

TEC-FORCE被災状況調査におけるUAV自律飛行を 活用した3次元データ取得に関する検討 (中間報告)

山田 宏樹¹

¹災害対策マネジメント室（〒540-8586大阪府大阪市中央区大手前1-5-44）

TEC-FORCEが行う被災調査は、徒歩による目視点検を基本としている。危険な状況の調査箇所も多く、二次被害の恐れもある。近年は災害調査へのUAV活用が進んでおり、既存研究では対象物の3次元構造を推定するSfM技術とUAVを用いた災害調査の手法も検討されている。そこで、本稿はUAVの自律飛行とSfM技術を活用したTEC-FORCE被災調査の新たな手法を検討した。結果、容易に3次元モデル生成が可能であること、モデル上の計測値が従来手法と同等程度の精度を持つことを確認できた。今後は、飛行実験や精度検証の知見を蓄積していく。

キーワード TEC-FORCE, UAV自律飛行, SfM

1. はじめに

(1) 研究背景

日本は地理的条件から、災害が発生しやすい。諸外国に比べ急勾配な河川、多くの活断層やプレート境界、気候変動なども伴い、近年は激甚な洪水氾濫や土砂災害が頻発している。

国土交通省では、被災地域の早期復旧等に資する技術的支援として、専門知識を有する緊急災害対策派遣隊（以下、TEC-FORCE）を創設。発災直後より被災地域に派遣し、災害対策用ヘリコプター等を活用した被災調査、復旧工法の技術的助言などを実施。その活動規模は、2021年3月時点で延べ約12万8千人に及ぶ。

TEC-FORCEは、土砂崩落や道路の寸断、二次災害の懸念など、立ち入り困難な個所を調査することも多い。広域調査ではヘリコプターによる空撮が有効だが、対象施設の詳細調査を実施する場合、その手法は徒歩による目視点検に頼っているのが現状である。

詳細調査では、ポールや巻尺などを用いた人力による確認を行っている。詳細設計や予備設計時に行う測量機器を用いた現地計測と比較すれば、調査結果の精度は高いとは言えない。

近年、無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle, 以下UAV）が急速に普及した、また、複数の写真から対象物の3次元構造を推定する技術（Structure from Motion, 以下SfM）が開発され、複数分野での応用が進んでいる。画像処理ソフトウェアを用いて3次元モデルが容易に作

成できるため、対象物の計測や任意箇所の断面図作成などが個人PCにて可能となった。既存研究¹⁾では、SfMを災害調査へ活用する検討も進んでいる。近畿地方整備局においても、2011年紀伊半島大水害現場の砂防事業にて、UAVとSfM解析を用いた調査手法が検証²⁾されている。

(2) 研究目的

TEC-FORCEが、被災施設を目視点検にて確認していることは先に述べた。安全対策を十分に行っている、被災調査を人的労力に頼っている限り、二次被害の危険は常にある。近年は被災調査にUAVも活用しているが、空撮による状況把握に留まっている。

UAVとSfMを被災調査に活用すれば、被災施設の空撮写真から3次元モデルを生成できる。3次元モデル上で対象施設の被災規模を把握することで、浸食等が生じている堤防のり面や土砂崩落などの危険個所に近づく必要がなくなる。UAVとSfMによる3次元モデルの活用は、TEC-FORCE活動の効率化および安全性向上に寄与する手法であると言える。

しかし、一般に3次元モデルを生成する画像処理ソフトウェアは高額である。また、SfM解析に必要な情報量をUAVで撮影するには、操縦者に高い技量が求められる。併せて、TEC-FORCEは限られた時間内に多くの被災施設を調査することも多い。1か所あたりの調査時間が、十分に取れないこともある。被災調査に3次元モデルを活用する手法が、従来の手法に比べ看過できない作業時間の増加を伴う場合、TEC-FORCE活動に適合しない可能性も高い。

