

## 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

内山庄一郎\*・井上 公\*・鈴木比奈子\*

### Approaches for Reconstructing a Three-dimensional Model by SfM to Utilize and Apply this Model for Research on Natural Disasters

Shoichiro UCHIYAMA, Hiroshi INOUE, and Hinako SUZUKI

*\*Department of Integrated Research on Disaster Prevention,  
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan  
uchiyama@bosai.go.jp, inoue@bosai.go.jp, hinasuzuki@bosai.go.jp*

#### Abstract

This paper reports the results of a trial study for utilizing structure from motion (SfM) with photographs taken from small unmanned aerial vehicles (sUAVs) or handheld camera for disaster prevention research. Low-cost software has also been integrated into the form reconstruction technology, and camera position estimations based on SfM or scale-invariant feature transform (SIFT) image processing can generate three-dimensional models from photographs. Improvements in sUAVs such as the electric multi-rotor radio control helicopter and compact digital camera photography from a low altitude have resulted in lower costs, improved safety, and greater ease of use. We integrated a sUAV with SfM for application to natural disaster sites and historic disaster materials. In slope disaster areas, we generated orthophotographs with errors of less than 1 m and a topographical map with 0.5 m interval contours. Moreover, with respect to historic disaster materials, we were able to restore and decipher very clearly the character of an old and weathered stone monument built after the 1923 Great Kanto Earthquake, where interpretation of the character had previously been difficult. We also developed the necessary expertise to apply this technology. The SfM and sUAVs offer an alternative for generating a highly precise three-dimensional model that is safe, simple, easy to use, and low in cost. This is an innovative tool for research in natural disasters, geomorphology, and historical disasters.

**Key words:** Structure from motion (SfM), Unmanned aerial vehicle (UAV), Digital surface model (DSM), Detailed topographical map, Historical materials

#### 1. はじめに

SfM (Structure from motion) (Tomasi and Kanade, 1992; Snavely *et al.*, 2007) や SIFT (Scale-invariant feature transform) (Lowe, 2004) などの画像処理をベースとした三次元形状復元技術や撮影位置推定技術が開発され、これらがパッケージングされた低価格、あるいはオープンソースのソフトウェアの登場によって、デスクトップ PC でも写真から三次元モデルを生成することができるようになった。また、小型 UAV

(small Unmanned Aerial Vehicle) とコンパクトデジタルカメラの進歩によって、低コストで安全かつ簡便な低空空撮や高画質写真撮影が可能となった。本稿では SfM と小型 UAV あるいは手持ちカメラで撮影した写真画像とを用いて三次元モデルや地形モデル、オルソフォトを生成し、これらの災害調査・観測への活用可能性に関する研究を行ったので報告する。

#### 1.1 SfM について

SfM はコンピュータビジョンの分野において開発

\* 独立行政法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット

され、動画や静止画からカメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する要素技術の 1 つである (満上, 2011)。SfM などのコンピュータビジョンの応用分野は多岐にわたる。一例を挙げると、バーチャルリアリティー (VR) や拡張現実感 (AR)、映画やゲームなどの映像制作分野、セキュリティ産業における顔画像などの物体認識、工業分野におけるロボットの自律制御や自動車の衝突防止などの運転支援など、非常に広範な分野で適用されている (黄ほか, 1998; 川西ほか, 2008)。本稿では、SfM の三次元形状復元技術を地形や歴史災害資料に適用した。

## 2. ソフトウェアおよび機材

SfM ソフトウェアにはオープンソースソフトウェアの VisualSfM (Wu, 2013; Wu *et al.*, 2011) および商用ソフトウェアの Agisoft PhotoScan 1.0.0 を用いた。これらは、既存の SfM 関連ライブラリと独自アルゴリズムとを組み合わせてパッケージングされており、比較的簡単な操作で一連の処理を行うことができる。GIS ソフトウェアには ESRI ArcGIS for Desktop Basic 10.2 および Spatial Analyst を用いた。GIS は地形モデルから等高線図や陰影図を作成する際に用いた。写真撮影には、Ricoh GR (以下 GR, APS-C CMOS, 約 1,690 万画素) と GoPro HD HERO2 (以下 GP2, 1/2.3 インチ CMOS, 約 1,100 万画素), GoPro HERO3 Black Edition (以下 GP3, 1/2.3 インチ CMOS, 1,200 万画素) を用いた。GR の主な設定は、TAv モード,  $f=5.6$ , シャッタースピード 1/640, 小型 UAV 搭載時はインターバル 1 秒, フォーカスは無限遠とした。GP2, GP3 とともにレンズ歪みが大きいので、画角はミディアム (GP2: 約 800 画素, GP3: 約 700 万画素) 設定とした。小型 UAV には 4 ローターのマルチコプターである DJI 社製 Phantom を使用した。

## 3. 対象地域および対象物

本研究では地形モデル生成の対象として 1 つの地域、そして災害資料の三次元モデル生成対象として 2 つの対象物を選定した。

地形モデル生成の対象地域は、平成 25 (2013) 年台風第 26 号の豪雨で発生した斜面崩壊の被災地域である東京都大島町の西部地域 (以下、伊豆大島) とした。この地域について、小型 UAV で撮影した垂

直写真、平成 25 年 (2013) 年 10 月 17 日に撮影された災害直後の垂直空中写真、および昭和 51 (1976) 年に撮影された垂直空中写真を用いて三次元モデルおよび地形モデルを作成した。次に、歴史災害資料の対象として、千葉県南房総市白浜町の厳島神社境内に昭和 2 (1927) 年に建立された大正関東地震の復興記念石碑 (以下、1927 年石碑) および同社境内にある年代不詳の狛犬石像を選定した。石碑の表面は風化が進みさらに苔に覆われており、文字の判読が難しい状態であった。また、狛犬石像は凹凸に富んだ造形のため三次元モデル化が難しいと予想し、どの程度まで立体形状を再現できるのかを試行した。

## 4. SfM 処理のフロー

SfM で写真画像から三次元モデルを生成するまでの流れは次の通りである。SfM ソフトウェアでは以下の 2 から 7 までを処理する。

- 1) デジタルカメラによる写真画像の撮影
- 2) 写真撮影位置の推定
- 3) 三次元モデルの構築
- 4) GCP の設定
- 5) テクスチャーの貼り付け (※)
- 6) 地形モデルの出力
- 7) オルソフォトの出力 (※)

※ SfM ソフトウェアによっては、この工程が存在しないものもある。

以下に各工程における処理の内容を述べる。

### 4.1 写真画像の撮影

デジタルカメラを用いて対象物の写真を撮影する。地形を対象とする場合は小型 UAV など垂直写真を撮影する (図 1)。石碑などの個別の対象物は



図 1 小型 UAV による写真撮影の様子  
Fig. 1 Taking photographs with sUAV.

カメラを手持ちで撮影する。なお、いずれの場合も撮影場所の GPS 情報は必要ない。理由は、生成する三次元モデルの精度に比して GPS 位置情報の精度が著しく劣るためである。

#### 4.2 写真撮影位置の推定

このプロセスでは、複数の写真画像から写真撮影位置を推定する(図2)。また、この工程で簡易三次元モデルとなるポイントクラウド(点群データ)を生成する。

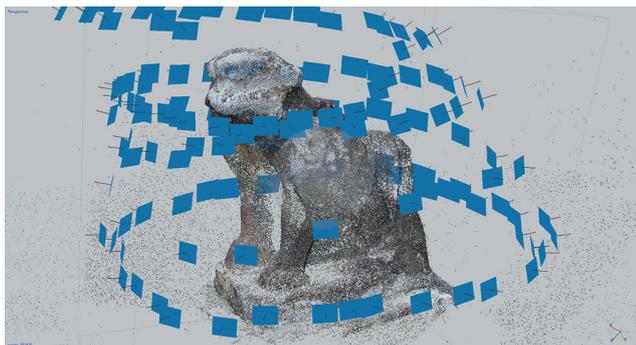


図2 写真撮影位置(青い四角)の推定  
Fig. 2 Estimated camera positions (blue squares).

#### 4.3 三次元モデルの構築

このプロセスでは、複数の写真画像に写っている対象物の同一点に対し視差を計算し、対象物の三次元モデルを再構築(Reconstruction)する(図3)。

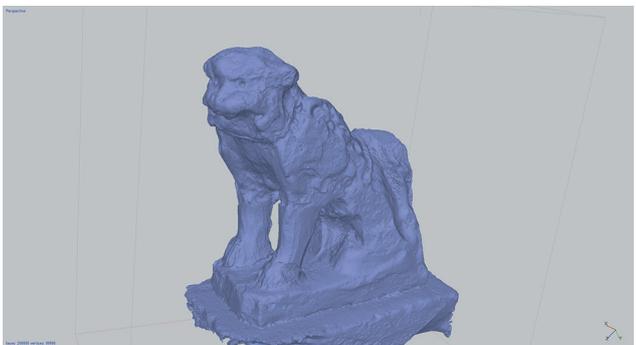


図3 三次元モデルの構築  
Fig. 3 Reconstructed three-dimensional model.

#### 4.4 GCP の設定

地形モデルを生成する場合は、三次元モデルに対し複数の GCP(地上基準点)を設定する。これによって三次元モデルに地理空間座標が定義され、地形モデルとして出力できる状態になる。

#### 4.5 テクスチャの貼り付け

三次元モデルの表面は微小な三角形のポリゴンの集合によって構成されている。この三次元モデルの

表面に写真画像から生成したテクスチャーを貼り付けることによって、PC 上で対象物を様々な角度から観察する際に便利な、より現実の状態に近いリアルな立体モデルを作成することができる(図4)。SfM ソフトウェアによっては、この工程が存在しないものもある。

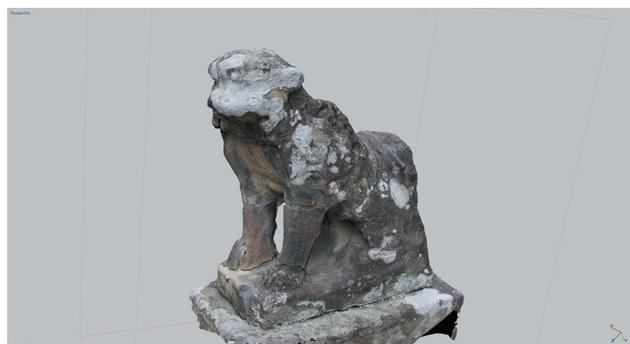


図4 テクスチャーを貼り付けた三次元モデル  
Fig. 4 Textured three-dimensional model.

#### 4.6 地形モデルの出力

SfM で生成した三次元モデルは、そのままでは GIS などで利用することができない。GeoTiff などのメッシュデータや、LAS などのポイントクラウドデータとしてファイル出力する。

#### 4.7 オルソフォトの出力

写真画像をモザイク(合成)処理し、地形表面のオルソフォト(正射投影画像)を出力する。SfM ソフトウェアによっては、この工程が存在しないものもある。

### 5. 三次元モデルの構築と結果

3章で挙げた対象について、SfM によって生成した三次元モデル、あるいは三次元モデルから生成した地形モデルである DSM (Digital Surface Model)、およびオルソフォトを示す。

なお、SfM によって生成する DSM の最小メッシュサイズは、計算ソースである写真画像の解像度に依存する。本研究では、ソースの写真画像に解像度の異なる複数の画像を用意し、それぞれのソースで生成可能な最も精密な解像度(最小メッシュサイズ)を求めべく SfM 処理を行った。

#### 5.1 伊豆大島

伊豆大島では、精密な DSM の作成を目的として SfM により三次元モデルの生成を行った。DSM は地表面とその上にある植生や人工構造物等の表面の

高さ情報をメッシュで表現するデータである。DSM 生成後、GIS で陰影図および等高線を計算し、細密地形図を作成した。本地域では、国土地理院のカラー空中写真、同院が災害直後に撮影し Web 公開した垂直写真および筆者らが小型 UAV で撮影した低空空中写真の 3 種の画像を計算ソースとして用意した。

### 5.1.1 1976 年のカラー垂直空中写真を用いた三次元モデリング

1976 年に撮影されたカラー垂直空中写真を国土地理院がスキャンし、数値空中写真として販売しているものを購入した。空中写真番号は CKT-76-5、撮影高度約 1,700 m、撮影縮尺約 1:10,000、4 コース合計で 23 枚、画像データの解像度は 20  $\mu\text{m}$  (1,270 dpi)、地上解像度は約 0.2 m/ピクセルである。GCP は地理院地図 (GSI Maps) から経緯度とレーザ測量による標高値を読み取り、6 点を設定した。SfM により 0.7 m メッシュの DSM と 0.18 m メッシュのオルソフォトを生成した。

図 5 は DSM から生成した陰影図に、同じく DSM から作成した 10 m 間隔の等高線をオーバーレイしたものである。陰影図では道路や建物形状を読み取ることができるが、建物のエッジは丸みを帯びている。図 6 にはオルソフォトを示した。特に目立つ歪みはなく、スムーズにモザイクされている。

### 5.1.2 災害直後の空中写真を用いた三次元モデリング

国土地理院が平成 25 年 (2013) 年 10 月 17 日に撮影し Web で公開した災害直後の空中写真を使用した。写真のサイズは 2,355 ピクセル  $\times$  3,608 ピクセル、撮影高度は約 1,400 m、合計 31 枚の写真を使用した。なお、この写真画像は Web 公開用のためか、短辺、長辺ともにオリジナルデータの 4 分の 1 にリサイズされていた。Exif には、カメラのモデル (UltraCamX)、および撮影位置と高度が記録されていた。UltraCamX は航空機専用のデジタル航空カメラのため、撮影位置は航空機用の GPS および IMU によって推定されており、その位置精度について信頼性が高いと判断したため、SfM 処理の際はカメラ位置情報として Exif の GPS 情報を使用した。GCP は地理院地図から経緯度とレーザ測量による標高値を読み取り、20 点を設定した。SfM により、DSM、オルソフォトともに 0.3 m メッシュのデータを生成した。図 7 は陰影図に 10 m 間隔の等高線をオーバーレイしたものである。斜面災害発生位置を明瞭に読

