

公益財団法人国土地理協会 第 17 回学術研究助成

UAV と SfM 多視点ステレオ写真測量を題材とした

教育教材モデルの開発

研究代表者 小屋畑 勝太 八戸工業高等専門学校

教育研究支援センター

共同研究者 藤原 広和 八戸工業高等専門学校

産業システム工学科

1. はじめに

1.1. 建設業界の課題と ICT 技術の活用

我が国では高度経済成長期に社会資本が集中的に整備され、これらの社会資本は建設後既に 30～50 年の期間を経過していることから、今後急速に老朽化が進行することが想定される。一方、人口減少、少子高齢化の進展により医療費・社会福祉費が増大し、生産労働人口が減少することによって、健全な社会資本の維持管理が困難になることが懸念される。

建設業界は、他の産業に比べ、週休 2 日制が十分に実現されておらず、労働時間が長く、労働災害による死亡者数は全産業の約 3 割を占め、依然として「きつい・汚い・危険」といった 3K イメージが根強く、深刻な人材不足に陥ることが懸念される。さらに、団塊世代の大量離職に伴い、経験豊富な技術者の不足により、これまで培われてきた貴重な技術の継承ができず、近い将来、現在の社会インフラを維持管理する技術自体が消失してしまう事態さえ懸念される状況である。今後、将来にわたって十分に社会資本の機能を発揮させていくために、建設業界全体の体制整備が急務となっている。

このような社会状況から、少ない人的・財的資源で最大限の効果を生み出す「生産性の向上」に向けた取り組みが重要であるとされている。国土交通省では、建設工事に係る「調査、設計・計画、施工、維持管理」の一連の工程において ICT や三次元データの活用等により、生産性の向上を目指した「i-Construction」という取り組みを推進している。特に、この取り組みの中で、UAV (Unmanned aerial vehicle, 無人航空機) と SfM (Structure from Motion, 多視点ステレオ写真測量) を用いた三次元地形データを取得する技術は、建設業界の ICT 化を推進する上でキーテクノロジーになると言われている。

従来の測量技術は TS (Total Station) や GNSS (Global Navigation Satellite System), レベル等の測量機器を用いて、点的な地形の観測が行われてきた。UAV と SfM を用いた写真測量技術は UAV により空撮された撮影位置が異なる複数の写真データを SfM の画像解析技術により対象地形の高密度な三次元点群データを生成し、比較的容易に面的な地形観測を可能にする。三次元点群データは、CIM (Civil Information Modeling) や情報化施工へ導入することにより、計画・設計段階から施工・維持管理まで一連の建設生産システムの効率化・高度化に寄与することが期待される。さらに、UAV と SfM を用いた写真測量技術は遠隔で観測することができ、災害調査や急傾斜地等の危険を伴う観測地においても安全な観測が可能であることから、調査・研究等にも広く利活用が進んでいる。

1.2. UAV を用いた写真測量技術の普及に向けた課題

これまでの空中写真を撮影する手段は、有人の航空機が一般的であった。近年、UAV は小型化・低価格化により、急速に普及が進んでいる。UAV を利用することにより、従来よりも高解像度の空中写真を低廉かつ簡便に撮影できるようになった。また、従来の写真測量では画像の主要な対応点の抽出やカメラレンズのキャリブレーションを手作業で行っており、多大な労力と時間を要していた。近年、このように煩雑な対応点の抽出作業は SIFT (Scale-Invariant Feature Transformation) というアルゴリズムが開発されたことにより、特徴点の抽出と画像間のマッチングの他、カメラのレンズ特性の各種パラメータの補正も自動化された。そして、撮影位置の推定技術 (SfM) や対象物の 3 次元形状を復元する技術 (MVS) が統合されることで、複数枚のステレオ画像から容易に 3 次元形状データが生成することが可能になった。

一方で、UAV を用いた写真測量技術は、適正な観測方法が十分に標準化されておらず、適正な精度管理ができていないことが大きな課題となっている。平成 28 年 3 月に国土地理院により「UAV を用いた公共測量マニュアル (案) (平成 29 年 3 月改正)」が制定されたが、UAV やカメラの仕様、SfM 画像解析ソ

ソフトウェアや UAV の自己標定技術の観測手法が多種多様に分岐しており、画一的な基準設定にはなっていない。さらに、実際の観測では観測対象地の地物やそのテクスチャなどの観測状況に応じて、適切な観測方法を適用することが求められる。従来の空中写真測量と比べて十分な精度が得られるが、現状ではまだ解決されない課題もあり、適切な精度管理が重要であることが指摘されている（早川ら、2016）。適正な観測方法の提案に向けて、早坂ら（2015）は市販されている主要な 3 つの SfM ソフトウェアを用いて、カメラフォーカスや写真重複度の設定、斜め撮影の導入等が精度に与える影響について報告した。さらに、菅井ら（2017）は地上レーザースキャナー-TLS (Terrestrial Laser Scanner) を用いた DSM (Digital Surface Model) によって、検証点だけでなく SfM によって得られる面的な観測精度を検証した。今後、適正な観測方法や精度管理方法を確立させるためには、様々な条件における精度検証の結果を蓄積していくことが重要である。

さらに、UAV を用いた写真測量技術の普及を図るためには、UAV による空撮や SfM 画像解析に関する技術を身につけた技術者の育成が重要である。近年、UAV や SfM に対する注目の高まりから、現場の建設技術者向けの UAV 操作や SfM 画像解析に関する講習会が多く開催されているが、学校教育ではこのような最新技術に関する教育ほとんど行われておらず、教材モデルとなるような実施事例がないのが現状である。今後、建設現場のみならず、学校教育においてもこのような最新技術に関する素養を身につけた次世代の技術者を育成する取り組みを推進していくことが望まれる。

1.3. 研究目的

UAV を用いた写真測量技術の普及に向けた課題としては、「適正な観測方法の確立」と「学校教育における教育教材モデルの構築」が挙げられる。教育教材モデルの構築にあたっては、標準化された適正な観測方法に基づいて、学習すべき内容を整理されることが望ましい。しかし、UAV を用いた写真測量技術は、対象地の状況などの観測条件に応じて、適切な観測方法を検討する必要がある。汎用的に適用できる観測方法として、標準化することは難しい。したがって、UAV を用いた写真測量技術に関するマニュアルの改正や研究動向を踏まえながら、学習課題を検討する必要がある。そこで、本研究では適正な UAV の飛行方法やカメラの撮影条件、SfM 画像解析の方法など、様々な設定条件における三次元地形データの精度を検証する。さらに、その結果を分析して、UAV を用いた写真測量技術に関する実習について、学校教育に適用する際の学習課題を整理する。そして、UAV と SfM 多視点ステレオ写真測量を題材とした教育教材モデルを開発することを目的とした。

UAV を用いた写真測量では、空中画像の撮影や SfM 画像解析のほか、対空標識の設置や座標値測定など、事前に準備作業が必要になる。これらの作業は、成果物である三次元地形データの精度にも影響することから、十分にその作業の質を確保することが重要である。さらに、UAV の操作にあたっては、法令を遵守した上で、十分に安全対策を講じて実施することが求められる。本研究では、教材開発の視点から基本的な作業について検討を深めながら、UAV を用いた写真測量に関する基礎的な知見を得ることを目標とした。

2. 研究方法

UAV を用いた写真測量は、対象地形の起伏、建物や植生の分布、成果物の要求精度、UAV 飛行制限の有無等を考慮して、各作業工程における方法や安全対策を整理して作業計画が作成される。本研究では、国土地理院「UAV を用いた公共測量マニュアル (案)」で規定される観測方法を標準として、得られる三次元地形データの精度を検証するために、様々な UAV の飛行条件やカメラの撮影条件において、フィールドテストを実施した。

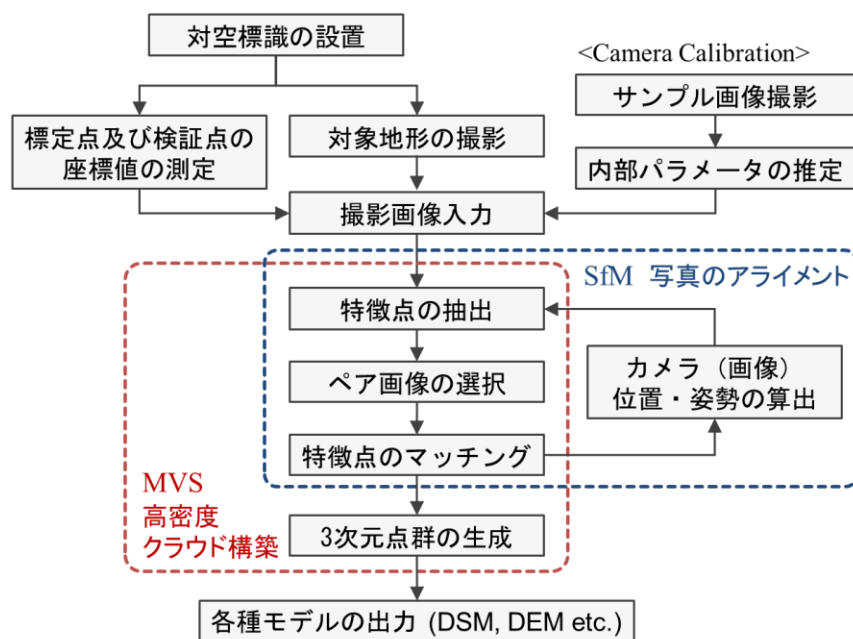


図1 UAVを用いた写真測量の作業フロー

本研究における UAV を用いた写真測量の主な作業の流れを図1に示す。はじめに、観測する対象地に標定点及び検証点を指定するための対空標識を設置する。この標定点と検証点の座標値を TS または GNSS を使用して測定する。また、UAV を用いて所定の飛行条件及びカメラ撮影条件で対象地形を撮影する。そして、得られた空撮画像を SfM 画像解析ソフトウェアに入力し、予め測定した標定点および検証点の座標値とカメラキャリブレーション結果から得られたカメラ内部パラメータを設定する。本研究では SfM 画像解析ソフトウェアに Agisoft PhotoScan を使用した。PhotoScan では、特徴点の抽出、ペア画像の選択、特徴点のマッチングが実行され、「写真のアライメント (SfM)」と「高密度クラウドポイント生成 (MVS)」の二つの工程を経て、三次元点群データが生成される。この三次元点群データからメッシュが構築され、DSM (Digital Surface Model) や DEM (Digital Elevation Model) 等の各種モデルを出力することができる。

以下に、各作業工程の方法、UAV 飛行条件やカメラ撮影条件の設定などについて、観測結果や解説を加えながら詳述する。

2.1. 調査対象地

UAV の飛行条件や SfM 画像解析の精度検証について検討にあたっては、八戸工業高等専門学校のグラウンド (図2) を調査対象地とした。この調査対象地は敷地面積約 20,000m² で、ほぼ平坦な地形となっている。SfM 画像解析において指定する標定点及び検証点を調査対象地に設定するために、対空標識を配置し、その座標値を測定した。以下に、対空標識の選定とその配置や座標値の測定について、詳述する。

(1) 対空標識の選定

国土地理院「UAV を用いた公共測量マニュアル」では、対空標識の大きさは、空撮写真に 15 画素以上写る大きさを標準とされ、対空標識のデザインは、+型や○型などが例示されている。本研究で用いる SfM 画像解析ソフトウェア PhotoScan では、図3(a)に示すような形状の対空標識が採用されており、空撮された画像から該当する対空標識の位置と測点番号を自動判読することが可能であるとされている。しかしながら、この対空標識は、太陽光の反射による白飛び等により画像が不鮮明になった場合、自動判読が難しくなるとの報告がある。