以上の課題を踏まえ、本稿では、UAVとSfMによる三次元モデルを活用した被災調査の新たな手法が、TEC-FORCE隊員の効率性および安全性向上に資するものか検証を行う。なお、今回は初期検証として、画像処理ソフトウェアの選定とUAVによる空撮は以下のとおりとした。

a)画像処理ソフトウェア

SfM解析が可能な最低限の機能を満たす低価格品を用いて、解析時間、精度を確認する。併せて、誰でも使用、変更が自由なインターネット上に公開されているオープンソースソフトウェアも用いることとする。

b)UAVによる空撮

操縦者の技量によらず必要な空撮を実施するため、UAV操作は目視内における自律飛行とする。自律飛行は、無料で使用できる専用のアプリケーションから選定する。

2. 検証方法

本章では、UAV自律飛行による対象物の空撮、およびSfM解析による三次元モデル生成の検証方法を述べる。検証にあたり、操作の容易さ、1箇所あたりの調査時間、取得データの精度に着目した。

(1)検証に用いたUAV, ソフトウェア

本稿UAVの諸元、自律飛行および画像処理に用いたソフトウェアを表-1、表-2に示し、以下に概要を記載する。

a) UAV

近畿地方整備局TEC-FORCEの既存装備品である、DJI社製のMAVIC AIR2を使用した。

b) 自律飛行ソフトウェア

UAV製造元のDJI社は、公式HPにて自律飛行をサポート

表-1 使用UAVおよび搭載カメラ


UAV	搭載カメラ	UAV外観
MAVIC AIR2 ³⁾ (DJI社) 重量 570g 最大伝送距離 6km	F値 2.8固定 焦点距離24mm/35mm 有効画素4,800万画素 センサーサイズ 1/2型	

表-2 使用ソフトウェア

名称	使用目的
Drone Harmony (サードパーティ製アプリケーション)	UAV自律飛行の設定, 操作
Metashape Standard (低価格ソフトウェア)	3次元モデル生成
Open Drone Map (オープンソースソフトウェア)	3次元モデル生成

している。しかし、今回使用したUAVは動作対象外に位置づけられている。よって、本稿に必要な機能を満たしつつ、操作性が良い無料アプリケーションソフトウェアから選定した。

c)画像処理ソフトウェア

三次元モデル生成が可能な画像処理ソフトウェアは、一般的に数十万円を超える高機能の物が多い。本稿では、SfM解析に必要な最低限の機能を満たす数万円のソフトウェアを用いた。併せて、誰でも使用および変更が自由なインターネット上のオープンソースソフトウェアでも検証を行った。

(2)検証場所

検証は、大阪府能勢町のノマックドローンフィールドにて行った。約1.3haの野球場であり、フィールド中心部に軽トラックが2台設置されている。TEC-FORCE活動を想定すれば、実際の被災箇所等で検証するのが望ましいが、本稿は2.(1).表-1のUAVによる自律飛行の空撮可否も含めた初期検証である。よって、検証は平坦地で天頂が開けたUAV飛行に好条件の場所にて行った。