み取ることができる。図 8 にはオルソフォトを示した。斜面災害発生源から下流の市街地への影響範囲を読み取ることができる。図 9 にはオルソフォトと数値地図 (国土基本情報) の住家・非住家建物、道路、河川レイヤーとのオーバーレイを示した。建物ポリゴンとオルソフォトの家屋とが、非常に良く整合している。図上の計測で 1 m 程度のズレがみられた。図 10 には DSM から作成した傾斜角図に陰影図をオーバーレイした地図を示した。斜面災害の発生源や非発生領域との境に、明瞭な赤色の傾斜変換線を読み取ることができる。

### 5.1.3 小型 UAV で撮影した垂直写真による三次元モデリング

平成 25 (2013) 年 11 月 14 日に伊豆大島にて小型 UAV による斜面崩壊地形の撮影を実施した。航空機 LiDAR による 1 m メッシュ、等高線間隔 1 m クラスの地形図作成を目指し、小型 UAV と SfM の組み合わせによって、どの程度の細密地形図が作成できるのか試行した。撮影は太陽光線の角度を考慮して正午過ぎの 0:10 頃より開始し、5 フライトで合計 578 枚の写真撮影し 0:45 頃に完了した。撮影領域の幅は東西、南北ともに約 450 m、撮影面積は約 12 ha、飛行高度は対地 40 ~ 50 m、カメラは GR を使用し、1 秒インターバルで垂直写真を撮影した。この画像をもとに SfM によって 0.09 m メッシュの DSM、および地上解像度 0.02 m のオルソフォトを生成した。図 11 はこの DSM から生成した陰影図および 2.5 m 間隔の等高線をオーバーレイしたものである。緑の点は SfM により推定された写真の撮影位置である。このフライトでは小型 UAV をマニュアルで操縦したため、コース間隔が平行にならなかった。図 12 にオルソフォトおよび撮影推定位置を示す。SfM によって生成されたオルソフォトの地上解像度は約 2 cm で、非常に高解像度な地表面の様子を観察できる。たとえば、この図では表現できないが、操縦者のヘルメット、手のひら、服装などを読みとることができる。図 13 には傾斜角図と陰影図のオーバーレイを示す。傾斜角図を 50 % 透過し陰影図と重ねた。急傾斜であることを示す茶色の線が傾斜変換線として読みとれる。傾斜変換線は、非崩壊地と崩壊によって地表が露出した部分との境界に観察される。さらに、崩壊土砂が流下したと思われる小河川に対して平行に傾斜変換線が描かれている。

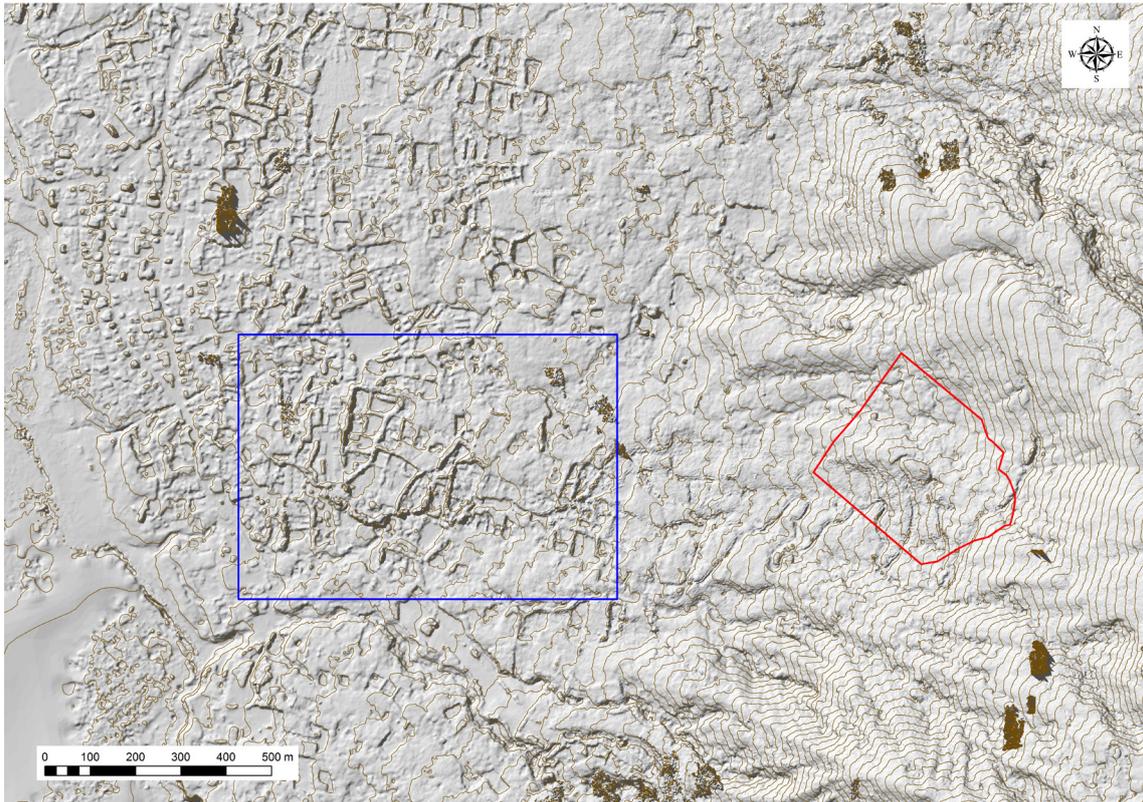


図5 陰影図と10 m間隔等高線図(1976年カラー空中写真からSfMで生成したDSMより作成. 青枠は図9, 赤枠は図11の範囲)  
Fig. 5 Shaded relief map with 10-m interval contour (SfM sources are aerial photographs taken in 1976. Blue border encloses the area shown in Fig. 9, while red border encloses that in Fig. 11).

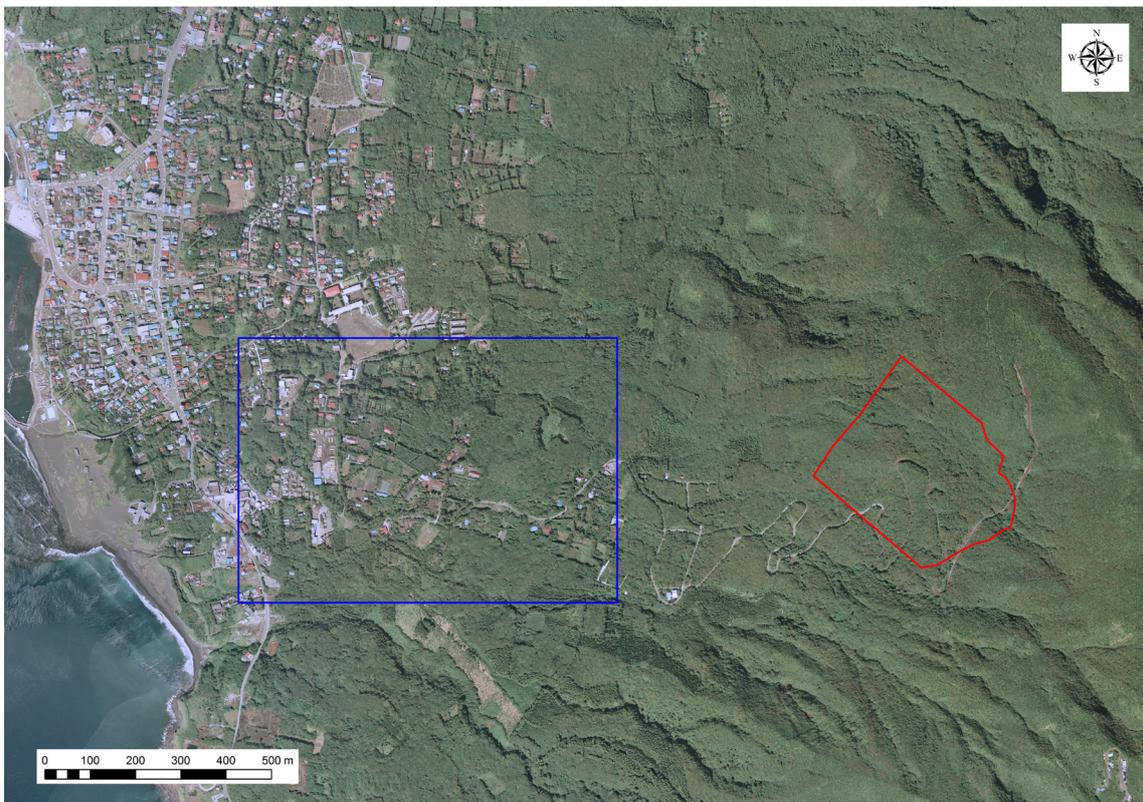


図6 オルソフォト(1976年カラー空中写真をSfMでモザイク. 青枠は図9, 赤枠は図11の範囲)  
Fig. 6 Orthophoto generated by SfM (sources are aerial photographs taken in 1976. Blue border encloses the area shown in Fig. 9, while red border encloses that in Fig. 11).

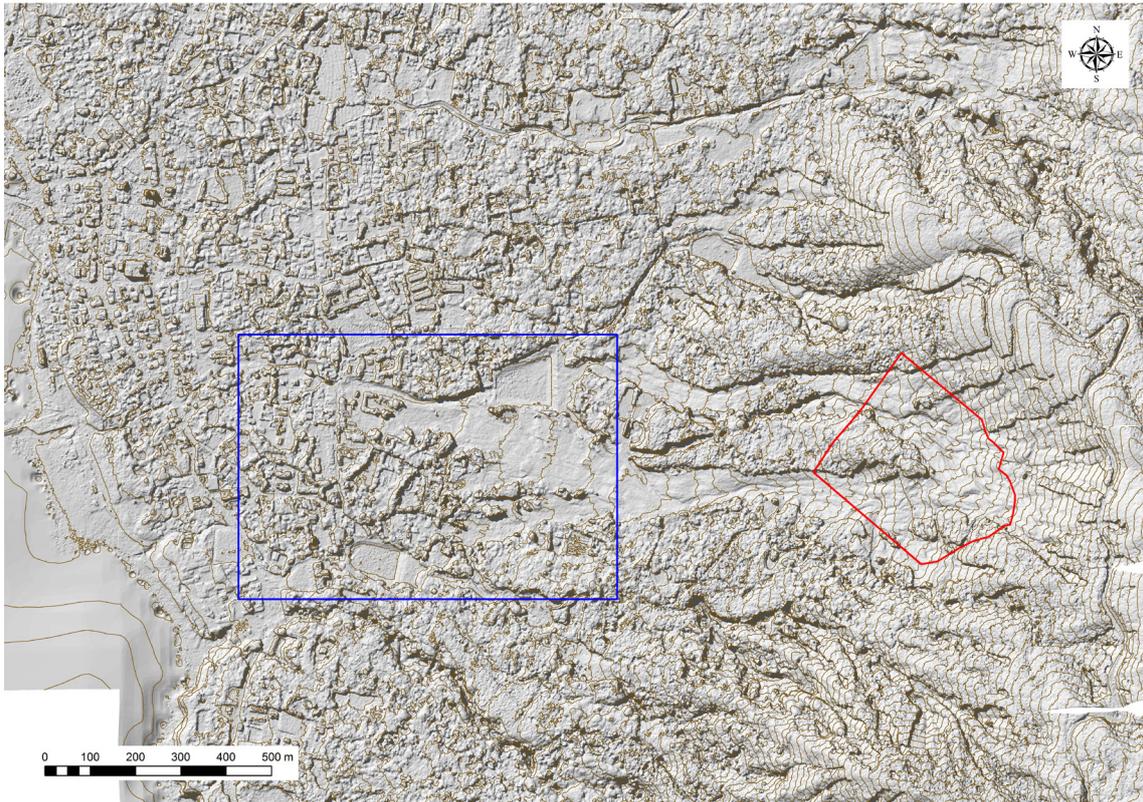


図 7 陰影図と 10 m 間隔等高線図 (2013 年災害直後の空中写真から SfM で生成した DSM より作成. 青枠は図 9, 赤枠は図 11 の範囲)  
Fig. 7 Shaded relief map with 10-m interval contour (SfM sources are aerial photographs taken on October 17, 2013, immediately after slope disaster. Blue border encloses the area shown in Fig. 9, while red border encloses that in Fig. 11).

