小型無人航空機を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による 地形情報の空中計測

早川裕弼*・小花和宏**

要 旨

デジタルカメラを搭載した小型無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle, 通称ドローン, または UAS: Unmanned Aircraft System) の普及により, 空中からの多視点画像の撮影が容易になった。加えて, 多数のステレオペア画像から撮影対象の 3 次元モデルを生成する SfM 多視点ステレオ写真測量 (Structure-from-Motion Multi-View Stereo Photogrammetry, 以下 SfM) の手法開発も進んでおり, これらが組み合わさって, 空中撮影画像の SfM による地形・地物計測がさまざまな分野で広まっている。本稿では, まずプラットフォームとしての UAS と, 地形計測手法としての SfM をそれぞれ概説し, 次に UAS を用いた空中撮影による SfM の地形計測適用事例をいくつか紹介する。UAS-SfM 手法の低価格化と簡素化により, 地形や地物を対象とした空中計測に基づく迅速・高精細な 3 次元データの取得や, 形状変化の経時的追跡を, 研究者や実務者など誰もが自ら実施することができるようになってきており, 各種物理探査の基礎情報としても有効活用されることが期待される。一方, 対象とする現象のスケールとその目的により, 適切な解像度および精度をよく検討したうえで, こうした地形計測を実施することが望まれる。

キーワード: 小型無人航空機システム (ドローン)・SfM 多視点ステレオ写真測量・高精細地形情報・3 次元点群データ・デジタル標高モデル

1. はじめに

近年さまざまな分野において, 各種データの「高解像度化」が進んでいる。市販の 4K テレビや 3D 映画, ハイレゾ音源などが生活に身近な例として挙げられるが, 地球科学の関連分野でも, たとえば気象観測における高精細レーダーデータを用いた高解像度降水ナウキャストの提供や (技術開発推進本部豪雨監視・予測技術開発部会運動学的予測グループ, 2014), 地盤情報データベースの解析に基づく高い空間密度での表層地質と堆積構造の解析 (伊藤ほか, 2015), また天体観測における次世代超大型望遠鏡 TMT (Thirty Meter Telescope) の開発 (秋山・大野, 2015) などが行われてきている。

地表・地形の観測に関しても, 最近数十年でより高

解像度な画像データや地形データが基礎情報として利用可能となってきた。地表の画像データに関しては, 1970 年代の Landsat シリーズに始まり, IKONOS, ALOS や WorldView といった衛星画像の高解像度化が進む一方 (日本リモートセンシング学会, 2011), 半世紀以上前から継続的に撮影され続けている空中写真の進歩もめざましい。たとえば, 第二次世界大戦直後に全国的に行われた米国軍による空中撮影は, モノクロで地上分解能も 1 m 程度と低いながらも, 当時の地表環境をあらわす貴重な記録となっている。その後, 国土地理院によるフィルムカメラによる空中写真の撮影が継続的に行われ, そのアーカイブはデジタル化されて, 現在も容易に利用可能となっている (日本地図センター, 2005; 西野ほか, 2007)。近年は 2 億画素といった高解像度デジタルカメラが空中写真の取得に使わ

2016 年 5 月 6 日原稿受付; 2016 年 6 月 22 日受理

* 東京大学空間情報科学研究センター

〒277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

** 株式会社ビジョンテック

〒305-0045 茨城県つくば市梅園 2-1-16

公益社団法人物理探査学会主催 平成 27 年度ワンデー
セミナー「空からの物理探査」にて発表

れており、その地上分解能は数 cm から数 10 cm 相当となっている (吉高神・田村, 2008)。

地形データに関しては、全球をカバーするデジタル標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) として、USGS (United States Geological Survey, アメリカ地質調査所) により 1996 年に完成された GTOPO30 の解像度が約 1 km (30 秒) であったのに対し、NASA (アメリカ航空宇宙局) による 2000 年のスペースシャトルに搭載された合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) によるレーダーセンシングに基づく SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) は、90 m (3 秒) あるいは 30 m (1 秒) の解像度をもつ (Farr et al., 2007)。また、経済産業省による光学センサの衛星画像から生成された ASTER GDEM の解像度は 30 m であり、これらは広域の地形解析によく使われてきた (Hayakawa et al., 2008; Tachikawa et al., 2011)。より最近のものでは、DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, ドイツ宇宙センター) による X バンド SAR を用いた TanDEM-X の 12 m 解像度 DEM が整備されつつある (Krieger et al., 2007)。また、地域レベルの高解像度地形データの取得手法として、空中写真を用いた写真測量による地形測量が広く行われ、地形図の作成などに活用されてきたが (林・小口, 2002)、近年では航空レーザ測量 (Airborne Laser Scanning, ALS または Airborne Light Detection and Ranging, 航空 Lidar) によ

る 0.5~2 m 解像度の DEM もより広い範囲で整備されてきている (佐藤ほか, 2010; Roering et al., 2013)。加えて、より局所的な地形測量方法として高精度 GNSS (Global Navigation Satellite System) やレーザ距離計、地上レーザ測量 (TLS: Terrestrial Laser Scanning) などを用いた地形計測手法も定着してきており、現場における地形測量を実施するための様々な選択肢が提供されている (Fig. 1) (Krishnan, et al., 2011; Oguchi et al., 2011; Tarolli, 2014; Passalacqua et al., 2014, 2015; 早川・小口, 2016)。

一方、空間解像度が高まるに従って、観測の頻度や観測にかかるコストが上がり、より高精細・高頻度な地形計測やモニタリングが困難となる問題もあった (例えば, Westoby et al., 2012)。また、高精度 GNSS や TLS といった地上からの計測では、アクセス困難な地域で発生する現象に対しては困難が伴われることもある。