(3)検証手順

本稿UAVを用いた自律飛行による撮影、三次元モデル生成、および精度検証の作業手順は、図-1のとおり。

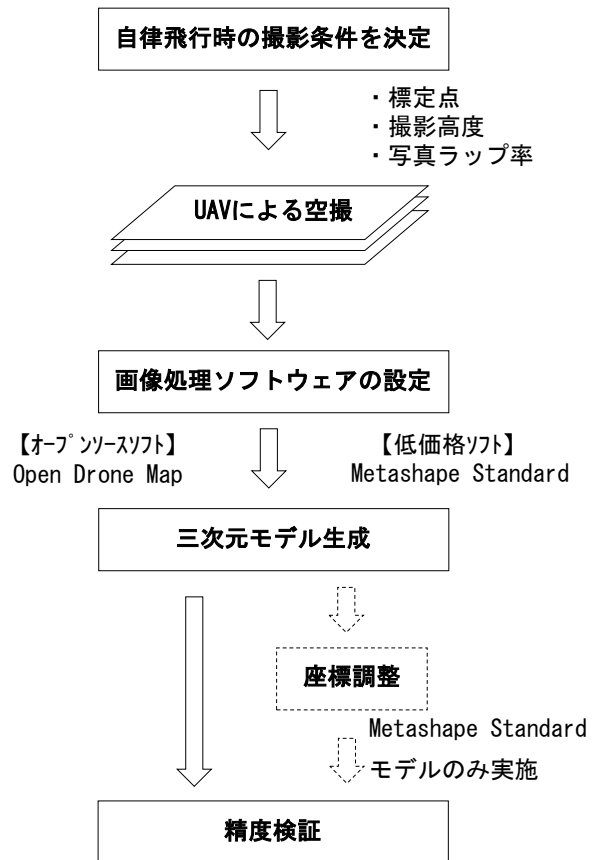


図-1 本稿の検証手順

(4) 自律飛行時の撮影条件

UAVを用いた公共測量⁴⁾⁵⁾では、求める精度に応じて標定点の配置数、地上画素寸法、撮影高度、写真ラップ率などを適切に設定する旨が記載されている。本稿で用いた撮影条件は、表-3のとおり。また、以下に撮影条件の設定方法を簡潔に記載する。

a) 標定点

既存研究⁶⁾では、50m四方の範囲内で標定点を3点から13点まで設置した場合を比較し、5点以上は精度に大きく影響しないことを示しつつ、計測範囲を網羅するように標定点を配置することの重要性が示唆されている。

本稿では、二次被害の懸念等から近接困難な被災箇所、または1箇所あたりの調査時間が限られた状況などを想定している。そのため、標定点は設置せず、現地作業の簡略化、迅速化を図った上で、得られる精度について検証した。

b) 地上画素寸法、撮影高度

UAV出来形管理要領によれば、写真上に投影された1画素に対する地上の寸法（以下、地上画素寸法）は1cm以内、撮影高度は50m程度が推奨されている。本稿は2.(4).a)から標定点を設置しないため、推奨値の50mでも精度が悪くなる可能性が高い。よって、高度は推奨値の50mと、より近接高度での2ケースにて検証を行った。近接高度は、低空飛行による撮影時間の増加、操作員の安全確保などを踏まえ、空撮写真から対象物の詳細がある程度確認できる10mとした。

地上画素寸法は、カメラ諸元と撮影高度で決定される。本稿UAVの場合、高度10mで0.36cm、高度50mで1.80cmとなる。

c) 写真ラップ率

UAV公共測量マニュアルに則り、オーバーラップ率を80%、サイドラップ率を60%とした。

(5) 画像処理ソフトウェアの設定

本稿で用いたソフトウェアは、2.(4).表-3の条件で取得した空撮写真を読み込むことで、ほぼ自動的に三次元モデルを生成できる。その精度、品質については生成時に調整が可能であり、設定を高くするほど処理時間が増加する傾向がある。

TEC-FORCE派遣時は、迅速な被災調査が求められる。ソフトウェアの処理時間は、短い方が望ましい。既存研究⁷⁾によれば、Metashapeは設定を高くするほど高精度になるが、「最高」設定と「中」設定では処理時間に約30倍の差を生じる場合が確認されている。併せて、「中」設定時に出来形管理要領の要求精度を満たす場合も示されているため、本稿ではMetashapeの設定を「中」とした。

Open Drone Mapは、既存研究が少ないこと、Metashapeの「中」設定と比較するため、設定を精度の高い「High Resolution」とした。

(6) 生成モデルの座標調整

土石流現場などの場合、生成した三次元モデルから被災規模を把握するには、比較データとして被災前の標高データ等を読み込む必要がある。当該データは国土地理院が公開している基盤地図情報から取得できるが、データの特徴として現地座標値を持っている（以下、測地座標系データ）。そのため、生成した三次元モデルが測地座標系データではない場合、モデルの座標系を調整する必要がある。

2.(1).表-2のMetashape Standardにて生成したモデルは、現地の座標値を持たないため、測地座標系データへ座標調整を行った。

本稿では、生成した三次元モデルと現地との対応点を図-2のとおり定め、現地の座標値を読み込むことで測地座標系データに変換した。

対応点の座標値は、TEC-FORCE既存装備品のハンディGPSを用いた現地計測値とした。併せて、近接困難地の調査を想定し、対応点の座標値を国土地理院地図⁸⁾から読み取った値も用いた。