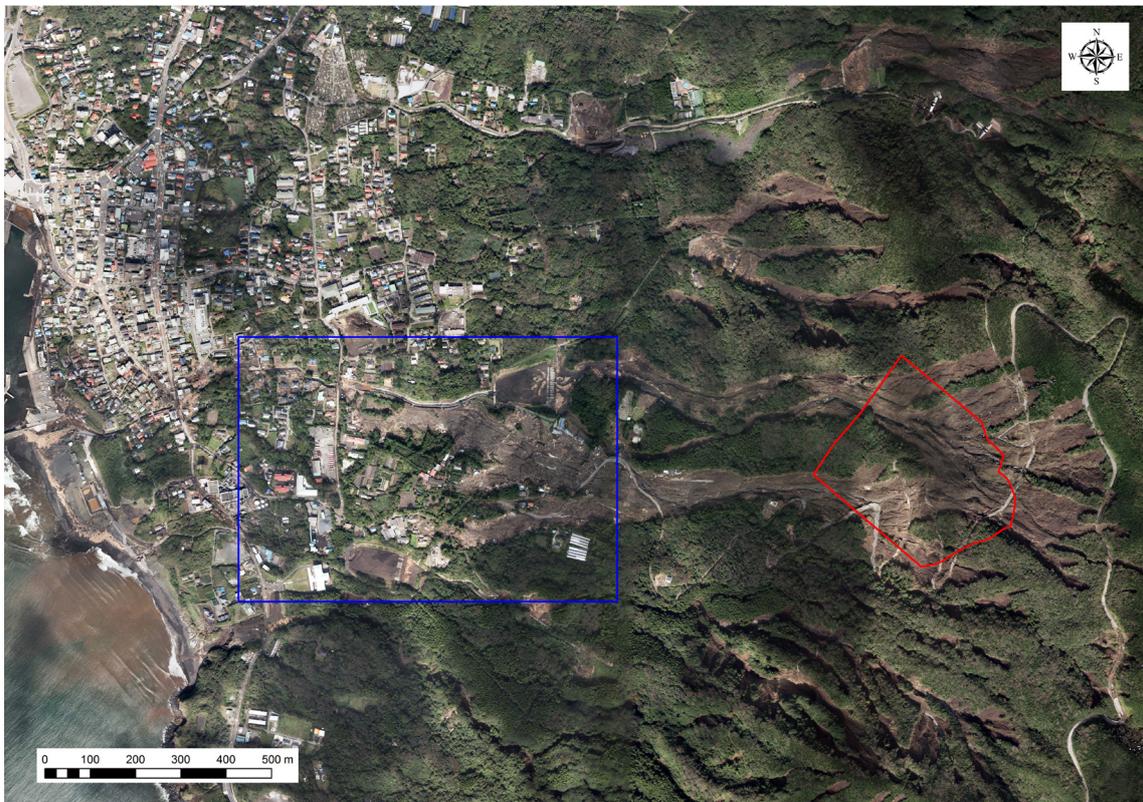


図 8 オルソフォト (2013 年災害直後の空中写真を SfM でモザイク. 青枠は図 9, 赤枠は図 11 の範囲)  
Fig. 8 Orthophoto generated by SfM (SfM sources are aerial photographs taken on October 17, 2013, immediately after the slope disaster. Blue border encloses the area shown in Fig. 9, while red border encloses that in Fig. 11).

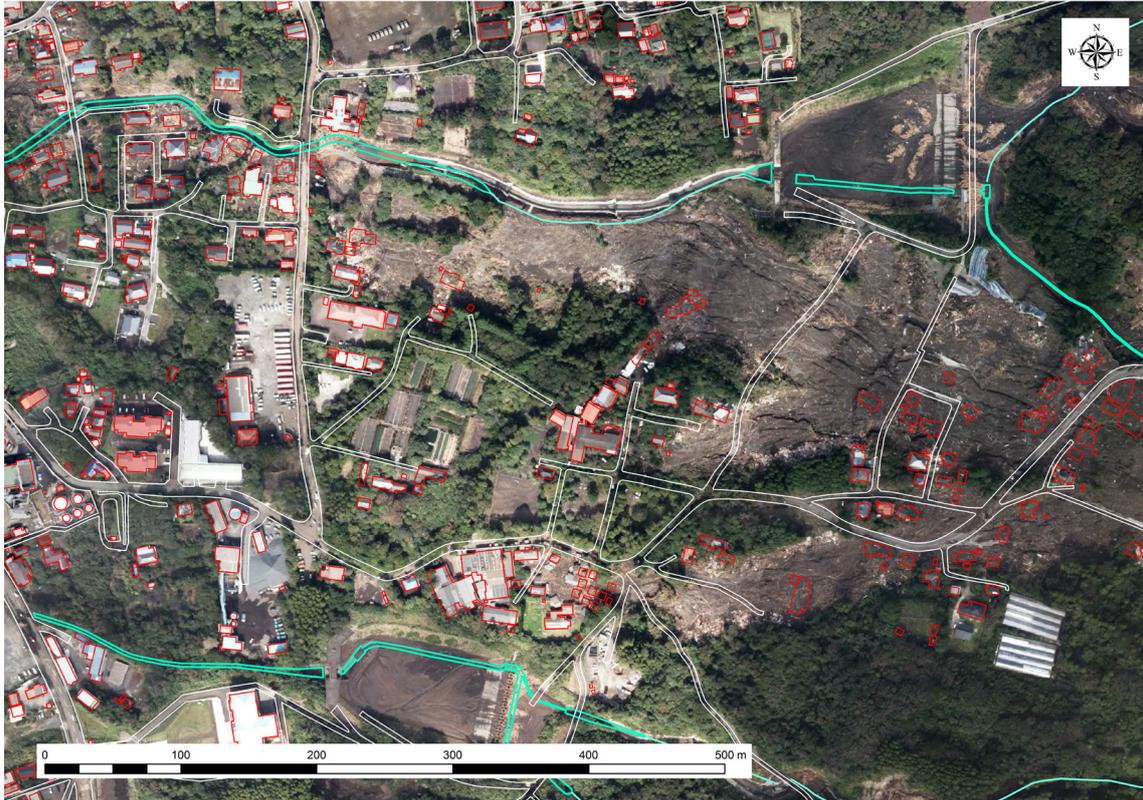


図9 オルソフォトと数値地図(国土基本情報)の住家・非住家建物, 道路, 河川レイヤーとのオーバーレイ  
Fig. 9 Layers of buildings, road, and river from GSI overlaid with the orthophoto.

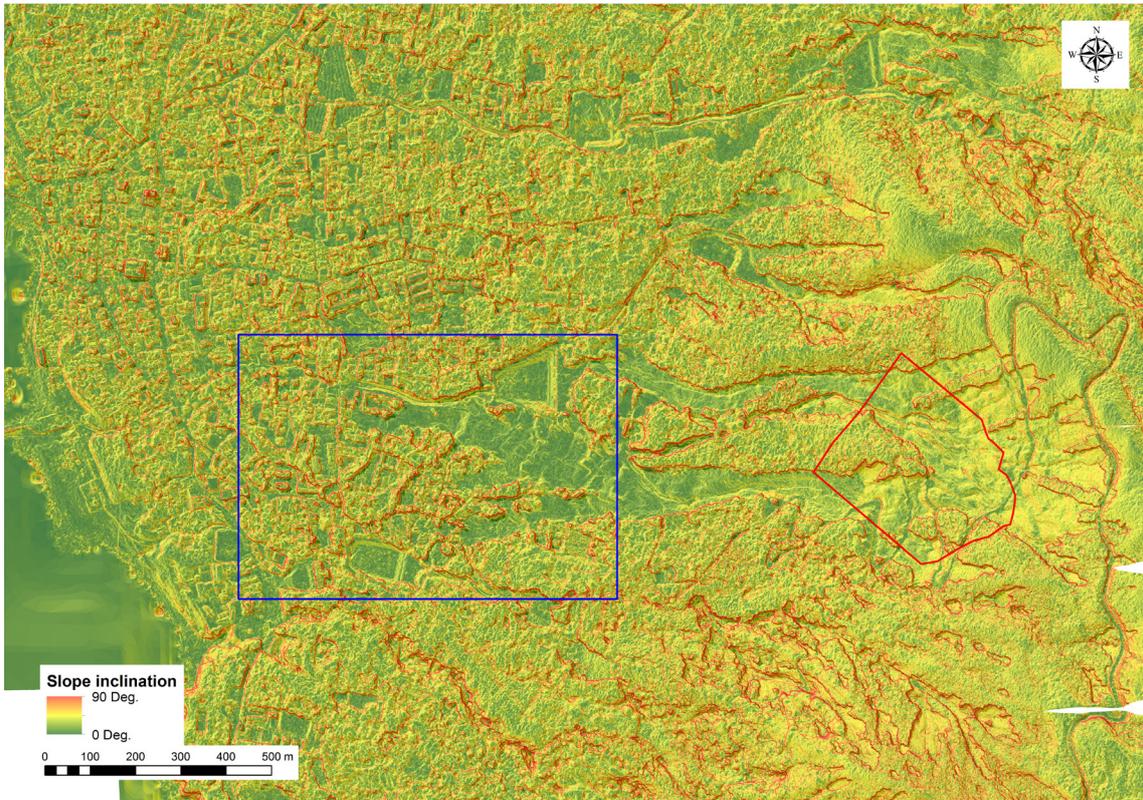


図10 傾斜角図(2013年災害直後の空中写真からSfMで生成したDSMより計算. 青枠は図9, 赤枠は図11の範囲)  
Fig. 10 Slope gradation map (SfM sources are aerial photographs taken on October 17, 2013, immediately after the slope disaster. Blue border encloses the area shown in Fig. 9, while red border encloses that in Fig. 11).

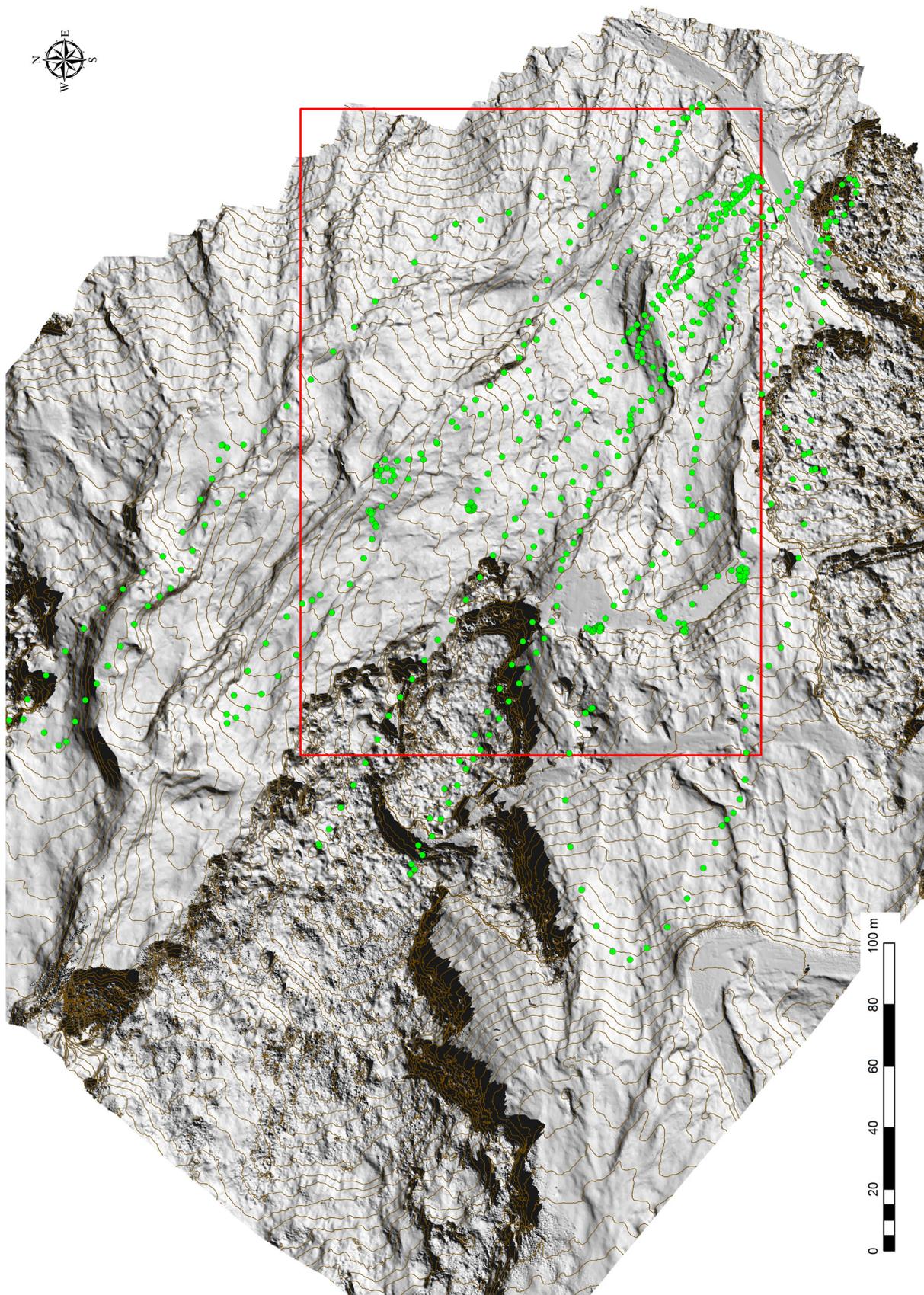


図 11 陰影図と 2.5 m 間隔の等高線、および写真撮影推定位置(緑の点)(小型 UAV 写真を使用、赤枠は図 14 の範囲)  
Fig. 11 Shaded relief map with 2.5-m interval contour and estimated camera positions in green dots (sUAV sources are aerial photographs taken by sUAV after the slope disaster. Red border encloses the area shown in Fig. 14).