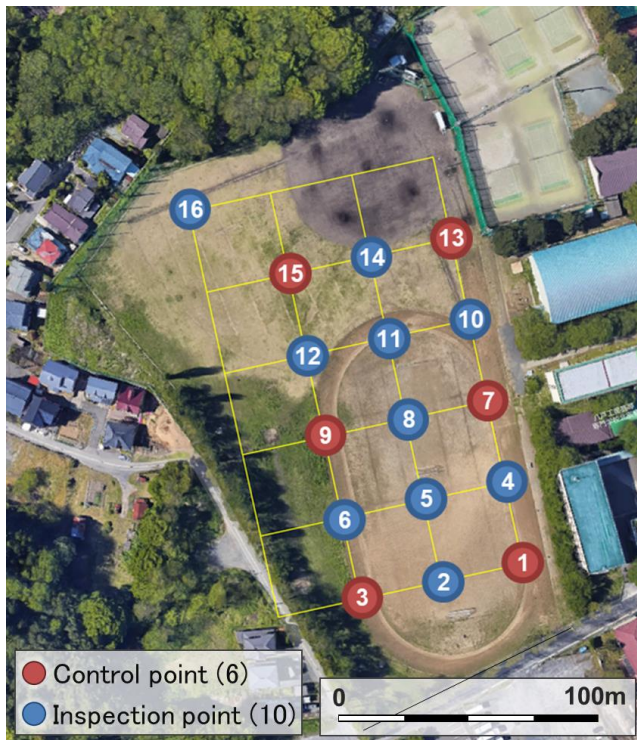


図2 調査対象地と対空標識の配置

本研究では、厚さ 1mm の白色の塩ビ板を 45cm 角にカットして、黒色のカットニングシートを張り付けて、+型の対空標識 (図 3(b)) を作製した。フィールドテストでは、作製した+型の対空標識を標準として、手動判読により標定点及び検証点の座標値を指定した。さらに、PhotoScan が採用する対空標識の自動判読の読み取り精度を検証するために、この対空標識をプリントして、自動判読の読み取り精度を検証した。

(2) 標定点及び検証点の配置

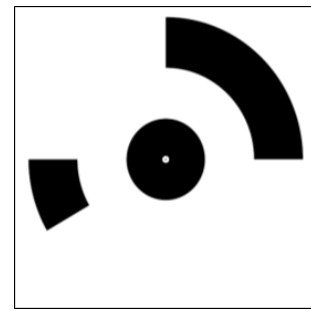
SfM 画像解析の過程において、既知の座標値を与える標定点を参照し、カメラ内部パラメータを調整しながら、三次元点群データが生成される。したがって、より多くの標定点を与えるほど、成果物の精度向上が期待できる。一方、検証点では SfM によって推定された座標値と予め測定した座標値を比較することによって、成果物の精度管理が行われる。これらの標定点と検証点を増やすことによって、より高精度で信頼性の高いデータを取得することが可能になる。しかしながら、そのためには予め TS や GNSS を用いて座標値を測定する必要がある、観測の作業量を増大させることにつながる。標定点及び検証点は目標とする精度に応じて最小限に抑えることが望ましい。

本研究では標定点及び検証点を約 30m 間隔で均等に設定し、調査対象地に対空標識を配置した。図 2 に、標定点 (赤/6 点) 及び検証点 (青/10 点) の測点番号を示す。

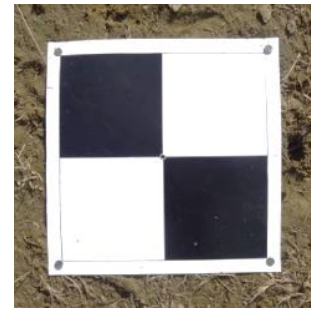
(3) 座標値の測定

国土地理院の「UAV を用いた公共測量マニュアル」では、標定点及び検証点の測量は TS や GNSS のキネマティック法または RTK 法を用いて 2 セット行い、較差の許容範囲が X・Y 成分 20mm, Z 成分 30mm を標準とすると定められている。作業効率を考慮すると、TS よりも GNSS を用いた方が効率的に作業を進めることができる。しかしながら、GNSS 測量は建物や樹木等の障害物が周辺にある場合、十分な精度が得られない可能性がある。座標値の計測にあたっては観測点の測定環境を留意した上で、適切な測定方法を適用する必要がある。

本研究では、TS と GNSS の両手法によって、標定点及び検証点の座標値を測定した。まず、GNSS によ



(a) 自動判読(PhotoScan)



(b) +型 45cm (標準)

図3 対空標識



(a) 水準測量



(b) GNSS (RTK 法)

図4 標定点及び検証点の座標値測定

るスタティック法により、No. 1, No. 8, No. 15 の3点の座標値を測定し、基準点とした。TSによる測定では、TS (SOKKIA SET530RS) を用いて、全16点の観測点を3つの閉合トラバースに区分けして、座標値を測定した。さらに、レベルを用いて、水準測量により高さ方向Zの座標値を求めた (図4(a))。そ

表1 TSとGNSSによる標定点及び検証点の座標値 [単位:m]

No.	TS (水準測量&トラバース測量)			GNSS (RTK 網平均値)			較差			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	54644.561	52046.907	53.866	54644.574	52046.896	53.851	-0.014	0.012	0.015	
2	54637.784	52017.123	53.919	54637.804	52017.130	53.904	-0.019	-0.007	0.015	
3	54631.036	51986.485	53.833	54631.058	51986.504	53.829	-0.022	-0.020	0.004	
4	54673.852	52040.332	53.858	54673.855	52040.324	53.852	-0.003	0.007	0.005	
5	54667.259	52010.656	53.941	54667.267	52010.654	53.927	-0.008	0.002	0.014	
6	54660.294	51980.059	53.827	54660.315	51980.063	53.822	-0.022	-0.004	0.004	
7	54703.101	52033.818	53.869	54703.122	52033.814	53.859	-0.020	0.003	0.010	
8	54696.277	52004.254	53.929	54696.284	52004.247	53.915	-0.007	0.007	0.014	
9	54690.101	51973.375	53.841	54690.095	51973.392	53.832	0.006	-0.017	0.009	
10	54732.350	52027.294	53.880	54732.357	52027.281	53.865	-0.007	0.012	0.014	
11	54725.520	51997.357	53.879	54725.529	51997.358	53.869	-0.009	-0.002	0.010	
12	54718.782	51967.406	53.894	54718.770	51967.421	53.884	0.012	-0.014	0.009	
13	54761.623	52021.071	53.858	54761.625	52021.068	53.844	-0.002	0.003	0.014	
14	54754.676	51990.716	53.938	54754.674	51990.722	53.929	0.002	-0.007	0.009	
15	54747.714	51960.656	53.922	54747.698	51960.664	53.922	0.015	-0.007	0.000	
16	54769.379	51924.821	53.825	54769.367	51924.833	53.814	0.012	-0.012	0.011	
							RMSE	0.013	0.010	0.011

の結果、トラバース測量では閉合比 1/20000 以上、水準測量では往復誤差 4mm であり、mm オーダーの精度が確保されていることを確認している。一方、GNSS による測定では GNSS 受信機 (SOKKIA GRX2) を用いて、RTK 法により、座標値を測定した (図 4(b))。さらに、スタティック法により測定した No. 1, No. 8, No. 15 の 3 点の座標値を既知座標として与えて、網平均値を算定した。網平均計算を導入することにより、較差を低減することが確認された。高精度が求められる観測では、必要に応じてスタティック法による既知点の数を増やすことが有効である。

TS と GNSS の各方法によって測定された標定点及び検証点の座標値を表 1 にそれぞれ示す。各方法の座標値の較差は最大 22mm で RMSE10mm 程度であり、この調査対象地では、GNSS 測量 (RTK 法) を用いた場合も必要な精度を満たすことが可能であると考えられる。本研究の調査対象地は平坦で天頂が開けているため、GNSS 測量に実施するにあたって好条件であったと言える。観測条件に応じて TS を併用しながら、標定点及び検証点の座標値を測定するべきである。

2.2. UAV による空撮システム

本研究で使用する UAV (DJI Matrice 600) を図 5 に示す。本機体は 6 つのプロペラを有し、機体上部には GNSS と IMU (Inertial Measurement Unit) が取り付けられている。フライトコントローラ (A3) はこれらのセンサー値を整理し、機体の姿勢と位置を標定することにより、安定した飛行を可能にする。機体の操縦は機体脚部に取り付けられたアンテナと地上の操縦機を通信させ、高度、位置、傾き、カメラ画像などの機体状態の表示をディスプレイに表示させ、操縦機から発せられる操縦信号によって機体を遠隔で操作することができる。機体下部には、カメラジンバル (Z15-A7) を取り付けした。このカメラジンバルは 3 つのサーボモーターがヨー軸・ピッチ軸・ロール軸方向にカメラを回転させ、自由に撮影方向を調整することができる。また、飛行中の傾きや揺れに対し、3 つのサーボモーターがカメラの傾きを補正し、カメラの向きを一定に保持することができる。

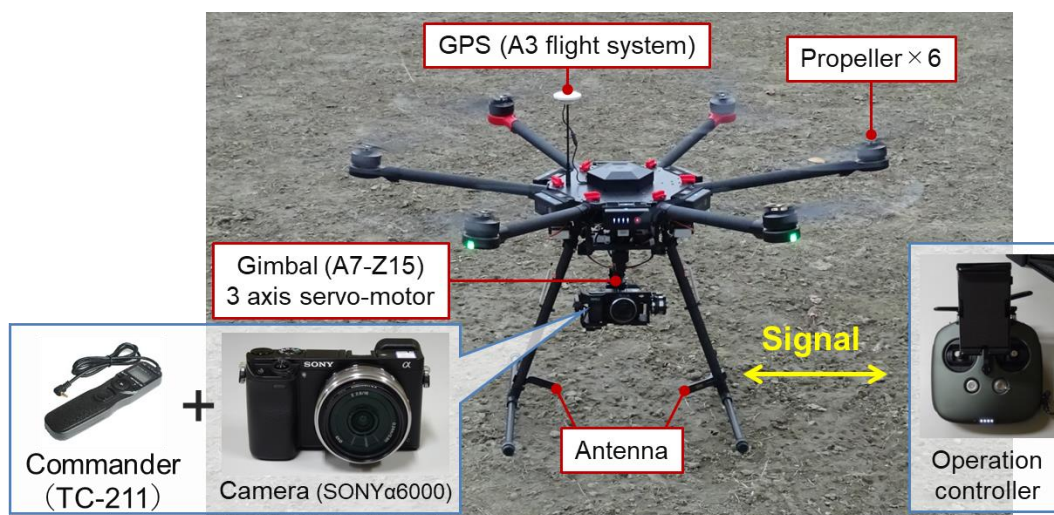


図 5 UAV (Matrice600) と撮影システム

空撮に用いるカメラはレンズ (SEL16F28) を取り付けした SONY α 6000 を使用した。飛行計画を策定するにあたって、使用するカメラの焦点距離、CMOS (Complementary

表 2 カメラ (SONY α 6000, SEL16F28) の諸元

総重量 [g]	焦点距離 [mm]	CMOS サイズ		画素数	
		縦 [mm]	横 [mm]	縦 [px]	横 [px]
約 350	16	15.6	23.5	4000	6000

Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサーのサイズ、記録画素数などの仕様は重要なパラメータとなる。このカメラの主な諸元を表 2 に示す。このカメラの 1 画素あたりのサイズは約 $3.91 \mu\text{m}$ に相当する。カメラにはリモートコマンダーを接続して、インターバル撮影を可能にした。UAV の飛行は、自律飛行制御ソフトウェア (DJI Ground Station) を使用し、飛行計画を策定した。このソフトウェアでは、UAV の飛行速度、高度、経路等の飛行条件を設定して、UAV を自律飛行させることが可能である。