Open Drone Mapの場合は、座標調整が不要だった。空撮写真に付与されているGPS情報を読み取り、自動的に三次元モデルを測地座標系データとして作成するためである。

表-3 UAV自律飛行時の撮影条件

項目	設定条件
標定点	無
撮影高度 (地上画素寸法)	10m(0.36cm) 50m(1.80cm)
写真ラップ率	オーバーラップ率80% サイドラップ率60%



図-2 現地と三次元モデル上の対応点

3. 結果

本章では、前章に沿って検証した三次元モデル生成に関して、UAV自律飛行の可否、三次元モデル生成に必要な時間、データ精度などについて述べる。

得られた知見からは、三次元モデル生成は既存装備品と低価格又はオープンソースのソフトウェアにて実現できることが明らかとなった。生成したモデル上で計測した値は、従来の調査手法と同等程度の精度を持つことも判明した。

(1) 自律飛行による空撮

本稿UAVと2. (1). 表-2の自律飛行アプリケーションを用いた結果、問題なく自律飛行を実現できた。また、自律飛行時に2. (4) 表-3の条件にて空撮を行ったところ、三次元モデル生成に必要な写真を短時間で取得できた。空撮に用いた時間は、離着陸を含め30分未満だった。撮影高度ごとの空撮時間を表-4に示す。

(2) 三次元モデル生成

検証の結果、取得した空撮写真を画像処理ソフトウェアに読み込むことで、短時間で三次元モデルが生成することが分かった。ソフトウェア別の処理時間を、表-5に示した。

表-5から、Metashape Standardの方が短時間で生成できたことが分かる。ただし、本結果は2. (6)の座標調整に用いる時間を含めていない。Open Drone Mapは座標調整が不要なため、全体の作業時間は短くなる可能性がある。図-3は、Open Drone Mapにて生成した三次元モデルを用いて、対象物の延長を測定している画像である。

(3) 精度検証

三次元モデル上の計測値と現地実測値の誤差を確認した。結果、若干の調整が必要だが、従来の調査手法と同等程度の精度を持つモデルであることが確認できた。

表-4 自律飛行による空撮枚数と時間

	撮影高度 10m	撮影高度 50m
空撮枚数	71枚	40枚
空撮時間	15分	10分

表-5 空撮写真から三次元モデルを生成する時間

	撮影高度 10 m (枚数 71枚)	撮影高度 50 m (枚数 40枚)
Metashape Standard	約10分	約5分
Open Drone Map	約25分	約12分

検証にあたり、2. (2)の検証場所に配置されている軽トラック周辺の四辺をABCD、軽トラックの全高をEとし、現地にて実測を行った。図-4は、実測箇所の位置を三次元モデル上に表現している。図-5、図-6は三次元モデルを用いてA~Eを計測した値と、実測値との誤差を示した。