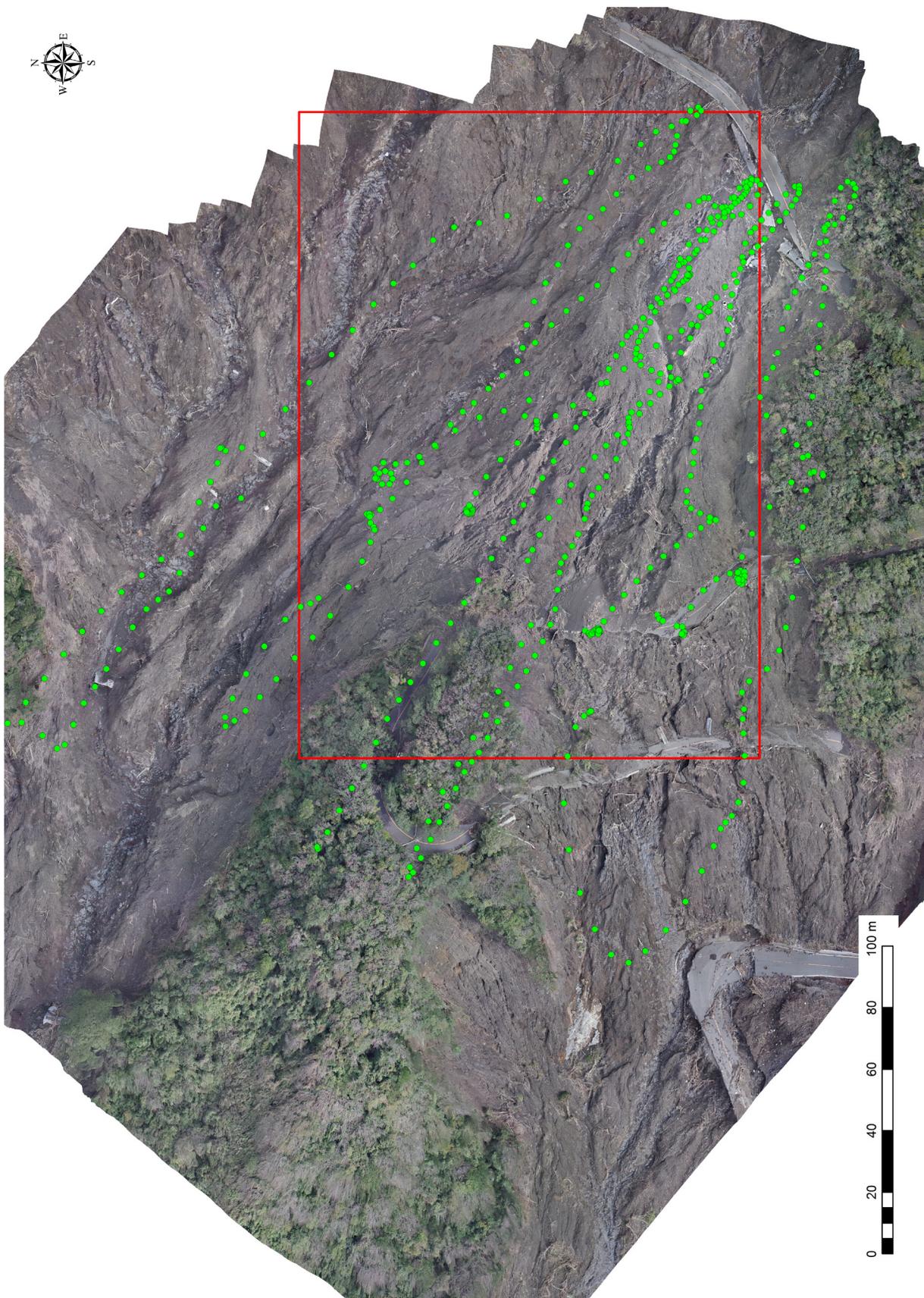


図 12 地上解像度 2 cm のオルソフォト (緑の点は SfM による写真撮影推定位置、赤枠は図 14 の範囲)  
Fig. 12 Orthophoto in 2-cm resolution generated by SfM (green dots show estimated camera positions. Red border encloses the area shown in Fig. 14).

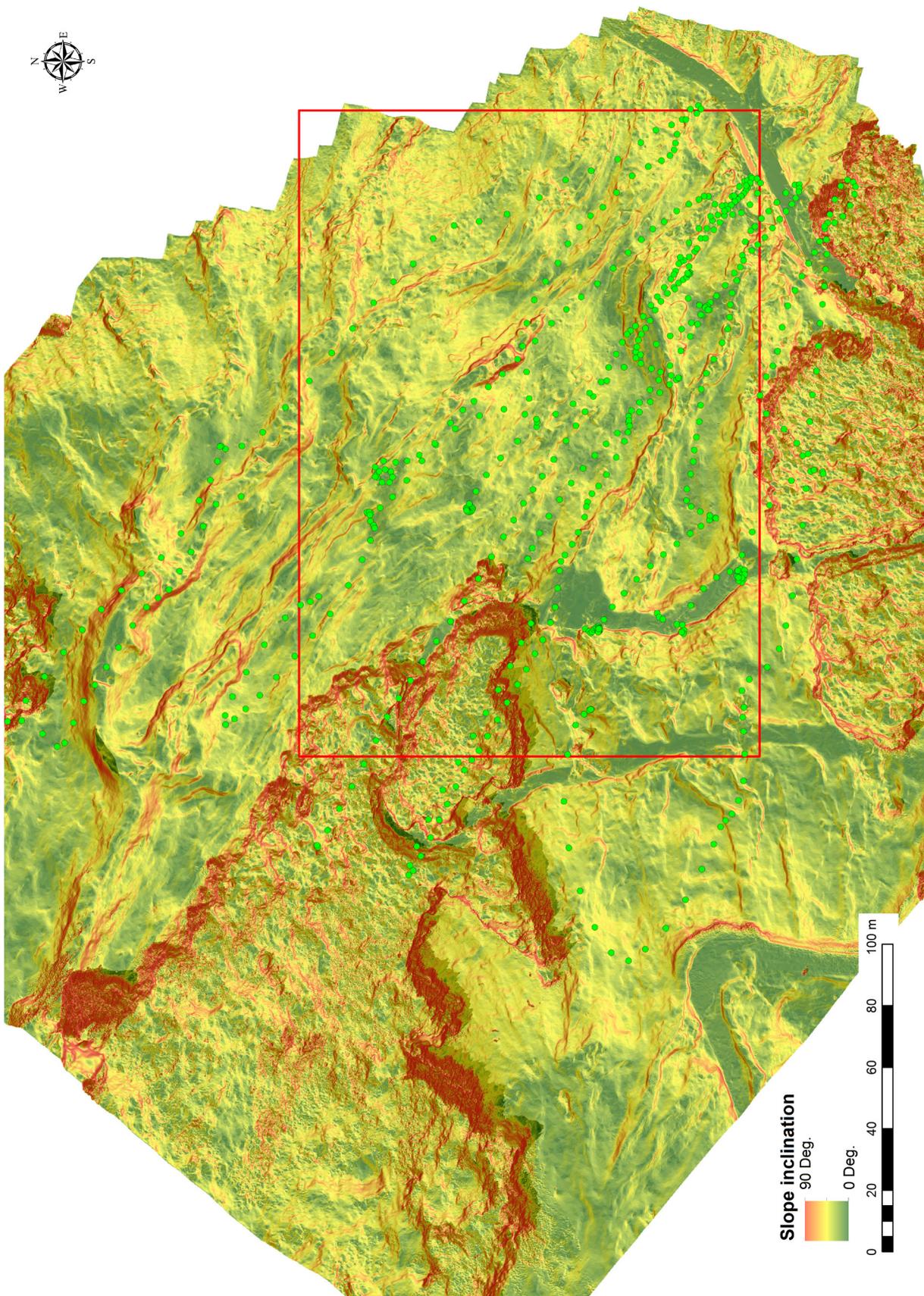


図 13 傾斜角図と陰影図とのオーバーレイ (赤枠は図 14 の範囲)  
Fig. 13 Slope gradation map with shaded relief map (green dots show the estimated camera positions. Red border encloses the area shown in Fig. 14).

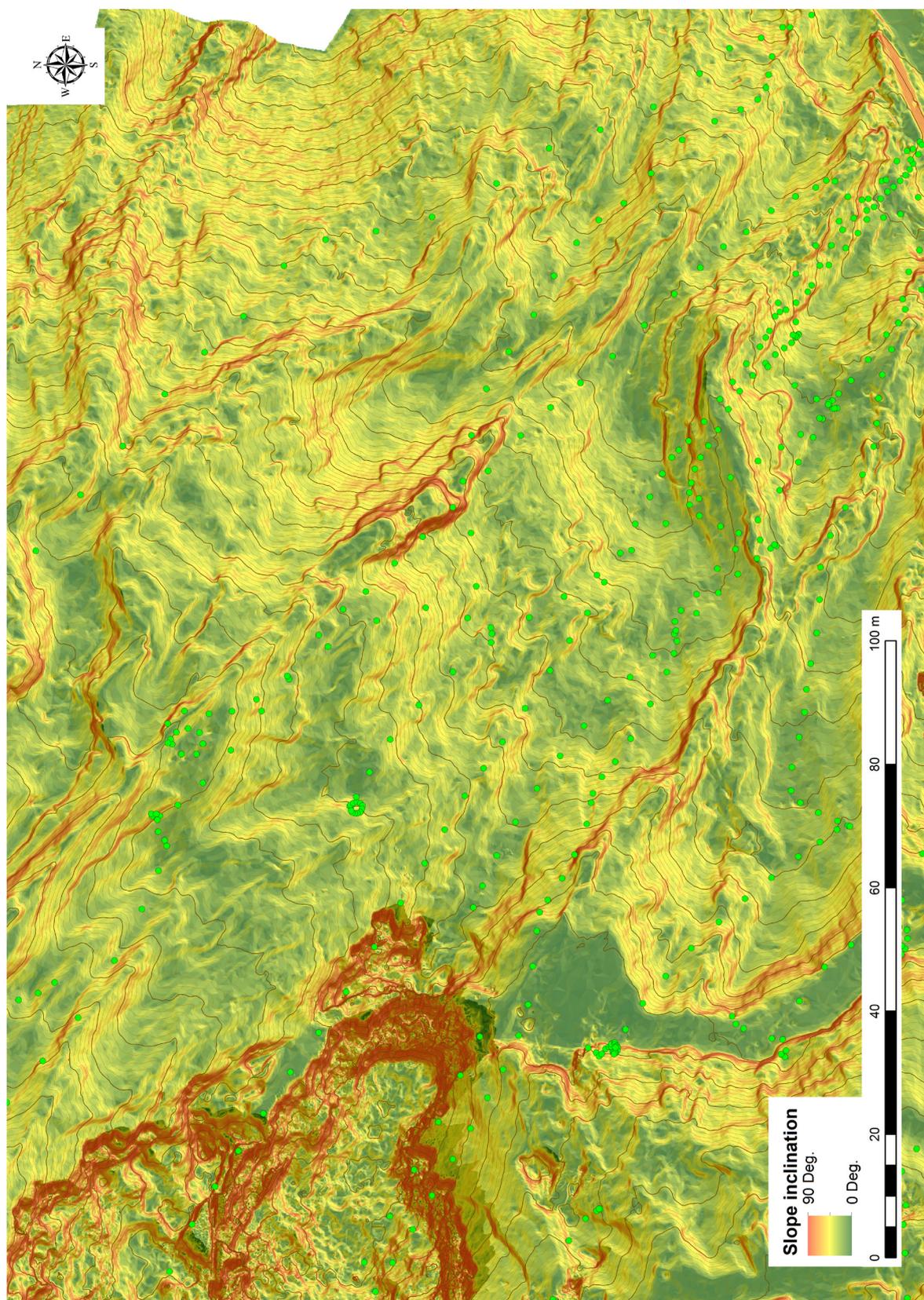


図 14a SfM による傾斜角図と陰影図および 0.5 m 間隔の等高線とのオーバーレイ  
Fig. 14a Slope gradation map with shaded relief map overlaid with 0.5-m interval contours by SfM.

崩壊土砂が崩壊源から単純に下方へ移動しただけでは、扇状地や舌状の地形が形成されるため、傾斜変換線はこのような様相を示さない。このことから、崩壊土砂は多量の水を含み下刻しながら流下したものと推定される。図 14a に傾斜角図と陰影図、0.5

m 間隔の等高線をオーバーレイした細密地形図を示す。0.5 m 間隔の等高線の屈曲は計曲線 (2.5 m 間隔) の按分線ではなく、それぞれの等高線の屈曲が地形の形状に応じて変化している。このことから、少なくとも、小型 UAV と SfM によって、この精度の細