こうした背景のもと、SfM に基づく地形測量手法が、2010 年以降の数年間で急速に広まってきた (Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Abellan et al., 2016; 早川ほか, 2016)。SfM とは、従来の少数のステレオペア画像を用いた写真測量 (例えば, 林・小口, 2002) の発展形とも捉えられ、多数の視点をもつステレオペア画像から、写真の撮影位置と対象物の 3 次元形状とを自動的に復元し、対象の詳細な 3 次元形状データをローコストで得ることのできる技術である (満上, 2011)。これに加えて、小型無人航空機 (UAV) が普及し、これに搭載されたデジタルカメラによる空中からの撮影視点が容易に得られるようになった。UAV を用いた画像撮影システムは UAS と呼ばれ、SfM のための多視点画像の取得を容易にした。このことから、SfM による地形測量は地形学をはじめとするさまざまな地球科学分野において普及してきた (Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; 内山ほか, 2014; 小花和ほか, 2014a, 2014b; Micheletti et al., 2015a, 2015b; 早川ほか, 2016)。後述のように、プラットフォームの自由度が高いことから、SfM の適用柔軟性は高く、これによる地形測量がカバーできる空間・時間スケールの範囲も幅広い (Fig. 1)。本稿では、まずプラットフォームとしての UAS の概要と、SfM の手法的な概要をまとめ、次に UAS を用いた空中撮影による SfM の適用事例をいくつか紹介する。UAS と SfM の双方を用いた地形計測手法を、ここでは UAS-SfM とよぶ (Fig. 2)。

Fig. 1. Coverage of spatial and time scales by various methods for topographic measurements (modified after Heritage and Large, 2009). SfM-MVS photogrammetry covers almost entire space of these methods.

Fig. 2. General workflow of UAS-based photo acquisition and SfM-MVS photogrammetry (UAS-SfM).

2. SfM のための写真撮影に用いられるプラットフォーム

2.1 UAS を用いた低空空撮

地形を対象とする場合、比較的広範囲の情報が必要で、かつ地表面に正対する上空からの視点が得られるといった理由から、従来からも人工衛星や有人航空機などから撮影された衛星画像や空中写真が一般に利用

されてきた。一方、より低コストで簡易な操作が可能な小型 UAS、とくに GNSS や磁気コンパス、気圧高度計といった各種センサによる位置制御と自律航行システムを搭載した、複数のプロペラをもつ電動マルチローターヘリコプター（マルチコプター）の高性能化と低価格化が近年急速に進み、またデジタルカメラの小型化・高性能化も相まって、小型 UAS を用いた低空空撮画像の取得が容易になった（Westoby et al. 2012; Colomina and Molina, 2014）。マルチコプターは従来の

シングルローターヘリコプターに比べ、複数のローターによる安定したホバリングや、コントローラと本体との電波通信性能の向上、本体の自動帰還や障害物回避など、操作性が大きく向上している。また、従来も風や気球、あるいは大型の UAS といったプラットフォームが利用されることもあったが、いずれも操作の困難さやコストの点で、調査研究への利用は限定的であった。

UAS には小型のデジタルカメラが搭載され、これを用いた低空（一般的には対地高度 30~150 m）からの空中撮影は、地上からの視点では取得困難な、地表面に正対した画像を広範囲にわたって得ることができる。これは、有人航空機から得られる空中写真に比べれば範囲は狭いものの、より高い分解能をもち得るため、地形計測のみならず、植生や地質など土地被覆の解析にも有用である。また、可視光領域を撮影する一般的なデジタルカメラに限らず、赤外線カメラや、大気観測用のセンサなど多様なセンサが搭載可能であり、最近では UAS にも搭載可能な超小型の微小電気機械式重力計なども開発されている (Middlemiss et al., 2016)。

2.2 その他のプラットフォーム

一方、数 10 m から数 100 m 以内といった比較的狭い範囲を対象とする場合には、手持ちカメラや、数 m 長のポールにカメラを取り付けて撮影する方法も有効である (早川ほか, 2015b)。また、浅水域において潜水者または自立型無人潜水機 (AUV: Automated Underwater Vehicle) により撮影された水底写真から水底地形を復元することや、顕微鏡写真などを用いた微細形状の取得も可能である。一方、過去に撮影された有人航空機による空中写真も、SfM の素材として有効な資源であり、たとえば火山地形の変化など、長期間かつ広範囲における変動の追跡などに有用である (Gomez et al., 2015)。

3. SfM の概要

3.1 SfM の発展

従来の写真測量においては、使用するカメラの厳密なキャリブレーションや、ステレオペアをなす相対画像の対応点を手動で抽出するといった作業手順が、成果物の質を決める重要な要素となっていた (Brown, 1966, 1971)。しかしこれらの手順には、相当の手間と時間がかかるのが一般的であり、高品質なデータを得るためには技術的にも高い熟練度が要求された。そのため、写真測量を実施することは、多くの人にとって困難を伴うものであった。