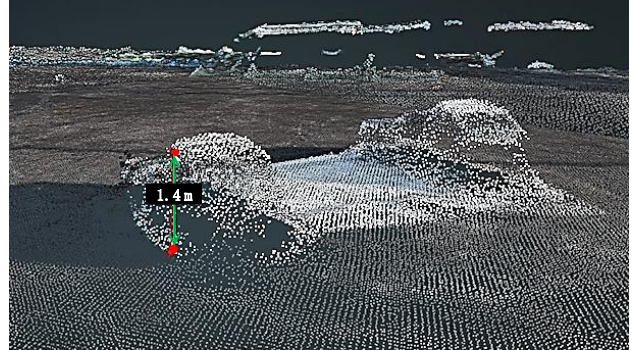


図-3 Open Drone Mapによる三次元モデル

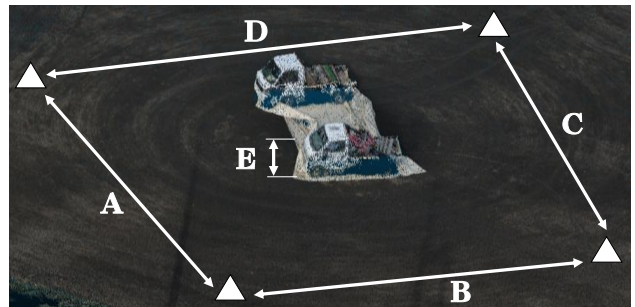


図-4 実測を行った箇所と三次元モデル上の位置関係

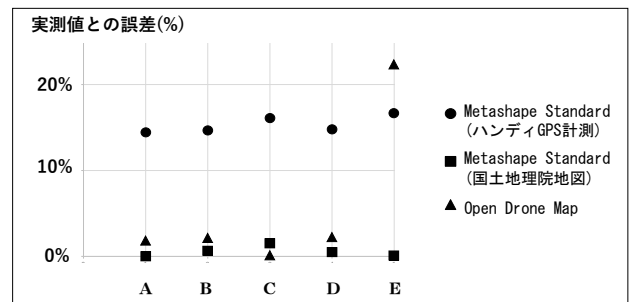


図-5 高度10mの写真で生成した三次元モデルと実測値の誤差

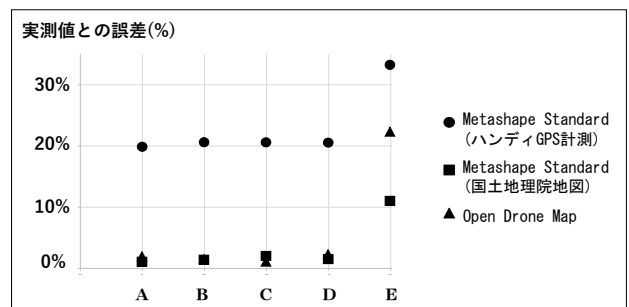


図-6 高度50mの写真で生成した三次元モデルと実測値の誤差

全体の傾向としては、撮影高度10mに比べ、高度50m時は誤差が増加傾向にあると言える。

画像処理ソフトウェア別に見ると、最も誤差が大きかったのはハンディGPSを用いたMetashape Standardモデルであり、高度10mの場合でも15%前後の誤差が生じた。これは、ハンディGPSの計測精度が要因と考えられる。公式HPによると、計測値には10m以内の製品誤差が内包されている。そのため、他の手法と比べ誤差が大きくなったと考えられる。

その他2つのモデルでは、実測値との誤差が2%程度であり、従来手法の精度と比較しても、遜色ない結果が得られた。ただし、軽トラックの全高Eのみ、10%を超える誤差が生じた。既存研究⁹⁾では、斜め撮影画像を追加することで、高さ方向の精度向上が示唆されている。その場合に留意すべきは、モデル生成時に用いる写真を増やすことは、解析時間の増加に直結することである。本稿でも、3. (2). 表-5から撮影枚数40枚に対して、71枚の場合はモデル生成時間が倍以上となった。

4. 考察と今後の展望

(1) 検証結果の考察

本稿では、TEC-FORCE装備品の既存UAVと低価格またはオープンソースのソフトウェアを用いることで、容易に被災調査に活用できる三次元モデル生成が可能であることを示した。

UAV操作検証からは、自律飛行を活用すれば操縦者の技量に寄らず必要な空撮が可能であることを確認した。このことから、最低限のUAV操作が可能なTEC-FORCE隊員であれば、誰でも必要な空撮が可能だと言える。

SfM活用検証からは、被災調査に活用できる三次元モデルが短時間で生成できることを確認した。UAVの空撮時間を加味しても、必要な時間は1時間程度だった。三次元モデルがあれば、従来のスケッチによる被災個所の概要図作成が不要となるため、報告書作成の時間短縮も見込まれる。よって、報告書作成も含めた1ヵ所あたりの被災調査時間で比較すれば、本手法は従来手法と比較しても遜色ないものと考えられる。特に、オープンソースソフトウェアのOpen Drone Mapは、初期投資が不要な公開ソフトウェアであり、座標調整も省略できることから、今後も継続検証していきたい。

三次元モデルの精度検証からは、従来手法の調査結果と同等程度の精度を持つことが確認できた。高さ方向の誤差は今後調整が必要であるが、危険箇所へ近接せずに被災調査が行える利点は大きい。本手法の検討が進めば、より短時間で実施することも可能となり、被災調査の効率化にも寄与するものと考えられる。