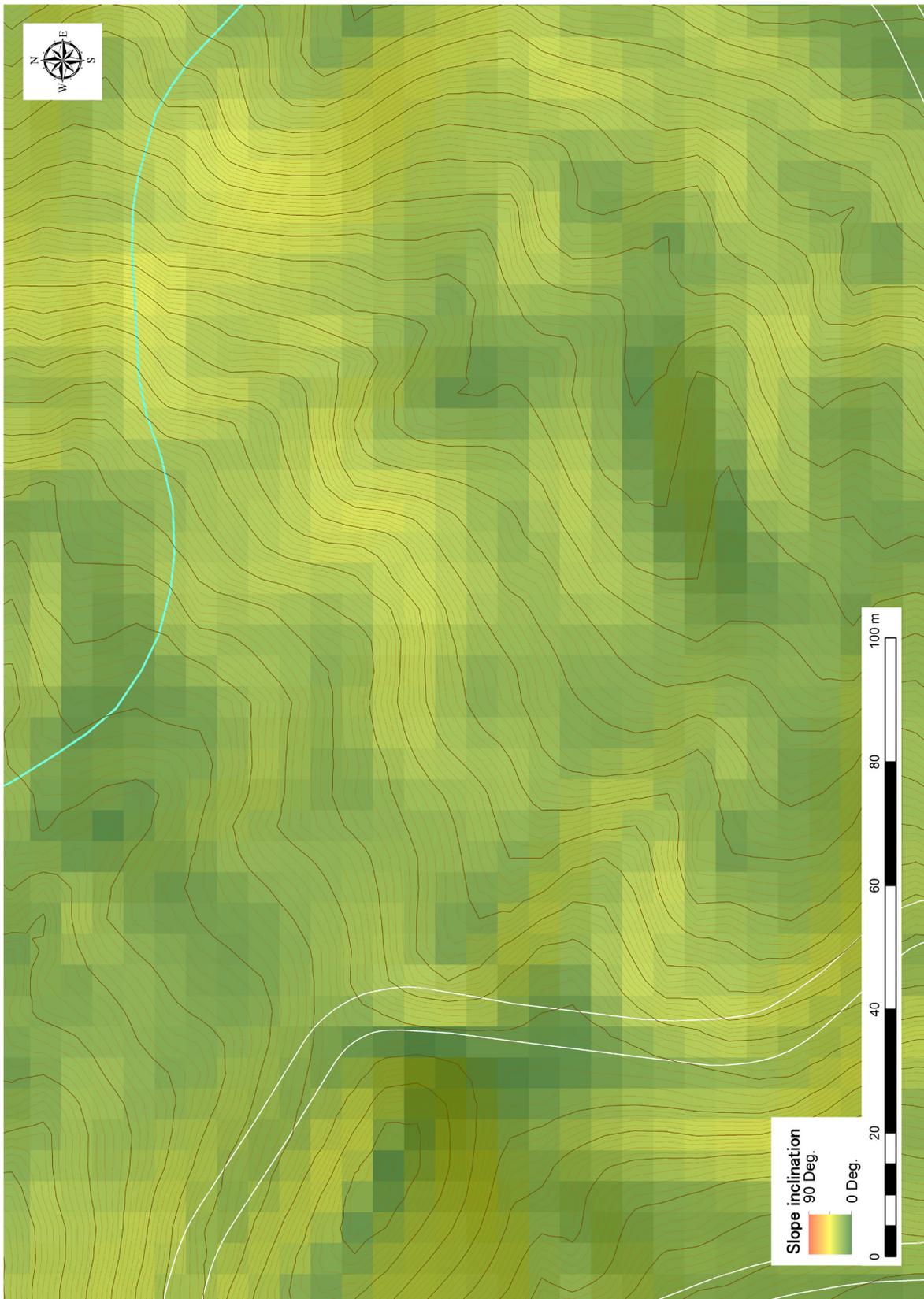


図 14b LidAR (国土地理院 5 m メッシュ)によるお傾斜角図と陰影図および 0.5 m 間隔の等高線とのオーバーレイ  
Fig. 14b Slope gradation map with shaded relief map overlaid with 0.5-m interval contours by LidAR (5 m DEM, GSI).

密地形図を描くことは十分に可能と考える。比較のため、図 14b に国土地理院による基盤地図情報 Web サイトで公開されている 5 m メッシュの数値標高データから作成した等高線図を示す。5 m メッシュ

は現時点で公開され入手可能な最も詳細な地形データの一種である。しかし、UAV と SfM を用いて作成した地形図 (図 14a) と比較すると、地形再現性は大幅に落ちることが読み取れる。

## 5.2 歴史災害資料

手持ちカメラで撮影した写真画像を用いて、歴史災害資料の三次元モデルを生成した。ここでの狙いは、苔や汚れ、風化によって判読が難しい状態となった古い石碑に刻まれた文字を、三次元モデルによって再現すること、および、SfM でどの程度の複雑な立体形状を再現できるのか試行することである。

### 5.2.1 1927 年石碑の三次元モデリング

この石碑は、千葉県南房総市白浜町白浜にある巖島神社境内に昭和 2 (1927) 年に建立されたものである。付近には野島埼灯台が建つ。この地域は大正 12 (1923) 年に発生した大正関東地震により海岸が隆起し、また灯台が崩壊するなどの被害を受けた。この石碑は、本地域の海岸の隆起量(六尺)や被害の様相、復興の社会的な動きを記録した貴重な資料である。石碑のサイズは幅 80 cm、高さ 150 cm、厚さ 12 cm ほどの板碑で、表面に 5 mm 程度の深さで文字が彫られている。文字列は、苔の繁茂や風化作用によって読み取りが難しくなりつつある。この石碑から 60 cm 程度の距離でカメラを保持し、石碑表面に対して平行移動しながら 158 枚の写真を撮影した。

図 15 は対象とした石碑とその周辺の様子である。図 16 には SfM によって推定された写真撮影位置を示す。深さ 5 mm 程度の文字の彫りを再現するため、多数の写真を撮影した。図 17 の左は、SfM によって生成した石碑のオルソフォト、中央が石碑表面の DSM に対し陰影処理を行った状態、右は陰影処理後に判読した文字列を示す。三次元モデル化によって、表面の汚れの影響を大幅に軽減することが可能となった。また陰影処理によって、非常に明瞭に文字列が判読できる状態になった。文字列から読み取れる大意は次の通りである。

#### 「震災復興記念碑

大正 12 (1923) 年 9 月 1 日、関東大地震で海底が約 1.8 m 隆起した。私達の白浜の漁港は潮が引いてしまい、船が掬われてすべてだめになった。これより後、住民は村当局と力を合わせて一緒に計画を立てて、毎日、朝から晩まで復興のため岩石をうがち、海底をさらう作業を行うこととなった。大正 13 (1924) 年 3 月に工事が始まり(起工)、大正 15 (1926) 年 6 月 10 日に完了した(竣工)。工事の総額は 1 万 5,000 円余りであった。野島は周囲が現れて、岬と

なった場所であるが<sup>注 1</sup>、当時、この地の灯台が倒壊したのは普通では考えられないくらいの驚きで言葉が出ないくらいむごたらしい様子だった。しかし、村全体の被害は軽微で、神様が知らず知らずのうちに守ってくださったからだ、鎮守の巖島神社を改築したいと誰かが言いはじめ、皆が同意した。神様のご神徳に報いるお金は補助金 802 円と宮城、福島両県からの寄付金 142 円を合わせ総額 4,700 円を得た。昭和 2 (1927) 年 2 月 20 日に竣成し、住民たちの希望がかなった。そこで、このことを子孫に念入りに伝えるために、このあらましを石に刻み石碑を建てる。昭和 2 (1927) 年 7 月 10 日建之」



図 15 昭和 2 (1927) 年に建立された大正関東地震の復興を記念する石碑

Fig. 15 Stone monument built after the 1923 Great Kanto Earthquake to memorialize the reconstruction from the hazard.

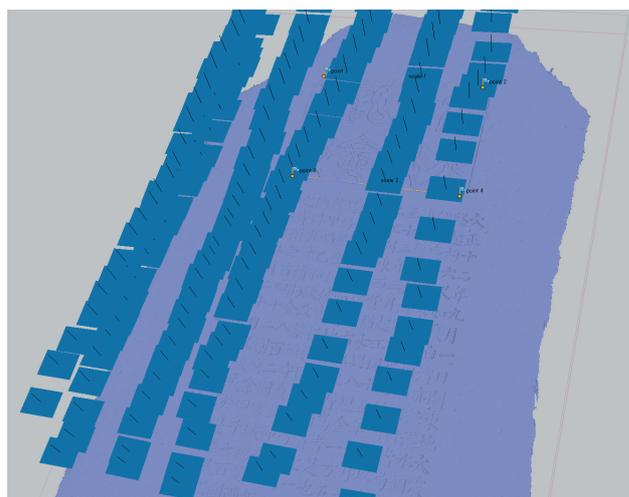
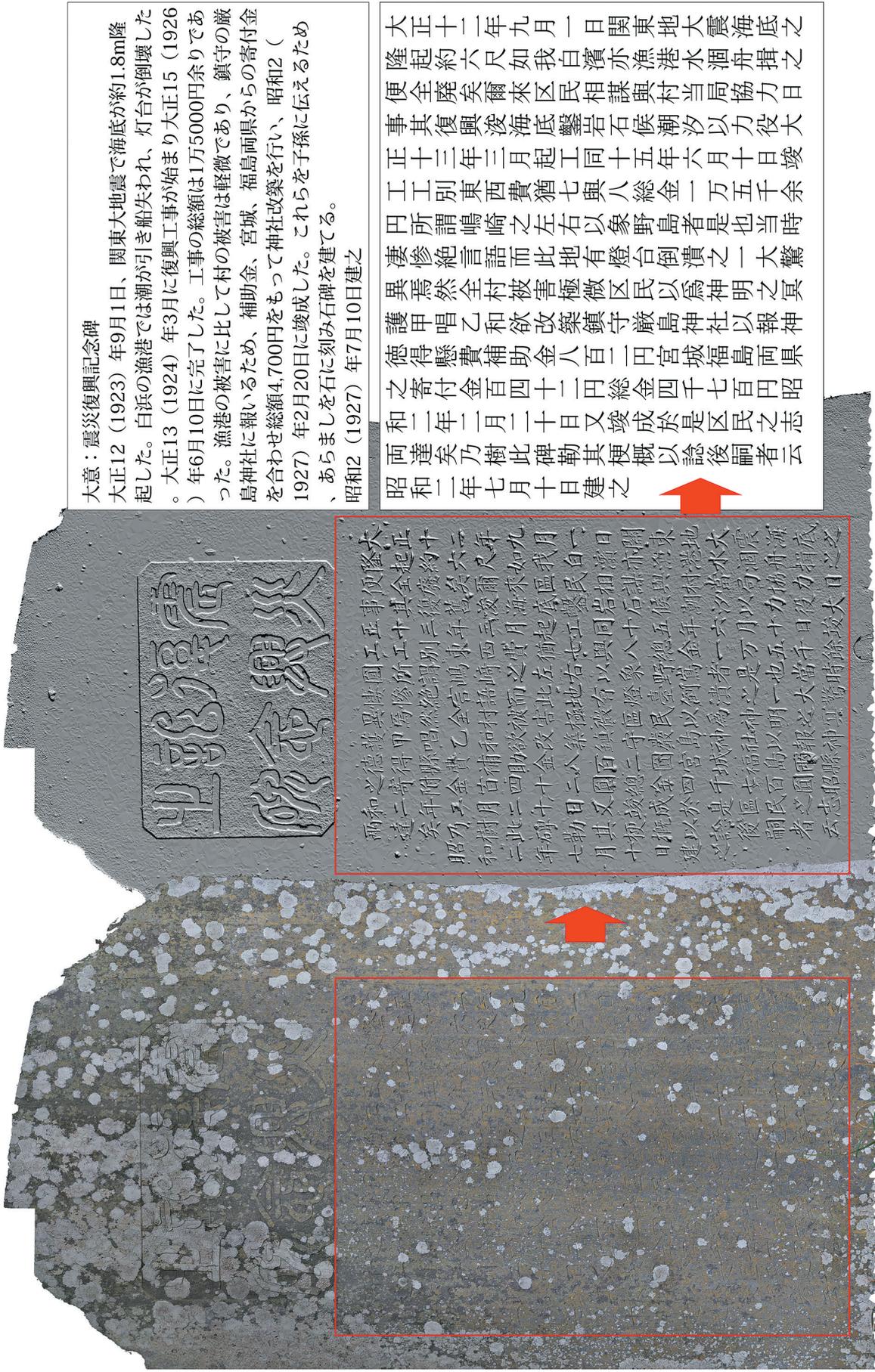


図 16 SfM によって推定された写真撮影位置と生成された石碑の三次元モデル

Fig. 16 Three-dimensional model of the stone monument with estimated camera positions by SfM.

注 1: 現在の野島崎は、地区名として野島と呼ばれていた。この地域では、孤島であった「野島」が 1703 年元禄地震によって隆起し、陸続きになったことが知られている。「岬になった」とは、「野島」が陸続きとなり、海に突き出た陸地の端となった、という意味である。



大意：震災復興記念碑

大正12（1923）年9月1日、関東大地震で海底が約1.8m隆起した。白浜の漁港では潮が引き船失われ、灯台が倒壊した。大正13（1924）年3月に復興工事が始まり大正15（1926）年6月10日に完了した。工事の総額は1万5000円余りであった。漁港の被害に比して村の被害は軽微であり、鎮守の厳島神社に報いるため、補助金、宮城、福島両県からの寄付金を合わせ総額4,700円をもって神社改築を行い、昭和2（1927）年2月20日に竣成した。これらを子孫に伝えるため、あらましを石に刻み石碑を建てる。  
昭和2（1927）年7月10日建之

大正十二年九月一日関東地大震海底之隆起約六尺如我白濱亦漁港水涸舟楫之便全廢矣爾來區民相謀與村当局協力日事其復興浚海底鑿岩石候潮汐以力役大正十三年三月起工同十五年六月十日竣工工別東西費猶七與八總金一万五千余円所謂嶋崎之左右以象野島者是也當時凄慘絕言語而此地有燈台倒潰之一大驚異焉然全村被害極微區民以為神明之冥護甲唱乙和欲改築鎮守嚴島神社以報神德得懸費補助金八百二円宮城福島兩縣之寄付金百四十二円總金四千七百円昭和二年二月二十日又竣成於是區民之志兩達矣乃樹此碑勒其梗概以諭後嗣者云  
昭和二年七月十日建之

大正十二年九月一日  
隆起約六尺如我白濱亦  
漁港水涸舟楫之便全廢  
矣爾來區民相謀與村當  
局協力日事其復興浚海  
底鑿岩石候潮汐以力役  
大正十三年三月起工同  
十五年六月十日竣工工  
別東西費猶七與八總金  
一万五千余円所謂嶋崎  
之左右以象野島者是也  
當時凄慘絕言語而此地  
有燈台倒潰之一大驚異  
焉然全村被害極微區民  
以為神明之冥護甲唱乙  
和欲改築鎮守嚴島神社  
以報神德得懸費補助金  
八百二円宮城福島兩縣  
之寄付金百四十二円總  
金四千七百円昭和二年  
二月二十日又竣成於是  
區民之志兩達矣乃樹此  
碑勒其梗概以諭後嗣者  
云

図 17 左：石碑表面の状態，中：三次元モデルを陰影処理した状態，右：判読した文字列，およびその大意  
Fig. 17 Left: Negative relief of the stone surface, Center: Shaded relief of the three-dimensional model, Right: Deciphered characters and the capitulation.

