

## U2 UAV 空撮による 2016 年熊本地震の被害把握と 3 次元モデル作成

### Damage evaluation and 3D modeling of the 2016 Kumamoto earthquake by UAV flights

○久保佳澄<sup>1</sup>・田邊諒士<sup>2</sup>・山崎文雄<sup>3</sup>  
Kasumi Kubo, Ryoto Tanabe, Fumio Yamazaki

**Abstract :** Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are becoming an efficient tool of high-resolution image collection for the places that are difficult to access from the ground, such as disaster stricken areas. In this study, UAV flights were carried out by the authors over various damage sites due to the 2016 Kumamoto earthquake, such as surface faulting, overturned tombstones, landslides, collapsed buildings, and a damaged bridge. The UAV flights captured high-resolution video footages and photos of these sites, and using them, three-dimensional (3D) models were developed based on a SfM (Structure-from-Motion) technique. The developed models could depict the damage situations vividly, and their accuracies were evaluated by comparing with aerial photos by the Geospatial Information Institute of Japan (GSI).

**Keywords :** UAV, SfM, 3D model, the 2016 Kumamoto earthquake, damage situation

#### 1. 背景と目的

近年、無人航空機(UAV, Drone)の高性能化・小型化が進み、人の立ち入りが困難な箇所での効率的な情報収集手段として、様々な分野で急速に活用され始めている。災害調査における空撮では、有人機では困難な数十 m 程度の低空から高細密な空撮画像が取得できる点や離着陸時の機動性の高さ等から、UAV が本格的に利用されるようになってきた<sup>1), 2)</sup>。また、得られた画像に SfM (Structure-from-Motion) 技術を適用して 3D モデル化することで、オルソ画像や数値表層モデル(DSM)などの細密な地形情報の取得が可能となった<sup>3), 4)</sup>。

筆者らのグループは、これまで被災建物や訓練施設の UAV 飛行を行った<sup>5), 6)</sup>。また他組織により取得された被災地の空撮画像を用いて、3D モデルの構築を行ってきた<sup>7)</sup>。本研究では、2016 年 4 月に発生した熊本地震を対象として、地上に現れた断層、墓石の転倒、斜面崩壊、倒壊建物、被災橋梁などの上空を UAV で飛行して、被害状況の視覚的な把握を行うとともに、3D モデルを構築して定量的な被災状況の評価を行うことを目的としている。

#### 2. 熊本地震と本研究での UAV 空撮

一連の熊本地震では、2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に Mj6.5 の前震が発生し、約 28 時間後の 4 月 16 日 1 時 25 分に Mj7.3 の本震が発生した。震源はいずれも熊本県益城町付近で、とくに本震によって多数の木造住宅が倒壊し、阿蘇山のカルデラ周辺を中心として斜面崩壊が多発した。地震発生直後から、国土地理院や航測会社などにより、航空写真撮影、航空レーザー測量、ドローン空撮などが多数実施された<sup>8), 9)</sup>。

本研究では、2016 年 8 月 9, 10 日に熊本地震の被災地域の現地調査を行い、以下の 5 地点を対象として UAV によ

る観測飛行を実施した。

- 益城町堂園地区 : 断層, V
- 西原村小森地区 : 墓地, V
- 西原村小森地区 : 大切畑大橋・斜面崩壊, P
- 南阿蘇村河陽地区 : 倒壊建物, P
- 阿蘇市山田 大観峰 : 斜面崩壊, V/P

ここで V は動画の撮影を、P は静止画(写真)の撮影を表している。撮影対象地の選定にあたっては、Fig. 1 に示す通り航空法を順守し、飛行可能な区域や高度を確認した。また、益城町堂園地区の断層調査にあたっては、同町教育委員会に申請し許可を得た。

