

UAV を活用した写真測量の精度検証 Accuracy Verification of Photogrammetry using UAV

基本図情報部 菅井秀翔・宮地邦英・中村孝之・南秀和・橘克巳¹

National Mapping Department Shuto SUGAI, Kunihide MIYAJI, Takayuki NAKAMURA,
Hidekazu MINAMI and Katsumi TACHIBANA

要 旨

国土地理院では、無人航空機（UAV）を基本図測量（電子国土基本図の修正作業）に活用することを目的とし、SfM 技術を用いた写真測量の精度検証を実施してきた。平成 27 年度に実施した精度検証では、固定翼型 UAV 及びマルチコプター型 UAV を用いて、基準点数及び配置の影響並びに斜め撮影の有効性について検証を行い、SfM ソフトウェアごとの傾向が異なるほか、斜め撮影の追加により高さ精度が向上することがわかった。平成 28 年度にマルチコプター型 UAV を用いて実施した精度検証では、撮影の重複率や内部標定要素の事前計測の有効性について検証を行い、撮影に必要な重複率の検討及び事前計測した内部標定要素の SfM 処理における取扱について注意が必要であることがわかった。精度検証で得られたこれら知見を基に、基本図測量での活用に向けて取組を進めていく。

1. はじめに

近年、無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle、以下「UAV」という。）が急速に普及している。従来の空中写真撮影を行ってきた有人航空機に比べ、高解像度の空中写真を簡便に撮影できる点にメリットがあり、写真測量分野への活用にも注目が集まっている。国土交通省が推進する i-Construction においても UAV を用いた測量が重要な技術として位置づけられており、国土地理院が定めた「UAV を用いた公共測量マニュアル（案）」を始めとした技術マニュアルが各種公表されている。

UAV を用いた写真測量においては、SfM/MVS（Structure from Motion/Multi View Stereo）技術が重要となる。SfM はコンピュータビジョンに由来する技術で、重複して撮影された複数の写真から抽出した多数の特徴点を用い、共線条件による制約に基づいて、カメラの内部標定要素及び外部標定要素、特徴点の三次元座標を一度に求める手法である。SfM によって求められた三次元幾何情報を基に、複数の写真間でのマッチングを行うことにより高密度の三次元点群やメッシュモデルを作成するのが MVS である。SfM ソフトウェア上では SfM 処理と MVS 処理が一貫して行われることから、本稿では、SfM 技

術と MVS 技術を併せて SfM 技術と総称することとする。従来の写真測量と UAV を用いた写真測量の決定的な違いは、搭載できる機材の差によって入手できる内部標定要素・外部標定要素の差にある。従来の写真測量では、航空機に搭載する測量用カメラを精密に較正し、内部標定要素を明らかにする必要がある。また、測量用航空機には GNSS/IMU 装置が搭載され、撮影時の位置や姿勢を取得することができる。一方、UAV は一般にペイロードが小さいため、精密計測を想定していない民生用カメラを搭載することとなり、GNSS/IMU 装置のように撮影時に外部標定要素を精密に取得する装置を搭載することもできない。先述のとおり、SfM 技術を用いれば計算の過程で内部標定要素と外部標定要素を推定計算し、三次元計測を実施することができるため、UAV 写真測量においては、SfM 技術は非常に重要である。

その一方で、SfM ソフトウェアのアルゴリズムはブラックボックスである。SfM 技術を用いて高精度な測量成果を得るためには、種々の条件で精度検証を行うことによりソフトウェアの挙動を理解し、適切な撮影と解析を行う必要がある。国土地理院では、基本図測量（電子国土基本図の修正作業）への UAV 及び SfM 技術の活用可能性を検討することを目的とし、平成 26 年度より SfM 技術による写真測量の精度検証を行ってきた。平成 26 年度の検証内容は早坂ほか（2015）で報告されている。本稿では、平成 27 年度に実施した鹿部飛行場での精度検証及び平成 28 年度に実施した日本写真測量学会 UAV テストサイトでの精度検証の結果を報告する。

2. 鹿部飛行場での検証（平成 27 年度実施）

平成 27 年度は固定翼型 UAV とマルチコプター型 UAV を用いた精度検証を実施した。検証サイトである鹿部飛行場は北海道茅部郡鹿部町にある民間の飛行場である（図-1）。撮影は平成 27 年 10 月 27 日に実施した。

2.1 撮影

固定翼型 UAV、マルチコプター型 UAV のいずれにおいても、カメラは SONY 社製 $\alpha 6000$ を、レンズは焦点距離 16mm の SONY 社製 SEL16F28 を使用

した。カメラの諸元を表-1 に示す。撮影設定は、シャッター速度はブレを考慮し 1/1,250~1/1,000 秒、絞りは画質を考慮し開放から一段絞って f4.0、手ぶれ補正機能は OFF、ピント合わせはオートフォーカスとした。



図-1 鹿部飛行場の位置

表-1 カメラ諸元

項目	概要
機種名	SONY α 6000
レンズ	SONY SEL16F28 焦点距離 16mm
画素数	6,000pix×4,000pix
センササイズ	23.5mm×16.2mm

2.1.1 固定翼型 UAV

固定翼型 UAV の検証では、フジインバック社製 B-2 を使用した (写真-1)。カメラは垂直下方又は俯角 45 度で機体に固定した。

垂直下方撮影は、オーバーラップ (以下「OL」という。) 90%, サイドラップ (以下「SL」という。) 60%で行うこととした。カメラの最短シャッター間隔が 1 秒, UAV の巡航速度が 110km/hであることを考慮し、撮影高度は撮影基準面から 320m, 撮影基準面上での地上画素寸法は約 8cm となるよう飛行コースを設計した。斜め下方撮影は、同一コースを往復することで、コース順方向及び逆方向それぞれで撮影を行った。撮影コース図を図-2 に示す。検証範囲をブロック 1, 2 に分割し、それぞれで解析を行った。ブロック 1 は滑走路を含む平坦な地域であり、ブロック 2 は北西方面の標高が高くなる傾斜地である。撮影枚数は、飛行時の風の影響等によりフライトによって多少前後したが、1 フライトあたりブロック 1 で約 70 枚、ブロック 2 で約 60 枚であった。

なお、これらの撮影は航空法施行規則 209 条の 4 (地表又は水面から 250m 以上の高さの空域で模型飛行機を飛行させる) に該当するため、航空局に事前に飛行計画を提出し、NOTAM を発行した。



