査など多くの研究に活用が期待される。また、この手法は、地形図や空中写真の整備されていない発展途上国など海外調査にとっても強力な調査手段となろう。今後、十分な安全確保および関連法規を遵守した上で、変動変位地形にとどまらず、広く地形研究全般にわたって新たな研究手法として普及することを期待したい。

なお、本報告の一部は日本活断層学会 2013 年度秋季学術大会において発表した (中田ほか、2013)。

キーワード: Structure from Motion (SfM), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Surface Model (DSM), オルソ画像, 地形計測, 水鳥断層

Keywords: structure from motion (SfM), small unmanned aerial vehicle (sUAV), digital surface model (DSM), orthophoto, geomorphometry, midori fault scarp



1964 年新潟地震の劣化した空中写真フィルムを用いた SfM によるオルソ画像の作成 Generating an orthophoto from SfM calculation with the low-quality air photographs taken in the 1964 Niigata earthquake

鈴木 比奈子^{1*}; 内山庄一郎¹
SUZUKI, Hinako^{1*}; UCHIYAMA, Shoichiro¹

¹ 独立行政法人 防災科学技術研究所

¹ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

近年 SfM (Structure from Motion) などの画像処理をベースとした三次元形状復元技術を用いて、デスクトップ PC で空中写真からオルソ画像の作成が可能になった。防災科学技術研究所では、1964 (昭和 39) 年に発生した新潟地震の空中写真ロールフィルムを所蔵しており、これら画像から、液状化による噴砂や建物の倒壊などの被害状況を詳細に読み取ることができる。しかし、このフィルムは 50 年にわたる長期間の保存により劣化が著しい。フィルム全体がコンブ状に歪み、膜面剥がれが発生している。画像全体が不均一に伸縮しており、測量精度の低下が予想される。さらに、画質の粒状感が強く、画像のマッチングにも問題が生じる可能性がある。本稿では、劣化が進んだ古い資料に対する SfM 適用の可能性を検証するため、実際に劣化した空中写真画像を計算ソースとして用い、SfM によるオルソ画像の作成を試みた。

使用した空中写真は、1964 (昭和 39) 年 7 月 21 日撮影のカラー空中写真で、カメラは RC5a (No. 213), 焦点距離 152.12 mm, 撮影高度は 1,520 m, 撮影縮尺は 1:10,000 である。SfM 処理に使用した枚数は 3 コース 19 枚, 撮影範囲は新潟市内の信濃川河口周辺である。空中写真ロールフィルムは写真測量用のスキャナーを保有する専門事業者にて 20 μ m (1,270 dpi) でスキャニングを依頼した。

SfM 処理の事前準備として、すべての空中写真について主点位置および画像一辺のサイズを同一にするため、以下の作業を行った。19 枚の空中写真は四隅の基準点からなる矩形が画像データの 4 辺と平行になるよう角度を補正した。さらに、画像の縦横の辺が 11,350 px \times 11,350 px となるよう切り出した。拡大・縮小は行っていない。切り出す際、空中写真の周囲の黒枠が入らないようにした。これらの処理には Adobe Photoshop CS6 を使用した。SfM では、これらの空中写真データを基に処理を行った。SfM ソフトウェアには Agisoft PhotoScan 1.0.1 を使用した。最初に写真位置の推定を行い、次に Reprojection error (再投影誤差) が 1.0 以上の点群データを削除した。構築された点群データに対し、GCP (Ground control point) を与え、オルソ画像を生成した。GCP は地理院地図 1974~1978 年撮影のカラー空中写真を参考とし、緯度、経度、標高値 (5 m レーザー) の情報を用いた。GCP は三次元モデル全体において 3 点 (写真の北部, 南西部, 南部の道路の交点) および 6 点 (先の 3 点に北西部, 南部, 南東部を加えたもの) の 2 通りを設定した。