2.3. UAV による観測方法

UAV の適正な飛行方法や飛行条件、カメラの撮影条件を検討するために、UAV の飛行条件を決定した。さらに、適正な UAV の飛行方法の検討では、飛行速度を段階的に変化させて、各条件において飛行速度やカメラの姿勢の安定性を評価した。本研究で対象にする地上画素寸法、写真重複率など飛行条件の策定について、以下に詳述する。

(1) 地上画素寸法

3 次元空間の対象物からの光線はカメラのレンズを介して CCD (Charge Coupled Device) や CMOS イメージセンサー上に結像される。イメージセンサーには受光素子が配列されており、各素子で光の波長や強さに応じた電荷が蓄えられる。そして、この電荷を電気信号として順次転送し、各素子において検出された光を平面座標に再現することにより、画像が生成される。このようなカメラの画像生成の原理から、画像を再現するにあたって、受光素子 1 画素の大きさが検知可能な最小サイズ (分解能) となる。この 1 画素の大きさが小さいほど、高精細な撮影画像を取得することができる。

カメラ撮影における 3 次元空間の撮影範囲とイメージセンサーの画像の関係を図 6 に示す。ここで、3 次元空間の撮影範囲とイメージセンサーに結像される画像は幾何学的な関係が成り立っている。つまり、カメラレンズの焦点距離 f 、撮影高度を H とすると、3 次元空間の撮影範囲が縮尺 f/H でイメージセンサーに相似的に再現される。逆に、実際の 3 次元空間の撮影範囲はイメージセンサーに結像される画像を倍率 H/f で拡大したものに相当する。したがって、カメラの画素サイズ s の H/f 倍が、3 次元空間の撮影範囲において、判読可能な最小サイズである地上画素寸法 R となる。

表 3 三次元点群作成における地上画素寸法と位置精度に関する基準

地上画素寸法 [m]	0.01	0.02	0.03
位置精度 [m]	0.05	0.10	0.20

国土地理院「UAV を用いた公共測量マニュアル」では、作成する三次元点群の位置精度に応じて、撮影する空中写真の地上画素寸法は表 3 を標準とされる。本研究において、使用するカメラ SONY $\alpha 6000$ は表 2 より、焦点距離 $f=16\text{mm}$

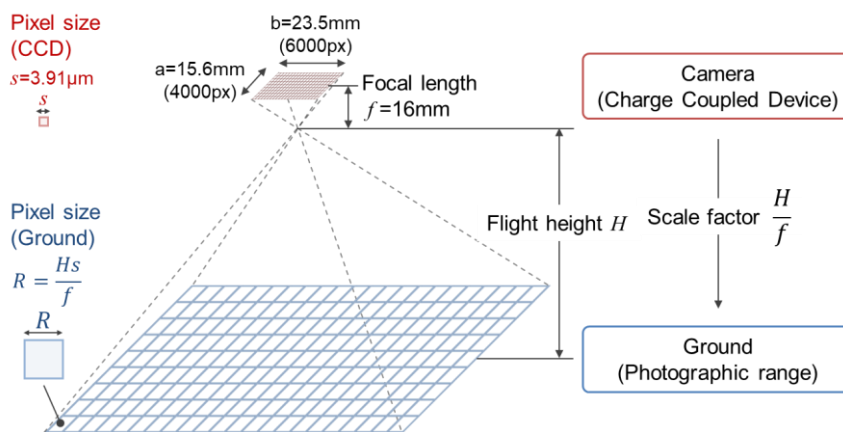


図 6 3 次元空間の撮影範囲とイメージセンサー画像の幾何学的な関係

であり、1画素あたりのサイズは約 $3.91\mu\text{m}$ に相当する。カメラ1画素あたりのサイズと地上画素寸法の関係は式1のように表される。

$$H = \frac{R}{s}f \quad \text{式 1}$$

例えば、地上画素寸法 $R=0.01\text{m}$ のとき、撮影高度は式1より $H=41\text{m}$ と算定される。本研究では、地上画素寸法 0.01m , 0.02m , 0.03m に相当する撮影高度 41m , 82m , 123m の3ケースを飛行条件とした。

(2) 写真重複度

写真重複度は空撮された隣接する空中写真の重なり割合を表したものであり、サイドラップとオーバーラップに分類される。図7に写真重複度の概念図を示す。ここで、撮影範囲を $A \times B$ (A は進行方向の長さ) とする。サイドラップ SL とは、隣接するコース間の空中写真の撮影範囲 B の距離に対する重複距離 B' の割合である (図7(a))。一方、オーバーラップ OL とは、空中写真の撮影範囲 A の距離に対する進行方向における連続する空中写真間の重複距離 A' の割合である (図7(b))。飛行計画を策定するにあたって、所定の写真重複度の空撮画像を得るためには、実際にどの程度の距離間隔で撮影するべきか、把握しておくことが重要である。任意の写真重複度におけるサイドラップの撮影距離間隔 S_{SL} 、オーバーラップの撮影距離間隔 S_{OL} はそれぞれ式2及び式3で求められる。

$$S_{OL} = A \times \left(1 - \frac{OL}{100}\right) \quad \text{式 2}$$

$$S_{SL} = B \times \left(1 - \frac{SL}{100}\right) \quad \text{式 3}$$

国土地理院「UAVを用いた公共測量マニュアル」では、撮影後に実際の写真重複度を確認できる場合には、サイドラップが60%以上、オーバーラップが80%以上を確保できるように撮影計画を立案することを標準とされる。これを踏まえて、本研究ではサイドラップを70%、60%、50%の3ケース、オーバーラップを90%、80%、70%の3ケースを飛行条件とした。前述した地上画素寸法の3ケースを組み合わせると精度検証で対象とする飛行条件は、全27ケースとなる。

以上、解説した地上画素寸法、写真重複度について、本研究で対象とするUAV飛行条件を表4に整理した。この飛行条件に従い、自律飛行制御ソフトウェア (DJI Ground Station) 上で、UAVの飛行高度、飛行経路、飛行速度などの飛行計画を作成した。

ここで、オーバーラップの飛行条件は、UAVの飛行速度とカメラのインターバル撮影時間間隔を調整することにより、空撮画像データを取得した。表4より、オーバーラップは10%減るごとに撮影距離間

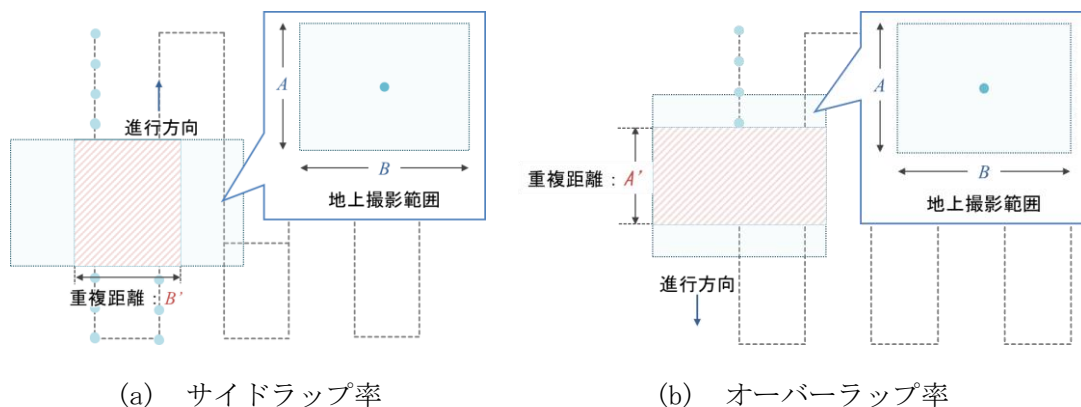


図7 写真重複度の概念図

表 4 本研究で対象とする UAV 飛行条件

分解能		サイドラップ		オーバーラップ	
撮影高度 H [m]	地上画素寸法 R [m]	割合 SL [%]	距離 S_{SL} [m]	割合 OL [%]	距離 S_{OL} [m]
41	0.01	70	18.1	90	4.00
				80	8.00
				70	12.0
		60	24.1	90	4.00
				80	8.00
				70	12.0
		50	30.1	90	4.00
				80	8.00
				70	12.0
82	0.02	70	36.1	90	8.00
				80	16.0
				70	24.0
		60	48.2	90	8.00
				80	16.0
				70	24.0
		50	60.2	90	8.00
				80	16.0
				70	24.0
123	0.03	70	54.2	90	12.0
				80	24.0
				70	36.0
		60	72.3	90	12.0
				80	24.0
				70	36.0
		50	90.3	90	12.0
				80	24.0
				70	36.0

隔が 2 倍, 3 倍と大きくなる. この特性に着目して, 一回のフライトで複数のオーバーラップの飛行条件のデータを取得した. 例えば, $H=41\text{m}$ の場合, オーバーラップの撮影距離間隔 S_{OL} は 4m, 8m, 12m である. UAV 飛行速度 4m/s, 撮影時間間隔 1 sec/回に設定することで, $S_{OL}=4\text{m}$ の観測データを取得することができる. さらに, このデータを 2 秒, 3 秒ごとのデータを抽出することで, $S_{OL}=8\text{m}$ 及び $S_{OL}=12\text{m}$ のデータを整理することができる.

2.4. カメラの撮影条件

UAV を用いた写真測量において, 空撮画像はノイズ, ブレの少ないより鮮明な画像が望ましい. カメラの撮影条件において, 空撮画像の品質を左右する条件として, シャッタースピード, ISO 感度, F 値が挙げられる.

・シャッタースピード

シャッタースピードとはシャッターが開いている時間であり, シャッタースピードを速くすると, 光が撮像素子にあたる時間は短くなり, ブレの少ないクリアな写真が得られる. UAV を用いた空撮で

はシャッタースピードは可能な限り短くすることが望ましい。

・ ISO 感度

ISO 感度とはイメージセンサーの光の感度であり，ISO 感度が高くすることにより，微弱な光も画像に再現することができる。一方，ISO 感度が高いほど，ノイズが多く発生しやすくなる。画質を高めるためには ISO 感度を可能な限り低く設定することが望ましい。

・ F 値

F 値はレンズから入る光の量を調整する絞りの大きさを表したものであり，「焦点距離/絞り有効径」で定義される。F 値を大きくすると絞りが絞られてレンズを通る光の量が少なくなり，F 値を小さくすると絞りが開きレンズを通る光の量は多くなる。また，F 値はピントの合って見える距離範囲である被写界深度に影響する。F 値を大きく設定することにより被写界深度が広くでき，建物の凹凸や起伏がある地形においてもピントがしっかり合った画像を取得できる。一方，F 値を高めすぎると絞り羽根の裏側に光が回ってしまう回折現象が発生し，画質の低下につながる。このように被写界深度と回折現象はトレードオフの関係にあり，使用するカメラやレンズの特性に応じて調整する必要がある。

以上のように，シャッタースピードはより短く，ISO 感度はより低く，そして，F 値は高めに設定することが望ましい。これらの設定条件について，本研究では一般的に UAV 講習会で推奨される値を参考として，カメラ撮影条件を適用した（表 5）。さらに，UAV による写真測量における適正なカメラ撮影条件の設定値について検討するために，複数の条件について，SfM 画像解析によって得られる座標値の精度検証をした。

なお，天候によって十分な明るさが得られない場合は，写真編集ソフトウェア（Adobe Lightroom）を使用して，RAW 画像をデジタル現像する際に露光感度を調整した。