一方、複数枚のステレオペア画像から、特徴点の自動抽出と自動対応、さらには画像の歪み補正なども自動的に可能なアルゴリズムが、コンピュータビジョン分野において開発されてきた。”Structure from Motion”は、こうしたアルゴリズムを用いて撮影画像の位置、および撮影対象物の 3 次元形状を自動的に復元する技術であり、数 10 年前から開発が進められてきている (Tomasi and Kanade, 1992; Lowe, 1999)。加えて、近年開発が進んだ MVS (Multi-View Stereo) では、SfM で復元された撮影画像の位置と対象物との配置関係を利用し、写真測量の原理でさらに高密度な対応点を生成する (Furukawa et al., 2010)。こうした SfM と MVS の組み合わせにより、従来の写真測量においては手動で行われていた作業手順の大部分が自動化された。加えて、これらのアルゴリズムがフリーまたは安価な商用ソフトウェアとして提供されるようになり、より多くの研究者が自ら写真測量を実施する機会をもたらし。代表的なソフトウェアとしては、それぞれ SfM, MVS のフリー・オープンソースソフトウェアである Bundler と PMVS/CMVS (Snavely et al., 2007; Furukawa et al., 2010)、またそれらのワークフローを一括した VisualSfM (Wu et al., 2011)、商用ソフトウェアとしては Agisoft 社 PhotoScan や Eos Systems 社 PhotoModeler, Pix4D 社 Pix4Dmapper などがある。さらに、写真測量に利用するデジタルカメラや、データ処理を行うコンピュータの高性能化と低価格化が、SfM の実行容易性を後押ししている。とくに、SfM では従来の写真測量に比べてより多数の画像を使用することが多いが、これらのデータ処理も、一般的なスペックのデジタルカメラやコンピュータでも実行可能となっている。ただし、数 10 枚から数 1000 枚といった多数の画像を処理するためには、十分な CPU 速度やメモリ、またグラフィック処理能力をもったコンピュータを用いることが求められる (内山ほか, 2014)。

3.2 SfM によるデータ取得と解析

SfM により得られるデータの種類の種類は、3 次元の点群データとメッシュモデル (TIN: Triangular Irregular Network)、および、2 次元平面に投影されたデジタル標高モデル (DEM) とオルソ補正画像、の主に 4 種類となる。点群データは、3 次元位置情報 (XYZ) に加えて、写真画像から得られる色情報 (RGB) をもつ。DEM やオルソ補正画像は、GIS (Geographical Information System) やリモートセンシングソフトウェアによる解析処理が容易に適用できる。ただし、SfM-MVS で取得できる DEM は、画像に写ったものが対象となるため、多くの場合地表と地物の表面をあら

わす DSM (Digital Surface Model) である。すなわち、密な植生に覆われた下の地面をあらわす DTM (Digital Terrain Model) は取得困難なことが多い。

DEM を用いた地形解析においては、断面図の抽出や、起伏の陰影、斜面勾配といった基礎的な指標の算出や、地表面の微細な凹凸を示す表面粗度 (roughness) といった各種の地形指標が得られる (Smith, 2014)。詳細に表現された形状にもとづく地形区分にも有効利用できる (Passalacqua et al., 2015)。また、オルソ補正画像を用いて、最尤法による画像分類や、オブジェクトベースの自動分類といったリモートセンシングで一般的な画像解析手法により、土地被覆の分類や植生の活動度評価、堆積物の粒径区分などが可能である (de Hass et al., 2014)。また、複数時期において取得されたデータを比較することで、従来の等高線由来の DEM や航空レーザによる DEM、空中写真などを用いた成果にくらべ、より高解像度かつ高頻度に、微細な変化の抽出や定量化が可能である (内山ほか, 2014)。この際、各時期のデータの正確な位置合わせが、変化を検出するために重要であり、取得データの誤差やその軽減手法の開発も課題となっている (Stöcker et al., 2015)。

一方、複雑な形状をもつ対象は、2 次元に投影するとその形状情報が大きく減ってしまう。そこで、点群またはメッシュモデルといった 3 次元データをその状態のまま解析する手法も提案されてきている。点群を用いた断面の抽出や (小花和ほか, 2014a)、点群どうしの距離の算出 (Lague et al., 2013)、点の 3 次元位置に基づく形状区分 (Brodu and Lague, 2012) 等である。点群やメッシュデータを扱う代表的なフリーソフトウェアとして、Meshlab (Cignoni et al., 2008) や CloudCompare (Girardeau-Montaut et al., 2005) などがある。

3.3 SfM のための画像撮影方法

SfM を実施するために、適切な写真撮影の方法を以下に概観する。まず、使用するデジタルカメラに関して、十分な高解像度画像を得るため、数 100 万画素を超えるセンサをもつものが望ましい。レンズについては、魚眼レンズなど超広角で歪曲するものは誤差が大きくなるために避け、なるべく焦点距離が固定されたもので、あるいは焦点距離が可変なズームレンズであれば一定の焦点距離に固定して撮影すると、一定の画角の画像が得られるため、処理時の誤差を抑えられる。鮮明な画像を得るために、環境光量にも依存するが、被写界深度の十分に深い絞り値を選択し (例えば、35 mm 判換算で 20~30 mm 程度の焦点距離のレンズで F5.6~F8.0 など)、シャッタースピードを十分に速い値

(例えば、1/800~1/2000 など) とする必要がある。また、感度についても可能な限り低い ISO 値とすることで、ノイズの発生を避ける。画像のファイルタイプは、非可逆圧縮形式である JPG は圧縮ノイズも発生するため、RAW から生成される可逆圧縮形式の TIFF が好ましい。ただし、TIFF はファイルサイズが大きくなる傾向もあり、処理に多大な時間がかかることになるため、数 100 枚といった多数の画像を処理する場合には JPG を選択することも合理的である。

対象物に関しては、光が反射しやすいもの (金属など)、透過するもの (ガラスなど) など、視点によって写り方が変わってしまうものは計測することが難しい。また、一様な色をもつ面などは対応点が抽出できないこともあるため、表面に模様 (テクスチャ) が存在するものがより適している。ただし、雪面など人間の目には真っ白に見えても、撮影画像には実際に存在する微細なテクスチャが記録されていることもあり、適切に対応点が抽出できることもある。

撮影の位置や向きについては、まず、隣同士のステレオペアの画像を 60~80% 重なり合うように、カメラの位置を移動しつつ連続的に撮影していく必要がある。また、対象物の全体を記録するため、可能な限り多数の視点方向からの撮影を行うことが望ましい。また、UAS による撮影の場合、高度を変えて画像を得ることで、低高度の近接画像による情報の高解像度化と、高高度の画像による対応点抽出の成功率の上昇といった効果が得られることもある (Fig. 3)。

Fig. 3. Schematic illustration of appropriate and inappropriate photo shootings for SfM-MVS photogrammetry.