### 5.2.2 狛犬石像の三次元モデリング

この石像は、前項の石碑が建つ巖島神社の拝殿前、右手にある呷(うん)型の狛犬である。設置時代は不詳であるが、東北地方太平洋沿岸の200社を超える神社調査の知見から、少なくとも明治時代よりは古く、神社への奉納物が多く残る江戸時代中期以降の作と推定される。狛犬のサイズは鎮座する足元から東部までの高さが約70cmである。この石像にカメラを向け70cm程の距離を保ちながら、螺旋を描くように頭部から足元にかけて133枚の写真を撮影した。

図18は対象とした狛犬石像とその周辺の様子である。図19にはSfMで生成した三次元モデルのワイヤーフレームと、推定された撮影位置を示す。こ



図18 千葉県南房総市白浜町白浜にある巖島神社境内に建つ時代未詳の呷(うん)型狛犬石像

Fig. 18 Koma-inu, stone figure built on grounds of Itsukushima Shrine in Shirahama, Minami-bousuo City, Chiba Prefecture.

の図化から、左右の前足と胴体とが完全に区別されてモデリングされていることがわかる。また石像表面の複雑な凹凸も再現している。図20はモデルにテクスチャーを貼り付けた状態である。テクスチャーは、撮影した写真画像からモザイク処理されたものである。テクスチャーを貼ると非常にリアルな表現となり、見かけ上は、ほぼ実物に近い立体物に見える。これらのことから、SfMでは穴のある立体物や複雑な表面形状であっても、非常にリアルに再現できることが示された。



図20 SfMで生成した三次元モデルにテクスチャーを貼り付けた状態

Fig. 20 Textured three-dimensional model.

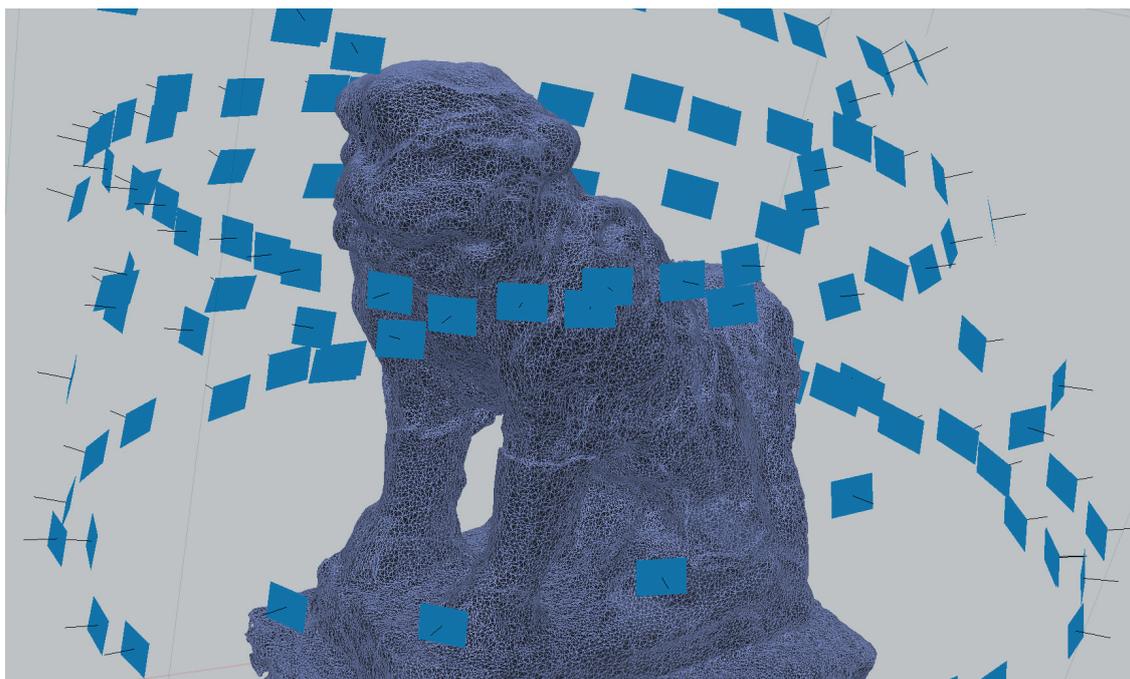


図19 SfMで生成した三次元モデルのワイヤーフレームと推定された撮影位置

Fig. 19 Wireframe of the three-dimensional model generated by SfM with estimated camera positions.

## 6. SfM で立体モデルを作成するためのノウハウ

SfM に関連する各種ライブラリが統合されたソフトウェアでは、ソフトウェアのワークフローに沿って処理するだけで、それなりの立体モデルを生成することができる場合が多い。その反面、処理に失敗する場合や、十分な計測精度が得られないなど、その原因を求めることが難しいケースもある。多くの場合、計算ソースとして用意する写真画像の品質を改善することで問題が解決する。以下に写真画像に求められる品質や撮影位置の決定手法について述べる。

### 6.1 デジタルカメラの選定

#### 6.1.1 撮像素子

デジタルカメラの撮像素子は、可能な限り大きく、画素数が多く、高感度耐性が高いものが良い。ただしデジタル一眼レフカメラは重量が重く、小型 UAV のペイロード（積載量）では搭載できない場合が多い。筆者らは小型、軽量で APS-C サイズの CMOS を搭載したリコー GR を採用し、良好な結果を得ている。ローパスフィルター（LPF）の影響については検証を行っていない。また、UAV に搭載する場合、CMOS ではローリングシャッター（ジェローエフェクトとも）現象が生じるため、カメラマウントにピカベイやジンバルなどの対策部品が必要となる。撮像素子が CCD の場合にはローリングシャッター現象は生じないが、スミアによって水面に反射する太陽などの点光源から直線状の白飛びが生じる場合があることに留意が必要である。

#### 6.1.2 レンズ

レンズの画角は、適度な広角（27～35 mm 程度）で、周辺歪みの少ないものが良い。170 度近い画角を持つアクションカメラなどのレンズの場合、SfM による自動的なレンズ歪み補正処理によって周辺部の画像が切り落とされ、実際に計算に使えるのは画像の中央部、面積にして半分程度となり、さらに解像度も低下する。したがって、超広角レンズで撮影した写真画像は SfM による処理には不向きといえる（図 21）。f 値に関する検証は行っていないが、垂直写真にせよ小型の対象物にせよ、画像全体が被写界深度領域に入るように絞り込む必要があるため、解放 f 値の明るさはさほど重要ではないと考える。

#### 6.1.3 画像記録フォーマット

RAW 画像を記録できるカメラシステムが良い。デジタルカメラで一般的な Jpeg フォーマットは



図 21 上：アクションカメラ（GP2）で撮影した画角 170 度の画像，下：広角補正された画像

Fig. 21 Top: Photograph of 170° field of view taken by GoPro2, Bottom: Undistorted photograph.

RGB 各色 8bit、各 256 の階調を持つ。しかし、例えば稜線より上の空と稜線以下の影部分の明るさが極端に異なるシーンなどでは、8 bit データの 256 階調だけでは白飛び、黒潰れる場合がある。RAW データの場合、RGB 各色 12～16 bit、各 4,096～65,536 の階調を持つため、撮影後に色が潰れた部分を再現できる可能性が高くなる（図 22、図 23）。

#### 6.1.4 インターバル撮影機能

デジタルカメラを小型 UAV に搭載する際、UAV に自動シャッターユニットが無い場合はインターバル撮影（タイムラプス撮影）機能が必要となる。貴重なフライト時間を有効に使うため、1 秒インターバル撮影が選択できると良い。短周期でインターバル撮影を行う場合、SD カードなどの記録メディアの書き込み速度によっては記録が間に合わないことがある。本番フライト前に連続記録ができるかどうか、実機で確認をする必要がある。



図 22 上：画像の一部が白飛びした JPEG 画像，下：RAW データから白飛びを復元した画像  
 Fig. 22 Top: JPEG image showing the problem of white jump, Bottom: Developed photograph modified by RAW.

### 6.1.5 その他

UAV で撮影する場合、万が一墜落して機体を失った際の損害を最小限にするため、フライトごとに記録メディアを交換したほうがよい。複数の高速な小容量の記録メディアを用意する。

### 6.2 写真画質と撮影枚数

SfM の計算ソースはいうまでもなく写真画像である。したがって、写真に写っていないものや、撮影枚数が不十分な対象物について立体モデルを生成することは不可能である。ここでは、SfM 処理に用いる写真を撮影する際の画質と撮影枚数について述べる。

#### 6.2.1 階調

画像の明部（ハイライト）が白飛びしていないこと（図 22）、暗部（シャドウ）が黒潰れしていないこと（図 23）が重要である。階調が失われた状態では撮影対



図 23 上：画像の一部が黒潰れした JPEG 画像，下：RAW データから黒潰れを復元した画像  
 Fig. 23 Top: JPEG showing the problem of black crushing, Bottom: Developed photograph modified by RAW.

象のテクスチャーを表現できないため、モデル作成に問題が生じる。

#### 6.2.2 色、ホワイトバランス

長時間の撮影により撮影地域周辺の明るさが変わる場合、あるいは撮影日や照明条件が異なる場合、撮影画像全体で色やホワイトバランスにばらつきが生じる。この場合、SfM で処理を行う前にホワイトバランスを調整するか、RAW データで全体のホワイトバランスを整えたほうがよいだろう。

#### 6.2.3 解像度

解像度は有効撮影画素数とは異なり、実際の撮影画像がどの程度、細部を表現できているかという指標である。カメラ機種によっては、コントラストを高めて見目を鮮やかに見せるため、あるいは高感度特性を上げるためなどの様々な理由で、解像度を犠牲にした画像が撮影される場合がある（図 24）。技術的に検証する際には、ISO 12233 のテストチャート結果が参考になる。図 25 に、画像の高さ 50 cm となるように印刷した ISO 12233 テストチャートを 2.5 m 離れた位置から撮影した結果を示す。チャー

トの中央下部にある垂直の縞模様(赤四角)で確認すると、GR(上)では5と6の間まで、GP3(中)およびGP2(下)では、ともに1と2の間まで縞模様の間隔が撮影できていることが判別できる。

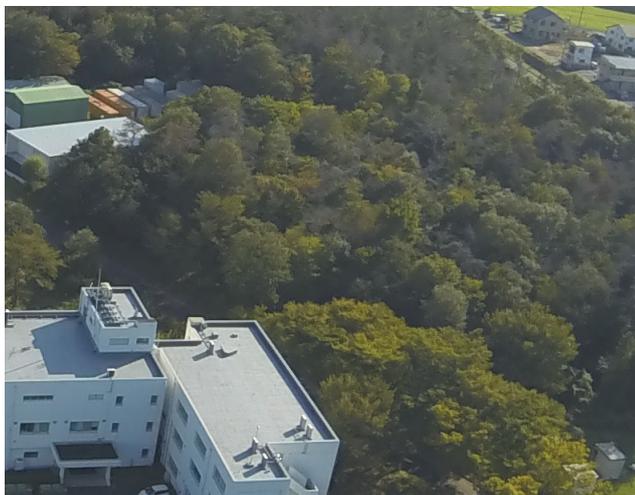
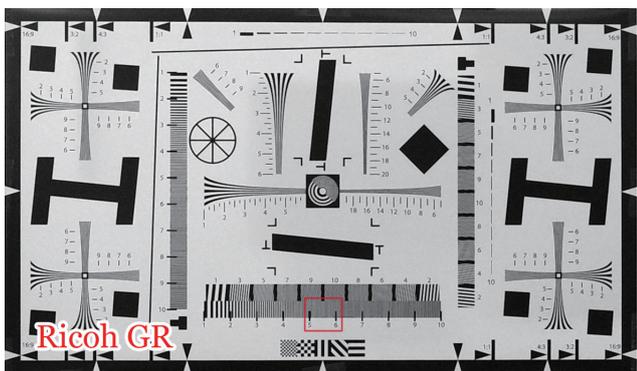
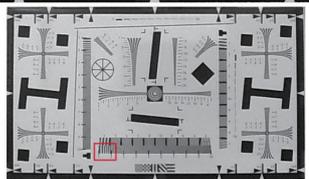


図 24 テクスチャーが不鮮明で解像度が悪い JPEG 画像の例(GP3 で撮影, 等倍表示)

Fig. 24 Example of wrong resolution (taken by GoPro3, Display in actual pixels).



Go Pro 3



Go Pro 2

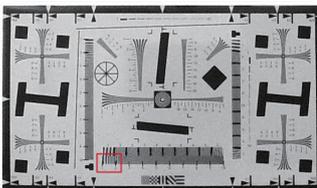


図 25 ISO 12233 テストチャートによる撮影画像の解像度テスト(上: GR, 中: GP3, 下 GP2, 全てピクセル等倍表示)

Fig. 25 Examination of resolution by ISO 12233 Test Chart (Top: GR, Middle: GoPro3, Bottom: GoPro2, all images are displayed in actual pixels).