以上から、本稿にて検証した新たな手法は、TEC-FORCEの効率性および安全性向上に寄与するものであり、

被災調査に適合する手法だと判断することができた。

(2) 本手法の適用限界

本稿で検証した新たな手法は、三次元モデル生成に必要な写真をUAVにて取得できることが前提である。よって、UAV飛行が困難な条件下では本手法が適用できない。

被災調査時は、悪天候時や非GPS環境下での作業も多い。2. (1). 表-1の既存UAVは、雨天時の飛行に適用しておらず、自律飛行を行うにはGPS情報が必要である。

悪天候時の飛行には、全天候型UAVが適している。しかし、高額であり、本稿UAVに比べ大型になるため携帯性が悪い。今後のUAVの小型化、市場流通による低価格化に期待したい。

非GPS環境下におけるUAV自律飛行の取組として、近年はロボットの自動運転技術などに導入されているVisual SLAMの適用が検討されている。既存研究¹⁰⁾では、UAVにステレオカメラ等の専用機材を搭載することで、自律飛行時に前方対象物との距離を一定に保ちつつ、都市河川の護岸点検に必要な空撮を成功させている。本稿UAVは追加機材を搭載できる機種ではないが、将来的にステレオカメラ機能を持つ全天候型のUAVが低価格で普及されれば、天候等によらず発災直後から迅速な被災調査が可能になると考える。

(3) 今後の検証内容と展望

本稿では、UAV飛行に好条件な場所にて検証を行ったが、今後は被災地等での飛行実験や、様々な撮影条件を設定した場合の精度検証を実施するなど、三次元モデルを用いた効率的な被災調査の知見を蓄積していく必要がある。

TEC-FORCEは、現場経験が豊富な職員で構成されることが多い。平時とは異なる環境下で専門知識を求められるため、経験の浅い若手職員は派遣されることに一抹の不安を感じる場合もある。本稿で検証した手法は、被災調査時の効率性および安全性向上を目的としたものだが、より効果的な運用が可能になれば、現場経験が浅い職員でも被災箇所を定量的に調査することができる。また、高度な技術的判断に直面した場合でも、従来のスケッチによる被災概要図に比べ、三次元モデルは被災箇所の詳細を確認できる。これにより、被災調査の効率化を図るとともに、調査時の安全性向上に寄与できることを期待したい。

今後も継続検証を行い、被災地域の早期復旧支援の一助となるよう推進していきたい。

謝辞: 本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご協力をいただいた日本工営(株)の方々には感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, Vol181, 2014年.
- 2) 北本楽, 柴田俊: UAVを用いたレベル3飛行(目視外補助者無し飛行)による河道閉塞および砂防施設の点検・調査活用について, 2021年.
- 3) DJI: MAVIC AIR2, <<https://www.dji.com/jp/mavic-air-2>> (入手2021.1.25)
- 4) 国土交通省国土地理院: UAVを用いた公共測量マニュアル(案), 2017.
- 5) 国土交通省: 空中写真測量(無人航空機)を用いた出来形管理要領(土工編)(案), 2020.
- 6) 近津博文, 小高明彦, 柳秀治, 横山大: UAV写真測量における三次元モデリングソフトウェアの性能評価, 写真測量とリモートセンシング, 日本写真測量学会, Vol155, 2016年.
- 7) 櫻井淳, 中村健二, 田中成典: 平常時と災害時におけるUAV写真測量の解析パラメータの決定とその適用に関する研究, 土木学会論文集, Vol173, 2017年.
- 8) 国土地理院: 地理院地図, <<https://maps.gsi.go.jp>> (入手2022.2.28)
- 9) 松岡祐仁, 野末晃, 上原広行: 斜め往復撮影による標定点不要の造成地UAV写真測量手法の開発, 2020年.
- 10) 石井明, 天方匡純, 菅原宏明, 藤井純一郎, 小篠耕平, 六門直哉: 非GPS環境下におけるUAVの自律飛行実験, 建設ロボットシンポジウム論文集, 2019年.