写真-1 鹿部飛行場で使用した固定翼型 UAV

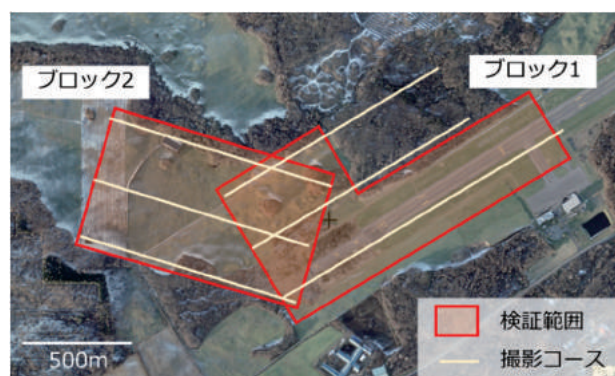


図-2 固定翼型 UAV の検証範囲及び撮影コース

2.1.2 マルチコプター型 UAV

マルチコプター型 UAV の検証では、エンルート社製 Zion Pro800 を使用した (写真-2)。垂直下方の撮影のほか、カメラを俯角 45 度にし、コース方向に対して順方向、逆方向、左方向、右方向の 4 通りの斜め写真撮影を行った。

平成 26 年度に実施したひたち海浜公園での検証結果 (早坂ほか, 2015) と対比する目的で、垂直下方撮影に関して OL90%, SL60%, 対地高度 130m で撮影を行った。この結果、撮影基準面での地上画素寸法は約 3cm となった。撮影コース図を図-3 に示す。撮影枚数は垂直下方写真が 117 枚、斜め撮影写真は 4 方向を合わせて 461 枚となった。撮影範囲は草地及びエプロンにあたり、起伏はほとんどない。また、エプロン部分は表面のテクスチャが乏しく、特徴点を用いる SfM 処理では障害となることが想定された。実際の解析では、三次元モデルの作成自体はできたものの、エプロン部分のモデルには凹凸が多数見られた。



写真-2 鹿部飛行場で使用したマルチコプター型 UAV

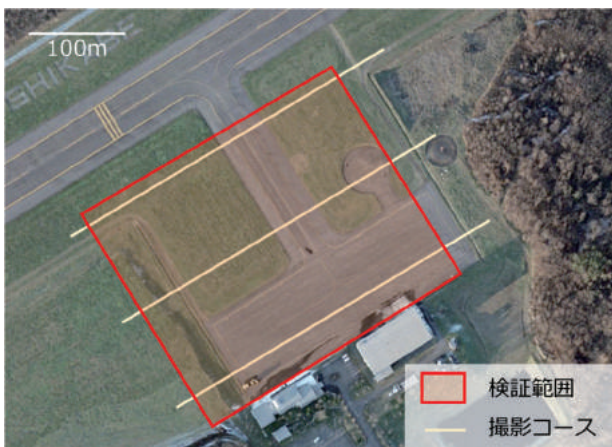


図-3 マルチコプター型 UAV の検証範囲及び撮影コース

2.2 結果

SfM 解析には、Pix4D 社 Pix4Dmapper Pro（以下「PM」という.）、Agisoft 社 PhotoScan Professional Edition（以下「PS」という.）、Acute3D 社 Smart3DCapture Master（以下「SC」という.）の3種類のソフトウェアを使用した。

2.2.1 固定翼型 UAV

固定翼型 UAV を用いた場合の精度検証手順は以下のとおりである。まず、SfM 処理で作成したオルソ画像上で検証点の位置の平面座標を計測する。次に、この平面座標を中心として半径 20cm 以内に存在する点群を抽出する。その後、抽出した点群が持つ高さ情報を、距離を重みとする IDW（Inverse Distance Weighted）法によって内挿し、高さ座標の計測値とする。最後に、水平・高さ座標の計測結果を、事前にネットワーク型 RTK 法（VRS 方式）による単点観測法で計測した検証点座標と比較し、検証点における残差を算出する。用いた検証点の数は、ブロック 1 で 17 点、ブロック 2 で 19 点である。固定翼型 UAV に関する検証項目を表-2 に示す。

表-2 固定翼型 UAV の検証項目

項目	内容
(1)基準点数	1. 直接定位以前の空中写真測量、基準点のみによるバンドル調整法での基準点数 2. 四隅・中央の 5 点の 2 通りで精度比較
(2)斜め撮影の追加	垂直撮影画像に、斜め撮影画像（コース順方向・逆方向）を加えて処理し、精度比較

(1)基準点数

GNSS/IMU による直接定位の採用以前の写真測量で、基準点のみを用いてバンドル調整を行う際の基準点数を採用する場合と、対象範囲の四隅及び中央の計 5 点を基準点として用いる場合の 2 通りについて比較を行った。直接定位採用以前の基準による基準点数は、ブロック 1 で 13 点、ブロック 2 で 10 点であり、いずれも四隅・中央の計 5 点とした場合より多い。基準点配点図を図-4 に示す。

基準点数を変化させた場合の検証点における平均二乗誤差を図-5 に示す。基準点数の増加により、誤差がある程度低減されることが認められるが、SfM ソフトウェアに SC を用いた場合のみ、基準点数を増やすと誤差の増大に繋がることもあるという結果となった。これについては 2.3.1 で考察する。

(2)斜め撮影の追加

垂直撮影画像に、コース順方向・逆方向の斜め撮影画像を追加し、垂直撮影画像のみによる解析結果と比較を行った。基準点は四隅・中央の 5 点とした。検証点における平均二乗誤差を図-6 に示す。ブロック 1 では斜め撮影画像を追加して処理したところ、水平・高さ精度の顕著な改善がみられた。ブロック 2 では、PS、SC については精度の改善が見られたものの、PM では斜め撮影画像を追加することでむしろ高さ精度が悪化するという結果が得られた。

2.2.2 マルチコプター型 UAV

マルチコプター型 UAV を用いた場合の精度検証手順は基本的には 2.2.1 に示した固定翼型 UAV での手順と同じであるが、地上画素寸法と点群密度の違いを考慮し、IDW 法の対象とする点群を、オルソ画像で計測された平面座標を中心とする半径 15cm 以内に存在する点群とした。