使用した UAV は、4 回転翼の小型ヘリコプター Phantom 3 Professional (DJI 社製)を用いた。総重量は 1280g、搭載カメラは Sony EXMOR 1/2.3" で、4K 動画または 12.4M ピクセルの高画質静止画の撮影が可能である。静止画の場合は、機体に搭載された GPS 受信機による機体位置情報が、画像ファイルに記録される。飛行高度は地上約 40m、撮影角度は鉛直下方及び斜め下方とし、手動操縦による空撮を行った。Fig. 2 に使用した

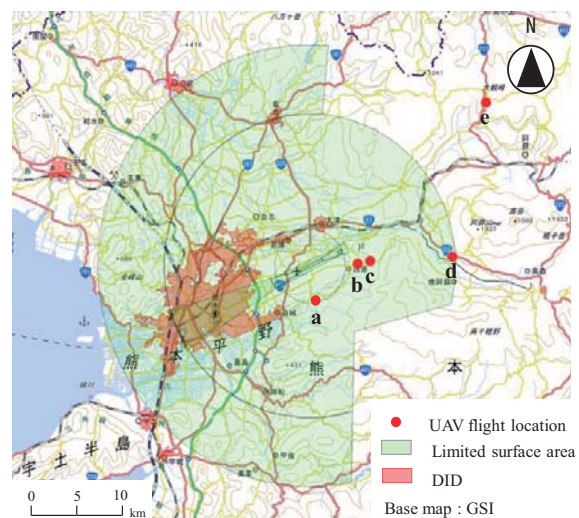


Fig. 1 Locations of UAV flights in this study and flight restriction areas using GSI map<sup>10)</sup>

<sup>1</sup>学生会員 千葉大学 工学部 都市環境システム学科

<sup>2</sup>学生会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

<sup>3</sup>正会員 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

(所在地 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

(連絡先 Tel: 043-290-3528, E-mail: afha0042@chiba-u.jp)

UAV と飛行の様子を示す。

撮影された画像による 3 次元モデル構築には、SfM による商用ソフトウェア Agisoft PhotoScan を使用した。SfM では、対象物を複数の視点から撮影した画像を用いて、カメラの撮影位置と 3 次元幾何学形状を同時に算出する。SfM による 3D モデル作成の流れは、以下の通りである。

- 1) 画像の撮影・取得
- 2) 特徴点の検出・マッチング
- 3) 特徴点の 3 次元位置及びカメラ姿勢の推定
- 4) GCP の追加
- 5) 3 次元モデルの構築

ここで、動画から作成する場合は、1 秒ごとに静止画（約 1.2M ピクセル）をビデオキャプチャし、地理院地図を用いて GCP を与えた。また、静止画から作成する場合は、飛行中 5 秒ごとに自動撮影された画像（12M ピクセル）を用い、搭載 GPS データのみを用いる場合と、地理院地図からの GCP を追加する場合の 2 ケースを試みた。



Fig. 2 Phantom 3 Professional UAV used in this study (left) and a scene of manual operation flight (right)

### 3. 観測結果

#### (1) 益城町堂園地区

一連の熊本地震は、従来より地震本部が主要活断層帯として指定していた布田川・日奈久断層帯が活動したものと考えられている。とくに布田川断層帯が 28km の区間でずれ動き、益城町、西原村、南阿蘇村などで、地表地震断層が出現した<sup>11)</sup>。益城町堂園地区に出現した最大約 2m の右横ずれ変位は、その最大のものである。

堂園地区の地表地震断層を UAV で撮影した結果を Fig. 3 に示す。動画をキャプチャした合計 154 枚の画像を使用し、PhotoScan を用いて 3D モデルを構築した。また、モデルには地理院地図からの GCP を 4 点追加した。自動推定されたカメラ姿勢情報を(a)に、オルソ画像を作成したものを (b)に、さらに国土地理院が 4 月 29 日に撮影したオルソ航空写真<sup>12)</sup>を(c)に示す。これらを比較すると、撮影時期は 4 か月近く異なるが、ともに地表地震断層を確認することができる。飛行高度は UAV では約 40m、地理院の有人機では千 m 程度と考えられるため、解像度は UAV 画像の方がはるかに高いことが分かる。したがって、詳細な地表断層の状況把握には UAV の方が優れているといえよう。