3.4 UAS-SfM により取得される地形データの解像度と精度

写真測量により得られる地形データの解像度は、元の画像の解像度に大きく依存する。すなわち、高解像度のセンサでの近接撮影であるほど SfM の出力データも高解像度となる一方、スマートフォンなどの小型

センサあるいは遠距離からの撮影であるほど得られるデータは低解像度となる。逆に言うと、SfM に用いる画像や撮影方法の工夫次第で取得データの解像度は柔軟に調整可能であり、計測対象の大きさや目的に沿って最適な解像度を選択することができる。プラットフォームが UAS であれば、高高度からの撮影で広域をカバーするか、低高度で高解像度を維持するかといった調整となる。このようにマルチスケールであることは、SfM の大きな利点のひとつである。その上で、各種地形を対象とした事例をみても、概ね 1 m より高い解像度で地形データが得られており（早川ほか, 2016）、実用的な解像度は航空レーザ測量のものより高いといえる。

一方、データの精度あるいは誤差については、解像度と独立した検討が必要である。SfM による 3 次元データ内部の精度は、上記の解像度と同様、元の画像の品質（レンズの歪み、センサのサイズや画素数、日射や大気などの撮影条件、隣同士の画像のオーバーラップ不足等）等に強く依存する（Micheletti et al., 2015a, 2015b）。そのため、空中地形計測の場合、UAS の飛行方法や画像の撮影条件が第一に重要となる。一方、SfM で作成された 3 次元データの外部標定、すなわち地理座標系への幾何補正（ジオリファレンス）にかかる精度は、GCP の位置精度に強く依存する（Tonkin et al., 2014）。GCP は、既知点座標の利用、地図データからの参照、GNSS 測位やトータルステーションによる座標計測など、SfM の撮影画像に含まれる特徴点として別途用意する必要があるため、それぞれ設置方法および計測誤差を丁寧に検討することが重要である（内山ほか, 2014）。加えて、とくに異なる時期の地形データを比較する場合、こうしたデータの位置精度が強く影響し、誤差のレベルを超える変化しか抽出できない。そのため、位置合わせのための基準点（不変点）を、GCP とした点の他にも設置し、位置合わせの精度を向上させるなどの工夫が必要である。また、出力データの解像度も精度を前提として、細くなりすぎないように設定する必要がある。

4. 事例研究

UAS を用いた SfM による地形計測は、様々な対象（例えば、斜面、河川、海岸、洞窟、活断層、火山、積雪等）で数多く行われている（早川ほか, 2016）。ここでは、より高精度ながらも計測範囲の限られたデータである TLS との比較、現地計測とデータ処理にかかる時間を短縮した迅速な地形計測、および多時期のデータの比較による変化の抽出、といった点に着目し、

三つの事例を以下に紹介する。

4.1 地上レーザ測量データとの比較：華厳滝の崖面

滝は岩盤河川のなかでは侵食速度が大きい地形であり、とくに滝周辺の崖面・斜面は滝の侵食にともなう風化作用により不安定化し、崩壊が頻繁に生じる。栃県日光市に位置する華厳滝は、約 2 万年前の男体山

Fig. 4. 3D models of Kegon Falls, Nikko, Japan (after Hayakawa and Obanawa, 2015). (a) Textured 3D TIN model of the waterfall. (b) Point cloud data with RGB color. (c) Absolute distances between nearest points in point clouds obtained by UAS-based SfM and terrestrial laser scanning. The point of view is the same as Fig. 4b.

の火山活動により溶岩流端部の崖面に形成され、年平均 2 cm の速度で数 100 m の区間を後退してきた（早川・松倉, 2003）。1986 年にも滝の落ち口（滝肩）付近の岩盤が、現在の高さ 97 m のうち最上部の約 20 m、幅約 30 m、奥行き最大約 8 m と大きく崩落した（Hayakawa, 2013）。これにより流水の落ち方も大きく変化し、滝肩から滝壺まで落下していた水流は中段の溶岩からなる岩盤に衝突するようになった。これにともない、崖面中部における水しぶきによる水の供給が増加し、凍結破砕等の風化作用が促進されたことで、崖面における落石が活発化した可能性が指摘されている（Hayakawa, 2013）。

崖面における岩盤崩落の位置と時系列変化を把握するため、華厳滝とその周辺の崖における地上レーザ測量（TLS）が 2011 年以降に実施されてきた（Hayakawa, 2013; Hayakawa and Obana, 2015）。一方、TLS では一方向からの計測に限定され、取得されるデータもレーザの影となる部分は計測不能なことから、小型 UAS を用いた全面的な崖の計測を 2014 年に実施した。

華厳滝の正面には観光用の観瀑台が上部と下部とにそれぞれ設置されている。地上レーザ測量は上部観瀑台から実施しており、UAS の離発着もこの地点から実施した。使用した UAS は DJI Phantom 2 であり、単焦点レンズ（焦点距離 18.5 mm）をもつコンパクトデジタルカメラ（Nikon COOLPIX A, 23.6 x 15.6 mm 1.6 メガピクセル CMOS センサ）を搭載し、1 秒インターバルでの画像撮影を行った。UAV の飛行は早朝、日の出直後の時間帯に設定し、マニュアル操作で崖面に対し上下左右に機体を移動させつつ、数百枚の画像を撮影した。これらの画像一つ一つには、カメラに接続された GPS 受信機により取得された位置情報（誤差数 m）が含まれる。