検証項目を表-3 に示す。

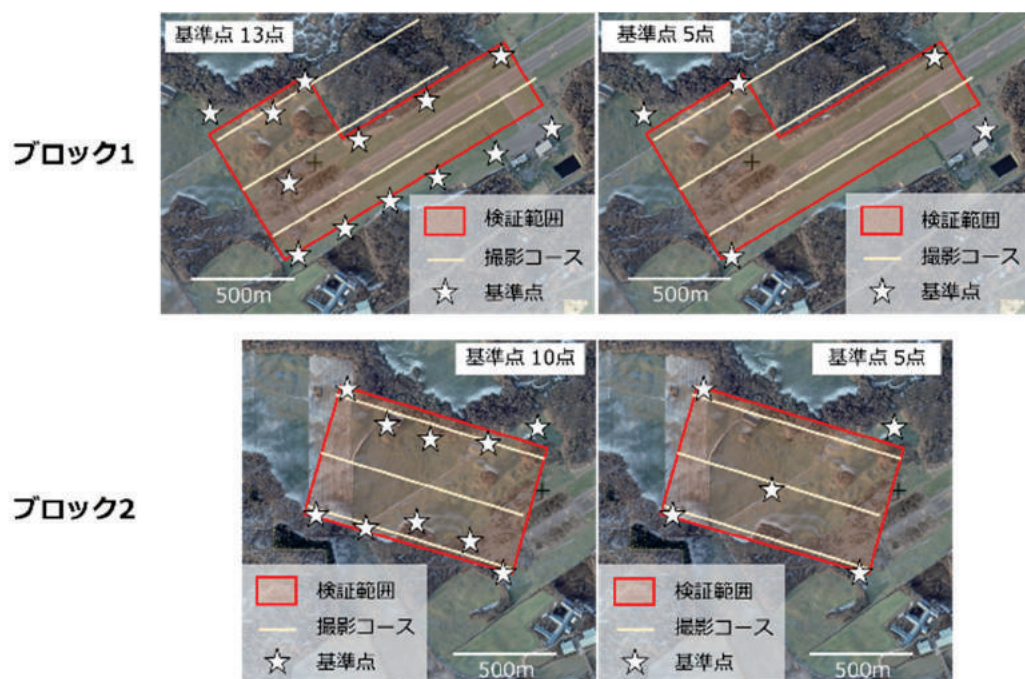


図-4 基準点配点図（固定翼型 UAV）

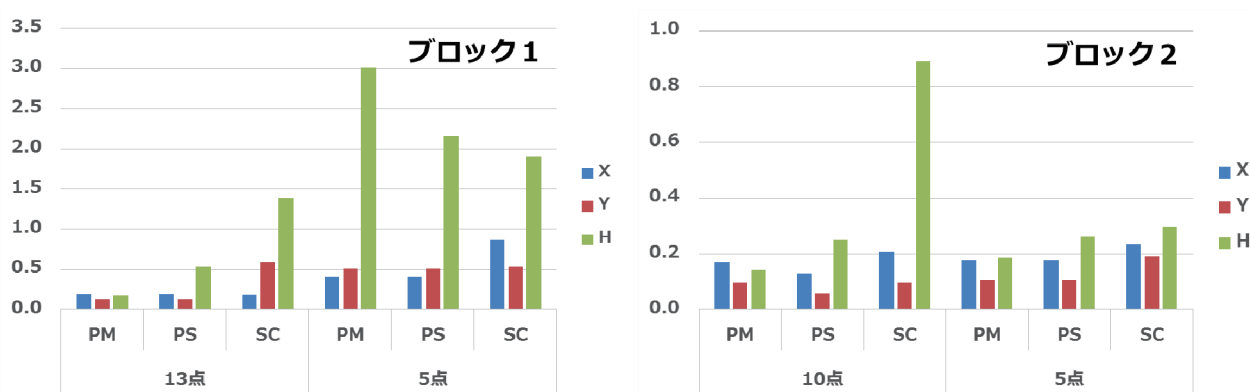


図-5 基準点数による検証点平均二乗誤差の違い（単位はメートル）

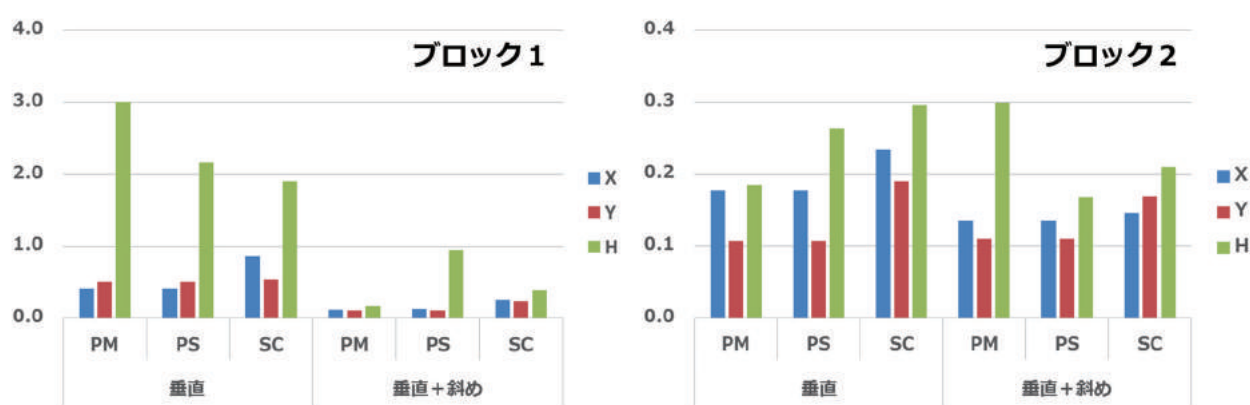


図-6 斜め撮影画像の有無による検証点平均二乗誤差の違い（単位はメートル）

表-3 マルチコプター型 UAV の検証項目

項目	内容
(1)基準点数	1. 直接定位以前の空中写真測量, 基準点のみによるバンドル調整法での基準点数 2. 四隅・中央の5点の2通りで精度比較
(2)基準点の観測数	基準点の観測を 1. 代表的な3枚程度で実施 2. 全写真で実施 の2通りで精度比較
(3)斜め撮影	垂直撮影画像に, 斜め撮影画像(コースに対して前後左右方向)を加えて処理し, 精度比較

(1)基準点数

直接定位採用以前の基準をもとに算出された基準点数 10 点で標定を行う場合, 及び四隅・中央の 5 点で標定を行う場合の 2 通りで比較を行った. 基準点配点図は図-7 のとおりである. 精度検証の結果を図-8 に示す. PM 及び PS では, 基準点数を 10 点に増やすと水平・高さ精度ともに改善し, 誤差 5cm 以内に収まっている. 一方で, SC では基準点数を 10 点に増やすと高さ精度が悪化するという結果が得られた. これは 2.3.1 で考察する.

