

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Investigating the indeterminacy and inaccuracy of camera intrinsic parameters in Unmanned-Aerial-Vehicle-based photogrammetry using structure from motion (SfM を使った UAV 写真測量における内部パラメータの推定の不定性と不正確性に関する研究)
氏 名 (Name)	HO THANH TRUC
<p>無人航空機 (UAV) を用いた空中写真測量は，インフラ点検，鉱山測量，ハザードモデリング，環境モニタリングなど多様な分野において，高解像度の 3 次元 (3D) モデルを生成する強力な手法として注目されている。Structure from Motion (SfM) はこの手法の基盤であり，カメラの内部・外部パラメータを同時に推定し，Multi-View Stereo (MVS) による高密度点群などの 3D 成果物の作成を可能する。地上基準点 (GCP) などの画像以外の測定を最小限に抑えつつ，UAV 写真測量の信頼性を向上させることが望まれている。</p> <p>近年，画像ごとに光学中心の緯度・経度・高度をセンチメートル級で記録可能な RTK-GNSS 受信機を搭載した比較的高価な RTK ドローンが普及している。この発展により，SfM のカメラパラメータ推定精度が向上し，ひいては UAV 写真測量の精度も高まる。しかし，SfM の過程には最終的なモデル精度を低下させうる実務上の課題が存在する。具体的には以下の 3 点である。</p> <p>1. SfM の解析設定が最適でないことによる精度低下の懸念 SfM には多数の解析設定項目が存在するが，既往研究の多くは標準的な解析設定で SfM の精度・精度 (precision) を評価しているため，解析設定の精度への影響は明らかになっていない。最適解析設定は画像セットごとに異なり実用場面では不明であるため，SfM の解析設定が最適でないことによる精度低下が小さい (非最適解析設定に頑健な) 撮影方法を探ることは重要である。最近の報告では，20°–35° のピッチ角を用いた撮影方法 CPA-2D-GP (Constant-Pitch-Angle, Two-Directional, and Gridded-Position shooting) が非最適解析設定に頑健であることが示唆されているが，これはより広範な条件で検証する必要がある。</p> <p>2. 非 RTK ドローン画像を用いた画像のみによる SfM における内部パラメータの不定性 UAV 写真測量では自己較正 SfM によりカメラ内部パラメータを推定するのが一般的である。しかし画像のみによる SfM では，撮影方法・被写体形状の組合せが Critical Configuration に該当すると，特定の内部パラメータが不定となり，不正確な結果を招く。どのパラメータがどのような撮影方法・被写体形状の組合せで不定となり，実務でどのように現れるかは十分に解明されていない。</p> <p>3. カメラ内部での歪み補正による内部パラメータ推定誤差の導入 SfM では入力画像に歪み補正が施されていないことを前提に，Brown モデルを用いたレンズ歪</p>	

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

みの補正を行う。しかし一部の UAV カメラでは、画像の保存時にメーカー独自の幾何補正を行う。こうした補正済み画像に Brown モデルを適用すると、内部パラメータ推定に追加の誤差を生じる恐れがある。

本研究では、これらの課題に対して以下の 3 つの検討を行った。

第 1 に、15 の画像セットと 750 通りの解析設定を用いて、SfM の精度の解析設定依存性を検証した。3 種類の GSD と 5 つのピッチ角で、CPA-2D-GP により撮影された画像セットに対し、RTK-GNSS によるカメラ座標をバンドル調整 (BA) に組み込んだ SfM を実施した。その結果、ピッチ角 20°および 30°の CPA-2D-GP 撮影が非最適な解析設定に対して最も頑健であり、全検証点での RMS 誤差は 0.056 m 以下に収まった。これにより、これらのピッチ角を採用することで、解析設定に関する懸念を最小化し、内部パラメータの推定を最も安定させられることが示唆された。これらの結果は、先行研究で示唆されていた CPA-2D-GP 撮影の非最適な解析設定に対する頑健性の一般性を示すものである。

第 2 に、CPA-1D-GP (Constant-Pitch-Angle, One-Directional, and Gridded-Position shooting) で得た画像セットを用いて、内部パラメータの不定性を検討した。数値実験の結果、理想条件 (UAV がストリップ間で高度・姿勢を完全に一定に維持) で取得した画像セットでは、焦点距離 (f) と主点座標 (cy) が不定となることが判明した。この不定性の影響は実データでも確認され、30 種の SfM の解析設定や標準設定での 50 回反復試行で内部パラメータ推定が不安定となった。一方、中間ストリップを導入して CPA-1D-GP を CPA-2D-GP に変更することで、本問題を効果的に緩和できた。

最後に、SfM 以前の画像保存時に施されるカメラ内部での歪み補正に起因する誤差を、CPA-2D-GP で得た画像セットから作成した数値標高モデル (DEM) の系統的な変形に着目して評価した。歪み補正ありなしの 2 ケースの画像セットから生成した DEM を、参照 DEM (すべての地上対空標識と RTK-GNSS で得たカメラ座標をバンドル調整に組み込んで作成した信頼できる DEM) と比較したところ、画像のみによる SfM では歪み補正の有無にかかわらず DEM の変形が発生した。しかし、カメラ座標をバンドル調整に取り込んでカメラパラメータを最適化すれば、変形は解消された。