このようにして SfM 処理によって生成したオルソ画像と地震直後の地盤災害等の現地調査図である「新潟地震地盤災害図 (西田ほか, 1964)」(縮尺 1:3,000) とをオーバーレイした結果、1:3,000 程度の縮尺であれば目立った位置ずれがなく、十分実用に耐えうるオルソ画像を得ることができた。オルソ画像の地上解像度は 0.2 m/px 程度であった。GCP の点数に関して、結論として 3 点で十分な精度を得ることができた。一方、6 点の GCP ではむしろ精度が低下した。GCP は、設置点数よりも、正確な位置に設置することの方が重要である。3 点の GCP は人工改変の少ないと思われる道路の交点を選出したことに対し、ここに追加した残り 3 点の GCP は敷地の角や新しく完成したバイパスに近い旧道の交点であった。新潟市内の信濃川周辺地域は、ほとんどの領域が標高 5 m 未満だが、後年の人為的な改変により標高値は大きく変動する。今回 GCP の標高値として採用したデータは地理院地図の標高値 (5 m レーザー) であり、1964 年の空中写真撮影時には存在しない構造物等に近接した地域の GCP は、かえって地図の精度を落とす結果となった。

以上の結果から、劣化した古い空中写真から、十分な精度をもったオルソ画像が得られることが明らかになった。また、それらの精度を上げるためには、必ずしも GCP を多く設定する必要はなく、撮影当時の地形にできるだけ近い地点を選定する必要がある。

キーワード: SfM, 劣化空中写真, 1964 年新潟地震, GCP, オルソ画像

Keywords: structure from motion (SfM), low quality aerial photograph, 1964 Niigata earthquake, ground control point (GCP), orthophoto

HTT33-P02

会場:3階ポスター会場

時間:5月2日 16:15-17:30



小型 UAV を用いた 2013 年ボホール地震断層の緊急調査 Mapping of the fault scarp formed during the 2013 Bohol earthquake by small UAV

中田 高^{1*}; 井上 公²; Cahulogan Mabee³; Rivera Danikko³; Lim Robjunelieaaa³; Pogay Cathy³
NAKATA, Takashi^{1*}; INOUE, Hiroshi²; CAHULOGAN, Mabee³; RIVERA, Danikko³; LIM, Robjunelieaaa³; POGAY,
Cathy³

¹ 広島大学 名誉教授, ² 防災科学技術研究所, ³ フィリピン火山地震研究所

¹Hiroshima University Professor Emeritus, ²NIED, ³PHIVOLCS

小型 UAV の活用で最も効果を発揮する事例として、大地震に伴って地表に出現する地震断層などの地変のマッピングのための低空空撮を挙げることができる。地震断層の調査は地震の特徴を明らかにするための基本的な調査であるが、地震後の本格的な空中写真撮影や空中や地表レーザー計測などの新たな調査手法による詳細かつ緻密なデータ入手にはいずれも高価な機器や多大な外注経費を伴うため、発展途上国における緊急性の高い調査では容易に取り組めるものではない。

本報告では、2013 年 10 月 15 日にフィリピン・ボホール島で発生した M7.2 (PHIVOLCS) の地震に伴って出現した地震断層を、UAV と SfM (Structure from Motion) ソフトを用いて解析した例を報告し、この手法の地形調査・活断層研究への活用の可能性を検討する。また、簡易ポールカメラを用いて、断層変位地形の詳細な観察事例も紹介する。本研究は、SATREPS (地球規模課題対応国際科学技術協力) の「フィリピン地震火山監視能力強化と防災情報の利活用推進」プロジェクト (研究代表者: 井上 公) の成果の一部である。

調査には、DJI 社製の小型 UAV・Phantom を使用した。電動 4 ローターを持つラジコンヘリで、長さ・幅約 35cm、重量約 650g、ペイロードは約 350g であり、カメラを搭載した場合、5 分以上の飛行が可能である。可搬性に優れ、機内持ち込み手荷物となり、海外調査にも携行可能である (但し現地国の電波法等の法令への適合の確認は必要)。この機体にインターバル撮影が可能なデジタルカメラ (Ricoh GR III) を搭載した。調査機材は全体で約 10 万円であった。

UAV で撮影した複数の画像を Agisoft 社の SfM 画像処理ソフト Photoscan SfM (Structure from Motion) を用いて、3D 画像を作成した。付属のソフトでカメラのレンズの歪補正を行い、現地地 GCP (コントロールポイント) を設定・測量し、DSM (Digital Surface Model) を作成した。さらに、GIS ソフトの Global Mapper (TM) を用いて、DSM から等高線図および地形断面図を行った。