表 5 撮影画像の品質に係る撮影条件

	シャッタースピード	ISO 感度	F 値
推奨値	1/1000 以下	100~200	晴天：5~7/曇天：4~5
適用条件	1/1000	100	5.0

推奨値の参考 HP：<http://ieiri-lab.jp/success/2016/10/i-con-drone-seminar.html>

2.5. SfM 画像解析の方法

様々な飛行条件やカメラ撮影条件において，UAV によって空撮された画像を SfM 画像解析ソフトウェア PhotoScan に入力して，三次元地形データを作成した。一例として，撮影高度 H123m/サイドラップ SL50%/オーバーラップ OL70%の飛行条件における空撮画像と三次元点群データを図 8 に示す。PhotoScan の画像解析では，「写真のアライメント (SfM)」と「高密度クラウド構築 (MVS)」の 2 つの工程に分けられる。

写真のアライメント (SfM) では，各画像の撮影座標 (XYZ) 及び姿勢 (ヨー，ピッチ，ロール角) と標定点及び検証点の座標値が推定される。SfM で推定された座標値と GNSS 測量 (RTK) で観測された座標値を比較することにより，UAV 飛行条件やカメラ撮影条件によって推定される座標値の精度を検証した。また，飛行速度を段階的に変化させて，飛行速度やカメラの姿勢の安定性を評価し，適正な UAV の飛行方法を検討した。

一方，高密度クラウドポイント (MVS) では三次元点群データが生成される。さらに，点群データからメッシュの構築し，DSM や DEM を出力することができる。菅井ら (2017) の UAV を活用した写真測量の

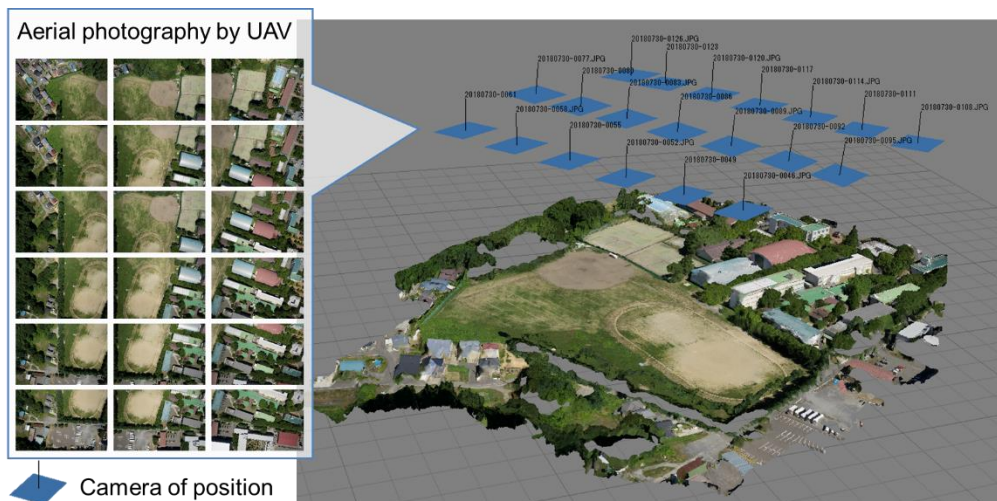


図 8 UAV による空撮画像の入力と三次元点群データ (H123m/SL50%/OL70%)

精度検証の結果によると、検証点精度と面的な精度に乖離が生じるとの報告がある。そこで、本研究では地上レーザースキャナー (TOPCON GLS-1500) を使用して、三次元地形の形状を測定し (図 9)、調査対象地の DEM データを作成した。そして、PhotoScan によって生成された DEM と比較することにより、面的な三次元地形データの精度を検証した。



(a) GLS-1500 本体

(b) ターゲットポイント

図 9 地上レーザースキャナーによる三次元空間の観測

PhotoScan の各工程では計算条件を設定する様々な項目がある。より緻密な計算条件を設定することにより、計算結果の精度を高めることができると推測される。本研究では、観測条件が精度に与える影響を分析するために、基本的には初期設定 (デフォルト) を用いて、標準的な設定において SfM 画像解析を行った。以下に、カメラキャリブレーションなど PhotoScan の計算条件とその設定方法について詳述する。

(1) カメラキャリブレーション

カメラによる画像撮影の過程において、撮影レンズは以下のような状態であることが理想的な状態とされる。

- ・物体の一点から発せられる光線が一点に結像する
- ・平面の物体が平面に結像する
- ・物体と像が相似関係である (歪み・ぼけが無い)

しかしながら、実際には光の振る舞いや各光学素子の配置、硝材の特性等によって、像が一点にまともならずぼけが生じ、平面が湾曲して結像する。この理想的なレンズと実際のレンズとの差異を「収差」という。基本的な収差には、球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、湾曲、色収差がある。カメラ

の製造段階において、これらの収差を低減するために、レンズ枚数や絞りの位置調整、硝材の材質や形状が最適化されるが、それでもなお収差を完全に消去することは不可能である。そこで、SfM 画像解析では、使用するカメラの特性を把握するためにカメラのキャリブレーションを行い、推定されたカメラ内部パラメータによって補正される。PhotoScan ではカメラのキャリブレーションを行う Lens という機能がある。Lens ではチェスボード柄の画像を画面に表示させて、その画面をカメラで撮影した画像を入力する。そして、Brown が導出したモデルを適用して、水平・垂直方向の焦点距離 (f_x , f_y)、主点のずれ (c_x , c_y)、放射状のレンズの歪み ($k1$, $k2$, $k3$, $k4$, $b1$, $b2$, $p1$, $p2$, $p3$, $p4$) のカメラの内部パラメータが推定される。

本研究では、この Lens を使用して、30 枚の画像を入力してカメラの内部パラメータを推定した。一方で、この国土地理院「UAV を用いた写真測量マニュアル (案)」では、焦点距離の初期値はデジタルカメラのカatalogの焦点距離の値を用いるものとする。また、セルフキャリブレーションを行うことを標準とするとされる。本研究では、焦点距離は初期値を設定して、その他の内部パラメータは、Lens で推定された値を適用することにした。また、セルフキャリブレーションによる効果を検証するために、初期値固定する Fix カメラモデルについても検証することにした。

(2) 標定点及び検証点の座標値入力

PhotoScan により SfM 画像解析を実行するにあたって、UAV を用いて空撮された対象画像を入力する。そして、各画像に写し出された標定点及び検証点である対空標識について、所定のポイント番号を指定し、座標値を入力する。UAV 飛行条件とカメラ撮影条件の精度検証では、表 1 に示した RTK 測量によって測定された座標値を入力した。また、各対空標識の設置点について、図 2 のように標定点及び検証点をそれぞれ指定した。一方 UAV の自律飛行による空撮方法の検討では、全ての画像に標定点が写り込むように、図 10 に示すように飛行経路に合わせて 14 点の対空標識を配置した。また、この対空標識の座標値の測定では、RTK 測量によって測定した表 6 の座標値を適用した。

その他、座標系には平面直交座標系 10 系「JGD2011/Japan Plane Rectangular CS X (EPSG::6678)」



図 10 自律飛行テスト用対空標識の配置

表 6 自律飛行テスト用標定点の座標値

No.	X	Y	Z
1	54625.151	52051.665	53.681
2	54603.568	52000.957	53.633
3	54644.667	52047.277	53.834
4	54632.802	51994.245	53.831
5	54673.913	52040.658	53.720
6	54662.013	51987.761	53.708
7	54707.125	52033.313	53.728
8	54695.260	51980.265	53.831
9	54732.423	52027.573	53.709
10	54720.513	51974.622	53.718
11	54765.628	52020.136	53.709
12	54749.792	51968.131	53.792
13	54794.884	52013.581	53.740
14	54779.067	51961.628	53.774

を設定した。さらに、PhotoScanの「座標値設定」では、計測精度（カメラ精度(m, deg), マーカー精度(m)）や画像の座標精度（マーカー精度(pix), タイポイント精度(pix)）を設定することができる。PhotoScan「User Manual Professional Edition, Version 1.4」により、これらの設定値は標定点または検証点の座標値に対し、計算上の重みを与えられてると推測される。しかしながら、具体的に計算上どのように重みづけがなされているかは記載されておらず、実際の計算方法はブラックボックスになっている。この「座標値設定」についてはデフォルト値を設定することにした。

(3) 写真のアライメント

標定点及び検証点の座標値を設定した後、SfM画像解析を実行する。PhotoScanでは、ワークフローの「写真のアライメント」により、SfMの計算が行われる。写真のアライメントを実行するにあたって、計算精度と計算時間などに関係する設定が用意されている。本研究では、基本的にデフォルト値を用いることにし、表7のように計算条件を設定した。写真のアライメントにおける設定項目について、以下に概説する。

・精度

「精度」では、計算する際の画像の解像度（画素数）を規定する。この設定では、「最高、高、中、低、最低」の5段階から設定することができる。「最高」を設定すると、元の画像を2倍に拡大した解像度で解析される。より高い解像度で解析されるため、特徴点の座標を正確に推定できるが、その処理に時間を要する。以下、「高」「中」と1段階下がるごとに、解像度が縦横それぞれ半分（画素数は4分の1）にダウンサンプリングされる。精度の設定は「最高」に設定しても、比較的短時間で計算を終えることができるため、本研究では精度を「最高」に設定した。

・汎用事前設定

汎用事前選択では、低解像度の画像でマッチングを試行し、重なりのある画像ペアを予め選択する機能である。この機能を組み込むことにより、効率的な計算が可能になる。特に、画像が多い場合に、処理時間の短縮につながるとされる。

・キーポイント制限とタイポイント制限

キーポイント制限では、各画像において検出される特徴点の数の上限が設定される。一方、タイポイント制限では、各画像ペアに投影されるタイポイント（画像ペアにおいて対応付けられる特徴点）の数の上限が設定される。これらの設定を0にすると無制限となるが、信頼性の低い特徴点が増える恐れがある。対象とする画像に写し出された地物のテクスチャや画質・写真重複度等に応じて、適切な設定を適用する必要がある。

・カメラモデルの調整

カメラモデルの調整は、最適化するカメラの内部パラメータの選択方法に関する設定項目である。チェックした場合、信頼性が保証できる内部パラメータのみを推定される。一方、チェックしない場合、内部パラメータのうち $f, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2$ のみが推定される。これらの内部パラメータの調整は、事後的に「カメラアライメントを最適化」によって設定することも可能である。この機能を利

表7 写真のアライメント及び高密度クラウドポイント生成における設定項目

写真のアライメント					高密度クラウドポイント生成		
精度	汎用事前選択	キーポイント制限	タイポイント制限	カメラモデルの調整	品質	深層フィルタ	頂点カラー計算
最高	有	40,000	4,000	無	高	強	有

用して、計算結果を精査しながら、状況に応じて調整することが望ましい。

(4) 高密度クラウドポイント生成

写真のアライメントを行った後、ワークフローの「高密度クラウドポイント生成」を実行することにより、三次元点群データを生成する MVS 画像解析を実行する。写真のアライメントと同様に、計算精度と計算時間などに関係する設定が用意されている。高密度クラウドポイントの設定を表 7 に示す。高密度クラウドポイントにおける設定項目について、以下に概説する。

・品質

「品質」では、写真のアライメントで設定した「精度」と同様に、MVS 画像解析で使用する画像の解像度（画素数）を規定される。この設定は、「最高、高、中、低、最低」の 5 段階から設定することができる。「最高」は元の画像の解像度で計算が行われ、1 段階下がるごとに、解像度が縦横それぞれ半分にダウンサンプリングされる。時間の許す範囲で高い設定を設定することが望ましいが、この計算には比較的長時間を要するため、本研究では、品質は「高」に設定した。

・深層フィルタ

深層フィルタの設定では、生成された点群を統合する際に、周囲と離れたノイズを除去するために適用されるフィルタの強さが設定される。この設定は、「強、中、弱、無効」の 4 段階から設定することができる。フィルタリングを強めるほど、信頼性の高い点だけが残る一方で、細部の形状が失われる恐れがある。SfM 写真測量の場合は、通常「強」が妥当であるが、形状が複雑な地物の再現性を高めるには「弱」を選択するべきであるとされる。

