学術研究と社会課題の解決に向けたUAVの活用

—飛ばせる、その先へ—

Utilization of UAVs for Academic Research and Social Issues

内 山 庄一郎*

Shoichiro UCHIYAMA

1 はじめに

研究者にとっての UAV (Unmanned aerial vehicle, ドローン) に対する一番の期待は、自由なタイミングで必要な場所のデータを簡便に取得することではないだろうか。こうしたメリットは、UAV の 5 つの特性—低コスト、適時性、高分解能性、三次元情報、非代替性—として整理できる¹⁾。撮影やセンシングを行うドローン、つまり情報収集ドローンを扱う際には、「飛ばせる、その先」のリテラシーが求められる。それはすなわち、空間情報の取り扱い技能である。本稿では、研究や社会課題の解決に UAV を安全かつ有効に活用するための要点を論考する。

2 UAV-SfM の概要

(1) SfM-MVS のメリット

1) SfM-MVS の原理

UAV に搭載された可視カメラを垂直真下に向けて、まっすぐに飛行させながら写真と写真が 70 ~ 80% 重なるように連続的に撮影する。隣り合うコースについても、同程度のオーバーラップを持たせる。これにより、一定の範囲をカバーするステレオペアの写真群が得られる。この時、撮影位置とカメラの向き (外部評定要素)、およびレンズの歪み (内部評定要素) の各パラメータが明らかであれば、写真に写る地上の任意の一点 (1 画素) の三次元座標を計測することができる。こうした複雑かつ大量の処理を自動的に行う技術が、写真測量を源流に持つ SfM-MVS 写真測量 (Structure from Motion and Multi-view Stereo) である。特に、オルソモザイク画像 (地図と重なる写真地図) を作成するだけであれば、地図が欲しい範囲をタブレット PC の地図上で選択するだけで、UAV の飛行から SfM 解析までのほぼ全ての工程が

自動化された製品もある。DSM (Digital surface model 数値表層モデル) を高精度に得たい場合は、地上基準点測量などを組み合わせ、写真測量としての精度向上のための工程が発生する。それでもなお、研究者個人レベルで実施が可能な作業量である。UAV, SfM, L1 バンド搬送波による GNSS 測量は、いわば UAV-SfM による計測の 3 種の神器である。これらはほぼ同時期に、低価格かつ実用レベルの製品が相次いで世に登場した。これらにより、1km² 程度の範囲ならば、半日程度の作業でデータを取得することができる。

2) UAV-SfM による四次元情報

大草原の景観とその野焼きで知られる九州の阿蘇火山では、2012 年 7 月九州北部豪雨に伴い、多数の斜面崩壊が発生した。この地域では、近年、およそ 10 年ごとに豪雨による集団多発的な斜面崩壊が発生している。しかしこれまでは、同じ斜面を、高い分解能で繰り返し観測できる低コストで簡便な手法が無かったため、次の崩壊が発生するまでの間、崩壊地の植生回復の過程や、直前の崩壊と次に発生する崩壊との位置的な関係性、次の崩壊発生メカニズムなどを詳細に明らかにすることが難しかった。

そのような中、2014 年より 2020 年現在まで、阿蘇火山の中央火口丘、仙酔峡地域を対象として、夏と冬の野焼き後の年 2 回を目安として、毎年観測を行っている。2016 年 4 月には、熊本地震に伴う新たな斜面崩壊も発生するなど、豪雨と地震とによる斜面崩壊の性質を明らかにする上で有用なデータを蓄積している^{2), 3)}。このように、UAV-SfM の簡便性を活かすことにより、高分解能な三次元データのみならず、時間分解能の高いデータセットを取得することも可能である。

(2) 災害対応と UAV-SfM

UAV は無人ロボットの一つであり、ハイリスク空間

*国立研究開発法人 防災科学技術研究所 マルチハザードリスク評価研究部門 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Multi-hazard Risk Assessment Division

キーワード: 1) UAV (ドローン), 2) SfM-MVS 写真測量, 3) 空間情報, 4) STM for sUAS

の作業にも適用できるポテンシャルがある。こうした人が乗らないメリットの活用先として、災害対応が挙げられる。ただし現時点では、危険地における人間の作業を代替する用途よりは、アクセス困難地における情報収集用途での活用がメインである。