以上より、本研究は SfM を用いた UAV 写真測量における内部パラメータの不定性・不正確性に関する実務的課題を系統的に検討し、その緩和策を実験的に検証した。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Investigating the indeterminacy and inaccuracy of camera intrinsic parameters in Unmanned-Aerial-Vehicle-based photogrammetry using structure from motion (SfM を使った UAV 写真測量における内部パラメータの推定の不定性と不正確性に関する研究)
氏 名 (Name)	HO THANH TRUC
<p>Aerial photogrammetry using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has emerged as a powerful technique for generating high-resolution three-dimensional (3D) models across various domains, including infrastructure inspection, mining surveying, hazard modeling, and environmental monitoring. Structure from motion (SfM) forms the foundation of this technique, enabling simultaneous estimation of camera intrinsic and extrinsic parameters and facilitating the creation of 3D products such as dense point clouds via Multi-View Stereo (MVS). Enhancing the reliability of UAV-based photogrammetry using SfM, while minimizing ground measurements such as ground control points (GCPs), is highly desirable.</p> <p>Recently, relatively expensive RTK drones equipped with RTK-GNSS receivers - capable of recording the latitude, longitude, and altitude of the optical center of each image with centimeter-level accuracy – have gained popularity. This advancement provides auxiliary information for SfM to improve the accuracy of camera parameter estimation and, in turn, enhance the accuracy of UAV-based photogrammetry. However, several practical issues in the SfM process can potentially degrade the final model accuracy. Specially, these include:</p> <ol style="list-style-type: none">Concerns about accuracy degradation due to non-optimal SfM analysis settings <p>SfM involves many analysis setting parameters, but most previous studies have evaluated the accuracy and precision of SfM using only standard analysis settings. Thus, the influence of analysis settings on SfM accuracy and precision remains unclear. Since the optimal settings differ by image set and are typically unknown in practical situations, it is important to identify image acquisition methods that are robust to non-optimal analysis settings. Recent reports suggest that CPA-2D-GP (Constant-Pitch-Angle, Two-Directional, and Gridded-Position shooting) with pitch angles of 20°–35° may be robust under such conditions, but further validation under broader conditions is necessary.</p> <ol style="list-style-type: none">Indeterminacy of intrinsic parameters in image-based SfM using non-RTK drone data <p>In UAV-based photogrammetry, SfM with self-calibration is commonly used to estimate camera intrinsic parameters. However, when SfM is performed using only images - referred to as image-based SfM, and the combination of shooting method and scene geometry falls into a critical configuration, certain intrinsic parameters may become indeterminate, resulting in inaccurate outcomes. It remains unclear which intrinsic parameters may be indeterminate, under which combinations of camera motion and scene geometry and how it manifests in practice.</p> <ol style="list-style-type: none">Introduction of inaccuracies in intrinsic parameter estimation due to in-camera distortion correction <p>SfM typically applies lens distortion correction using the Brown model, under the assumption that no prior</p>	

distortion correction has been applied to the input images. However, some UAV cameras perform manufacturer-specific geometric corrections when saving images. Applying the Brown model to such pre-corrected images may introduce additional errors in intrinsic parameter estimation.

To address these issues, this study conducted three investigations:

First, the robustness of SfM accuracy and precision across different analysis settings was examined using 15 image-sets and 750 analysis settings. Images captured at three different GSDs and five pitch angles by the CPA-2D-GP shooting were exploited in this study. SfM was performed for 750 analysis settings with camera coordinates measured by RTK-GNSS integrated into the bundle adjustment (BA). Results demonstrated that CPA-2D-GP shooting with 20° and 30° pitch angles was the most robust against the non-optimality in SfM settings, with RMS errors for all validation points not exceeding 0.056 m. These results suggest that employing these pitch angles minimizes concerns related to SfM settings, and yields the most stable estimation of intrinsic parameters. These findings confirmed the generality of the robustness of CPA-2D-GP shooting against non-optimal SfM settings, as suggested by the previous research.

Second, the indeterminacy of intrinsic parameters in SfM was examined using images captured by Constant-Pitch-Angle, One-Directional, and Gridded-Position shooting (CPA-1D-GP). Numerical experiments demonstrated that the focal length (f) and principal point coordinate (c_y) were indeterminable in images acquired under ideal conditions, where the UAV maintained a perfectly constant altitude and orientation across strips. This indeterminacy was also confirmed in real datasets, manifested as instability of intrinsic parameter estimation across 30 different SfM settings and in 50 repeated trials under a standard setting. However, introducing intermediate strips to transform CPA-1D-GP into CPA-2D-GP flight design effectively mitigated this issue.