ボホール地震では、震源域の北部において、北東-南西走向の東側隆起長さ約 5km の逆断層型地震断層が PHIVOLCS によって確認された。国土地理院は、合成開口レーダー (SAR) の解析にもとづいて、島の北西部に東北東-西南西の方向に最大変位量が 1m を超える長さ約 50km の帯状の地殻変動集中域があり、その北東部に約 2m の地震断層変位に対応する長さ約 5km の南側隆起の不連続を認めている (<http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic131108-index.html>)。また、南西側の Loon から Maribojoc にかけて海岸が約 1m 隆起したが、これと調和的な約 10km にわたる海岸線の海側への移動 (離水) が観察された。

UAV による地震断層の調査は、断層変位地形が明瞭に観察できる Anonang 村周辺の 2 か所において実施した。今世紀最大の台風 30 号 (フィリピン名: ヨランダ) が来襲した前日 (11 月 14 日) の 1 日のみの短時間の調査であったが、それぞれの場所で断層に沿った長さ約 300m の範囲の低空撮影と GCP の設定および計測を行った。その結果、断層線の位置・形状、断層変位量に関する詳細なデータを効率的に収集することができた。

また、インターバル撮影機能のついたカメラを、長さ約 5m のポールの先端に設置して逆断層先端部のおよそ 10mX10m 範囲の微細な変位地形の計測を試みた。その際、長さ 5m の測量ポールを地表において、Local GCP の設置に活用した。

この調査によって、本調査法が地形図や空中写真の整備されていない発展途上国などの海外調査に極めて有効なものであることが実証された。また、国内においても、突発災害などの緊急調査において、研究者が容易に活用できる効率的かつ強力な調査手段として期待される。

キーワード: ラジコンヘリ, 写真測量, 地震断層, 013 年ボホール地震

Keywords: UAV, SfM photogrammetry, earthquake fault, 2013 Bohol earthquake

マルチコプター空撮による 2013 年フィリピン・ボホール地震の建物被害調査 Multicopter Aerial Photo Survey of Building Damages by 2013 Bohol Earthquake in the Philippines

井上 公^{1*}; 花里 利一²; 今井 弘¹; メロサントス アーノルド³; アルコネス ポンチ³; ソリアノ カールビンセント³
INOUE, Hiroshi^{1*}; HANAZATO, Toshikazu²; IMAI, Hiroshi¹; MELOSANTOS, Arnold³; ALCONES, Ponzch³; SORIANO, Karl vincent³

¹ 防災科学技術研究所, ² 三重大学, ³ フィリピン火山地震研究所

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention(NIED), ²Mie University, ³Philippine Institute for Volcanology and Seismology(PHIVOLCS)

マルチコプター空撮技術が低・中層の建物や構造物の地震被害記録に有用であることを示す。2013 年 10 月 15 日にフィリピン中部のボホール島で M7.2 の直下型地震が発生し、島の西部を中心に多数の建物が倒壊して 200 名を超える死者が発生した。フィリピン火山地震研究所による被害調査に基づく震度は震源に近い州都のタグビララン市でフィリピン震度階 VII (気象庁震度 VI 相当) であった。我々は地震発生から約 3 週間後に現地を訪れ、マルチコプターを用いて教会を中心に建物被害の空撮調査を行った。また同じくマルチコプターを用いて、表層に現れた地震断層と海岸隆起の写真測量調査 (中田・他: 本学会) およびチョコレートヒルと呼ばれる多数の特徴的な丘陵地形の地すべり被害調査を行った。

フィリピン各地には 16 世紀のスペイン統治時代に創建された石造の教会が多数存在するが、今回の地震ではボホール島西部各地に建つそれらの教会が特に大きな被害を受けた。同島南西部バクラヨン市の海岸に建つ現在のバクラヨン教会は 1727 年に建設されたフィリピン最古の教会として知られるが、その鐘楼の上半部と聖堂の前壁がほぼ完全に倒壊した。また南部のロボック市のロボック教会は隣接する博物館も含めて周囲の壁が下部を残して大きく倒壊した。南西部のマリボホック市のマリボホック教会や北西部クラリン市のクラリン教会はほぼ完全に倒壊した。今回の地震では教会の他、サグバヤン市庁舎やトゥビゴン市庁舎などの公共的建物の被害も大きく、特にコンクリート造の柱・梁に囲まれた組積造帳壁の崩落が目立った。

