UAV 空中写真を用いて SfM により生成したオルソ写真の位置精度検証に関する事例報告 —宮崎大学田野演習林スギ人工林における事例—

宮原 史浩¹・光田 靖^{2*}

¹ 宮崎大学大学院農学研究科 〒 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

² 宮崎大学農学部 〒 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

A report of evaluation about position accuracy of ortho photos derived from SfM using UAV aerial photos – A case of a sugi plantation stand in the Tano forest science station of University of Miyazaki

Fumihito Miyazaki¹ and Yasushi Mitsuda^{2*}

¹ Graduate School of Agriculture, University of Miyazaki, 1-1 Gakuenkibanadainishi, Miyazaki, 889-2192 Japan

² Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, 1-1 Gakuenkibanadainishi, Miyazaki, 889-2192 Japan

Key Words: GNSS survey, PPK survey, GCP, Flight plan, RTKLIB

キーワード: GNSS 測量, PPK 測位, 地上基準点, 飛行設計, RTKLIB

はじめに

UAV を用いて空撮した空中写真に SfM を適用して作成したオルソフォトを利用するにあたって、その位置精度は重要な事項である。近年、UAV 空中写真から SfM により生成されたオルソフォトを、森林の所有境界確定や森林施業の実施確認といった林業の現場で用いることに注目が集まっている（例えば、古家 2020）。また、景観生態学分野の研究においても、UAV 空中写真から SfM により生成された三次元点群やオルソフォトが、対象とする景観の構造や分布パターンを解析するために用いられている（例えば、佐々木ほか 2017, 村上 2018, 中田ほか 2020）。このような実利用において、UAV 空中写真由来のオルソフォトがどのような位置精度を持っているのかを把握することが重要である。

UAV は GNSS 測量を行いつつ自律飛行するため、UAV 空中写真には撮影点の地理座標が付与されるが、UAV の GNSS 単独測位では十分な位置精度が得られないことが多い。撮影時に GCP（Ground Control

Point: 地上基準点）となる対空標識を設置し UAV 空中写真に映り込むようにして、SfM を適用する際に正確な GCP の地理座標を与えることで、オルソフォトの位置精度を高くすることが求められる（林野庁 2019）。しかし、対象が森林域である場合、樹木が地表を覆っていて GCP を設置することが困難な場合が多い。そのため、RTK 測量が可能な UAV を用いて空中写真に付与される地理座標の位置精度を高くすることで、GCP を用いずに位置精度の高いオルソフォトを得る方法が注目を集めている（古家 2020）。ただし、対象が森林域である場合、携帯電話ネットワークの圏外となり、リアルタイムの補正情報を得ることができずに RTK 測量が不可能なことが少なくない。その場合には、基地局を現地に設定して、基地局の GNSS 観測データを用いて UAV の GNSS 観測データを事後に補正する PPK（Post Processing Kinematic）測量を行うこととなる（古家 2020）。

森林域を対象とした場合、UAV 空中写真を用いて正確な位置精度をもったオルソフォトを作成するためには、いくつかの障壁がある。先述のように GCP を設置することが難しく、SfM 解析時に GCP を用いて位置精度を向上させる方法を使うことができない

* 連絡先: mitsuda@cc.miyazaki-u.ac.jp

受付: 2021 年 4 月 22 日 / 受理: 2021 年 7 月 6 日

場合が多い。RTK 測量を行うことができる UAV は未だ高価であり、リアルタイム補正情報を得るためのサービス料も必要となって導入コストが高くなってしまう。また、携帯電話ネットワークの圏外であれば PPK 測量を行うことになるが、そのための機材および解析の知識も必要になる。以上のような要因により、林業の現場では普及機種の UAV による空中写真を用いてオルソフォトを作成することが多くなると予想される。

以上のようなことから、UAV による GNSS 単独測位の位置情報のみに頼って作成されたオルソフォトがどのような位置精度を持つのか検証する必要がある。森林域において UAV 空中写真から SfM により生成されたオルソフォトの位置精度は、撮影条件、林分条件、および地形などの様々な要因から影響を受けると考えられるため一般化することは難しい。よって、様々な条件における事例の積み重ねが必要である。このような考えのもと、スギ壮齢人工林を対象として、UAV 空中写真から SfM により生成されたオルソフォトの位置精度を検証した事例を報告する。