撮影画像を用いて、3 章に示した SfM の手順により、各種 3 次元データを生成した。使用した SfM ソフトウェアは Agisoft PhotoScan Professional である。これにより滝の崖面とその周辺を含んだ 3 次元モデルが生成された（Fig. 4a, b）。

UAS による画像を用いた SfM（UAS-SfM）および TLS と GNSS による基準点計測により得られたジオリファレンス済みの点群データについて、CloudCompare の C2C（cloud-to-cloud）距離計算機能を用いて、異なる点群間における最近隣の点間距離を算出し、これらの点群の差異を検証した（Fig. 4c）。周辺の植生に覆われる部分に関しては、写真測量、レーザ測量それぞれにより得られる点の位置の差異が大きくなるが、岩盤が露出する崖面においてはその差異は概ね 50 cm 以下に収まっている（Fig. 4c）。UAS-SfM によるデータ

は、そのジオリファレンスがカメラに接続した GPS アンテナによる位置座標に依存するため、最大で数 m の誤差を含むものと考えられる。しかしながら、出力された点群データの TLS からの偏差が 1 m 以下であることは、UAS-SfM により迅速に取得できるデータの有用性を示している（小花和ほか, 2015）。今後、TLS 計測に基づく GCP の設置等により、UAS-SfM による点群の位置精度の改善が期待される。

4.2 迅速地形測量と現地調査への活用：キルギスの考古遺跡とその周辺

未踏査の地域における地質調査や地理調査、考古調査などにおいて、現地の地形を含む地表情報の取得が必要なケースがある。そこで、小型 UAS と SfM を用いて、迅速に地形・地表情報を取得することを試みた（早川ほか, 2015a）。目標とするのは、広範囲（1 km² 以上）における、中程度の解像度（1 m 程度）をもつ地形データ（DEM）およびオルソ補正画像を、短時間（1 時間程度）のうちにオンサイトで取得することである。

適用事例として示すのは、キルギス共和国イシクル湖南岸（標高約 1600 m）に位置する先史時代遺跡とその周辺である。この地域は、比較的乾燥した気候であり、植生被覆は少なく、河岸段丘がよく発達している。人家もほとんどない見通しの優れた場所であり、UAS の飛行条件は良好であった。使用した UAS 機材は DJI Phantom 3 Professional であり、これはコントローラに接続する FPV（First Person View）により機体の操作が可能なものである。一地点からの UAS の手動操作による飛行を一回、約 15 分間実施し、対地高度数百 m の高さにおいて、矩形の渦巻き状に UAS の機体を移動させ、1～5 秒に 1 回のインターバルで画像を撮影した（Fig. 5a）。その結果、面積にして 1 km² を超える範囲における対地写真が得られた。

次に、着陸した UAS の機体からその場で画像データを抽出し、ラップトップコンピュータを用いてオンサイトで SfM の処理を行った（Fig. 5b）。この際、処理速度を優先するために、出力されるデータ（タイポイント、高密度点群、DEM、オルソ補正画像）の質はソフトウェア設定における低～中程度とした。また、地上参照点（GCP）は用いず、画像に記録された機体位置（UAS の GNSS 受信機による地理座標）に基づくソフトウェアの自動処理によるジオリファレンスとした。SfM の出力データは地理情報システム（GIS; Geographical Information System）ソフトウェアを用いてさらに解析処理を進め、DEM に基づく地形陰影図、等高線、斜面傾斜分布図等を作成した。その結果、40

Fig. 5. Topographic measurement using UAS-SfM in Issyk-Kul region, Kyrgyz. (a) Flight path of UAS manually operated. (b) Base station of UAS flight, with a laptop computer for data processing. (c) Topographic hillshade image with 1-m interval topographic contour lines (left side) and orthorectified image (right side), obtained in an hour on site.

～60 分程度で、地形図やオルソ補正空中写真として使用できるドキュメントファイルが生成された (Fig. 5c)。また、GIS による簡単な地形解析もその場で可能であり、例えば地形断面図等を即時に作成し表示することができる。

解像度や精度は低下するものの、こうして迅速にオンサイトで得られたデータは、計測範囲の広さに対して一定の許容精度 (数十 cm～数 m) をもつ。さらに、解析出力結果をタブレット端末に表示、あるいはモバイルプリンタで印刷することにより、さらにその場の現地調査に活用できる。すなわち、地形学的調査であれば、その場で実際の地形を観察しながら段丘面の認定や対比、地形区分といったことに用いることができ、有用性が非常に高い。また、岩盤区分といった地質調査、未発掘の遺跡・遺物分布を探索する考古学的一般調査など、あらゆるフィールドサイエンスの目的にお

いて有用な基礎情報を提供することができる。一方、現場で得られた元の空撮画像データは、後日高性能なコンピュータを用いて再解析することで、さらに高解像度・高精度な地形情報およびオルソ補正画像を得るためにも利用できる。

ただし、とくに UAS の長距離、高高度の目視外飛行を実施する場合、調査を実施する国、地域の法規制等の規則をよく確認し、現地のカウンターパートと綿密に相談して調査計画を立案するなど、細心の注意が必要である。

4.3 複数時期のデータ比較：外房海岸、太東崎の雀島

同一箇所における SfM の計測を複数回実施し、その地形変化を検出した事例を示す (小花和ほか, 2014a, 2015; Obanawa and Hayakawa, 2015)。対象としたのは九十九里海岸南部の太東崎 (千葉県いすみ市) に位置す

早川・小花和：小型無人航空機を用いた SfM 多視点

Fig. 6. Time series of coastal bedrock erosion at Suzume-jima Island (modified after Obanawa and Hayakawa, 2015). (a) Textured 3D models for different time periods. (b) Differences of vertically projected digital elevation model for the two time periods highlighting portions of erosion and rockfalls.