## 6.2.4 ノイズ, プレ

写真画像中のノイズには、ISO 感度を上げた際の増感ノイズと、Jpeg の圧縮ノイズとの二種類がある(図 26)。前者は、高感度耐性の高い大型撮像素子を使用すること、後者は Jpeg の圧縮度を下げる、あるいは RAW データ等を使用するなどで回避できる。



図 26 ISO 増感ノイズおよび JPEG 圧縮ノイズが目立つ画像の例(GP2 で撮影, 等倍表示)

Fig. 26 Example of wrong photograph with ISO sensitizing and mosquito noise (taken by GoPro2, display in actual pixels).

## 6.2.5 撮影枚数

いまだ一定の知見を得ていないが、以下の点について考慮する必要がある。

### 6.2.5.1 撮影枚数の決め方

地形を一定のオーバーラップ率で撮影した場合、カメラの画角と植生の高さによってはモデル化した地形表面が写真に写らない可能性がある(図 27)。撮影高度が低い場合は特に注意が必要である。

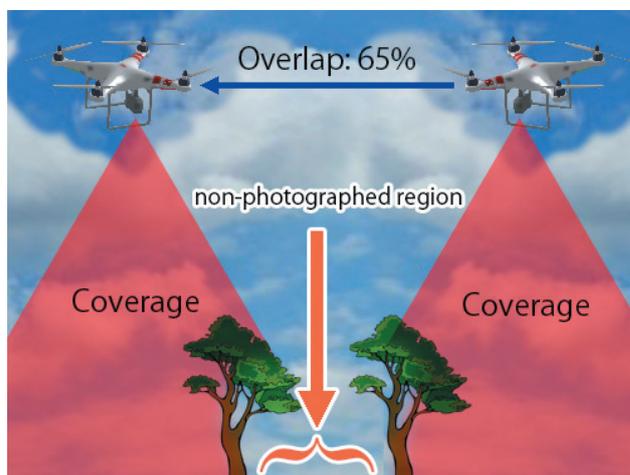


図 27 一定オーバーラップ率の撮影で不可視領域が生じる事例

Fig. 27 Non-photographed region occurs in case of an sUAV with constant overlap.

また、立体モデルの構築、つまり画像の視差の計算には最低でも2枚の写真が必要だが、対象物の凹部の内側の形状を十分に再現するためには、2枚の写真では情報が足りないことがある。撮影対象が近ければ近いほど、表現したい対象物の凹部が深ければ深いほど、部分的にオーバーラップ率を高くする必要がある。

### 6.2.5.2 撮影位置の決め方

定位置で方向だけを変えて撮影してはならない(図28)。そのような写真画像では、視差の計算ができないためモデルの作成は不可能である。

DSMなどの地形モデルを作成する場合は垂直写真を撮影する。最低限必要なオーバーラップ率は進行方向、横方向ともに65%以上だが、カメラブレ等により没写真が出るリスクや、より精密なモデルを構築することを考慮して、筆者らは常に1秒インターバルで撮影している。

石碑や建物、岩石露頭などの立体モデルを作成する場合は、対象物に対し平行移動で撮影する(図29)。あるいは、対象物を中心としてカメラを回して撮影する(図19)。

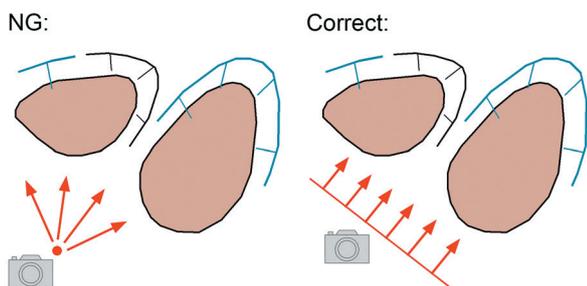


図28 撮影位置の決め方(左:悪い例, 右:正しい例)  
Fig. 28 Determination of handheld camera position.

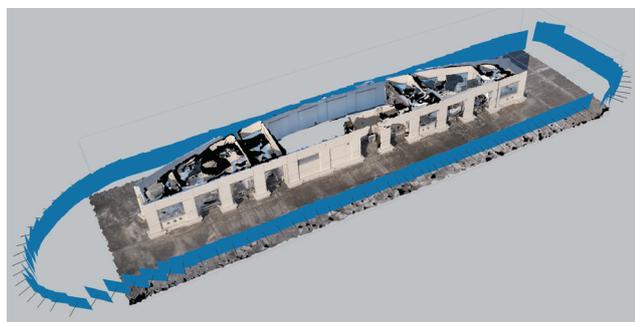


図29 建物の立体モデルを撮影する際のカメラ位置  
Fig. 29 Camera positions to capture images of a building.

## 6.3 レンズ歪み補正

写真測量などで内部標定とよばれるレンズ歪み補

正係数を求める。図30は液晶ディスプレイに表示した白黒チェッカーボードをGP2で撮影したオリジナル画像だが、画像周辺が大きく湾曲している。図31はレンズ歪み補正を行った画像である。画像の中央部、周辺部ともに湾曲が補正され、図中に赤線で示したように、幾何学模様の直線が復元されている。レンズ歪み補正係数は、カメラごと、レンズごとに異なるため、機種が同じであってもキャリブレーションファイルは共用できない。レンズ補正係数を求める際は、本番撮影時と同じf値に設定し、マクロモードの設定も本番環境に合わせて補正作業を行う。1つの三次元モデルのソースに複数のカメラで撮影した写真が混在する場合は、各写真に対し適切なレンズキャリブレーションファイルを指定する必要がある。

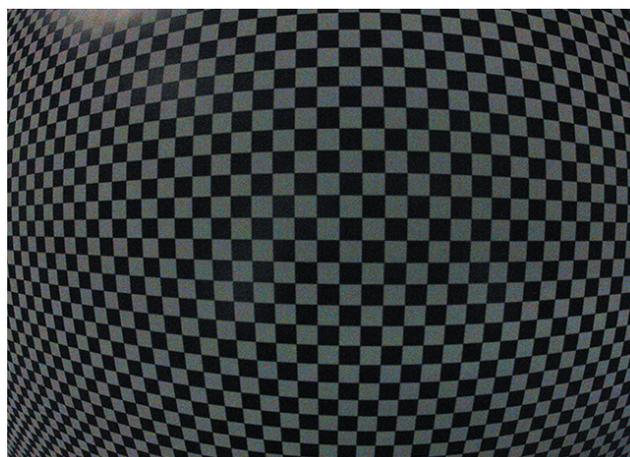


図30 液晶ディスプレイに表示したチェッカーボードをGP2で撮影したオリジナル画像  
Fig. 30 Photograph of checkerboard displayed on LCD taken by GoPro2.

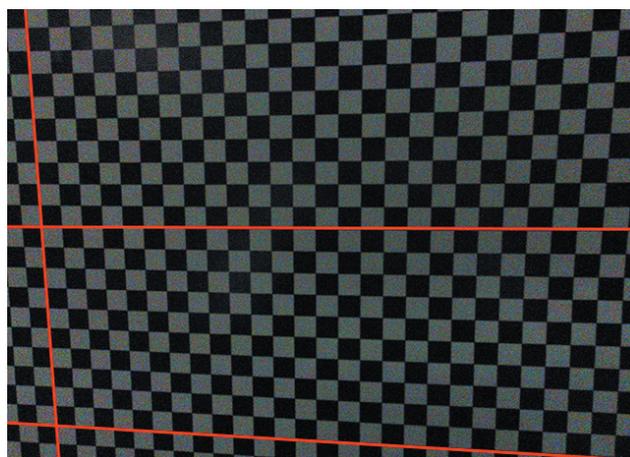


図31 歪み補正を行った画像(赤い線は湾曲が直線に補正されたことを示すガイド線)  
Fig. 31 Undistorted image by PhotoScan (red guide line shows a curvature modified to a straight line).

レンズ歪み補正によって焦点距離，主点位置のズレ，放射方向歪み，接線方向の歪みを補正パラメータとして求めることができる。レンズ歪み補正ソフトウェアには Agisoft 社が無償提供する「Lens」などがある。

#### 6.4 SfM 計算パラメータ

本節では SfM 処理を行う際の計算パラメータ，特に三次元モデルの精度を決める立体ポリゴン数の設定や，対象物に応じた計算モードの設定について述べる。

立体モデルを構成する三角形のポリゴンは Face などとよばれる。この数が多ければ多いほど精密な形状を再現できる。

計算モードについて，例えば PhotoScan の場合，二次元の写真画像から三次元モデルを再構築する Build Geometry プロセスでは，Height field (地形モデル) と Arbitrary (像などの立体物) との 2 つの計算モードがある。対象物に応じた計算モード (Object type) を選択する。

##### 6.4.1 計算モード : Height field

このモードは，DSM やオルソフォトなど，地形モデルを生成する場合に選択する。使用するソースは垂直写真や高位置から撮影した斜め写真を用いる。このモードの適切な Face の数は 100 万～1,000 万である。例えばこの値を 20 万とすると，地形モデルの場合は非常に粗いモデルとなり実用的ではない (図 32，伊豆大島 1976 年空中写真から生成)。図 33 は同地域を Face 数 1,000 万で生成したモデルであり，地表の微細な形状が再現されている。

##### 6.4.2 計算モード : Arbitrary

このモードは，例えば狛犬石像のような小規模かつ単独の三次元モデルに対して使用する (図 20)。その他，岩石，露頭，ノッチやオーバーハングした微地形，建物などが適用対象となる。広域の地形モデルは前項の Height field の適用対象であり，これらに対して Arbitrary を適用するメリットは無い。Arbitrary モードにおける適切な Face 数は 20 万～50 万程度である。このモードは，大量の物理メモリと CPU 時間を必要とするため，最終的に作成可能な三次元モデルの詳細度はハードウェアリソースに依存する。

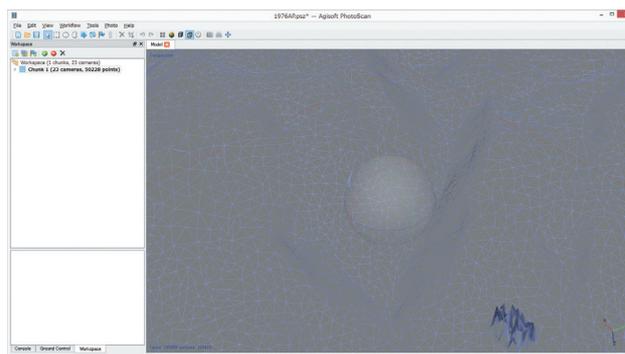


図 32 Face 数を 20 万で生成した三次元モデル (伊豆大島 1976 年カラー空中写真から SfM で生成)

Fig. 32 Terrestrial three-dimensional model generated in 200 thousand face count (SfM sources are aerial photographs taken in 1976).

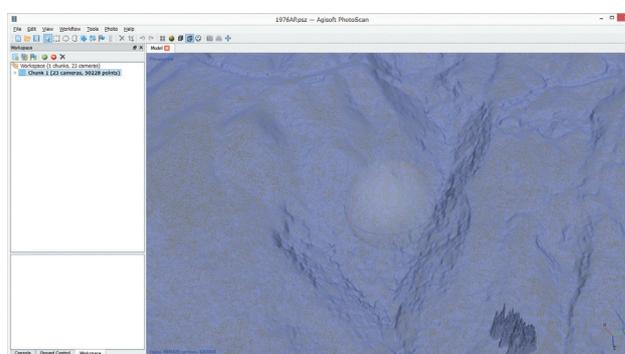


図 33 Face 数を 1,000 万で生成した三次元モデル (伊豆大島 1976 年カラー空中写真から SfM で生成)

Fig. 33 Terrestrial three-dimensional model generated in 10 million face count (SfM sources are aerial photographs taken in 1976).

#### 6.5 ハードウェア

立体モデルの精度を高めるには，大量の写真を用意し，多くの三次元ポリゴンを持つモデルを作成する必要がある。結局のところ，精密なモデルを現実的な計算時間内に生成するためには，大きな計算リソースが必要となる。

##### 6.5.1 CPU

SfM ソフトウェアのうち本稿で用いた PhotoScan および Visual SfM はマルチスレッド対応アプリケーションのため，OS が認識するすべての CPU コアを 100 % 使用して計算を行う (図 34)。CPU は，最新のアーキテクチャ，高いクロック速度，多くの物理コアを持つものが望ましい。ただし，後述の GPU を計算に利用する場合は，GPU ボード 1 基につき管理用の CPU 物理コアが 1 つ (Intel ハイパースレッディングが有効な場合は仮想コアを含め 2 つ) 必要となる。

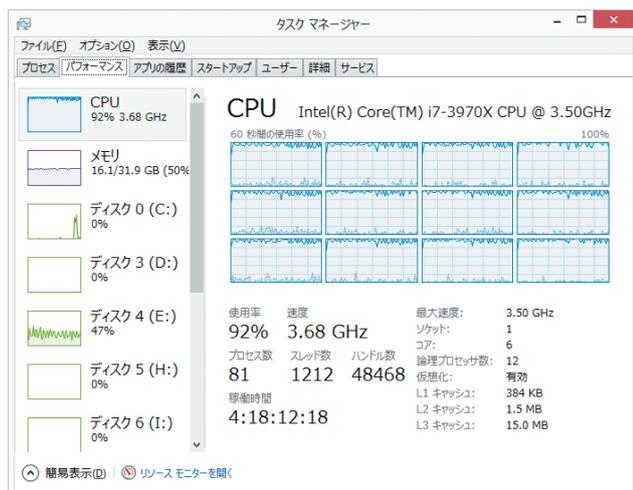


図 34 PhotoScan による CPU リソースの使用状況  
Fig. 34 CPU consumption by PhotoScan when in process.

