

次世代に向けた基盤地図情報三次元化の検討 —写真測量における固定翼 UAV の活用に関する精度検証—

実施期間 平成 29 年度～平成 30 年度
基本図情報部地図情報技術開発室 澤 可那子 阪上 雅之
野口 真弓 笹川 啓
基本図情報部画像調査課 瀧 繁幸

1. はじめに

近年、無人航空機（以下「UAV」という。）及び複数の画像から三次元モデルを作成する三次元形状復元技術が普及し、UAV の空中撮影写真を用いた三次元形状復元技術による写真測量が、簡便に三次元の地理空間情報を取得する手段として注目を集めている。UAV には、マルチコプター型と固定翼型が存在し、日本ではその操作性の手軽さからマルチコプター型 UAV の利用が主流となっている。しかし、固定翼 UAV はマルチコプター型よりも航続時間が長く、広範囲の撮影に適していると考えられ、固定翼 UAV を利用することで三次元地理空間情報の取得の幅が広がることが期待される。地図情報技術開発室では、これまで、マルチコプター型 UAV を用いた三次元モデルやオルソ画像の作成及びその精度について検討を行ってきた。今回、新たに固定翼 UAV を導入し、固定翼 UAV を用いた三次元形状復元技術による写真測量の精度検証を実施したので報告する。

また、UAV を用いた写真測量では、標定点及び検証点を設置する必要があるが、標定点及び検証点の測量には多大な労力を要するという課題があった。UAV による写真測量の作業を省力化し、より簡便に三次元地理空間情報を取得することを目的に、人手による測量が不要な GNSS 内蔵対空標識の検証を実施したため併せて報告する。

2. 精度検証

2.1 固定翼 UAV

2.1.1 使用機材

使用した固定翼 UAV は senseFly 社製の eBee Plus（写真-1）である。本機体は 2 周波受信可能な GNSS アンテナを搭載し、後処理キネマティック測位（以下「PPK」という。）により高精度に撮影主点位置を取得することができる。撮影に使用したカメラは付属の senseFly S.O.D.A である。機体及びカメラの諸元を表-1 に示す。飛行は senseFly 社製のソフトウェア eMotion3 を利用して計画し、自動操縦により撮影を行った。飛行方向は、機体が撮影飛行中に横風を受ける方向となるように計画した。

2.1.2 検証地

検証は 1) 標定点の有無と精度、2) 写真重複率と精度について、愛知県知多市にある無人飛行ロボット実証実験場（以下「ロボット実験場」という。）及び茨城県筑西



写真-1 eBee Plus

表-1 機体及びカメラの諸元

機体	翼幅	110 cm
	重量	1.1 kg
	飛行速度	11~30 m/s
	天候制限	風速 12 m 以下
	最長航続時間	59 分
カメラ	焦点距離	28 mm
	フォーカス	固定
	センサーサイズ	BSI CMOS 1-inch
	シャッター間隔	0.6 秒（最小）

市にある関城 ULP 飛行場（以下「関城飛行場」という.）で実施した. また, 3) PPK において既知点とする電子基準点と機体との距離（以下「基線距離」という.）が精度に与える影響について福島県南相馬市にある福島ロボットテストフィールド（以下「福島 RTF」という.）で検証した. 各検証地における諸元を表-2 に示す.

2.1.3 検証内容

本機体で得られた位置情報に対し電子基準点を既知点とした PPK を行い, 撮影写真に高精度な主点位置を付与した上で, 三次元形状復元ソフトで三次元形状復元計算を行った. 三次元形状復元計算結果で検証点における較差を確認し, 検証点較差の RMS を評価することで精度検証を実施した. 現地における検証点の計測にはネットワーク型 RTK 法 (VRS 方式) (以下「VRS」という.) を利用した. 1) 標定点の有無では, 検証範囲の四隅及び中央の計 5 点の対空標識を標定点とし, 残りを検証点とした場合と, 標定点を用いず対空標識全てを検証点とした場合で三次元形状復元計算を行い, 精度を比較した. 2) 写真重複率では, 3 通りのオーバーラップ (以下「OL」という.) とサイドラップ (以下「SL」という.) の組合せで計画した飛行について, 各々で標定点無しの三次元形状復元計算を行い, 写真重複率の違いによる精度への影響を確認した. 3) 基線距離では, 異なる距離にある複数の電子基準点を既知点とし, 各々の場合について PPK を実施した. それらの結果をもとに, 標定点を用いず三次元形状復元計算を行い, 基線距離の違いによる精度への影響を確認した. なお, 1) 及び 3) については写真重複率の計画値を OL: 60% - SL: 80%として検証した.