(2)基準点の観測数

標定時, 一つの基準点に対して何枚の写真で観測(刺針)を行うかによって, 生成される三次元モデルの精度が異なる可能性がある. そのため, 基準点が写りこんでいる写真のうちから代表的なものを 3 枚選び観測を行う簡便な方法と, 基準点が写りこんでいる写真全てで観測を行う方法の 2 通りで精度の比較を行った. 結果を図-9 に示す. なお, 使用した基準点数はいずれも 10 点である. PM では観測数 3 の場合に比べ, 全観測を行うと水平・高さ精度ともに大きく改善するという結果が得られた. PS の場合では, 観測数 3, 全観測で得られる精度は同程度であった. 一方で, SC では精度がむしろ悪化するという結果となった. (1)で述べたとおり, SC では基準点が 10 点の場合に精度が悪化しており, 基準点の観測数以外の要素が精度に大きく影響している可能性がある.

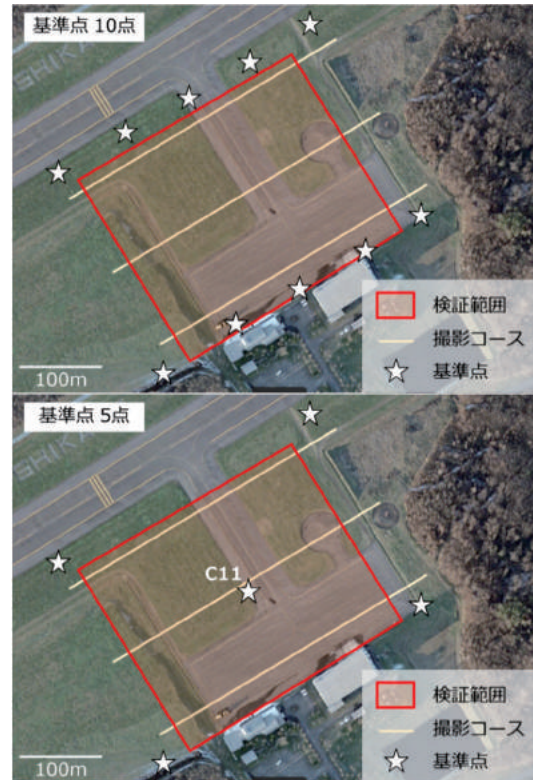


図-7 基準点配点図 (マルチコプター型 UAV)

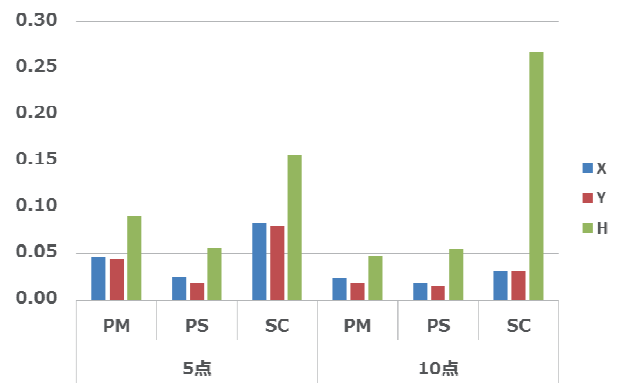


図-8 基準点数の違いによる検証点の平均二乗誤差の違い (単位はメートル)

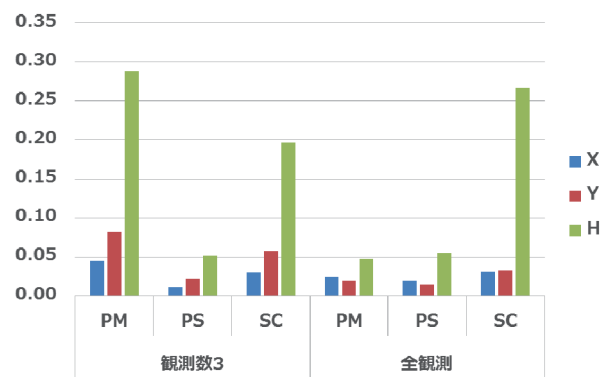


図-9 基準点観測数の違いによる検証点の平均二乗誤差の違い (単位はメートル)

(3)斜め撮影の追加

垂直下方撮影画像に、同一コースから前後左右 4 方向に向けて撮影した斜め撮影画像を加えて解析し、垂直下方撮影画像のみによる解析精度との比較を行った。なお、精度検証範囲を考慮し、斜め下方撮影画像のうち、写りこんだ範囲の大半が検証範囲外である画像は採用しないこととした。基準点 10 点で全観測を行った場合の比較結果を図-10 に示す。斜め撮影画像を追加すると、いずれのソフトウェアでも水平精度にそれほどの差は出ないが、PM と SC では高さ精度が改善していることが確認できた。一方で、PS においてはやや高さ精度が悪化した。

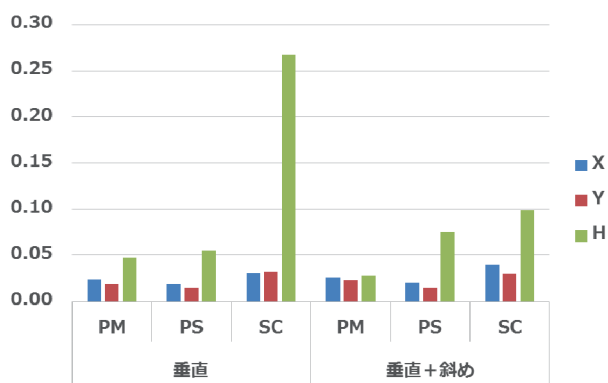


図-10 斜め撮影画像の有無による検証点の平均二乗誤差の違い（単位はメートル）

2.3 考察

2.3.1 基準点数および配点

固定翼型、マルチコプター型いずれのケースでも、PM および PS では基準点数が増えれば位置精度が改善するという結果となった。一方で、SC では、基準点数を増やすとむしろ高さ精度が悪化するという結果が得られた。この原因は、基準点の配点に原因があるものと考えられる。直接定位以前の基準で算出された数の基準点を用いる場合では、検証範囲の外周に沿って基準点が配置されている。基準点数は四隅・中央とした場合よりは多いものの、検証範囲中央部に基準点がないため、中央部でのモデルの歪みを抑えられず精度が悪化した可能性がある。マルチコプター型の撮影画像で、外周部に沿って配置された 10 点のほか、中央に 1 点（C11、図-7 参照）追加した計 11 点で解析を行うと、SC においても精度が大きく改善した（図-11）。このため、SC においては、外周部のみならずモデル化する範囲の中央部にも基準点を配置する必要があることが示唆された。固定翼型のブロック 2 での検証でも同様に、基準点数を 10 点から 5 点に減らすと SC では高さ精度が大幅に向上するという結果が得られている（図-5）。これは、基準点数を 5 点とした際に、検証範囲中央に

位置する基準点を選定したことが理由の一つと考えられる（図-4）。

このように、基準点の数及び配点が解析結果に与える影響はソフトウェアごとに傾向が異なることがわかった。測量作業で SfM ソフトウェアを使用する場合にはその傾向に留意した上で、検証点を用いて精度確認を行う必要がある。