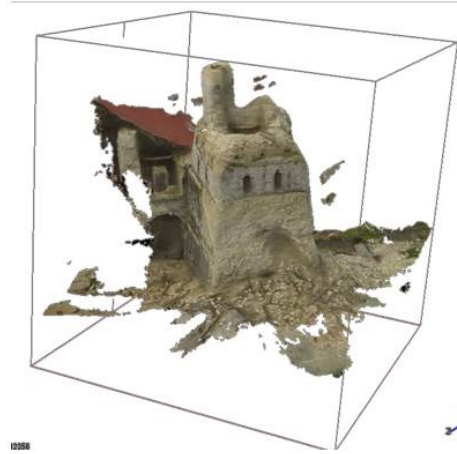
撮影機材はマルチコプターには小型で操縦も容易な DJI 社製 Phantom、カメラには軽量で高解像度の GoProHero 3 Black Edition を用いた。カメラを前方斜め下向きに取り付けた機体を GPS モードで手動操縦で飛行させた。撮影アングルの確認のためにリアルタイムで画像転送を行う FPV(FirstPerson'sView) システムの FatShark 社製 TeleporterV3 を用いた。撮影は 2 秒に 1 回のインターバルモードとし、被写体の周囲を飛行しながら連続撮影を行った。一回の飛行時間は安全を見て 5 分前後とした。周囲には顕著な被害がなく通常の生活が営まれている場合が多かったため、機体には万一の衝突時の衝撃吸収のためのプロペラガードを装着し、飛行には細心の注意を払った。幸い墜落事故の発生は一回もなかった。一般に地上からの手動操縦では機体の距離感がつかみにくいが、FPV システムを用いると撮影アングルを飛行中に確認できるのはもちろんのこと、被害調査のような被写体に接近する必要がある調査における衝突事故防止の手段として有用である。

図左にこうして撮影したバクラヨン教会の鐘楼の空撮写真の例を示す。地上からでは観察することのできない鐘楼の上部とその内部の破壊面を観察することができる。マルチコプターによる地震直後の空撮は建物の周囲への立ち入りが困難な場合でも被害の全容を容易にとらえることができ、災害概況を迅速に把握するツールとして極めて有用である。さらにこうして得られた約 50 枚の空撮写真を SfM(Structure from Motion) ソフトウェアの PhotoScan を用いて処理し、鐘楼の 3 次元モデルを再構築した (図右)。この手法により建物の破壊のモデリングと解析が可能となる。被災構造物の 3 次元モデルはデジタル災害遺構としての活用価値も大きい。従来から行われているレーザースキャナーによる 3 次元測量に比較してマルチコプター空撮と SfM による写真測量は簡便であり、3 次元プリンターで模型を作成すれば被災建物の修理計画や事前の耐震対策の検討作業等にも役立つことが期待される。

HTT33-P04

会場:3 階ポスター会場

時間:5 月 2 日 16:15-17:30



小型ヘリおよび UAV による植生・土地被覆図と空間線量率マップの作成 Production of vegetation/landcover and dose rate maps by small helicopter and UAV

近藤 昭彦^{1*}; 本多 嘉明¹; 梶原 康司¹; 野呂 直樹²; 高良 洋平²; 安藤 史識²; 藤森 雄大²; 野波 健蔵³; 山口 英俊⁴
KONDOH, Akihiko^{1*}; HONDA, Yoshiaki¹; KAJIWARA, Koji¹; NORO, Naoki²; TAKARA, Yohei²; ANDO, Fuminori²; FUJIMORI, Takahiro²; NONAMI, Kenzo³; YAMAGUCHI, Hidetoshi⁴

¹ 千葉大学環境リモートセンシング研究センター, ² エバ・ジャパン株式会社, ³ 千葉大学工学研究科, ⁴ SWR 株式会社
¹ Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, ² EBA JAPAN CO., LTD., ³ Graduate School of Engineering, Chiba University, ⁴ SWR CO., LTD.