2.2 GNSS 内蔵対空標識

2.2.1 使用機材

使用した GNSS 内蔵対空標識は propeller 社製の AeroPoints (写真-2) である. 本機器は, 計測地点に 45 分間静置後, 電子基準点等の補正情報を適用することで高精度に測位することができる. 本機器の諸元を表-3 に示す.

2.2.2 検証地

1) 本機器の測位精度について, 関城飛行場, 福島 RTF 及び沖縄県南城市にある志喜屋漁港多目的広場 (以下「志喜屋広場」という.) で検証した. 福島 RTF では 2) 基線距離と精度について, また, 志喜屋広場では 3) 衛星配置と精度についても検証した. 計測は関城飛行場と福島 RTF については UAV の撮影日と同日に, 志喜屋広場は平成 31 年 2 月 13 日に行った.

2.2.3 検証内容

VRS 計測値を正解値とし, 電子基準点により補正した本機器の測位座標値と比較した. 2) では, 異なる距離にある電子基準点で, それぞれ補正を行い, 基線距離の精度への影響を確認した. 3) では, 本機器による計測を午前と午後の 2 回行い, 衛星配置の精度への影響を確認した.

表-2 各検証地における諸元

検証地	ロボット実験場	関城飛行場	福島 RTF
検証範囲	30,000 m ²	17,500 m ²	165,000 m ²
撮影日	H30.6.1	H30.6.8	H30.11.13
上空平均風速	5~6 m	8~9 m	7~9 m
計画 OL/SL 率	80% / 80% 60% / 80% 60% / 60%	80% / 80% 60% / 80% 60% / 60%	60% / 80%
対地高度	119 m	144 m	130 m
地上画素寸法	2.8 cm	3.4 cm	3.0 cm
対空標識数	7 点	10 点	11 点



写真-2 AeroPoints

表-3 AeroPoints の諸元

外寸	554 mm×554 mm×32 mm
重量	1.1 kg
動作温度	0℃(最低), 40 度(最高)

表-4 標定点の有無と精度

	標定点	較差の RMS	
		水平	垂直
ロボット 実験場	有	2.9 cm	3.0 cm
	無	4.2 cm	6.3 cm
関城 飛行場	有	2.2 cm	7.4 cm
	無	4.6 cm	5.6 cm