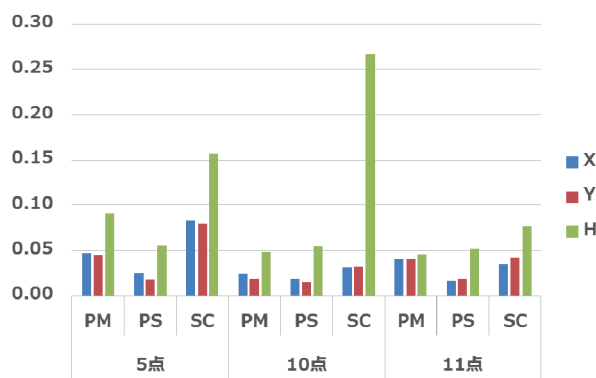


図-11 基準点数の違いによる検証点の平均二乗誤差の違い（単位はメートル）

2.3.2 基準点の観測数

マルチコプター型で基準点の観測数を変えて検証したところ、代表的な写真を 3 枚選んで観測する簡便法よりも、全観測の方が総じて精度が良いという結果が得られた。数枚を選択する簡便法に比べ、全観測では作業コストが大きくなるデメリットはあるが、精度向上に寄与することが期待される。選択する写真によっては精度に影響があることも予想されるため、解析の再現性を担保する観点でも、全観測を行った上での SfM 処理が推奨されるものと思われる。

2.3.3 斜め撮影の有効性

固定翼型、マルチコプター型のいずれの場合でも、斜め撮影画像を解析に導入することで特に高さ精度が向上することが確認された。他方向からの視点が増加されたことにより、三次元解析の信頼性が向上したことによるものと考えられる。その一方で、斜め撮影画像を追加すると、写真枚数が増加し、処理時間もその分増加するという問題も生じた。斜め画像撮影の必要性は、成果物に必要な精度を吟味した上で検討する必要がある。

3. 日本写真測量学会 UAV テストサイトでの検証 (平成 28 年度実施)

日本写真測量学会 UAV テストサイトは神奈川県足柄上郡松田町にある(図-12)。UAV を用いた測量の精度検証に活用することを目的として一般社団法人日本写真測量学会が整備した検証サイトで、長辺約 100m、短辺約 50m の範囲に、TS を用いて計測した対空標識が 76 点設置されている。サイトの大半はほぼ平坦であるが、東部と南部を流れる沢に向かって急激に落ち込み、高低差は最大で約 10m である。

垣内ほか(2016)は本テストサイトでマルチコプター型 UAV を用いた精度検証を実施している。地上画素寸法 1cm、OL90%、SL60%以上で撮影を行い、基準点 5 点を用いて PM により解析を行い、平均二乗誤差で X 方向 2.6cm、Y 方向 6.6cm、標高 4.5cm という結果が報告されている。

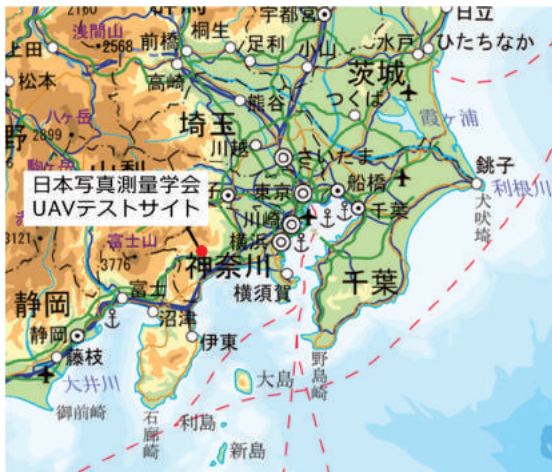


図-12 日本写真測量学会 UAV テストサイトの位置

3.1 撮影

機体は DJI 社製 Phantom 3 Professional を使用した(写真-3)。Phantom 3 はカメラが機体と一体化しているタイプの小型 UAV である。搭載カメラの焦点距離は 3.6mm、フォーカスは無限遠固定である。なお、先述の垣内ほか(2016)では一眼レフカメラで撮影した画像で精度検証を実施しており、本検証で用いたカメラはより簡素なものである。

撮影は、カメラを垂直下方向きに固定して実施した。撮影基準面はテストサイトの大部分を占める平坦面とし、OL90%、SL90%、地上画素寸法 1cm となるように計画した(図-13)。地上画素寸法 1cm で撮影を行う場合、撮影高度は撮影基準面から約 23m となる。しかし、自動航行時の飛行速度と撮影インターバルの制約から、一度のフライトで OL90% の撮影を行うことができなかったため、OL80%、SL90% の撮影を撮影位置をずらして 2 回行い、2 回分の撮影成果を合わせて擬似的に OL90%、SL90% での撮影を

再現した。撮影は平成 29 年 2 月 8 日に実施した。撮影枚数は全部で 403 枚となった。



写真-3 日本写真測量学会 UAV テストサイトで使用したマルチコプター型 UAV

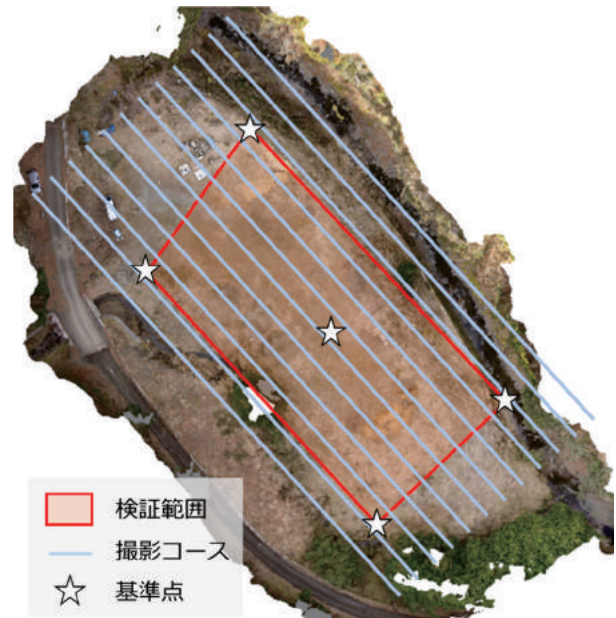


図-13 日本写真測量学会 UAV テストサイトでの撮影コース及び基準点配点図

3.2 結果

SfM 解析には、鹿部飛行場での検証で用いた PM、PS と、Bentley 社 ContextCapture Center (SC の後継、以下「CC」という。)の計 3 種類のソフトウェアを使用した。