・頂点カラー計算

頂点カラー計算は、写真画像から色情報を抽出して、生成された点群をカラーリングする設定である。特に、座標精度には関係しないが、有効にするとカラーの点群データが生成される。

以上、写真のアライメント及び高密度クラウドポイント生成における計算条件の設定では、空撮された画像に写し出された地物のテクスチャや解像度・写真重複度等の状況に応じて、適切な設定を適用する必要がある。本研究では、比較対象の全ての条件において、統一した設定条件を用いて、精度検証を行った。

3. 結果及び考察

UAV を用いた写真測量に関する教育モデルを開発するにあたって、適正な UAV による観測方法を明らかにするために、調査対象地においてフィールドテスト実施して、教材に取り入れるべき教育内容を検討した。具体的に、UAV の自律飛行方法、カメラの撮影条件の設定、地上画素寸法や写真重複度などの撮影条件について、実際に得られたデータから、適正な観測方法を分析した。

3.1. 適正な UAV 自律飛行による空撮方法

UAV を用いて空撮画像を取得するにあたって、マニュアル操作により空撮画像を取得することを試みたが、サイドラップやオーバーラップで規定される所定の位置でズレなく撮影することは困難であった。また、操縦機と UAV 本体との通信が不安定でシャッターボタン押しでも撮影されていない、または重複して撮影されることがあり、SfM 画像解析に入力する写真の整理が非常に煩雑な作業になる。このため、マニュアル操作による空撮画像の取得は、UAV の操作技術が未熟な学生にとっては、相当な高等技術になると考えられる。

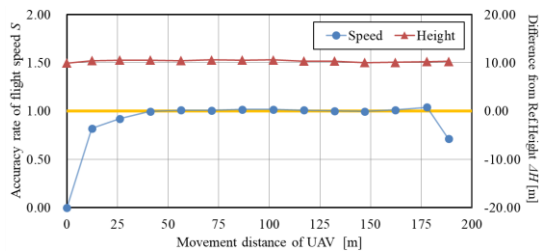
本研究では、リモートコマンダーによるインターバル撮影と自律飛行制御ソフトウェア（DJI Ground

Station) を使用して、自律飛行による空撮方法を採用した。この方法では、オーバーラップの撮影距離間隔に応じて飛行速度と撮影時間間隔を調整して、所定の位置における空撮画像を取得するため、UAV の飛行速度の安定性が重要になる。また、UAV を移動させながら撮影するため、カメラの撮影方向にブレが生じることが懸念される。そこで、適正な自律飛行による空撮方法を検討するために、飛行速度を段階的に変化させて設定した各飛行速度における飛行速度、飛行高度、カメラの撮影方向の安定性について分析した。

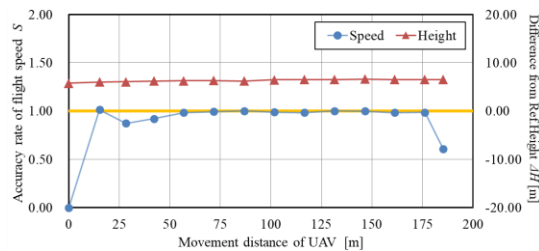
UAV の自律飛行による空撮方法の検討では、飛行高度 82m (地上画素寸法 2cm)、飛行速度を 2.5m/s、5.0m/s、7.5m/s、10.0m/s、12.5m/s、15.0m/s の 6 ケースに設定した。また、図 10 に示すように全ての空撮画像に標定点が写り込むように配置して、空撮画像を撮影した。そして、各ケースで得られた空撮画像を入力して SfM 画像解析を行い、カメラの位置座標と姿勢から、飛行速度、高度、カメラ撮影方向(ヨー角、ピッチ角、ロール角)を推定した。

(1) 飛行高度と飛行速度の安定性

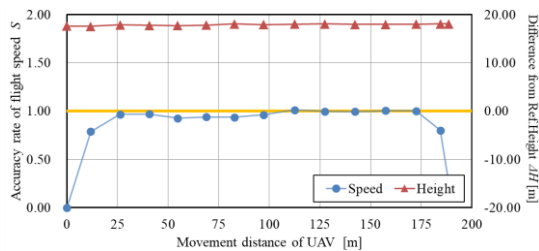
フィールドテストの結果得られた UAV 自律飛行における飛行速度と飛行高度の安定性について、図 11 にまとめて示す。飛行速度は、設定値 S に対する推定値 $S_{est.}$ の比 ($S_{est.}/S$) で正規化して、その値が 1 (橙色ライン) の時、設定した所定の飛行速度であることを表している。この結果より、7.5m/s 以下の飛行速度では設定値に達した後は安定した飛行ができているが、10.0m/s 以上の飛行速度では設定値に



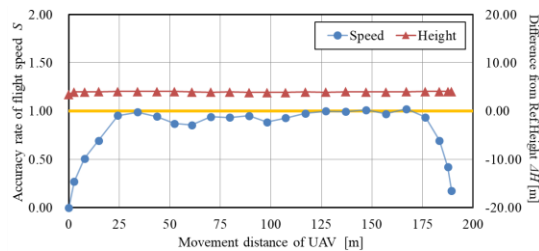
(a) 2.5m/s



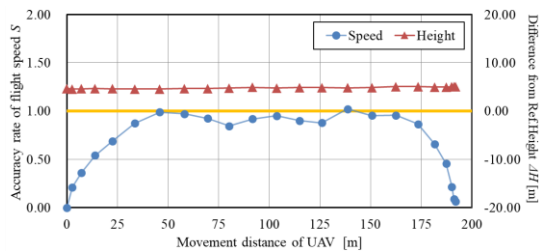
(b) 5.0m/s



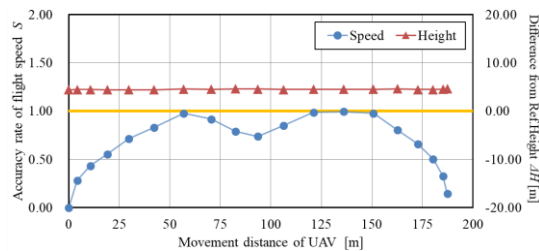
(c) 7.5m/s



(d) 10.0m/s



(e) 12.5m/s



(f) 15.0m/s

図 11 UAV 自律飛行の各飛行速度における飛行速度と飛行高度の安定性

達した後も、その速度が不安定であることが確認された。また、設定値に達するまでに要する距離は、速度が速くなるほど長い距離を要した。設定値に達するまでは所定のオーバーラップ画像が得られないことになるため、この距離を助走距離として、飛行経路を計画することが望ましい。したがって、実際の測定では飛行速度 7.5m/s 以下で、助走距離として 20m 程度設けた飛行経路を設定することが望ましい。

UAV の飛行高度は、設定した飛行高度 (82m) にその地点の標高 (約 54m) を加えた 136m が本来の飛行高度 H になる。図 11 では、飛行高度の推定値 $H_{est.}$ から本来の飛行高度を差し引いた値 ΔH ($H_{est.} - H$) で表した。この結果より、どのケースにおいても飛行高度が安定していることが確認された。一方、全ケースで本来の飛行高度よりも高い値となっており、特に速度 7.5m/s のケースでは、20m も高い値を示した。ここで、SfM 画像解析は Self-calibration に設定して実行されたものである。SfM 解析後の焦点距離の修正値は初期値よりも大きい値となった。SfM 解析後の各ケースにおける焦点距離の修正値を表 8 に示す。この焦点距離と図 11 の飛行高度のずれには相対的に一致していることが確認された。つまり、飛行高度のずれは、SfM 画像解析におけるカメラの Self-calibration によって、焦点距離が修正されて、飛行高度が高まったと推測される。実際にこの他のフィールドテストにおいても、同様に焦点距離により、想定される飛行高度よりも高い値になることが確認されている。Self-calibration により、精度は向上するが飛行高度に矛盾が生じることになる。これについては、別途詳細に検討する必要がある。

表 8 SfM 解析後の各ケースにおける焦点距離の修正値

飛行速度 [m/s]	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
焦点距離の修正値 [mm]	4653	4405	5013	4308	4379	4351

(2) カメラ撮影方向の安定性

本研究で使用する UAV にはカメラジンバル (Z15-A7) を取り付けて、カメラを設置している。このカメラジンバルは飛行中の傾きや揺れに対し、3つのサーボモーターにより傾きを補正するように機能し、カメラの向きを一定に保持することができる。しかし、瞬間的な傾きの変化には、傾き補正機能の応答が追いつかず、空撮画像に傾きが生じることが想定される。このように、空撮画像に傾きが生じた場合、所定の写真重複度を有する空撮画像が得られず、SfM 画像解析によって生成される三次元地形データの精度に影響を与える恐れがある。そこで、UAV 自律飛行の各飛行速度におけるカメラ撮影方向 (ヨー角 ϕ , ピッチ角 θ , ロール角 ψ) について分析した。

SfM 画像解析の結果から推定される各飛行速度におけるヨー角 ϕ , ピッチ角 θ , ロール角 ψ のカメラ撮影方向を図 12 にまとめて示す。ここで、ヨー角 ϕ は進行方向を 0° 、ピッチ角 θ 及びロール角 ψ は鉛直下向きを 0° とする。図 12 においては、各角度ともに 0° (橙色ライン) のとき、撮影方向にズレのない所定の撮影方向であることを表している。

この結果より、ヨー角 ϕ は、飛行経路のコースに入って、飛行するに従いある角度に安定していくが、計画した飛行経路とは多少ずれが生じることが確認された。ヨー角については、ジンバルによる傾き補正は機能しておらず、機体の前方向の向きで空中写真が撮影される。自律飛行制御ソフトウェア (DJI Ground Station) において、UAV の機首方向は「進行方向に沿う」に設定しているが、必ずしも機体が進行方向に沿っていないものと推察される。特に低速の 2.5m/s と高速の 15.0m/s では、ヨー角のずれが大きくなるという結果となった。

ピッチ角 θ に着目すると、始動時はカメラの撮影方向に多少傾きが生じることが確認された。この原因として、始動時は前方に機体を傾けて加速することにより、同様にカメラも傾いてしまうと考えられる。さらに、大きな加速度が生じた場合、カメラが慣性により振れてしまうことによりピッチ角に傾