3. 検証結果と考察

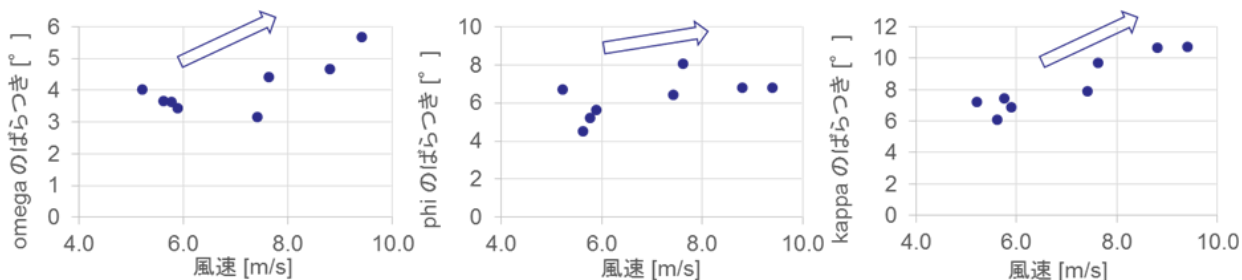


図-1 風速と機体姿勢のばらつき

表-5 写真重複率と精度

検証地	風速	OL率/SL率 [%]		較差のRMS	
		計画値	実効値	水平	垂直
ロボット 実験場	4.7 m	80 / 80	61 / 80	4.6 cm	5.8 cm
	5.2 m	60 / 80	59 / 79	4.2 cm	6.3 cm
	5.8 m	60 / 60	59 / 63	4.9 cm	4.6 cm
関城 飛行場	9.1 m	80 / 80	50 / 77	6.0 cm	6.0 cm
	8.8 m	60 / 80	50 / 78	4.6 cm	5.6 cm
	9.4 m	60 / 60	48 / 61	3.1 cm	3.0 cm

表-6 OL 主点間距離

検証地	計画 OL 率	理論値	実効値
ロボット 実験場	80%	21 m	39 m
	60%	41 m	42 m
関城 飛行場	80%	26 m	44 m
	60%	51 m	56 m

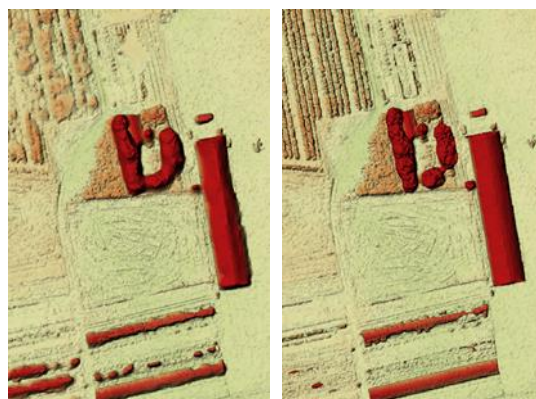


図-2 写真重複率による陰影段彩図の違い
OL/SL率：(左)48% / 61% (右)50% / 78%

3.1 固定翼 UAV

3.1.1 標定点の有無

検証結果を表-4に示す。標定点の有無によらず、水平及び垂直ともに10cm以内の精度で三次元形状復元計算が可能であり、地図情報レベル250の精度を満たす可能性が確認された。ただし3.1.3に示すとおり、基線距離が長くなると標定点無しの三次元形状復元計算の精度が低下した。本検証を行ったロボット実験場及び関城飛行場は基線距離がそれぞれ5km、8kmであったため、標定点の有無が精度に大きな影響を与えなかったと考える。

3.1.2 写真重複率

検証結果を表-5に示す。本検証ではOL率の実効値が計画値を満たさない場合が見られた。これは、本機体が安定した姿勢になってからシャッターを切るメカニズムとなっているためである。写真のブレを防ぐため撮影時にモーターを一時的に止めることから、撮影直後は機体が不安定になる。不安定になった機体を再び安定させるために必要な飛行距離が、計画OL率を実現するための主点間距離より長く、計画値を満たすことができなかつたと言える。表-6にOL主点間距離の理論値と実効値を示す。表から機体を安定させるためには約40mの飛行距離が必要であると考えられる。また、二つの検証地を比較すると、同じ計画OL率でも実効値が異なっている。これは風が原因と考えられる。図-1に風速と機体姿勢のばらつきについて示す。風速が大きくなると姿勢のばらつきが大きくなることがわかる。したがって、風速が大きくなり機体の姿勢が崩れやすくなることで、機体姿勢を立て直すための飛行距離が長くなり、実効OL率に影響したと考える。以上のように、OL率は、機体のメカニズムにより、高く設定することが困難また計画値を満足しない場合があることから、SL率を調整することによる写真重複率の確保が有効であると考えられる。

検証点における精度はOL: 60% - SL: 60%で計画した飛行のときや精度が良かったものの、各条件において大差はなかった。図-2に異なる写真重複率の写真から作成した陰影段彩図を示す。重複率が

表-7 基線距離と精度 (eBee Plus)