#### (2) 西原村小森地区

西原村は 4 月 16 日の本震の際、村役場に設置された熊本県の地震計が計測震度 7 を記録されたことで知られている。県道 28 号熊本高森線に沿った墓地において、8 月の調査時点でも大半

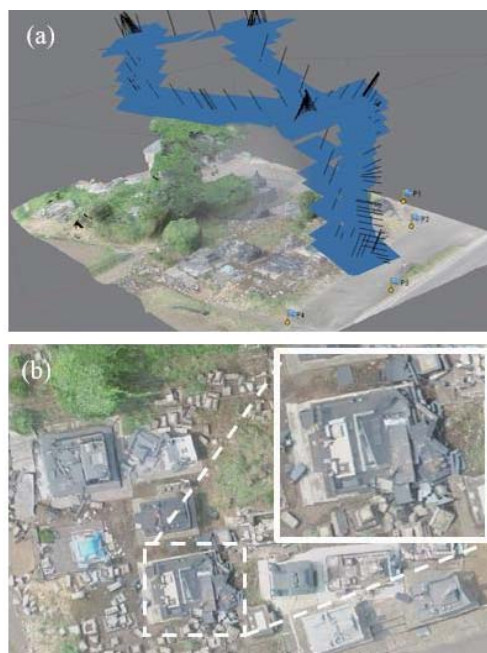


Fig. 4 Developed 3D model with estimated camera positions (a), and the orthomosaic image created by SfM (b) for a graveyard in Komori district, Nishihara village.

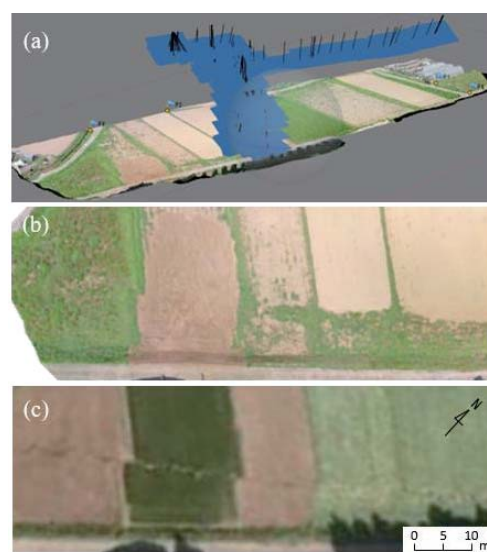


Fig. 3 Developed 3D model with estimated camera positions (a), an orthomosaic image made by SfM (b), and the orthographic image by GSI taken on April 29 (c) for surface faulting in Dozono district, Mashiki town.

の墓石が転倒している状況が見られたので、UAV による観測を行った。墓石の転倒率は、従来よりわが国では地震動強さを推定する指標として使用されてきた<sup>13)</sup>。また、墓石転倒率を航空写真の画像解析から推定しようという試みも行われている<sup>14)</sup>。

墓地の上空を空撮した動画からキャプチャした合計 130 枚の画像を使用し、PhotoScan を用いて 3D モデルを構築した。モデルには地理院地図から GCP を 4 点追加した。Fig. 4 にその結果を示すが、推定されたカメラ姿勢情



報と 3D モデルを(a)に、オルソ画像を(b)に示す。UAV を用いると低空からほぼ垂直の空撮を行うことが可能で、通常の航空写真や衛星画像からは判別が困難な墓石の転倒状況を容易に確認できることが分かる。今回構築した 3D モデルは、拡大すると墓石のエッジが正確には再現されていない。SfM ソフトの解析精度<sup>15)</sup>の問題も考えられ、特徴点検出時の処理条件の見直しも考えたい。