解析条件を表-4 に示す。いずれの検証においても、使用する基準点は全ての場合で四隅・中央の 5 点とし、四隅の基準点に囲まれる範囲に存在する 48 点を検証点として用いた(図-13)。精度検証は以下の手順で実施した。まず、SfM ソフトウェア上で、検証点が写りこんでいる写真全てで観測を実施した後、SfM 処理を行った。その後、処理後に算出された各検証点における交会残差を用いて全検証点での平

均二乗誤差を計算した。各検証点における交会残差は、使用した3つのSfMソフトウェアいずれにおいても、解析後に作成される解析結果レポート上で確認することができる。

表-4 日本写真測量学会 UAV テストサイトでの解析条件

項目	内容													
(1) 重複率	以下の 7 通りの重複率で解析を実施し、精度を比較 <table><tr><th>OL</th><th>SL</th></tr><tr><td rowspan="2">90%</td><td>80%</td></tr><tr><td>60%</td></tr><tr><td rowspan="2">80%</td><td>80%</td></tr><tr><td>60%</td></tr><tr><td>70%</td><td>60%</td></tr><tr><td rowspan="2">60%</td><td>60%</td></tr><tr><td>30%</td></tr></table>	OL	SL	90%	80%	60%	80%	80%	60%	70%	60%	60%	60%	30%
OL	SL													
90%	80%													
	60%													
80%	80%													
	60%													
70%	60%													
60%	60%													
	30%													
(2) 内部標定要素	事前に実施したカメラ検定の結果の使用方法について、 ①使用しない (セルフキャリブレーション) ②初期値として使用し調整計算 ③固定値として使用 の 3 通りで精度比較													

(1)重複率

OL, SLともに90%での撮影を行い、そこから写真を間引くことにより様々な段階の重複率で精度比較を行った。使用するマシンのメモリ上の制約からOL90%, SL90%で撮影した全写真を一度に使ってのSfM処理はできなかった。そのため、最も重複率が高いものをOL90%, SL80%とし、表-4に示す7通りの重複率でそれぞれSfM処理を行った。解析結果を図-14に示す。なお、全ての重複率において、セルフキャリブレーションを行う設定で解析を実施した。3つのソフトウェアいずれにおいても、地上画素寸法1cmでの撮影に対し、どの重複率でも概ね水平精度2~4cm、高さ精度4~8cm程度の値が得られた。重複率を変化させても平均二乗誤差及び誤差最大値ともに大きく変化することなく、重複率が小さくなると誤差が大きくなるような傾向は特に見られなかった。

(2)内部標定要素

事前に一般社団法人日本測量協会のカメラキャリブレーションサービス(以下「カメラ検定」という。)により、UAV本体に搭載されているカメラの内部標定要素の計測を行った。カメラ検定で用いるソフト

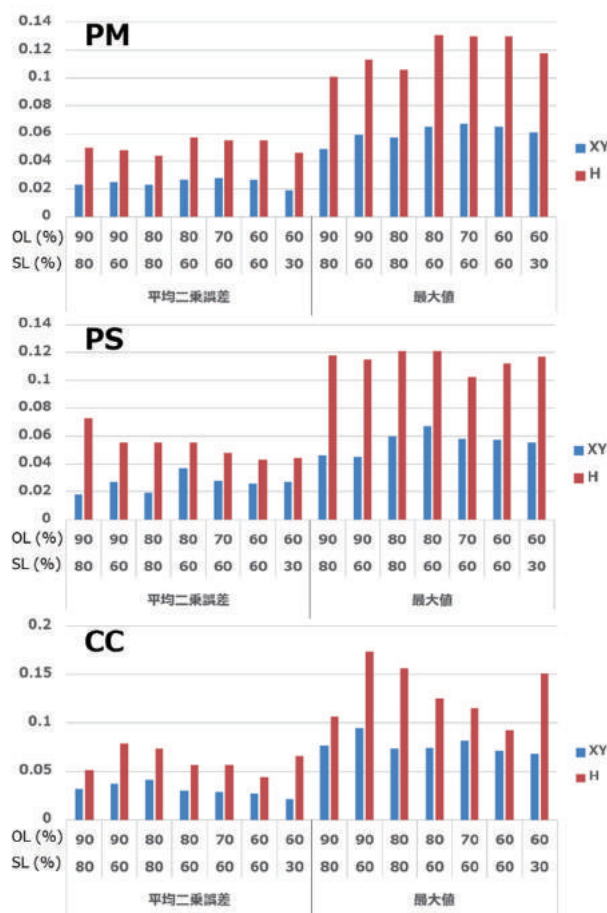


図-14 重複率の違いによる検証点での平均二乗誤差および最大誤差の比較(単位はメートル)

ウェア、3種類のSfMソフトウェアそれぞれで採用されているカメラモデルが異なるため、パラメータ変換してSfM処理に使用した。3種類のSfMソフトウェアで採用されているカメラモデルは中野(2016)にまとめられている。

解析に当たっては、カメラ検定の結果を①使用しない(以下「①初期値なし」という。), ②初期値として使用し、調整計算(以下「②初期値調整」という。), ③固定値として使用(以下「③初期値固定」という。)の3通りで実施し、精度の比較を行った。結果を図-15に示す。いずれのソフトにおいても、③初期値固定において、高さ精度を中心に精度が顕著に悪くなる傾向が見られた。PSでは特に顕著で、①初期値なし、②初期値調整では高さ精度が平均二乗誤差で5cm程度であったのに対し、③初期値固定では40cm弱にまで悪化した。①初期値なし、②初期値調整では、地上画素寸法1cmに対し、いずれのソフトでも水平精度3cm程度、高さ精度は5~10cm程度という結果となった。