対象地および方法

対象地は宮崎大学田野演習林 10 林班ろ小班で、53 年生のスギ人工同齢単純林であり、面積は約 1 ha である（図 1）。対象林分内に 30×30 m の方形プロットを設定して立木調査をおこなったところ、立木密度は 922 本/ha であり、平均直径および平均樹高は

図 1. 対象林分および GCP の配置

35.6 cm および 25.0 m であった。対象林分には 2 本の森林作業道が開設されており、この作業道上に GCP を設置することで空間的に分散させることが可能であると考え、この林分を対象地とした。

検証に用いた UAV は DJI 社 Phantom 4 Pro+（以下、P4Pro+ と記す）および Phantom 4 RTK（以下、P4RTK と記す）である。両機種ともにカメラは有効画素数 20M ピクセルであり、メカニカルシャッターを備えている。対応する GNSS は P4Pro+ が GPS および GLONASS であり、P4RTK が GPS, GLONASS, BeiDou, および Galileo である。自律飛行のための飛行計画においては、オーバーラップ率を 90%、サイドラップ率を 60% として、飛行高度を 60 m（地上解像度：約 2 cm）とした。飛行計画・自律飛行のアプリケーションについては、P4Pro+ では Pix4Dcapture を、P4RTK では DJI GS RTK を用いた。なお、P4Pro+ は送信機にモニタが付いている機種で、Phantom シリーズで一般的に用いられる iOS 用飛行計画アプリケーションである DJI GS PRO を利用することができない。そこで、P4Pro+ に Ctrl+DJI というアプリケーションをインストールして、このアプリケーションを介して飛行計画アプリケーションである Pix4Dcapture を利用した。なお、P4Pro+ では通常のグリッドパターン飛行経路に加えて、2 つのグリッドパターンを垂直に交差させるダブルグリッドパターンも試行した（図 2）。UAV による空撮は全て同日に行ったが、撮影日の違いによる気象条件（日射条件、風速など）の違いを考慮するために、その前日に P4Pro+ で試しに行った撮影のデータも用いて検証した。

精度検証を行うため、森林作業道上で上空から視認しやすいと思われる 7 か所に GCP を設置した。GCP の正確な地理座標を計測するために、PPK 測位が可能な 2 周波対応の GNSS 受信機（ビズステーション社 DG-PRO1RWS）を 2 台用いた。現地基準局とするために、1 台の GNSS 受信機は 1 点の GCP 上に

図 2. 撮影経路

固定して継続計測した。もう一台の受信機を移動局として、残り6点のGCPを移動計測した。その際、観測間隔は1秒として、それぞれの移動局では20分以上観測し、現地基準局では3時間以上の計測を行った。取得したGNSS観測データをRTKLIB (Takasu 2009)により基線解析してPPK測位結果を得た。まず、国土交通省電子基準点(田野, 電子基準点番号: 960715)のデータを利用して、1点で継続観測したデータをスタティック測量データとみなして基線解析し、PPK処理によるGCPの座標値を計算した。次に、この点を基準局とみなし、残り6点のGCPにおける観測データをキネマティック測量データとみなして基線解析し、PPK処理によるGCPの座標値を計算した。また、P4RTKで観測されたGNSS観測データについても同様にRTKLIBを用いて基線解析を行い、各写真に付与する撮影位置座標をPPK測位結果で置き換えた。P4RTKで計測を行うと0.2秒間隔のGNSS観測データと写真の撮影情報(撮影時刻、座標など)が記録される。全てのGNSS観測データを対象として基線解析を行い、各写真について撮影直前および直後のデータを抜き出して、線形補完により計算した位置座標を写真位置とした。なお、これらのGNSS測量およびPPK測位結果を得るためのRTKLIBによる基線解析については、農研機構による「小型GNSS受信機を用いた高精度測位マニュアル」(坂本ほか2019b)を参考にした。

これらのUAV空中写真に対して、Agisoft社Metashapeを用いてSfM解析を行ってオルソフォトを作成した。オルソフォト上で対空標識を視認して、その位置座標を計測し、GNSS測量データから基線解析を用いて得られたPPK計測結果を真値とみなして位置精度を計算した。オルソフォトは、1) P4Pro+で通常撮影した写真を用いた場合、2) P4Pro+でダブルグリッド撮影した写真を用いた場合、3) P4Pro+で別日にダブルグリッド撮影した写真を用いた場合、4) P4Pro+でダブルグリッド撮影した写真を用い、SfMにおいてGCPに位置座標を与えた場合、