### (3)西原村 大切畑大橋

大切畑大橋は県道 28 号線に架かる全長 265m の 5 径間連続橋梁である。熊本地震によって積層ゴム支承が損傷し、桁が支承から脱落するなどの甚大な被害を受け、地震発生以来通行止めの状況が続いていた。現地調査では、西原村側から徒歩で橋梁を渡り、大切畑貯水池の状況を観測するとともに、大橋上から UAV を飛ばして、橋に隣接する斜面の崩壊状況などを撮影した。

UAV から撮影した高分解能静止画の例を Fig. 5(a)に示す。3D モデル構築には合計 51 枚の静止画像を使用した。構築した 3D モデルとカメラ姿勢情報を(b)に、数値表層モデル(DEM)を(c)に示す。

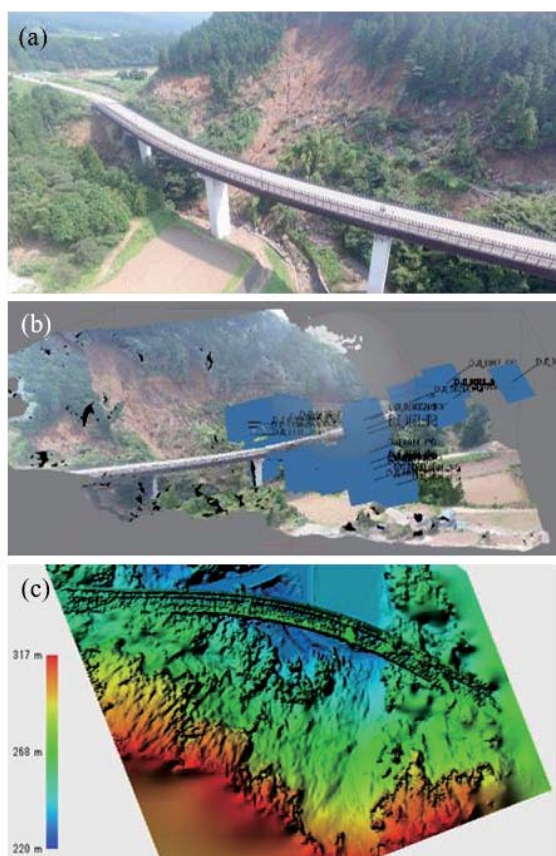


Fig. 5 An example of still photo from UAV (a), developed 3D model with estimated camera positions (b), and the DSM created by SfM (c) for Ohkiri-hata bridge area in Komori district, Nishihara village.

この観測では静止画撮影を行ったため、機体搭載の GPS データも取得され、カメラ位置の探索の初期値として利用できた。

有人航空機より撮影された航空写真に比べ崩壊斜面に接近できるため、地形変化や植生の変化を観測しやすい。また、DEMにより斜面の上方から下方に向けて、土砂が流出している様子が確認できる。

### (4) 南阿蘇村河陽地区

南阿蘇村河陽地区は、阿蘇大橋の崩落、アパート倒壊による人的被害、地表地震断層の出現など、様々な被害が集中した地区である。現地調査では、倒壊して残された建物の上空を道路上から UAV を飛行させて観測した。合計 172 枚の静止画像を用いて、GCP を与えない場合と与えた場合の 2 ケースで 3D モデルを構築した。

PhotoScan を用いて構築した 3D モデルを Fig. 6 (a)に、3D モデルと自動推定されたカメラ姿勢情報を(b)に、GCP として追加する標定点(P1-P5)の配置を(c)に示す。各点間の距離を計測し 3D モデルに GCP を与えたものと与えないものと比較した結果を Table 1 に示す。2 ケースの 3D モデルを比較した結果、GCP を与えていない 3D モデルでは最大誤差が 0.35m、GCP を与えた場合では-0.28m となり、GCP を与えた場合の方がやや良い結果となった。PhotoScan では、GCP を追加する過程において、画像に写る標定点に手動で GCP を合わせる必要がある。今回は標定点としてカラーコーンを使用したため、空撮画像内でその倒