Finally, this study evaluated inaccuracies introduced by in-camera distortion correction applied during image saving, prior to the SfM process, by focusing on its effect on systematic deformation in digital elevation models (DEMs) derived from CPA-2D-GP images. DEMs generated from images with and without distortion correction were compared to reference DEMs, which were created using all ground markers as GCPs and RTK-GNSS camera coordinates in BA. The results showed that, in image-based SfM, DEM deformation occurred regardless of whether in-camera distortion correction was applied. However, when camera coordinates were integrated into the bundle adjustment for optimizing camera parameters, the deformation was eliminated.

In conclusion, this study systematically investigated practical issues related to the indeterminacy and inaccuracy of intrinsic parameters in UAV-based photogrammetry using SfM, and proposed experimentally validated strategies to mitigate these issues.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	HO THANH TRUC
審 査 委 員	主 査 : 神野 有生
	副 査 : 樋口 隆哉
	副 査 : 山本 浩一
	副 査 : 中島 伸一郎
	副 査 : 水上 嘉樹
論 文 題 目	Investigating the indeterminacy and inaccuracy of camera intrinsic parameters in Unmanned-Aerial-Vehicle-based photogrammetry using structure from motion (SfM を使った UAV 写真測量における内部パラメータの推定の不定性と不正確性に関する研究)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>近年の UAV 写真測量 (UAV で撮影した多数の写真による地物の 3 次元復元) の普及は、廉価な UAV の発達に加え、SfM (Structure from Motion) という自動的な解析技術に支えられている。SfM は、重なりをもって撮った写真のみから、各写真の相対的な撮影位置・向きに加え、カメラの幾何特性を表すパラメータ (内部パラメータ) を同時推定できる技術であるが、実用上は精度面の課題も残っている。本研究は、SfM を用いた UAV 写真測量について、広く用いられる一定ピッチ角グリッド撮影 (カメラを UAV 進行方向に真下から一定角度傾けたまま、平行な多コースを飛行しながら撮影する方法; 本論文では、各コースから次コースへのターン飛行中に撮影を行わないものは CPA-1D-GP, 行うものは CPA-2D-GP と呼称) を例に、実用上の 3 つの課題について検討している。</p> <p>第 1 に、SfM の解析設定が精度に与える影響について、CPA-2D-GP に関する現地実験データを多数の解析設定で解析することにより検討し、ピッチ角が 20° や 30° であれば、解析設定によらず安定した高精度を与えることなどを示した。この成果は、既往研究で示された知見をより広範な条件下で示したという位置づけである。</p> <p>第 2 に、SfM において一部のパラメータが理論的に不定になる可能性について、CG を用いたシミュレーションデータと現地実験データに基づいて検討し、CPA-1D-GP ではカメラの焦点距離と主点位置が理論的に不定になり、現実にも推定が極めて不安定になることを、初めて明らかにした。CPA-1D-GP は広く用いられる撮影方法の 1 つであることから、この成果は学術的に新しいだけでなく、実務者にとって重要な警告を与えている。また実用的な対策として、各コースから次のコースへのターン飛行中にも撮影を行うことで、つまり CPA-2D-GP を採用することで、この問題を解消できることを示している。</p>	

第 3 に, SfM において, 画像の保存前にカメラ内部で行われるレンズ歪みの補正が, SfM で推定される地形の歪みを誘発している可能性について, CPA-2D-GP に関する現地実験データにより検討した。結果として, その可能性を否定するとともに, 撮影位置の RTK-GNSS 測位の利用によって歪みを除去できることを示した。

このように本研究で得られた知見は, 学術的に新しい知見に加え, UAV 写真測量の実用において注意が必要な重要な知見を含んでいる。また, すべての結論が, 実験データに基づいて科学的に導かれている。

公聴会における主な質問内容は, ダブルグリッド撮影 (垂直な 2 方向の一定ピッチ角グリッド撮影を組み合わせた撮影) の有効性を問うもの, UAV に多カメラを搭載することの有効性を問うもの, 不定性がソフトウェア依存か否かを問うもの, 実際の飛行におけるピッチ角の一定性の程度を問うもの, スライドの含意を確認するものなどであった。発表者からは概ね的確な回答が得られた。

以上より本研究は独創性, 信頼性, 有効性, 実用性ともに優れ, 博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会, 公聴会での質問に対する応答などから, 最終試験は合格とした。

なお, 関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 2 編)

- 1) Truc Thanh Ho, Ariyo Kanno, Yuji Matsuoka, Masahiko Sekine, Tsuyoshi Imai, Koichi Yamamoto, and Takaya Higuchi, Robustness of Structure from Motion Accuracy/Precision Against the Non-Optimality in Analysis Settings: Case Study in Constant-Pitch Flight Design, International Journal of Automation Technology, Vol.18, No.5, pp. 621-631, 2024.
- 2) Truc Thanh Ho, Riku Sato, Ariyo Kanno, Tsuyoshi Imai, Koichi Yamamoto, and Takaya Higuchi, Indeterminacy of camera intrinsic parameters in structure from motion using images from constant-pitch flight design, Remote Sensing, Vol 17, No.12, Article number 2030, 2025.