原子力災害により放射能汚染を被った地域の環境回復、帰還、復興のために最も重要かつ最初に必要な情報は土地被覆現況図と放射能汚染マップである。この二つの地理情報に基づき、除染も含む放射能対策を策定する必要がある。千葉大学では東電福島第一原発の事故後、直ちに飯館村、川俣町を中心に阿武隈山地の広範囲にわたる空間線量率分布の把握を試みた。その後、重点調査地域を川俣町山木屋地区（旧計画的避難区域）に設定し、空間線量率マップの作成を試みてきた。

その基本的な目標は航空機モニタリングや幹線道路沿いの走行サーベイでは明らかにすることができない里山流域単位の詳細な空間線量率マップを作成することである。山村における暮らしは里山における水・物質循環に依存しており、暮らしと関わりを持つ範囲が里山流域だからである。そこで、空間線量率計と GPS を同期させて、山林斜面を歩く歩行サーベイの手法を確立させ、山木屋地区北部の山地斜面で空間線量率の詳細な分布を計測した。

その結果、山木屋地区北部の山地斜面の空間線量率は、①高標高域で高い、②東電福島第一原発方向（東南方向）の斜面が高い、③常緑針葉樹林の空間線量率が高い、といった規則性も明らかになったが、空間的な不均質性も大きく、対象地域ごとに調査を行う必要性が生じてきた。

山林斜面の歩行サーベイは詳細な空間密度分布を得る効率的な手法であるが、現場ではクマザサや有刺木本のため歩行が困難な場所も多い。田畑においても避難実施後繁茂した雑草群落の中の歩行は困難を極める。そこで、飛行体による空間線量率の測定を試みた。

使用した飛行体は、①有人小型ヘリコプター：ロビンソン社 R44、②ガソリンエンジン搭載ラジコンヘリコプター：YAMAHA/RMAX、③電動マルチコプター：ミニサーベイヤ MS-06L、である。MS-06L は千葉大学野波研究室が開発した 6 ローター、自律制御可能なマルチコプターであり、ペイロードは 5kg である。②、③はラジコンで制御する UAV (Unmanned Aerial Vehicle) である。

使用した計測機器は、①ビデオカメラ：民生用デジタルビデオカメラ、②ハイパースペクトルカメラ：エバ・ジャパン製 NH-7、③空間線量率計測システム：ホットスポットファインダー HSF、である。HSF は HSF1（製造：SQR 株式会社、販売：ポニー工業株式会社）をベースとし、UAV 計測のために改良した機器である。改良点は装置の設置制約への対応と、ソフトウェアの変更（データ自動取得プログラム）である。

有人ヘリコプターにはビデオカメラ、ハイパースペクトルカメラを専用ジンバルを用いて据え付け、鉛直下方の撮影を行った。ハイパースペクトルカメラは静止画像撮影とプッシュブルーム方式による撮影を行い、高空間分解能オルソ空中写真の作成および土地被覆分類のためのハイパースペクトル画像の取得を行った。

2013 年 8 月から 11 月の間に、山木屋地区において実施したフィールドキャンペーンでは HSF を YAMAHA/RMAX と MS-06L に搭載し、様々な土地利用、土地被覆を対象にして空間線量率の測定を行った。YAMAHA/RMAX ではその積載能力を活かし、ウィンチに接続したケーブルに 2 個のシンチレータを 3m 間隔で搭載し、その間の空間線量率を計測することにより、高度に伴う空間線量率減衰の理論値からのずれを確認することが可能となった。YAMAHA/RMAX は空間線量率の三次元分布と、その場所による違いの計測、および森林の樹冠上の空間線量率の計測も行った。ミニサーベイヤはその機動性を活かして、広大な平地の連続測定、建物の屋根、河岸等における計測も行った。

有人ヘリコプターで取得したビデオ画像は 1 秒ごとに自動キャプチャーし、約 1000 シーンごとに写真計測ソフトウェアである Agisoft Photoscan を用いてモザイク処理、オルソフォト化を行った。今回は撮影に有人ヘリを用いたが、UAV による撮影画像の利用が可能である。ハイパースペクトルカメラによる画像は教師なし分類手法による判別により、樹種、屋根、道路等の材質、等を区分することが可能であることを確認した。

今回のキャンペーンにより、低コストかつオンデマンドによる地域の画像撮影、空間線量率計測が可能であることが明らかとなった。今後の課題は現場への実装である。引き続き、川俣町山木屋地区において地域と協働で計測を継続し、環境回復、帰還、復興の目的を共有した枠組みの中でリモートセンシングの役割を果たしていきたいと考えている。

キーワード: 原子力災害, 空間線量率計測, UAV, ハイパースペクトルカメラ, 山木屋地区, 福島

Keywords: nuclear disaster, dose rate measurement, UAV, hyperspectral camera, Yamakiya District, FUKUSHIMA