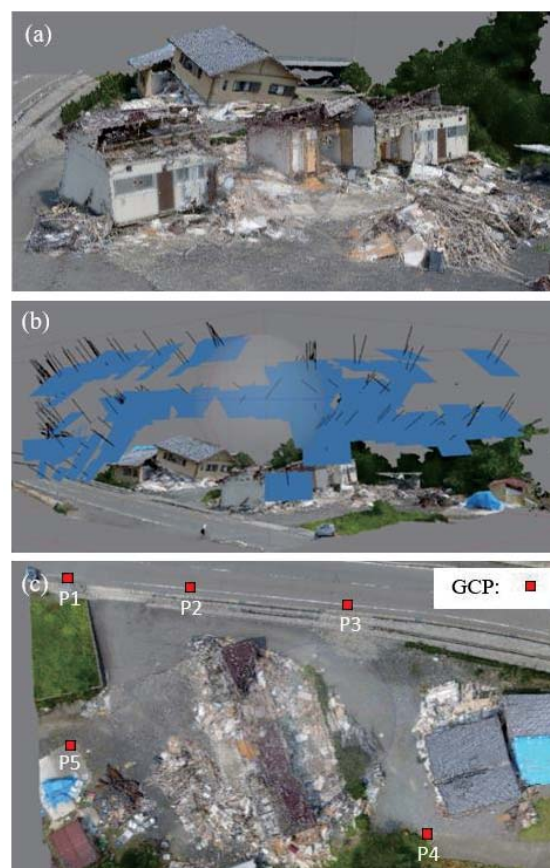


Fig. 6 Developed 3D model of collapsed buildings (a), developed 3D model with estimated camera positions (b), and the layout of the GCP (c)

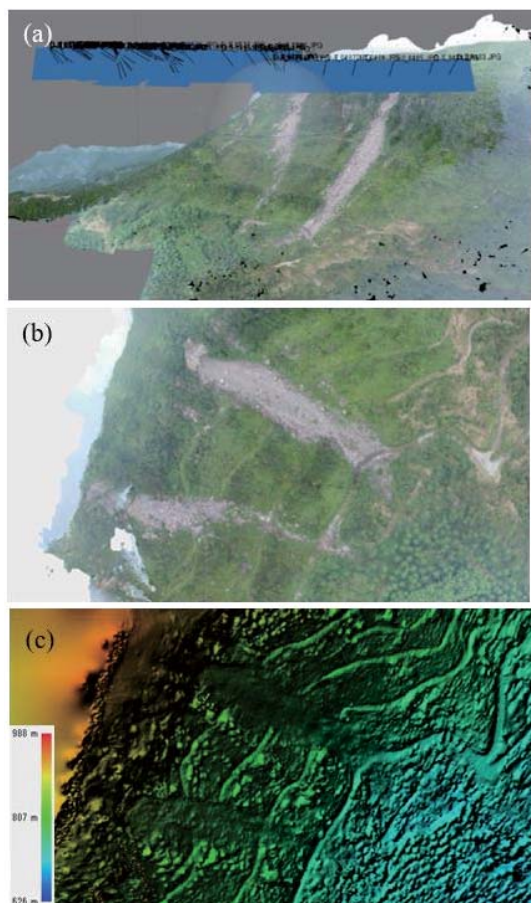
**Table 1.** Comparison of the horizontal distances of the developed 3D models and field measurement (m)

2D Distance	Measured distance	Before adding the GCP		After adding the GCP	
		3D Model	Difference	3D Model	Difference
P1-P2	15.08	15.26	0.18	14.97	-0.11
P2-P3	19.68	19.86	0.18	19.50	-0.18
P2-P5	24.08	24.43	0.35	23.98	-0.10
P3-P4	30.03	30.31	0.28	29.75	-0.28