5) P4RTKで通常撮影した写真を用いた場合、6) P4RTKで通常撮影した写真を用い、写真の撮影座標としてPPK測位結果を与えた場合の6パターンで作成し、位置精度を比較した。なお、パターン4においては、7点全てのGCPを事前に既知点として与えてSfM解析を行った。

結果および考察

GCP地理座標の計算においては、基線解析の結果から補足衛星が5個以上でFix解が得られたデータのみを抽出した。データの抽出率は10%程度となり、Fix解が得られる率が非常に低い観測となっていた。また、各GCPについて抽出したデータを確認したところ、Fix解が得られたデータであるにもかかわらず、大きくばらついていた。そこで、目視により分布の中心から大きく外れていると考えられるデータを削除し、残りのデータについてX、Y、Z座標それぞれの中央値をもってGCPの位置座標とした(坂本ほか2019a)。各GCPについて、このようにして計算した位置座標からのデータのばらつきを、X方向とY方向それぞれにおける偏差(絶対値)の平均値およびXY平面における距離の平均値で評価した(表1)。なお、後述のように観測精度が悪かったため、水平精度のみを評価の対象とし、より誤差が生じるとされる垂直精度は評価の対象としなかった(小林2020)。3時間以上の計測を行った現地基準局では、

表1. GCPの位置精度

GCP	平均偏差X方向	平均偏差Y方向	平均誤差
現地基準局	0.039	0.032	0.054
移動局1	2.539	2.697	3.918
移動局2	4.107	1.854	4.877
移動局3	2.811	3.428	4.756
移動局4	3.430	2.435	4.540
移動局5	3.100	3.376	5.031
移動局6	3.324	2.590	4.593
	[m]	[m]	[m]

表2. 生成されたオルソフォトの位置精度

機種 パターン*	P4Pro+				P4RTK	
	1	2	3	4	5	6
誤差 平均値 [m]	2.075	1.796	2.817	1.635	3.506	1.871
標準偏差	1.204	0.865	1.030	0.942	1.520	1.188

* パターン: 1) P4Pro+: 通常撮影、2) P4Pro+: ダブルグリッド撮影、3) P4Pro+: ダブルグリッド撮影(別日)、4) P4Pro+: ダブルグリッド撮影GCP補正、5) P4RTK: 通常撮影、6) P4RTK: PPK補正

計算により得られた位置座標から各観測データまでの平均距離が 5 cm となり、精度の高い位置計測ができたと考えられる。しかし、20 分程度の観測となった移動局では、観測データのばらつきが非常に大きく、位置計測精度に問題があると考えられる。遮蔽物のない農地で行われた同様の検証では位置精度が 5 cm 以下であったことと比較すると、著しく誤差が大きい（坂本ほか 2019a）。森林域の GNSS 計測においてはマルチパスの影響が大きく、正確な計測が難しい（例えば、露木 1994）。特に、今回は GCP を幅 3 m 程度の森林作業道に設置したため、樹高 25 m 程度の立木に囲まれることとなり、マルチパスの影響が顕著になったものと考えられる。P4RTK のデータを基線解析した場合には、ほとんど全てのデータにおいて Fix 解が得られており、このことからマルチパスの影響が大きいことが推察される。

GCP の位置精度に問題はあるものの、これを真値として UAV 空中写真から SfM により生成された 6 種類のオルソフォトの位置精度を検証した。GIS を用いて各オルソフォトにおける GCP の位置を計測し、GNSS 計測を PPK 補正して得た位置座標との距離を誤差として、誤差の平均値および標準偏差を計算した（表 2）。その結果、P4Pro+ によるダブルグリッド撮影を行った場合（パターン 2）において、誤差の平均値および標準偏差が GCP を用いない場合の最小値となった。しかし、同じ設定で前日に撮影した写真を用いた場合（パターン 3）では誤差が大きくなったことから、ダブルグリッド撮影が必ずしも高い位置精度のオルソフォトをもたらすわけではない可能性がある。P4RTK により撮影された写真を用いる場合、位置情報を補正しないと誤差が大きくなり（パターン 5）、PPK 測位結果で置き換えると誤差が小さくなった（パターン 6）。SfM 処理において GCP に座標値を与えた場合において（パターン 4）、平均誤差は比較した中では最小であったが、1.635 m となり期待していた 1 メートル以下の誤差にはならなかった。今回の事例では約 1 ha と狭い範囲を対象としたにもかかわらず、110 ha を対象とした事例（小川ほか 2017）と同程度の位置精度であった。このことは、GCP の位置精度に問題があることに加えて、幅の狭い森林作業道に GCP を設置したため GCP が映っていた写真が少なかったことにも要因があると考えられる。