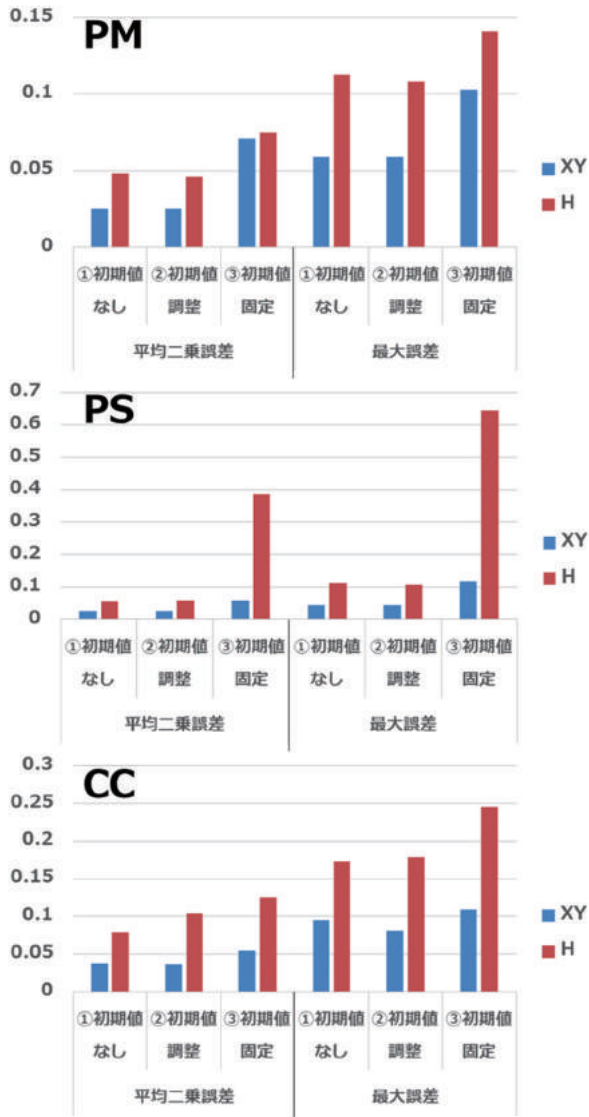


図-15 内部標定要素初期値の用い方による検証点での平均二乗誤差および最大誤差の比較（単位はメートル）

3.3 考察

3.3.1 DSM を用いた重複率と三次元復元精度の比較

図-14 のとおり、撮影の重複率を変化させても、検証点精度には顕著な差が出なかった。一般に、SfM では重複率が低下するほど解析結果が不安定となり、精度も低下することが予想されるが、それとは異なる結果となった。そのため、SfM 処理で生成される DSM を用いて原因の考察を試みた。

まず、SfM 処理により生成される DSM から陰影段階彩図を作成して定性的な比較を実施した。重複率が大きい場合には微細な地形まで復元されているが、重複率が低くなるほど地形の復元は粗くなっていることがわかる（図-16）。

次に、一般社団法人日本写真測量学会から、テストサイト内を計測した地上レーザーによる DSM デ

ータを提供いただき、これを真値として SfM 処理で生成した DSM データと比較し、面的な評価を行った。両データで 20cm メッシュの標高データを作成し、差分をとった結果を図-17 に示す。検証範囲縁辺部で差分が大きくなっているところは、植生の存在や地上レーザー計測を実施した時点からの地表の変化を表しているものと思われる。重複率が大きい場合においては、高さ方向の誤差が 5cm 以内の領域が検証範囲の大半を占めるが、最も重複率の小さい OL60%, SL30% のケースでは、SfM により作成した DSM の方が検証範囲西半分で全体的に高くなっており、面的な三次元復元精度は高くないことがわかる。それにもかかわらず 3.2 (1) のとおり検証点精度は他の重複率と同程度であった理由の一つとして、検証点の対空標識が SfM 処理時のマッチング要素となり、検証点周辺で局所的に精度が高くなっていることが考えられる。実際に、SfM による DSM と地上レーザー DSM の差分をとったところ、OL60%, SL30% の西半分領域において、検証点周辺のみ高さ精度が 5cm 以内に収まっているケースも見られた（図-18）。一見矛盾する結果が得られた理由がこれであると断定することはできないが、検証点精度と面的な精度に乖離が生じる場合があることが示唆された。撮影時に必要な重複率を検討する際には、検証点精度のみに捉われるのではなく、面的な精度評価を行う必要があるだろう。

3.3.2 内部標定要素の初期値を使うと精度が悪化した理由

今回、カメラ検定で事前に計測した内部標定要素を固定して SfM 処理した③初期値固定では、セルフキャリブレーションで内部標定要素を調整計算する①初期値なし、②初期値調整と比較して顕著に精度が悪化した。この原因について考察を行う。

原因の一つは、カメラ検定の精度に対し、UAV に搭載されているカメラの焦点距離が短いことだと考えられる。カメラ検定の結果、今回使用した UAV 搭載カメラの焦点距離は 3.5876mm という値が得られた。一方、①初期値なしでセルフキャリブレーションによって推定計算された焦点距離を比較すると、SfM ソフトウェアや重複率によって 3.51mm から 3.66mm と推定結果に幅があった。この結果から、焦点距離には 0.01mm の桁で不確実性が存在する可能性があると考えられる。焦点距離が 0.01mm の不確実性を持つと仮定すると、対地高度 23m での撮影においては、焦点距離を固定することで、高さ方向の解析結果に約 6cm の不確実性を生むことになる。