基線距離	Fix 率	PPK 精度	較差の RMS	
			水平	垂直
2.3 km	100%	4.2 cm	4.5 cm	6.6 cm
11.2 km	100%	7.0 cm	8.0 cm	2.7 cm
20.5 km	100%	8.0 cm	11.5 cm	2.9 cm
32.6 km	100%	10.1 cm	17.2 cm	8.7 cm
41.2 km	100%	11.2 cm	22.5 cm	5.0 cm
50.3 km	5%	33.5 cm	-	-

表-8 各検証地における諸元と精度

検証地	検証範囲	基線距離	対空標識数	較差の RMS	
				水平	垂直
関城飛行場	17,500 m ²	8.0 km	9 点	2.4 cm	2.4 cm
福島 RTF	210,000 m ²	2.4 km	18 点	2.6 cm	4.8 cm
志喜屋広場	16,500 m ²	2.7 km	9 点	2.0 cm	1.1 cm

表-9 基線距離と精度 (AeroPoints)

基線距離	較差の RMS	
	水平	垂直
2.4 km	2.4 cm	2.0 cm
10.7 km	8.3 cm	3.8 cm
20.6 km	9.5 cm	3.1 cm
33.0 km	13.8 cm	9.9 cm
40.8 km	23.7 cm	1.9 cm

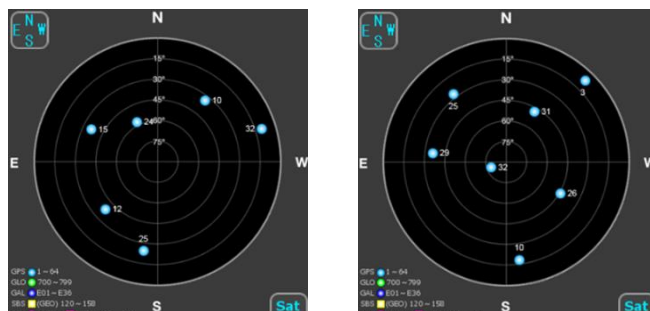


図-3 AeroPoints 計測時の衛星配置 左：午前，右：午後 (みちびき (準天頂衛星システム) HP「GNSS View」 <http://qzss.go.jp/technical/gnssview/index.html>)

低い写真から作成した陰影段彩図は、エッジが不明瞭で、また、詳細な地形を復元できていなかった。このことから写真重複率は地形の復元精度に影響を与えると考える。

3.1.3 基線距離

検証結果を表-7に示す。Fix 率及び PPK 精度は、PPK 解析ソフトウェアで算出された値である。基線距離が約 50km のとき、PPK の Fix 率が著しく低下したが、基線距離が約 40km までは水平が最大約 20cm、垂直が最大約 10cm の精度で三次元形状復元計算が可能であった。ただし、基線距離が長くなると、PPK 精度が低下し、三次元形状復元計算の精度が低下するため、留意する必要がある。

3.2 GNSS 内蔵対空標識

3.2.1 計測精度

検証結果を表-8に示す。各検証地においてやや違いはあるものの、どの検証地においても水平及び垂直ともに 5 cm 以内の精度であった。

3.2.2 基線距離

検証結果を表-9に示す。基線距離が長くなるにつれて、測位精度が低下した。特に、基線距離が 40km を超えたとき、水平精度の低下が著しかった。

3.2.3 衛星配置

午前及び午後の計測開始 15 分後における衛星配置の状況を図-3に示す。午前及び午後の測位座標値の較差は水平 0.5 cm、垂直 0.1cm であり、衛星配置の違いによる精度への影響は確認されなかった。

4. まとめ

三次元地理空間情報の取得の幅を広げること並びに UAV を用いた三次元形状復元技術による写真測量の作業を省力化することを目的に、固定翼 UAV 及び GNSS 内蔵対空標識の検証を実施した。その結果、本機体を用いることで、公共測量作業規程の準則第 80 条に基づく地図情報レベル 250 に近い精度で三次元地理空間情報が取得できること及び標定点無しの写真測量の可能性を確認した。また、GNSS 内蔵対空標識の測位精度が明らかになったことで、成果物の要求精度に応じて本機器を活用することが可能になったと考える。