今回の事例では、生成されたオルソフォト位置精度について明確に優れた撮影方法を見出すことはで

きなかった。普及型の UAV で撮影を行い、GCP を用いない場合では、ダブルグリッド撮影を行うことで水平誤差が 2 m 以内のオルソフォトを作成できる可能性が示唆された。ただし、対象範囲が広い場合にはダブルグリッド撮影を行うことは現実的でないだろう。GCP に座標値を与えて SfM 処理を行った場合でも大きく位置精度が向上しなかったのは、GCP の位置計測精度に問題があることも原因であると考えられる。P4RTK を用いて PPK 測位を行った場合には、期待したような高い位置精度をもつオルソフォトを作成することはできなかった。被写体のブレや白飛び・黒つぶれなど写真の質に起因する SfM 処理の限界であるかもしれない。今回の事例では写真撮影の設定をオートにしていたが、設定を変えて検証する必要がある。撮影高度を 60 m と固定したが、様々な撮影高度を試してみる必要もある（小林 2020）。また、中田ほか（2020）が指摘するように、より高い精度を求めるためには、カメラキャリブレーションを実施する必要がある。

今回の事例をとおして、森林域で UAV による空中写真から位置精度の高いオルソフォトを作成することの難しさが改めて確認された。森林域では森林作業道など開空度の低い場所に GCP を設置しなければならないことが多いが、そのような場所では GCP の正確な位置を計測するのは難しい。そのため GCP に座標値を与えて SfM を行ったにもかかわらず、高い精度のオルソフォトを生成できないという結果になってしまう。また、開空度が低い場合樹木に遮蔽されて GCP が映っている写真が少なく、SfM に際して十分な補正情報を与えることができないことが多い。このような状況から、P4RTK のような PPK 測位が可能な機種を用いた撮影が有用であると考えられる。今回の結果では、その優位性を示すことはできなかったが、GCP の位置精度にも問題があったので、さらなる検証が必要である。

謝 辞

今回の検証を行うにあたって、Phantom 4 RTK での空中写真撮影において宮崎県森林組合連合会にご協力いただいた。ここに記して、心より謝意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP21K05665 の助成を受けたものです。

引用文献

- 古家直行. 2020. 森林・林業現場でのドローン活用最前線. 現代林業 650: 12-34.
- 小林裕之. 2020. 撮影高度とDTMの違いがUAV-SfMによる森林計測に及ぼす影響. 森林計画学会誌 53(2): 69-79.
- 村上拓彦. 2018. UAVを利用した森林リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌 38(3): 258-265.
- 中田康隆・速水将人・興水健一・竹内史郎・蝦名益仁・佐藤創. 2020. RTK-UAVを用いた地形変化の観測と応用の可能性: 北海道胆振東部地震で発生した森林域の崩壊跡地における検証. 景観生態学 25(2): 43-52.
- 小川みゆき・太田徹志・溝上展也・吉田茂二郎. 2017. UAVとSfMを用いた森林計測における位置精度の検証. 九州森林研究 70: 145-147.
- 林野庁. 2019. UAV立木調査マニュアル. https://www.rinya.maff.go.jp/j/gyoumu/gijutu/attach/pdf/syuukaku_kourituka-2.pdf (最終確認 2021 年 4 月 15 日).
- 坂本利弘・岩崎亘典・石塚直樹・Sprague, D. 2019a. 小型GNSS受信機および測位演算プログラムパッケージ「RTKLIB」による対空標識の簡易・高精度測位手法に関する事例研究. 日本リモートセンシング学会誌 39(2): 123-132.
- 坂本利弘・岩崎亘典・石塚直樹・Sprague, D. 2019b. 小型GNSS受信機を用いた高精度測位マニュアル(ドローン用対空標識編). https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/130441.html (最終確認 2021 年 4 月 15 日).
- 佐々木剛・丹羽英之・朝波史香・鎌田磨人. 2017. 小型UAVを用いた海岸マツ林の林床光環境の推定. 日本緑化工学会誌 43(1): 51-55.
- Takasu T. 2009. RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS, FOSS4G 2009 Tokyo, Japan, November 2, 2009. http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/foss4g_2009_rtklib.pdf (最終確認 2021 年 4 月 15 日).
- 露木聡. 1994. 森林資源調査におけるGPS利用の可能性: ディファレンシャルGPS測位精度の比較. 森林計画学会誌 23: 45-58.