### 6.5.2 CPU のハイパースレッディングの有効性

次の環境における実行速度のテストではハイパースレッディング (HT) 有効のほうが 20% 程度高速であった。ただし Intel Xeon CPU の場合、HT 無効のほうが高速という報告 (AgiSoft, 2013) もあるため、それぞれの環境でテストを行うべきであろう。

### 6.5.3 CPU のハイパースレッディングのテスト

CPU は Intel Core i7 Extreme 3970X (Sandy Bridge, 6 Cores, 3.5-4.0 GHz), 写真枚数は 62 枚の環境で処理にかかる時間を計測するテストを行った。

結果：ハイパースレッディング有効の場合

Align Photos: 434.439 sec. (19.8% 高速)

Build Geometry: 267.335 sec. (16.3% 高速)

Build Texture: 74.003 sec. (9.6% 低速)

結果：ハイパースレッディング無効の場合

Align Photos: 541.912 sec.

Build Geometry: 319.404 sec.

Build Texture: 67.549 sec.

### 6.5.4 GPU

SfM ソフトウェアのうち本稿で用いた PhotoScan および Visual SfM では OpenCL や CUDA に対応する GPU を計算リソースとして利用できる。GPU は、CPU (コア数 2 ~ 6 個) と比してコア数が非常に多い (例：nVidia GeForce GTX 680 の場合、GPU コアは 1,536 個、図 35) ため、科学技術計算のような単純計算では CPU の数倍から百数十倍のスピードで計算を行うことができる。次の環境におけるテストでは、GPU を有効にすることにより約 3 倍高速であっ



図 35 GPU コアの個数、および GPU 負荷 (赤字で強調表示、nVidia GeForce GTX 680 の例)

Fig. 35 GPU cores and loads in red characters (nVidia GeForce GTX 680).

た。ただし PhotoScan の場合、現状では GPU を計算に使える処理は Build Geometry の最初のステップ「Reconstruction Depth」のみである。

### 6.5.5 GPU 計算速度のテスト

GPU は nVidia GeForce GTX 680, CPU は Intel Core i7 Extreme 3970X (HT 有効) の環境で計算速度のテストを行った。

結果：GPU 有効の場合

Reconstruction Depth: 2h 02min 18 sec. (約 3 倍高速)

結果：GPU 無効の場合

Reconstruction Depth: 5h 53min 36 sec.

### 6.5.6 メモリ

三次元モデルの生成には大量のメモリを必要とする。例えば PhotoScan の場合、メモリ消費量は計算モードに依存する。地形モデルを生成する計算モードである Height field モードでは、1,200 万画素の写真画像を 200 枚使用し、オリジナルの写真画像と同等の解像度でモデルを生成した場合は約 13 GB の

メモリが必要となる。また、もう 1 つの計算モード Arbitrary モードでは、1,200 万画素の写真画像を 100 枚使用し、オリジナルの写真画像と同等の解像度でモデルを生成した場合は、48 ~ 144 GB のメモリが必要となる。解像度を 4 分の 1 に落とした場合でも、12 ~ 36 GB のメモリを消費する(図 36)。



図 36 物理メモリの使用状況(Arbitrary モードでの処理)  
Fig. 36 RAM consumption by PhotoScan in Arbitrary mode.

## 7. SfM の課題

### 7.1 地理座標系とローカル座標系の選択

地形モデルを作成する場合、3 点以上の GCP が必須となる。現地に GCP を設置する際、地理座標系を基準とするか、あるいは現地にて任意の原点を持つローカル座標系を設定するかを決定しなくてはならない。それぞれのメリット、デメリットを挙げる。

#### 7.1.1 地理座標系を基準とする場合

GCP に地理座標系、例えば WGS 1984 を基準とした GCP を設置することによって、生成した地形モデルを GIS などで即座に既存のデータとオーバーレイし、解析に用いることができる。しかし、例えば小型 UAV で対地 50 m の高度から GR で垂直写真を撮影した場合の地上解像度は約 1.3 cm/pixel だが、これに見合った精度で GCP の緯度、経度、標高を測定することは容易ではない。ハンディ GPS ロガーでは全く精度不足だが、RTK-GNSS などが利用できる環境と装備があれば、地理座標系を基準とした GCP の設置も可能であろう。あるいは、日本国内であれば地理院地図から取得した経緯度、標高値を GCP として活用できる地域もある。

#### 7.1.2 ローカル座標系を設定する場合

ローカル座標系とは、現場に独自の測量基準点を設置し、トータルステーションやオートレベルを用いて GCP 間の距離や位置測定を行った場合の座標系と定義する。この方式であれば通常、GCP 位置座標は数 cm 以内の誤差で測定できるため、小型 UAV による高解像度垂直写真の精度とも調和的である。ただし、そのままでは座標系が異なるため、生成した地形モデルと既存の地理空間情報とを GIS で同時に取り扱うことはできない。

## 7.2 精度検証

ソースの写真画像の解像度にもよるが、SfM で地形モデルを生成すると、0.2 ~ 1.0 m メッシュの DSM やオルソ画像を作成することができる。あるいは、石碑に刻まれた文字の数 mm の凹凸を精密に表現する立体モデルを生成できる。しかし、現状ではこれらの精度を合理的に検証する術はない。なぜなら、災害後の地形モデルであれば、モデル作成範囲内に水準点などの既知の点があるとは限らず、あるいは、斜面災害や断層変位などによって地形が変化している場合もある。また、石碑や露頭などの立体モデルであれば、精度の比較に耐えうる高精度なデータが存在しない。以上のように、精度検証が難しいことは課題である。今後、TLS (Terrestrial Laser Scanner) などを用いて、SfM とは異なるアルゴリズムで計測、生成した立体モデルと比較検証を行いたい。

### 7.3 地表面モデルの取得

SfM は写真画像をソースとするパッシブなモデル構築手法であるため、写真に写っていない情報についてはモデル化することができない。その点では、LiDAR のようにレーザを照射して測定するアクティブな手法に劣る。しかし、季節によって植生が疎で地表面が写真に写っている場合、いわゆる数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を生成することも可能と思われる。また、現状の SfM ソフトウェアでは単に三次元モデルを生成するだけであるが、いずれは、写真から得られた情報を分類することによって、植生、地表面、建物など、複数の属性を持った三次元モデルを生成できる可能性がある。

### 7.4 古い航空写真の取り扱い

RC-8 などのいわゆるアナログ航空カメラで撮影された過去の空中写真をソースとして SfM で三次元

モデルを生成する場合にいくつかの課題がある。通常、アナログ航空カメラで撮影された空中写真の場合、スキャニングを経てデジタル化される。そのため、画像には、カメラの歪みに加え、スキャニング時の歪み加わる。また、スキャナーを通してデジタル化するため、航空写真一枚ごとに主点位置をはじめとする内部標定要素が異なる。また、簡易な手法でレンズキャリブレーションデータを得ることが難しい。これらの事情により、スキャニングした航空写真を扱う場合は、次の注意が必要である。スキャニングは高性能な機器で画素ピッチ  $20\ \mu\text{m}$ 、1,270 dpi 以上の解像度で実施する。航空写真周辺の黒帯に刻まれた指標を使用して、正確に写真の中心点を求める。黒帯の4隅にある指標が画像データの4隅となるように画像を回転する。同じカメラで撮影された航空写真(撮影日、標定図、撮影機材が同一の写真)について、長辺、短辺のピクセルサイズをそろえる。SfMによる自動歪み補正の精度向上には多くの写真が必要であるため、SfM処理の際には、地形モデルを生成したいエリアよりも一回り以上広いエリアの空中写真を用意する。この方法では本質的な解決にはならないが、画像周辺部に偏在する歪みや位置精度低下を減じ、全体的な精度向上に資する。

## 7.5 作業の効率化：撮影計画と計算コスト

### 7.5.1 撮影計画

伊豆大島の斜面災害地において小型 UAV による垂直写真を撮影した際は、5 フライトで合計 578 枚の写真を撮影し、等高線間隔 0.5 m の精密地形図を作成することができた。しかし、この地形図を得るために適当な写真撮影の枚数や撮影コース設定、対地高度などの設定はオーバースペックであった可能性もある。不必要に処理する写真が多いと、撮影に時間がかかるだけでなく、立体モデル生成の計算が現実的な時間内に完了しないこともある。今後は、一定の精度を得るために必要な写真の地上解像度、撮影枚数、GCP 設置数について知見をまとめていく必要がある。

### 7.5.2 計算コスト

SfM は大量の高解像度写真を処理する必要がある。生成されるモデルの精度や、計算にかかる時間は、最終的には使用する計算機の能力に依存する。この技術を災害直後の即時的な情報収集等に適用する場合、撮影計画や三次元モデルの要求精度の最適

化などを通して、計算コストを低減する工夫が必要である。

ただし、コンピュータによる計算処理能力は、著しいスピードで向上している。現時点では計算コストの観点から処理が困難であっても、近い将来には実現できる可能性が高い。つまり、過去の災害時や平時に取得された膨大な数の動画、写真から防災研究に有用な情報を抽出したり、古い写真や動画などから当時の地形モデルを再現できる可能性は十分にある。平時から災害に関する各種情報をアーカイブすることには意義がある。

## 8. まとめ

### 8.1 SfM の有用性

ここまでの知見をもとに SfM の有用性をまとめる。災害調査において、航空機レーザ測量などの既存技術は高コストであり、逆に 2 万 5 千分の 1 地形図では低精度であった地理空間情報が、SfM と小型 UAV とを使用することによって、安全、簡便、低コストに、精密な三次元モデルと数 cm ~ 数 m の解像度を持つ DSM が生成できることが示された。また DSM をベースに、0.5 m オーダーの細密地形図やオルソフォトを得ることができた。次に、肉眼では判読に難儀するような古い石碑の表面を三次元モデリングし、陰影を生成することによって、石碑表面の風化や汚れの影響を取り除き、容易に判読できることが示された。脆弱な、あるいは貴重な歴史災害資料に対して、拓本などの資料を汚損する手法によらず、非接触の手法で文字列の判読や資料形状データの取得が可能となった。さらに、SfM は特殊な機材を必要とせず、ある程度高画質なデジタルカメラさえあれば誰でも実現可能な手法であることに着目したい。

### 8.2 まとめ

本稿では、SfM と小型 UAV、あるいは手持ちカメラによる写真撮影とによって、容易に高精度な三次元モデルを生成することができることを示した。また、生成した三次元モデルから DSM や陰影図を作成し、調査研究に活用できることを示した。GCP の設置と位置測定法、三次元モデルの精度検証手法、そして撮影計画の最適化や計算コストについて今後の検討課題とした。また計算能力の向上によって、リアルタイムの災害情報処理や、あるいは過去の災

害情報アーカイブから有用な情報を抽出できる可能性について示唆した。

SfM は今後、自然災害や地形調査、歴史災害資料調査等において革新的なツールとして活用されるものと考えられる。

## 謝辞

本稿の執筆にあたって低空空撮技術活用研究会による第一回研究会(平成 25 年 8 月開催, 岐阜県本巣市, 根尾谷地震断層)および第二回研究会(平成 25 年 12 月開催, 茨城県つくば市, 防災科学技術研究所)での議論を参考にした。記して関係者に謝意を表します。また、匿名の読者のコメントにより本論文の質が向上しました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Tomasi, C. and Kanade, T. (1992): Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. *International Journal of Computer Vision*, **9-2**, 137-154.
- 2) Snavely, N., Seitz, M. S., and Szeliski, R. (2007): Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, **80-2**, 189-210.
- 3) Lowe, G. D. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, **60-2**, 91-110.
- 4) 満上育久 (2011): 私の研究開発ツール Bundler: Structure from Motion for Unordered Image

Collections. *映像情報メディア学会誌*, **53**, 479-482.

- 5) 黄 英傑・坂本拓之・西田広文 (1998): 多視点画像からの 3 次元情報抽出. *RICOH TECHNICAL REPORT*, **24**, 26-34.
- 6) 川西亮輔・山下 淳・金子 透 (2008): 全方位画像列を用いた 3 次元環境モデル生成. *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集*, 2P2-C13, 1-4.
- 7) Wu, C. (2013): Towards Linear-time Incremental Structure from Motion. in *International Conference on 3D Vision*.
- 8) Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., and Seitz, S. M. (2011): Multicore Bundle Adjustment. in *CVPR 2011*.
- 9) Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2010): Towards Internet-scale Multi-view Stereo. In *Computer Vision and Pattern Recognition*.
- 10) Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010): Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **32-8**, 1362-1376.
- 11) Agisoft (2013): Strange workstations testing results. (<http://www.agisoft.ru/forum/index.php?topic=1330>, December 6, 2013)

(2013 年 12 月 11 日原稿受付,  
2014 年 1 月 20 日改稿受付,  
2014 年 2 月 3 日原稿受理)

## 要 旨

画像処理をベースとした形状復元技術および撮影位置推定技術である SfM を災害情報収集と調査観測に活用するための試行的な研究を行った。小型 UAV と手持ちカメラで写真画像を撮影し SfM で三次元モデルを作成した。その結果、斜面災害発生地域において、0.5 m 間隔の細密地形図や位置誤差 1 m 程度のオルソフォトを生成することができた。また歴史災害資料である 1927 年に建立された石碑では、その文字を明瞭に復元、判読することができた。SfM と小型 UAV によって、安全、簡便、低コストに、数 cm 級の精度を持つ三次元地形モデルの生成や、歴史災害資料の判読ができることを示した。今後、これらの技術は自然災害や地形調査、歴史災害の資料調査等において革新的なツールとして活用されることが考えられる。

**キーワード** : Structure from Motion (SfM), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Surface Model (DSM), 細密地形図, 歴史資料