先述のとおり、UAV-SfMによるオルソ画像作成は劇的に容易になった。このインパクトを受けて、これまで主に指揮板と無線機で行っていた災害初動における状況把握に、デジタル地図化の波が押し寄せる日も来るだろう⁴⁾。デジタル化された情報の活用は、UAVの操縦技能だけでは達成できない。オルソ画像やWeb-GISなどの空間情報の取り扱い技能が重要になる。しかし現在、社会人が後天的に空間情報技術を学ぶ機会は限られている。こうした現状に対し、自治体や市井の人に向けた生涯学習や研修の機会の提供など、空間情報を軸とした科学技術研究の社会還元の一環が必要と考えている。

(3) 分解能と識別レベル

UAV-SfMによる観測を行う際、地上分解能はどのような基準で決めているだろうか。この問いは、分解能と識別レベル⁵⁾を理解することで合理的に解決できる。分解能は1画素に対する地上の距離であり、識別レベルは、物体を検知(2画素)、認識(8画素)、識別(12.8画素)するために必要な画素数である⁴⁾。何を、どの識別レベルで見たいのか、つまりUAV-SfMを実施する目的を明確化すれば、おのずと必要な地上分解能は決定される。無目的であると、無駄に高分解能な撮影計画を立ててしまう。これは、撮影・解析ともに長時間化するだけであり、非効率である。もし、Web-GISで共有する目的であれば、表示できる最大分解能はズームレベルに規制される。一般的な最大ズームレベルは21(分解能7.5cm)だが、そのWeb-GISシステムに分解能1cmのオルソ画像を投入しても、画面上では分解能7.5cmの画像しか得られない。

ところで、分解能と精度は別物である。高分解能は高精度を意味しない。飛行高度を下げればミリメートル級の分解能を得ることも可能だが、それはただ高精細というだけであり、位置精度とは全く無関係である。頻繁に誤用される例が多いので、特段の注意を要する。

(4) UAV-SfM実施時の留意点

UAV-SfMは、処理の自動化や低コスト性により、導入障壁は低い。一方、高精度データの取得には適切な対処が求められる。その代表的な留意点を5つ挙げる。

1) 内部・外部評定要素の高精度化:SfMでも写真測量と同様に、内部・外部標定要素の高精度化が要となる。しかし、UAVの飛行高度は低く、機体と地上との距離の差の変化が大きい。このため、キャリブレーション済みの内部標定要素が、必ずしも最良の結果を生むとは限

らない。さらに、カメラの撮影設定、地上基準点の測量精度とその分布の偏り、写真から自動抽出される画像特徴点の量と精度の差異といった、精度に影響を及ぼす要因が大きな変数として存在している。このため、観測領域内でも場所により異なる精度を示す。そして、地上基準点およびグラントゥールースの高精度な測量には、機材由来の限界がある。GNSSであれば最良でもセンチメートル精度、トータルステーションではミリメートル精度も可能だが、測量範囲内の広い範囲で、二点間の視通を得ることは難しい。複数時期の地表面の変化を捉える場合、グラントゥールースの測量精度よりも小さい変化は誤差に含まれるため、計測することはできない。

2) 撮影対象の性質:草、樹木の葉、水面など、動く対象物は計測ができないか、計測精度が一定しない。「動く」とは、ステレオペア写真に写る対象物の位置が、分解能の1/2以上変化することである。この問題は、写真の分解能を高めるほど顕著に生じる。

3) 非等時性:一定範囲の撮影飛行には、ある程度の時間を要する。このため、雪崩や土石流のように常時変化する現象を、計測対象とすることはできない。また、飛行の最中にも太陽は移動し、時に雲の影響も生じるため、撮影範囲の全域で等しい光量を得ることが難しい。このため、近赤外の撮影では写真間の環境光の差異が問題になる。環境光を計測し補正するセンサーも存在するが、反射率補正の原理的な難しさは避けられない。

4) 非均質性:一枚の写真で影と日向があるように、画素ごとに、自然光の入射強度が異なる。植生、建物、地形、これらと太陽との位置関係および雲の存在により生じる自然現象だが、完全に回避することは難しい。可視画像では、過剰な明部・暗部の画質が低下し、情報量が減る。近赤外画像では、同じ写真内で入射光の強度が異なる部分が存在するが、その補正は原理的に困難である。さらに、周辺光量低下のように、内部標定要素では補正できない光学的な光量不均質性の影響も受ける。

5) グラウンドスミア:飛行しながら撮影するため、不動の被写体であっても、ブレて写ることがある。露光中に分解能の1/2以上の機体移動があると、カメラブレを生じる。この問題も、写真の分解能を高める、つまり、カメラの大画素化や低高度の飛行で顕著に生じる。シャッタースピードの高速化には限界があるので、飛行速度を落とさざるを得ない。つまり、作業効率が大幅に低下する。