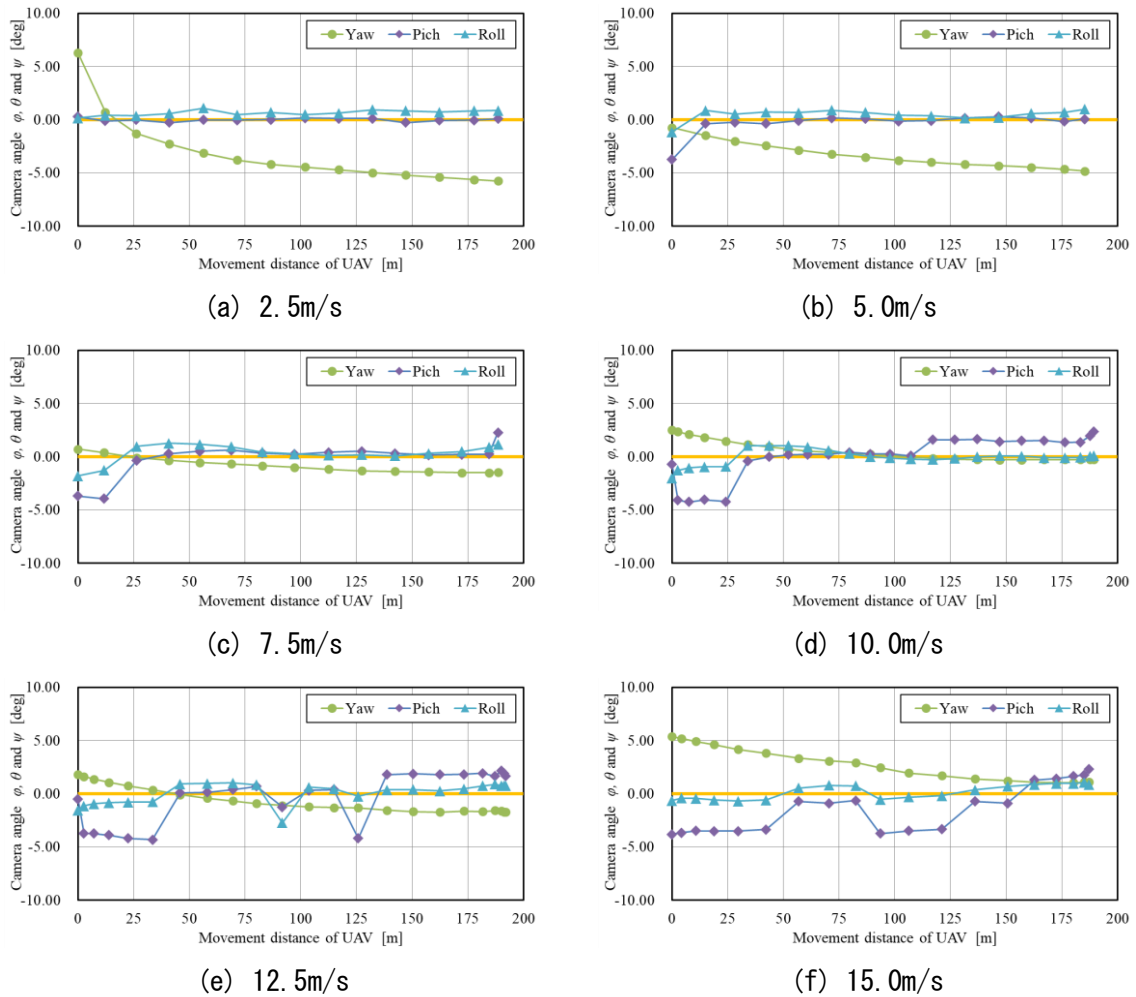


図 12 UAV 自律飛行の各飛行速度におけるカメラ撮影方向の安定性

きが生じると考えられる。飛行速度 7.5m/s 以下の低速のケースでは UAV が加速した後、ピッチ角は安定しているが、飛行速度 10m/s 以上の高速のケースでは不安定になる結果が確認された。低速のケースではジンバルの傾き補正機能により、傾きを安定させることができるが、高速のケースでは飛行速度が安定せず (図 11)、終始加速度が不安定であるため、ジンバルではピッチ角を補正しきれず、結果としてピッチ角が不安定になると推察される。

ロール角 ψ に着目すると、始動時に多少不安定になるが、全体として比較的安定している傾向が確認された。UAV が前方に直進するとき、左右の方向に係る傾きは比較的小さく、傾きが生じた場合もジンバルによる傾き補正が有効に機能していると推察される。ただし、飛行速度 10m/s 以上の高速のケースでは、多少不安定になる状況が確認された。

(3) 飛行速度によるバッテリー効率の変化

UAV を用いて効率的に空撮画像を取得するためには、バッテリーの電力消費効率の良い方法で飛行させることが有効である。この UAV 自律飛行による空撮方法の検討において、各飛行速度におけるバッテリー減量の変化を記録した。なお、経路長は 600m でありバッテリー減量 [%] は、自律飛行制御ソフトウェア (DJI Ground Station) に表示される飛行経路の始点と終点のバッテリー残量の差から算定したものである。このデータは、経路長が短く、最小読定値が粗いため、あくまでも参考値であるが、飛行速度が遅いほど、バッテリーの減量が大きくなる傾向が確認された。飛行速度が遅いほど、飛行時間が長くなるため、バッテリーは大きく消耗すると推察される。この結果より、飛行速度が速いほどバッテリーの減量を抑えた効率的な飛行が可能になることが確認された。

表 9 各飛行速度におけるバッテリー減量の変化

飛行速度 [m/s]		2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
バッテリー 減量 [%]	1 回目	11	6	5	5	5	4
	2 回目	11	7	5	5	4	4
	3 回目	11	7	5	4	4	4
平均 [%]		11.00	6.67	5.00	4.67	4.33	4.00

以上の適正な UAV 自律飛行による空撮方法の検討結果を踏まえると、飛行速度 7.5m/s 以下で、助走距離として 20m 程度設けた飛行経路を設定するが望ましいと考えられる。さらに、バッテリーの電力効率を考慮すると、UAV の飛行速度 5m/s 程度に設定することで効率的に空撮画像が取得できると考えられる。また、撮影方向におけるヨー角はジンバルによる傾き補正が機能しないため、ズレが生じやすいことが確認された。ヨー角はピッチ角やロール角に比べ、そのズレが写真の重複度に与える影響は小さいが、予めヨー角のズレに留意した飛行計画とすることが望ましい。

3.2. 適正な UAV 空撮条件の方法

SfM 画像解析の過程において、標定点の既知座標値を参照し、カメラ内部パラメータを調整しながら、三次元点群データが生成される。したがって、より多くの標定点を与えるほど、成果物の精度向上が期待できるが、予め TS や GNSS を用いて座標値を測定する必要があり、観測の作業量を増大することにつながる。標定点及び検証点の数は必要とする精度に応じて最小限に抑え、適切な配置を適用することが重要である。また、SfM 画像解析に入力する画像はその地上画素寸法や写真重複度が高いほど、より正確かつ綿密に特徴点が抽出されることで、精度の高い三次元点群データが生成される。一方で、地上画素寸法や写真重複度を高めると、データ数が増加し、計算負荷を増大させることにつながる。

SfM 画像解析の計算条件は図 2 の P1, P3, P7, P9, P13, P15 の計 6 点を標定点として既知座標を与え、P2, P4, P5, P6, P8, P10, P11, P12, P14, P16 の計 10 点の検証点とした。さらに、カメラモデル Self-calibration と Fix の 2 条件で計算し、Self-calibration の効果も合わせて分析した。そして、このような計算条件において、表 4 に示した全 27 ケースの UAV 空撮条件について、各条件によって推定される座標値の精度を分析した。

(1) 標定点及び検証点における座標値誤差

標定点及び検証点において、GNSS (RTK 法) を用いて測定された座標値 (表 1) と SfM 画像解析によって推定される座標値との差から、各観測点の誤差を算定した。そして、この結果から標定点及び検証点の配置が座標値の推定精度に与える影響を分析した。一例として、カメラモデル: Self-calibration, UAV 空撮条件: H82m/SL60%/OL80%における各観測点の x 方向の誤差 e_x , y 方向の誤差 e_y , z 方向の誤差 e_z について比較した結果を図 13 に示す。

全体の傾向として、標定点に囲まれた中央に位置する検証点 P5, P8, P11 では誤差が小さく、外側に位置する検証点では誤差が大きくなった。特に、標定点の外側に位置する P16 では、突出して誤差が大きくなった。一方、中央に位置する検証点では、既知座標を与える標定点が検査点を取り囲むように配置されているため、比較的高い精度が得られたと推察される。一方で、標定点は既知座標を与えているため、当然ながら検証点の誤差に比べ、標定点の誤差は小さくなると想定されたが、大きな違いは確認できなかった。逆に、P9 のように標定点の誤差が検証点を上回る状況も確認された。PhotoScan の SfM 画像解析の計算過程では、標定点にはその精度に応じて重みづけの係数が乗じられて計算されていると考えられる。この結果から、標定点の重みづけのファクタが過小な値が設定されていると示唆される。

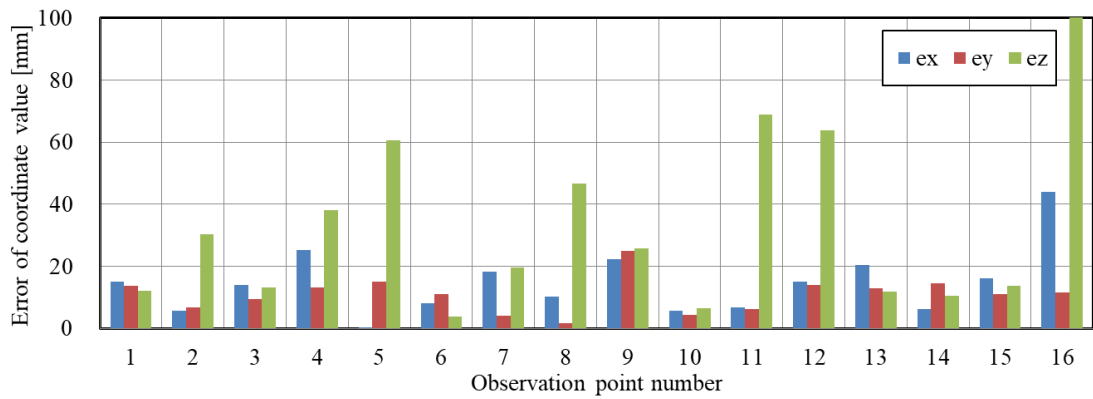


図 13 標定点及び検証点における座標値誤差 (Self-Calibration, R20mm/SL60%/OL80%)

精度を向上させるためには PhotoScan の計算条件については、改めて見直しが必要である。

各方向の誤差に着目すると、各観測点ともに平面方向の誤差 e_x , e_y は比較的小さく、高さ方向の誤差 e_z は大きくなった。特に、高さ方向の精度は、検証点で著しく高まる傾向が確認された。菅井ら (2017) では、斜め撮影を導入することによって、高さ方向の精度が改善することが報告されている。また、DEM データを使用して、面的な誤差分布について検証し、観測点における点的な精度と面的な精度には乖離が生じることが指摘されている。斜め撮影画像の導入や DEM データを使用した面的な精度検証も含めて、さらに詳細な検証が必要である。

(2) 地上画素寸法と写真重複度による座標値誤差

本研究では表 4 に示した UAV 空撮条件について、地上画素寸法や写真重複度が精度に与える影響を検証した。カメラモデル Self-calibration と Fix の 2 条件について、地上画素寸法 $R=10\text{mm}$, 20mm , 30mm とサイドラップ $SL=50\%$, 60% , 70% 及びオーバーラップ $OL=70\%$, 80% , 90% の撮影条件について、検証点における水平方向の平均二乗誤差 ($RMSE_{xy}$) を比較したグラフを図 14 に示す。

カメラモデルに Self-calibration を適用することにより、Fix を用いた場合よりも、大きく精度が改善することが確認された。Self-calibration では、SfM 画像解析を実行しながら、主点のずれやレンズの歪み等を補正するカメラ内部パラメータが修正され、計算上の矛盾が生じないように、計算が行われる。結果として、カメラ内部パラメータの初期値を一定に用いる Fix よりも Self-calibration の方が、高い座標精度が得られたと推察される。

Self-calibration の結果 (図 14(a)) より、全体として、オーバーラップが高くなるにつれ、誤差が小さくなる傾向が確認された。一方で、サイドラップを高めると、逆に誤差が大きくなる傾向が確認された。特に、地上画素寸法 $R=20\text{mm}$ ではサイドラップが高まるにつれて、明らかに誤差が大きくなる傾向が確認された。また、地上画素寸法に着目すると、精度が多少改善する傾向が確認されたが、地上画素