れ込みが生じたことや、単色であるため中心を確実に押さえることができなかつたことが誤差を小さくできなかつた要因と考えられる<sup>9)</sup>。

(5) 阿蘇市山田 大観峰

阿蘇山のカルデラを見下ろす外輪山の展望台が大観峰である。現地を訪れたところ、大観峰のすぐ近傍のアクセス困難な斜面に崩落が見られたので、UAVで撮影することにした。得られた合計46枚の高分解能静止画像を使用して、3Dモデルを構築した。3Dモデルと自動推定されたカメラ姿勢情報を Fig. 7 (a)に、オルソ画像を(b)に、DEMを(c)に示す。有人航空機より撮影された航空写真に比べ崩壊斜面に接近できるため、より詳細に地形変化を観測しやすい。また、DEMにより斜面の上方から下方に向けて、土砂が流出している様子が確認できる。



**Fig. 7** Estimated camera positions (a), orthomosaic image created by SfM (b), DEM created by SfM (c)

4. まとめと今後の展望

本研究では、2016年熊本地震により発生した断層、墓石の転倒被害、斜面崩壊、建物被害などの被災状況をUAVで撮影し、空撮画像からSfMを用いて3Dモデル化及びオルソ画像とDEMの作成を行った。UAVは低空かつ多角から対象物を撮影できるため、被害状況を詳細に、把握することができた。今後は取得したデータを定量的に解析し、有効な情報となることを検証していきたい。しかし、UAVは人口密集地域では飛行制限があり、規制対象外の総重量200g以下の小型UAVの利用も検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 伊東明彦：UAVの開発と実利用の動向，特集 土木とリモートセンシング，土木技術，68(12)，27-32，2013.
- 2) Nonami, K., Kendoul, F., Suzuki, S., Wang, W., Nakazawa, D.: Autonomous flying robots, Springer, Tokyo, 2010.
- 3) 内山庄一郎，井上公，鈴木比奈子：SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究，防災科学技術研究所研究報告，第81号，2014.
- 4) 石黒聡士，熊原康博，後藤秀昭，中田高，松多信尚，杉戸信彦，廣内大助，渡辺満久，澤祥，鈴木康弘：UAVによる空撮とSfM-MVS解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度：2014年11月長野県北部の地震を例に，日本リモートセンシング学会誌，36(2)，107-116，2016.
- 5) 松田薫元，傳田真也，リュウ ウェン，山崎文雄：UAV空撮画像を用いた被災建物の3次元モデル構築の試み，第58回学術講演会論文集，日本リモートセンシング学会，75-76，2015.
- 6) 田邊諒士，松田薫元，中西慶，劉ウェン，山崎文雄，ドローン空撮画像を用いた消防訓練塔の3次元モデル構築，第60回学術講演会論文集，日本リモートセンシング学会，95-98，2016.
- 7) Yamazaki, F., Matsuda, T., Denda, S., Liu, W.: Construction of 3D models of buildings damaged by earthquakes using UAV aerial images, Proc. of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering, Sydney, Australia, Paper No. 204, 8p, 2015.
- 8) 石黒聡士，松多信尚，井上公，中田高，田中圭，石山達也，箕田友和，竹竝大士，森木ひかる，廣内大助：UAVを用いた平成28年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成，第36回学術講演会論文集，日本リモートセンシング学会，214-217，2016.
- 9) Yamazaki, F., Liu, W.: Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake, 6th ASIA Conference on Earthquake Engineering, Cebu City, Philippines, 8p, 2016.
- 10) 国土地理院：地理院地図 <http://maps.gsi.go.jp/>
- 11) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：平成28年(2016年)熊本地震及び関連情報 <https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/kumamoto2016/index.html>
- 12) 国土地理院：平成28年熊本地震に関する情報 <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
- 13) 翠川三郎，藤本一雄：墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布，日本建築学会構造系論文集 (490)，111-118，1996.
- 14) 日塔哲広，山崎文雄：航空写真の画像解析による墓石転倒率の推定のための基礎的検討：地域安全学会論文集，No. 8，121-126，2006.
- 15) 早坂寿人，大野裕幸，大塚力，関谷洋史，瀧繁幸：UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，国土地理院時報，127集，2015.