3 操縦技能の定量的な評価手法

(1) 操縦技能の不確定性

安全の確保のためには、一定以上の操縦技能が求めら

れる。一方で、操縦技能は、レフェリーによる客観的、定量的な評価が難しい側面がある。年間2倍弱の速度で事業者数が増加中の、ビジネス要素の強い民間のドローンスクールでは、レフェリー間の基準を揃えることや、それを維持することも難しいと思われる。また、国土交通省航空局に対する許可・承認の申請には、10時間以上の操縦経験時間を有することが求められる。しかし、10時間を安全の閾値とする根拠は明らかではない。このように、民間資格にしても10時間基準にしても、必ずしも一定の技能水準を保証するとは限らない状況にある。

(2) STM for sUASによる操縦技能の定量評価

アメリカ国立標準技術研究所⁶⁾が考案したSTM for sUAS (Standard test method for small unmanned aerial systems)は、操縦者の技能と、機体、ペイロード(カメラ)、画面インターフェイスのそれぞれの性能を、定量的に評価することができる手法である。この試験により、UAV操縦者の能力が情状酌量の余地なく、公正かつ明確に数値化される。また、一定の技能を持った操縦者が、異なる機体で同じ試験を行うことにより、機体の操縦性を評価することもできる。さらに、カメラの視力的な性能(どこまで細かいものが見えるか)や、同じカメラであっても、FPVモニター・外部モニターなどの画面インターフェイス、動画・静止画の規格、それぞれの違いによる見え方性能も評価できる。

この試験の特徴は、判定基準が簡単かつ明快な点にある(次項)。このため、UAVを知らない者でも判定ができる。一つの試験方法で何通りもの性能評価ができる上、判定の客観性が高いという、よく練られた試験手法である。ただし、このSTM for sUASは、あくまでも操縦者の技能とそれを基準とした各種性能評価のみを対象としている。災害時のUAV活用求められる空間情報の活用技能など、実務で必須となる他の技能については、評価対象とならない。

日常の操縦訓練とその試験としてSTM for sUASを導入することにより、個々の操縦者の技能が確実に証明できるようになる。さらに、この試験方法が広く実践され、操縦者の技能の統計的な位置づけが明らかになれば、災害時のUAVによる情報活動を認めるために必要な、最低限の操縦技能のしきい値を設定することもできるだろう。

(3) 操縦技能の判定

STM for sUASでは、操縦技能の判定を次のように行う(図1)。ターゲットとして設置したバケツの底には、外周リングを伴う数字やアルファベットが描かれている。UAVのカメラから寸胴バケツの底を見ようとし

図1 ターゲットの判定基準

左：成功、右：失敗。中央のように外周リングが少し欠けている場合は失敗として扱う。ただし、画面上での見え方にも依存するため、試験実施機関で判定方法を統一する。

図2 ターゲットを設置するスタンドの例

左：自作の木製スタンド。右：測量用アルミ脚を利用した例。基本設計は、脚の角度45度で4つ、真上に1つ、合計5つのターゲットを設置する。右のように手持ちの資機材で工夫して作成してもよい。木製スタンドは2×4材などで安価に簡単に自作できる。

図3 レイアウトと試験の実施例⁶⁾

上：定位置の保持試験、下：側方機動の試験の例。NIST⁶⁾の図に加筆・修正。上は、各スタンド上空でホバリングし、真下と俯角45度の位置にあるターゲットを正確に見る操作を行うもの。下は、スタンド側方を飛行させ、俯角45度のターゲットを正確に見るもの。スタンドの配置や個数は変更してもよい。

た時、外周リングの全部が欠けずに見える位置は、バケツを起点とする上空の一つの直線上にのみ存在する。つまり、機体の位置とカメラの俯角を正確に操作できなけ

れば、正しくターゲットを見ることはできない。

操縦試験では、一定時間内に、UAV の位置とカメラ角度を正確に操作し、複数のターゲット（図 2）を次々と確認する操縦タスクを実行する（図 3）。そして、時間当たりのターゲット確認成功数を求めることで、操縦技能を定量化することができる。