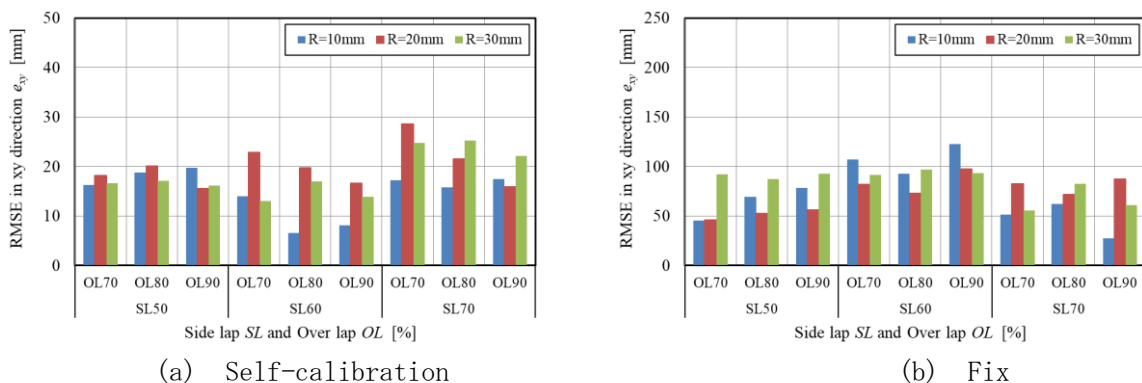


図 14 地上画素寸法と写真重複率による

寸法 $f=30\text{mm}$ でも全ての条件で RMSE 30mm 以下と誤差は小さいことが確認された。写真重複度や地上画素寸法の条件について緻密に観測すると計算負荷が増大する。この結果からは、その計算負荷に応じた精度向上の効果は期待できないことが示唆される。

一般的に、写真重複度をより高く設定することにより、より多くの特徴点から三次元の地形座標が推定される。さらに、地上画素寸法をより精細に設定することにより、より正確な特徴点のマッチングを行うことができ、より信頼性の高い三次元地形データが生成されると考えられる。しかしながら、今回の結果からは、このような想定とは矛盾する結果が得られた。本研究の精度検証では、主に検証点の推定座標値を検証する方法を用いているが、三次元地形データの精度を適正に評価するためには、面的な精度評価が必要である。

3.3. 適正なカメラ撮影条件の設定方法

SfM 画像解析では、入力される空撮画像の画質が生成される三次元点群データの品質を左右する。良質な空撮画像を得るためには、適正なカメラ撮影条件を設定する必要がある。

本研究では、主な空撮画像の品質に係るカメラ撮影条件として「F 値, ISO 感度, シャッタースピード」に着目して、各条件の SfM 解析によって推定される座標値の精度を検証した。

本研究では、一般に用いられるカメラ撮影条件を参考に表 10 の F 値, ISO 感度, シャッタースピードの設定値を対象とした。計算条件は R20mm/SL60%/OL80%の空撮条件で撮影された画像を入力し、図 2 の 6 点を標定点として既知座標を与え、計 10 点の検証点における x 方向の誤差 e_x , y 方向の誤差 e_y , z 方向の誤差 e_z を評価した。さら

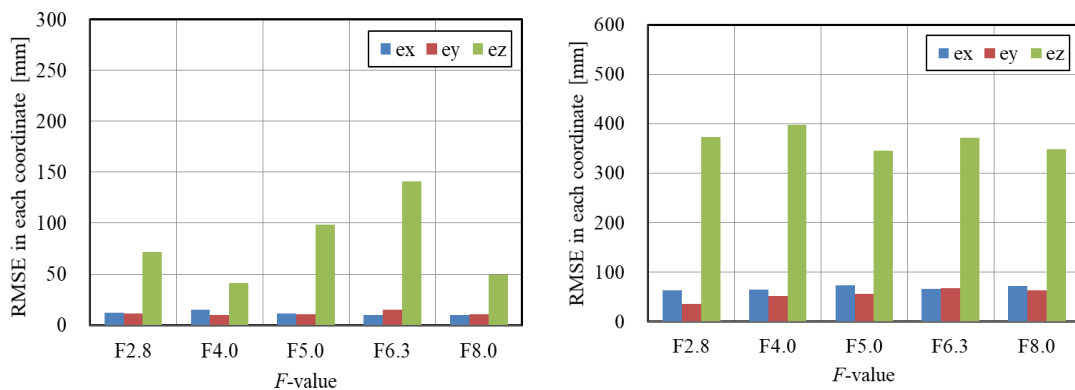
表 10 対象とするカメラ撮影条件の設定値

F 値	2.8	4.0	5.0	6.3	8.0
ISO 感度	100	200	500	1000	5000
シャッタースピード	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/100

に、カメラモデル Self-calibration と Fix の 2 条件を計算し、Self-calibration の効果も合わせて分析した。

(1) F 値の設定値による座標誤差

本研究で対象とした F 値の設定値について、各条件における x 方向の誤差 e_x , y 方向の誤差 e_y , z 方向の誤差 e_z を比較した結果を図 15 に示す。Self-calibration の結果 (図 15(a)) では、各条件によって水平誤差 e_x, e_y に差は確認されなかったが、高さ誤差 e_z は F6.3 において誤差が大きくなるという結果となった。一方で、カメラモデルを Fix に設定した結果 (図 15(b)) では、水平誤差、高さ誤差ともに、どの条件においても同様な値を示した。



(a) Self-calibration

(b) Fix

図 15 F 値の設定値による座標誤差

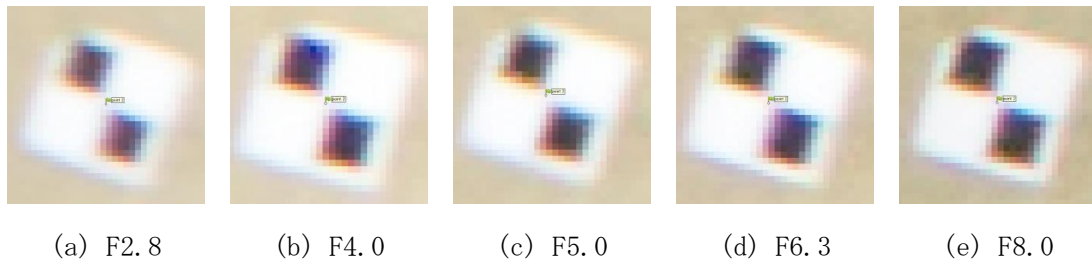


図 16 F 値の設定値における空撮画像

各 F 値の設定値における空撮画像を図 16 にまとめて示す. F2.8 ではピントがずれた多少ぼやけた画像が確認されたが, 人間の目で判断できるほどの差は確認されなかった. F 値は, ピントの合って見える距離範囲である被写界深度に関係し, 一般に F 値が高いほど被写界深度が広がる. 本研究の調査対象地は平坦な地形をしており, F 値が座標値の精度に与える影響は小さかったと推察される.

(2) ISO 感度の設定による座標値誤差

本研究で対象とした ISO 感度の設定値について, 各条件における x 方向の誤差 e_x , y 方向の誤差 e_y , z 方向の誤差 e_z を比較した結果を図 17 に示す. なお, ISO5000 ではノイズが多く発生し, 一部の対空標識で判読することができなかつたため, 比較対象から除外した. Self-calibration の結果 (図-17(a)) では, ISO500 の条件で高さ誤差が小さくなったが, その他は, ほぼ同様な値を示した. 一方, カメラモデルを Fix に設定した結果 (図 17(b)) では, ISO 感度が大きくなるにつれて水平誤差が大きくなる傾向が確認されたが, その差は小さく, 設定値によって誤差に大きな違いは確認されなかつた.

各 ISO 感度の設定値における空撮画像を図 18 にまとめて示す. このように実際の空撮画像は ISO 感度が高くなるにつれて, ノイズが多く発生する状況が確認された. 一方, ISO 感度が高い設定値では画質が低い画像が適用されているにもかかわらず, ISO 感度の設定値による誤差に違いは確認されなかつた.

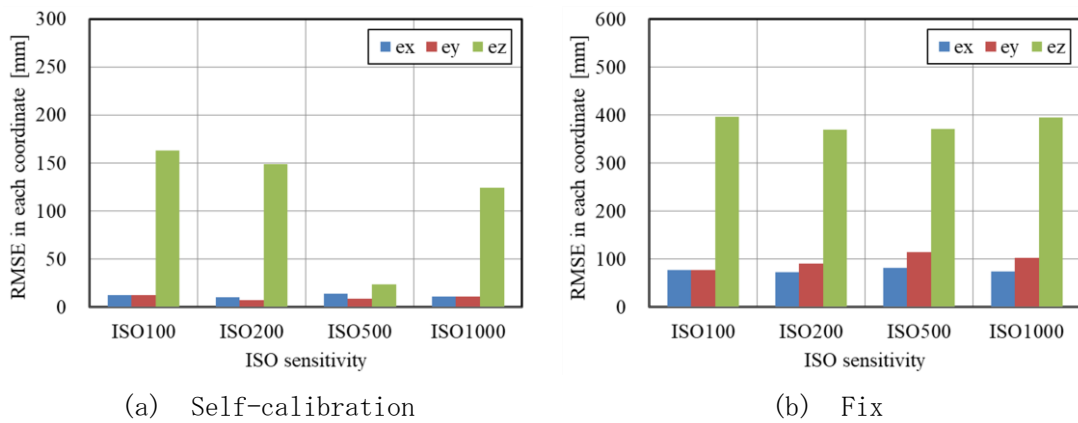


図 17 ISO 感度の設定値による座標誤差

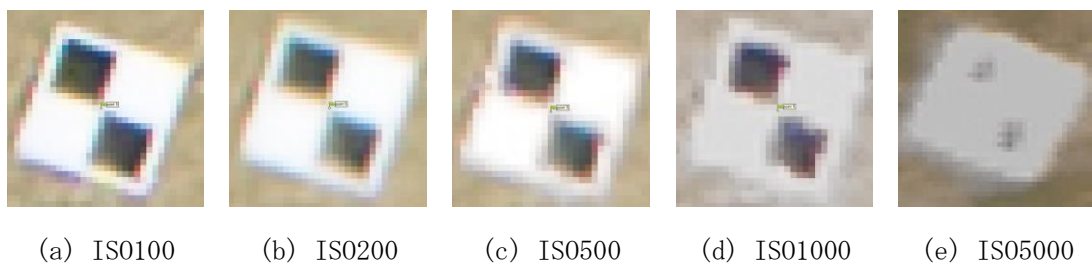


図 18 ISO 感度の設定値における空撮画像

た. この結果から, SfM 画像解析では, ある程度画質が劣悪な空撮画像でも, 特徴点の抽出が可能であるといえる. しかしながら, より正確な SfM 画像解析を行うためには, 良質な空撮画像を用いるべきである. さらに, この結果については, さらに詳細に検証する必要がある.

(3) シャッタースピードの設定による座標値誤差

本研究で対象としたシャッタースピードの設定値について, 各条件における x 方向の誤差 e_x , y 方向の誤差 e_y , z 方向の誤差 e_z を比較した結果を図 19 に示す. Self-calibration の結果 (図 19(a)) より, 1/100 の条件では誤差が突出して大きい値となった. カメラモデルを Fix に設定した結果 (図 19(b)) では, 僅かながらシャッタースピードが遅くなるにつれて, 誤差が大きくなる傾向が確認された.

各シャッタースピードの設定値における空撮画像を図 20 にまとめて示す. シャッタースピードを速くすると, 光が撮像素子にあたる時間は短くなり, ブレの少ないクリアな写真が得られる. シャッタースピード 1/4000 から 1/1000 では, 鮮明な空撮画像となっているが, シャッタースピードが遅い 1/500 や 1/100 ではブレが生じている状況が確認された. 特に, 1/100 では地物のブレが大きく, 座標の手動判読が困難になるほどのブレが生じた. UAV を用いた空撮にあたっては, 移動しながらの撮影となるため, 画像のブレを抑えるためにシャッタースピードは可能な限り速い設定を用いるべきである.