る陸繋島（通称、雀島）である。雀島は岩盤からなる直径約 50 m、高さ約 30 m の小さな島であり、砂浜で陸続きとなっているものの、急斜面で囲まれており人が島内に立ち入ることは困難である（Fig. 6a）。太東崎における周辺の見食崖の基部には、波による崖の侵食を防ぐため消波堤が連続的に設置されているが、雀島の周囲には設置されておらず、波による自然な状態に近い岩盤侵食が観察できる。

UAS による現地計測は 2014 年 6 月および 10 月にそれぞれ実施した。使用した UAS 機材は DJI Phantom 2 および NIKON COOLPIX A である。複数回のフライトで、それぞれカメラの向きを鉛直下向き、斜め下向きに変更し、異なる視点の画像を 1 秒間隔で撮影した。撮影画像枚数はいずれも 1200 枚以上である。UAS のフライトは 1 回につき 10～15 分程度であるが、複数回のフライトと、その前後の準備・確認時間を含めて現場における必要時間は 2 時間程度であった。撮影した画像を用いて、SfM により 1 平方 m あたり 1000–1700 点の密度をもつ点群およびそれに由来するデータ

（TIN、テクスチャ画像）を生成した。この SfM の処理には 24～48 時間程度を要した。

以上の UAS-SfM 計測により、陸上からではアクセス困難な土地の、詳細な形状データを得ることができた（小花和ほか, 2014a）。たとえば、東側（海側）の見食崖やその基部に広がる波食棚の形状が鮮明に表現されている（Fig. 6a）。また、北側のオーバーハングした見食洞状の崖においては、その天井部の新鮮な崩落跡や、基部に集積した落石なども詳細に示されている。地理座標系上における絶対座標の相違は数メートルのオーダーであるものの、2 時期における相対的な誤差はより小さいと考えられ、こうした複雑な形状を対象としても、UAS-SfM は有効であることが示された（小花和ほか, 2015; Obanawa and Hayakawa, 2015）。

前述のように、2 時期のデータを比較するにあたり、2 つの点群データの不变箇所における位置合わせが重要である。そこで、3 箇所の不变部分を特定し、それらを基準として、6 月のデータに 10 月のデータを平行移動および回転によって適合させる位置合わせを行った。次に、変化を抽出する箇所ごとに投影面を設定し、3 次元の点群データから部分的なラスタデータを作成した。これら 2 時期のラスタデータの差分をとることで、変化した領域の面積および体積を抽出した（Fig. 6b）。ここで、湾曲した見食洞状の崖面のうち、その天井部でもっとも大きな変化がみられた部分の体積は 64 m^3 であった（Obanawa and Hayakawa, 2015）。また、雀島の岩盤部分全域において、侵食の総量は 4 ヶ月で 257 m^3 、これに基づく平均的な侵食速度は約 0.14 m/y であった。これは過去、消波堤が設置されるより前の太東崎における見食崖の侵食速度約 1 m/y に比べると小さいが、今後、より多時期の計測データを解析することにより、長期的な地形変化を時系列的に追跡することが可能であると考えられる。

5. まとめと展望

本稿では、小型 UAS と SfM 多視点ステレオ写真測量を用いた空中からの地形計測について、その手法から応用までを概観した。取り上げた事例はごく一部であるが、地形や地物を対象とした迅速・高精細な 3 次元計測と、形状変化の経時的追跡は、さまざまな分野で適用されつつある。とくに、UAS-SfM 手法の低価格化、簡素化による普及が進み、高精細な地形データを研究者や実務者など誰もが自ら取得することができるようになってきている。こうした空中計測により得られる高精細地形データは、各種物理探査の基礎情報としても有効活用されることが期待され、今後、ますます

す多くの機会に適用されていくと考えられる。

一方、すでに述べたように、計測データそのものの精度向上や、多時期のデータの位置合わせにかかる誤差の低減など、現状ではまだ容易に解決されない課題もあり、今後の改善が期待されるところでもある。また、SfM により高解像度の地形情報が従来より簡易に得られるようになったものの、撮影設定や処理過程を誤ると、データの精度が追従しない場合や、不必要に巨大なデータサイズに出力される場合もある。すなわち、対象とする現象のスケール（空間および時間）とその目的（形状計測、変化抽出等）により、適切な解像度および精度をよく検討することが必要とされる。すなわち、最適な解像度、および最善の精度を念頭に、地形計測を実施することが望まれよう。

謝 辞

本講座は、公益社団法人物理探査学会が開催した平成 27 年度ワンデーセミナー「空からの物理探査」における講義の一部を再編したものである。このような貴重な機会を与えて頂いた、事業委員会および会誌編集委員会の関係者の方々、および講演の契機をいただいた富山大学楠本成寿様に、深く御礼申し上げます。また、本講座をまとめるにあたり、UAS の安全で効率的な運用や、SfM に関する諸々の情報交換をさせていただいた防災科学技術研究所内山庄一郎様、関東学院大学齋藤 仁様にお世話になりました。ここに記して、謝意を表します。