4 UAV の課題

市販 UAV の性能は年々向上している。しかし、航空機としての本質的な性質については、あまり大きく進展していない面もある。この問題を、次の 3 点に整理した。

(1) 安全性の定量的評価

操縦の容易性は向上し、それによって感覚的には、安全な印象も強化された。しかし本質的には、有人航空機と同様に、安全性は総運航回数（時間）に対する事故率として表現されるべきである。現時点では、ドローンの飛行安全性に対する定量的なリスク評価も、それに必要な事故実績の網羅的収集も十分に行われているとはいえない。飛行のリスクが不明であるために、いわゆる「第三者上空の飛行」が法的に制約される（許可されない）主たる理由となっている。

(2) 航続時間

上空の一点に静止（ホバリング）できるマルチコプタータイプの UAV は、常に飛び続けなくてはならない固定翼 UAV よりも汎用性が高い。しかし、マルチコプター UAV は、航続時間が短いことが弱点である。どのような用途で使うにしても、航続時間の短さが大きな制約要因となる。この課題の本質的解決には、バッテリーの技術ジャンプが必要と思われる。バッテリー技術に対するいくつかの技術的挑戦が見られるが、まだ、一長一短の状況にある。

航続時間の問題に付随して、操縦装置と機体との通信の問題もある。現在の 2.4GHz 帯の直接通信では、通信距離にはおのずと限界がある。飛行の長時間化の実現には、関連法規を含めた間接通信インフラの整備が求められる。そして、日本では丘陵地や山地が国土の 7 割を占めており、ドローンによる配送などの活用が期待される中山間地の農村では、携帯電話の不感地帯も広く存在する。こうした環境では、UAV の低コスト性を阻害しないような通信環境の整備も求められるだろう。

(3) 汎用性

UAV のペイロード（カメラなどの搭載物）には、多くの場合、機体とセットで開発された専用品が取り付けられる。UAV の用途はペイロードによって決まるため、その変更ができないことは、他用途への転用が難しいこ

とを意味する。また、人が乗って操縦しないために、突風、強磁場、電波途絶など、機体に対する様々な外乱に対する機体制御性能が、飛行可能な環境の限界を決める。機体外部状況のセンシング、機体制御のソフトウェア、プロペラやモーターなどの推進システムなど、ハード・ソフトの両面においてさらなる発展が期待される。

5 まとめ

UAV-SfM により、空間情報の適時、容易かつ低コストでの取得が実現された。UAV-SfM を学術研究のツールとして活用することで、これまで実施が難しかった研究の展開が期待される。また、社会における情報収集ドローンの活用には、操縦技能に加えて空間情報の取り扱い技能の習得と、その教育研修機会の増加が求められる。

UAV 飛行の安全確保のために、操縦技能を担保する仕組みが必要とされている。無人の機体は、制御に不具合が生じた場合に、外見から状況を判断して人間が対処しなくてはならない。SfM 関連の飛行の多くが自動化される中で、緊急時の対応こそが人間に求められる役割となる。操縦の自動化が進む旅客機でも、緊急時の対応は人間の仕事である。UAV も同様の道を辿るように思われる。そのような中、操縦技術の習得と評価において、STM for sUAS には、これからの操縦技能のあり方をリニューアルするインパクトがある。

人が乗らないことがメリットである移動体は、逆説的には機体制御技術の精緻さが運用の限界を規定する。バッテリー技術のジャンプと共に、さらなる関連技術の発展が期待される。

参考文献

- 1) 内山庄一郎 (2019): 新たな観測手法としての SfM 写真測量の活用. 地震ジャーナル, 67, 58-62.
- 2) Saito, H., Uchiyama, S., Hayakawa, Y.S., Obanawa, H., (2018): Landslides triggered by an earthquake and heavy rainfalls at Aso volcano, Japan, detected by UAS and SfM-MVS photogrammetry. Prog Earth Planet Sci 5, 15, doi:10.1186/s40645-018-0169-6.
- 3) 齋藤仁・内山庄一郎 (2019): 多時期のドローン調査に基づく斜面崩壊地と植生回復モニタリング. CSIS DAYS 2019, A10.
- 4) 内山庄一郎 (2020): ドローン活用ガイド 2020. 東京法令出版, 印刷中.
- 5) John Johnson (1958): Analysis of image forming systems, in Image Intensifier Symposium, AD 220160, 244-273.
- 6) Adam Jacoff (2019): Measuring and Comparing Small Unmanned Aircraft System Capabilities and Remote Pilot Proficiency, Version: 2019-09-12. National Institute of Standards and Technology.

Keywords: 1) UAV, 2) SfM-MVS photogrammetry, 3) Geospatial information, 4) STM for sUAS