また、カメラ検定の結果を固定することにより、誤差の分散がうまくいかず、解析結果に悪影響を及ぼした可能性も考えられる。SfM は三次元幾何復元

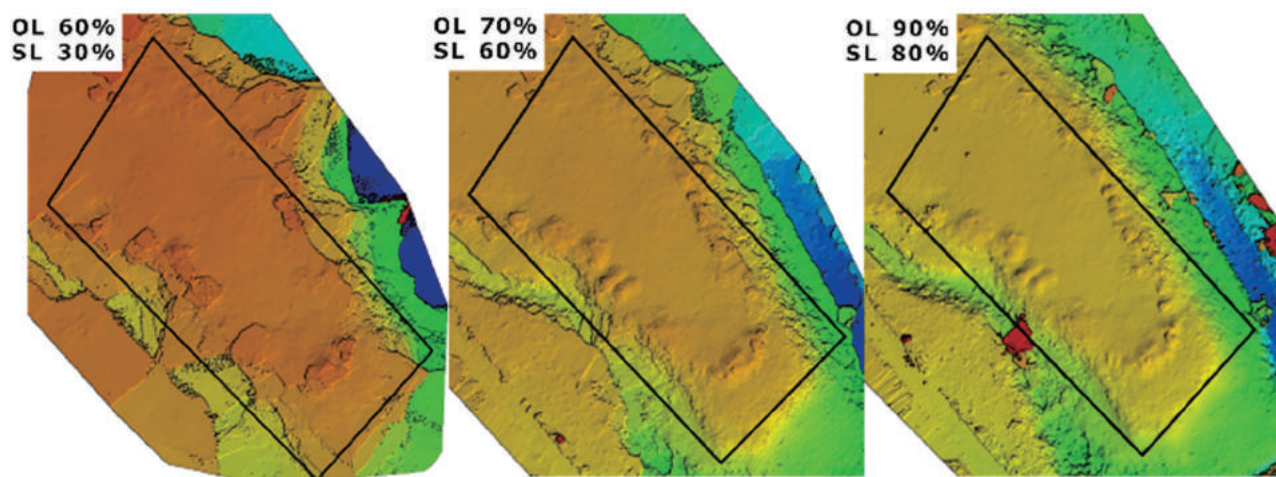


図-16 撮影の重複率と DSM の関係（陰影段彩図，PM で作成，黒い枠線は検証範囲）

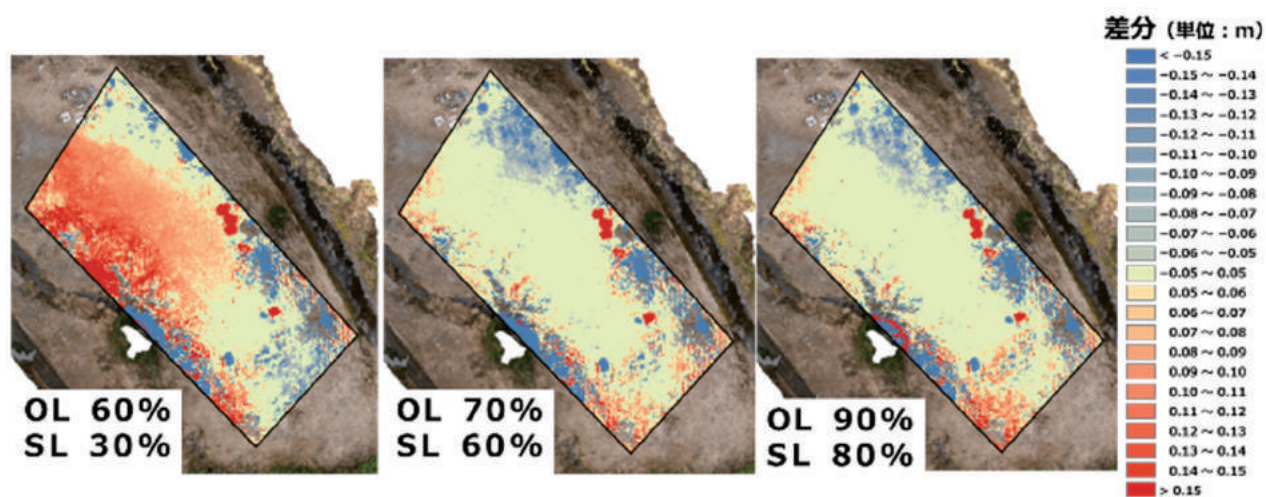


図-17 重複率ごとの Sfm による DSM と地上レーザーDSM との差分（Sfm による DSM は CC で作成）

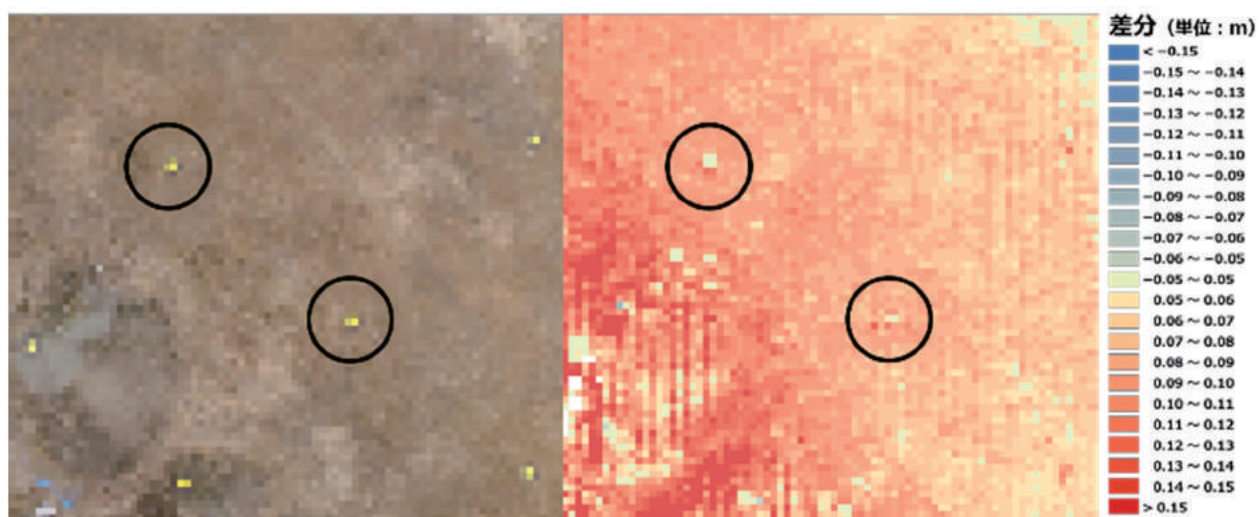


図-18 検証点周辺における Sfm による DSM と地上レーザーDSM との差分（重複率 OL60%，SL30%，Sfm による DSM は CC で作成）

時の誤差を、内部標定要素、外部標定要素、特徴点の三次元座標を調整計算することによって分散し、もっともらしい値を得る手法である。しかし、内部標定要素を固定値としたことにより、誤差分散の自由度が小さくなり、結果として解析結果である三次元幾何情報に大きな誤差を残してしまったのかもしれない。

これら以外にも精度悪化につながる要因が存在する可能性はあるが、その要因を明確化することはできなかった。

4. まとめ

国土地理院では、平成 27 年度に鹿部飛行場、平成 28 年度に日本写真測量学会 UAV テストサイトで UAV による撮影を行い、SfM の精度検証を行った。電子国土基本図は、都市計画区域は地図情報レベル

2500、都市計画区域外は地図情報レベル 25000 で整備しており、最も高精度な場合、地図情報レベル 2500 の精度として水平精度 1.75m が必要となる。今回の検証の結果、撮影条件、解析条件に注意すれば、SfM でも十分精度の良い測量結果を得られ、地図情報レベル 2500 であれば十分に満たす可能性があることがわかってきた。これらの検証結果をもとに、基本測量、特に電子国土基本図の修正作業における UAV の活用に向けてさらなる調査検討を進める。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、地上レーザー計測データを提供してくださった一般社団法人日本写真測量学会に謝意を表する。

(公開日：平成 29 年 9 月 22 日)

参 考 文 献

- 早坂寿人，大野裕幸，大塚力，関谷洋史，瀧繁幸（2015）：UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，国土地理院時報，127，107-116。
- 垣内力，鈴木英夫，大森康至（2016）：4. UAV テストサイトを使用した 3 次元点群測量の精度検証例，写真測量とリモートセンシング，55，301-302。
- 中野一也（2016）：解説：Structure from Motion (SfM) 第三回 SfM による三次元形状復元ソフトウェアについて，写真測量とリモートセンシング，55，321-324。