参 考 文 献

- Abellan, A., Derron, M.-H., and Jaboyedoff, M. (2016): "Use of 3D Point Clouds in Geohazards" Special Issue: Current Challenges and Future Trends, *Remote Sens.* **8**, 130. doi:10.3390/rs8020130.
- 秋山正幸・大野良人 (2015): 次世代超大型望遠鏡 TMT のための広視野多天体補償光学, *光学*, **44**, 396–398.
- Brodu, N., and Lague, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **68**, 121–134. doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006.
- Brown, D. C. (1966): Decentering distortion of lenses, *Photogramm Eng.*, **32**, 444–462.
- Brown, D. C. (1971): Close-range camera calibration, *Photogramm Eng.*, **37**, 855–866.
- Cignoni, P., Cignoni, P., Callieri, M., Callieri, M., Corsini, M., Corsini, M., et al. (2008): MeshLab: An open-source mesh processing tool, *Sixth Eurographics Ital. Chapter Conf.*, 129–136.
- Colomina, I., and Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **92**, 79–97. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- de Haas, T., Ventra, D., Carbonneau, P. E., and Kleinhan, M. G. (2014): Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering, *Geomorphology*, **217**, 165–181. doi:10.1016/j.geomorph.2014.04.028.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007): The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, **45**, RG2004. doi:10.1029/2005RG000183.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., and Carbonneau, P. E. (2013): Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement, *Earth Surf. Process. Landforms*, **38**, 421–430. doi:10.1002/esp.3366.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2010): Towards internet-scale multi-view stereo, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (IEEE)*, 1434–1441. doi:10.1109/CVPR.2010.5539802.
- 技術開発推進本部豪雨監視・予測技術開発部会運動学的予測グループ (2014): 高解像度降水ナウキャストにおける降水の解析・予測技術について, *測候時報*, **81**, 55–76.
- Girardeau-Montaut, D., and Roux, M. (2005): Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, **36**, W19.
- Gomez, C., Hayakawa, Y., and Obanawa, H. (2015): A study of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology, *Geomorphology*, **242**, 11–20. doi:10.1016/j.geomorph.2015.02.021.
- 早川裕一・松倉公憲 (2003): 日光、華嚴滝の後退速度, *地学雑誌*, **112**, 521–530. doi:10.5026/jgeography.112.4_521.
- Hayakawa, Y. S., Oguchi, T., and Lin, Z. (2008): Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, 1–5. doi:10.1029/2008GL035036.
- Hayakawa, Y. S. (2013): Stability analysis of cliff face around Kegon Falls in Nikko, eastern Japan: An implication to its erosional mechanisms, *Int. J. Geosci.*, **04**, 8–16. doi:10.4236/ijg.2013.46A2002.

- Hayakawa, Y. S., and Obanawa, H. (2015): Mapping cliff face changes around a waterfall using terrestrial laser scanning and UAS-based SfM-MVS photogrammetry, *The International Symposium on Cartography in Internet and Ubiquitous Environment 2015*, C5.
- 早川裕式・久米正吾・荒友里子・アブティカノワ=アイダ (2015a): 海外調査における UAS と GIS を用いたオンライン即時地形情報解析, *地形*, **37**, 289–290.
- 早川裕式・小花和宏之・吉田英嗣・鳴橋竜太郎・奥村晃史・財城真寿美 (2015b): トルコ・カイセリ県における遺跡周辺の地形情報の取得と解析, *Abstracts, Japan Geoscience Union International Meeting 2015*, HTT32-03.
- 早川裕式・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎 (2016): SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的应用, *地形*, **37**, 321–343.
- 早川裕式・小口 高 (2016): 地形学における地上レーザ測量の活用, *地学雑誌*, **125**, 299–324.
doi:10.5026/jgeography.125.299.
- Heritage G. L., and Large A. R. G. (2009): *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell.
- 伊藤有加・小口 高・増田富士雄・坂本隆彦 (2015): 地盤情報データベースの解析に基づく大阪平野における埋没谷と埋没段丘の分布と形態, *堆積学研究*, **74**, 21–29.
doi:10.4096/jssj.74.21.
- 吉高神 充・田村竜哉 (2008): デジタル航空カメラ等による空中写真撮影, *国土地理院時報*, **115**, 51–59.
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M., Zink, M. (2007): TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **45**, 3317–3341.
doi:10.1109/TGRS.2007.900693.
- Krishnan, S., Crosby, C., Nandigam, V., Phan, M., Cowart, C., Baru, C., Arrowsmith, R. (2011): OpenTopography: a services oriented architecture for community access to LIDAR topography, *Proceedings of the 2nd International Conference on Computing for Geospatial Research & Applications - COM.Geo '11*, 1–8.
doi:10.1145/1999320.1999327.
- Lague, D., Brodu, N., and Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z), *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **82**, 10–26.
doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
- 林 舟・小口 高 (2002): 地形学における写真測量法的应用：欧米の事例を中心に，*地学雑誌*，**111**，1–15.
doi:10.5026/jgeography.111.1.
- Lowe, D. G. (1999): Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision (IEEE)*, 1150–1157.
doi:10.1109/ICCV.1999.790410.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., and Lane, S. N. (2015a): Structure from Motion (SfM) Photogrammetry, *Geomorphological Techniques (British Society for Geomorphology)*, 1–12.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., and Lane, S. N. (2015b): Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone, *Earth Surf. Process. Landforms*, **40**, 473–486. doi:10.1002/esp.3648.
- Middlemiss, R. P., Samarelli, A., Paul, D. J., Hough, J., Rowan, S., and Hammond, G. D. (2016): Measurement of the Earth tides with a MEMS gravimeter, *Nature*, **531**, 614–617.
doi:10.1038/nature17397.
- 満上育久 (2011): Bundler: Structure from motion for unordered image collections, *映像情報メディア学会誌*，**65**, 479–482.
doi:10.3169/itej.65.479.
- 西野保司・根本正美・尾崎豊彦・島田久嗣・藤村英範・山本陽子 (2007): 国土変遷アーカイブ・空中写真閲覧システム, *国土地理院時報*, **112**, 111–114.
- 日本地図センター (2005): 新版 地図と測量の Q&A, 日本地図センター, 東京.
- 日本リモートセンシング学会 編 (2011): 基礎からわかるリモートセンシング. 理工図書, 東京.
- 小花和宏之・早川裕式・ゴメス=クリストファー (2014a): UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング, *地形*, **35**, 283–294.
- 小花和宏之・早川裕式・齋藤 仁・ゴメス=クリストファー (2014b): UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較, 写真測量とリモートセンシング, **53**, 67–74.
- Obanawa, H., and Hayakawa, Y. S. (2015): High-resolution topographic survey using small UAV and SfM-MVS technologies in hardly accessible area, *The International Symposium on Cartography in Internet and Ubiquitous Environment 2015*, C4.
- 小花和宏之・早川裕式・加藤 顕・ゴメス=クリストファー (2015): 小型無人航空機および単独測位 GNSS 搭載カメラを用いた簡易的な地形測量手法, *地形*, **36**, 87–106.
- Oguchi, T., Hayakawa, Y. S., and Waskiewicz, T. (2011): Data Sources, *Developments in Earth Surface Processes: Geomorphological Mapping – Methods and Applications*, M. J. Smith, P. Paron, and J. S. Griffiths (Eds.), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 189–224.
doi:10.1016/B978-0-444-53446-0.00007-0.
- Passalacqua, P., Hillier, J., and Tarolli, P. (2014): Innovative

- analysis and use of high-resolution DTMs for quantitative interrogation of Earth-surface processes, *Earth Surf. Process. Landforms*, **39**, 1400–1403. doi:10.1002/esp.3616.
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D. M., Simley, J. D., Arrowsmith, J. R., Bode, C. A., et al. (2015): Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review, *Earth-Science Rev.*, **148**, 174–193. doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.012.
- Roering, J. J., Mackey, B. H., Marshall, J. A., Sweeney, K. E., Deligne, N. I., Booth, A. M., et al. (2013): “You are HERE”: Connecting the dots with airborne lidar for geomorphic fieldwork, *Geomorphology*, **200**, 172–183. doi:10.1016/j.geomorph.2013.04.009.
- 佐藤浩・岩橋純子・小荒井 衛・神谷 泉・小室勝也 (2010): 国土地理院における高解像度 DEM の整備とそれを活用した地理情報解析研究, *地形*, **31**, 359–382.
- Smith, M. W. (2014): Roughness in the Earth sciences. *Earth-Science Rev.*, **136**, 202–225. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.05.016
- Snavely, N., Seitz, S. M., and Szeliski, R. (2007): Modeling the World from Internet Photo Collections, *Int. J. Comput. Vis.*, **80**, 189–210. doi:10.1007/s11263-007-0107-3.
- Stöcker, C., Eltner, A., and Karrasch, P. (2015): Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry – A case study from Andalusia, Spain, *Catena*, **132**, 1–11. doi:10.1016/j.catena.2015.04.004.
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., and Iwasaki, A. (2011): Characteristics of ASTER GDEM version 2, *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Vancouver, BC: IEEE)*, 3657–3660. doi:10.1109/IGARSS.2011.6050017.
- Tarolli, P. (2014): High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges, *Geomorphology*, **216**, 295–312. doi:10.1016/j.geomorph.2014.03.008.
- Tomasi, C., and Kanade, T. (1992): Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method, *Int. J. Comput. Vis.*, **9**, 137–154.
- Tonkin, T. N., Midgley, N. G., Graham, D. J., and Labadz, J. C. (2014): The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales, *Geomorphology*, **226**, 35–43. doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.021.
- 内山庄一郎・井上 公・鈴木比奈子 (2014): 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*, **81**, 37–60.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., and Reynolds, J. M. (2012): “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, **179**, 300–314. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., and Seitz, S. M. (2011): Multicore bundle adjustment, in *CVPR 2011 (IEEE)*, 3057–3064. doi:10.1109/CVPR.2011.5995552.

Aerial measurements of topography using small UAS and SfM-MVS photogrammetry

Yuichi S. Hayakawa* and Hiroyuki Obanawa**

ABSTRACT

With the spread of small unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a digital camera (UAS: unmanned aerial system), it has been facilitated to acquire multi-view aerial images. Whereas, the technique of Structure-from-Motion Multi-View Stereo photogrammetry (SfM-MVS) has also been developed to enable the creation of three-dimensional models of targets including landforms and objects on the land surface from a large number of stereo-pair images. The combined use of these UAS and SfM, i.e., the photogrammetry of low-altitude aerial images, has enhanced topographical measurements of landforms and ground objects in a variety of fields. In this paper, we outline the overviews of UAS as a platform and SfM as measurement technique, and then introduce some examples of applied topographic measurements by SfM based on the aerial imaging with UAS. Thus, the low price and easy operation of UAS-SfM technique have allowed rapid acquisition of high-definition three-dimensional data of landforms and ground objects based on the aerial measurement, as well as the change detection of such objects, for any researchers and practitioners. Therefore the method has a large potential to be effectively used as the basic data acquisition and analysis for geophysical surveys. In addition, it is desirable to perform such high-definition topographic measurements with careful examination of optimized resolution and reasonable accuracy by the scale and the purpose of the phenomenon of interest.

Keywords: unmanned aerial system (drone), SfM-MVS photogrammetry, high-definition topographic data, three dimensional point cloud, digital elevation model

Manuscript received May 6, 2016; Accepted June 22, 2016.

* Center for Spatial Information Science, The University of
Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

** VisionTech Inc.

2-1-16 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-0045, Japan

A part of this paper was presented at the 2015 SEGJ One-day Seminar
“Aerial Geophysical Survey” by the Society of Exploration
Geophysicists of Japan.