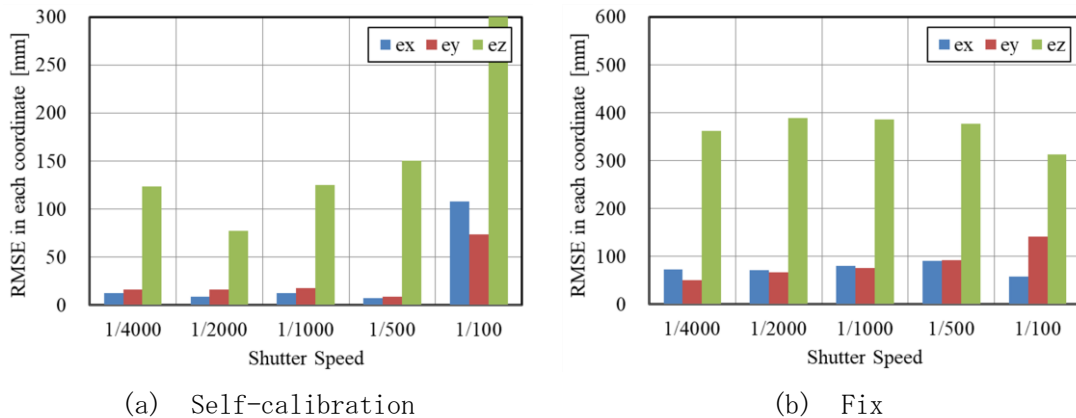


図 19 シャッタースピードの設定値による座標誤差

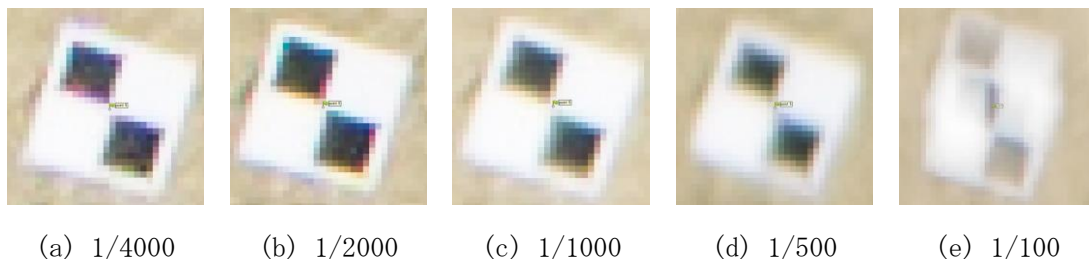


図 20 シャッタースピードの設定値における空撮画像

以上, 適正なカメラ撮影条件の設定方法についての検討結果を踏まえると, カメラの撮影条件による画像の品質の良否は, 想定に反して, SfM 画像解析に大きく影響するものではないという結果が得られた. SfM 画像解析では人間の目でも判読が難しいものでも, 統計的な処理等によって最も確からしい特徴点の抽出・マッチングされ, 三次元地形データの生成が可能であると推察される. しかしながら, 正確な SfM 画像解析を行うためには, 良質な空撮画像を用いるべきである.

3.4. 三次元点群データの精度

UAV 空撮条件やカメラ撮影条件について, SfM 画像解析の推定座標値の精度を検証した結果, 想定とは異なる説明が困難な結果が確認された. その例として, UAV の撮影条件の検討において, サイドラッ

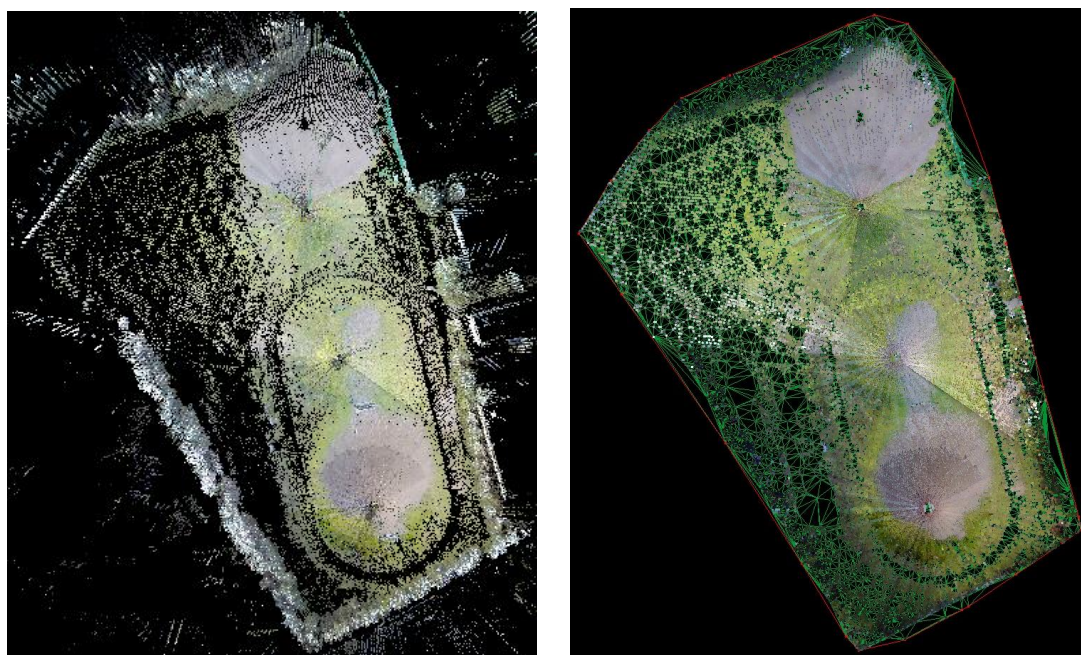
ブを高めると、逆に誤差が大きくなる傾向が確認された。特に、地上画素寸法 $R=20\text{mm}$ ではサイドラップが高まるにつれて、明らかに誤差が大きくなる傾向が確認された。また、カメラ撮影条件では、劣悪な空撮画像と良質な空撮画像のどちらにおいても、それらを用いて推定される座標値に大きな差は確認されなかった。カメラの撮影条件による画像の品質の良否は、SfM 画像解析に大きく影響するものではないという結果が得られた。菅井ら (2017) によって、DEM データを使用して面的な誤差分布について検証し、観測点における点的な精度と面的な精度には乖離が生じることが指摘されている。つまり、検証点による誤差検証だけでは、十分にその条件の良否を評価できない可能性がある。

そこで、本研究では、各条件における SfM 画像解析の結果から、さらに三次元点群データの作成、及び DSM (Digital Surface Model) の構築を行い、DEM を作成した。一方、推定値を検証する上で基準となるデータは地上レーザースキャナー TLS (Terrestrial Laser Scanner) (図 9) を使用して、空間的な地形データを測定した。TLS による観測では、調査対象地の観測点 P2, P8, P14 (図 2) に据え付けて、3 点から全方位 360° で観測した。その結果を得られた三次元点群データを図 21(a) に示す。さらに、この点群データから TIN (Triangulated Irregular Network) データ (図 21(b)) を作成し、TIN データから、 0.25m 格子上に標高を抽出して DEM データを整理した。

そして、3D レーザースキャナーから得られた DEM を基準データとして、各条件で作成された DEM の精度を検証した。一例として、UAV 空撮条件における「R20mm/SL50%/OL70%」と「R20mm/SL70%/OL90%」について、面的な座標誤差を検証した結果を図 22 に示す。

ここで、 z 方向の誤差 e_z は「基準データ DEM」と「比較対象 DEM」の同一座標の標高値の差を算定したものである。また、白色が誤差 0 の状態を表し、赤色がプラス (標高の過大評価) 青色がマイナス (標高の過小評価) を表している。

検証点における水平方向の平均二乗誤差 ($RMSE_{xy}$) を比較した結果 (図 14) では、両条件は同程度の誤差であったが、図 22 より、「R20mm/SL70%/OL90%」の方が大きな誤差が生じていることが確認された。また、両条件の結果ともに、北側の敷地境界で赤色を示し、誤差が高まっている状況が確認された。特に、「R20mm/SL70%/OL90%」では、その赤色が濃く 0.4m 程度の比較的大きな誤差が分布している。このよ



(a) Point cloud

(b) TIN

図 21 3D 地上レーザースキャナーを用いた DEM データの作成

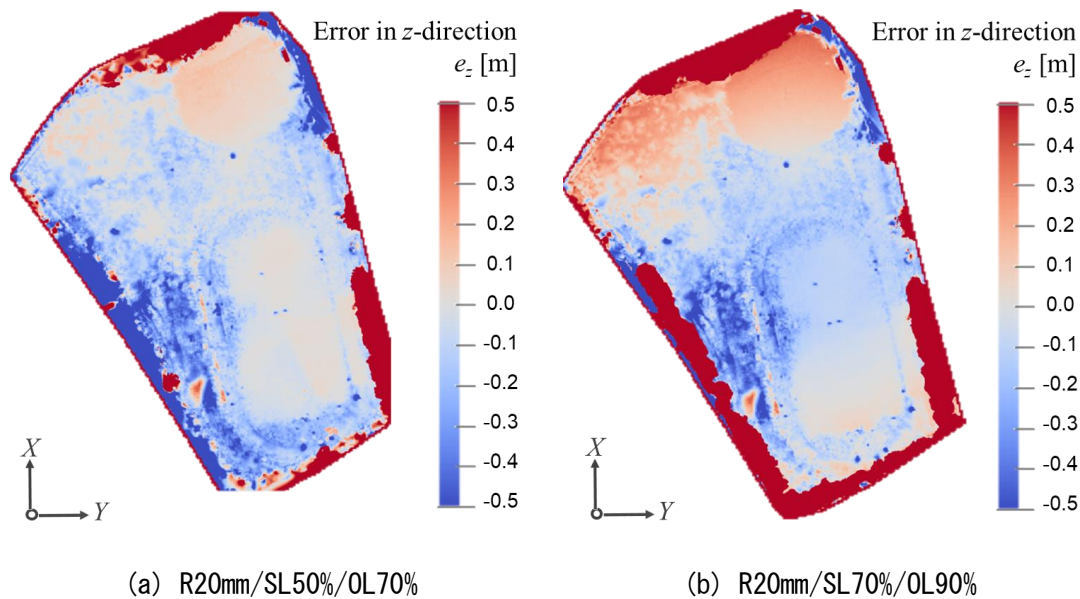


図 22 DEM データを用いた高さ誤差 e_z の分布

うに、北側の敷地境界付近で高い誤差が分布した原因としては地形が湾曲化していると推測される。どちらの条件も標定点の配置は同じく、南側に偏った配置となっている。標定点が写り込んでいない画像が多くなると、SfM 画像解析における正しいカメラ位置や姿勢の算定が難しくなり、結果としてそれが地形の歪みとなって表れると推察される。特に、入力する空撮画像の枚数が多い空撮条件「R20mm/SL70%/OL90%」のケースでは比較的大きな歪みが生じたと推察される。さらに、図 22 (b) では、南側にも多少赤色が分布している状況が確認できる。北側で生じた不正確なカメラ位置や姿勢または地形の歪みによって、対象地形の全体の精度に影響を与えている可能性が示唆される。

DEM による面的な精度検証の結果より、標定点の配置は SfM 画像解析を行う上で、非常に重要であるといえる。標定点は対象地形の 4 隅に必ず配置し、UAV の空撮画像に最低 1 つ、可能であれば複数写り込むように配置すべきであると考えられる。本研究では、標定点の数を等距離に配置することに留意していた。実際は UAV の撮影範囲を対象範囲として捉え、対象範囲全体に標定点を配置することが望ましいと考えられる。

今後は、標定点が写り込んでいない画像を除外した上で改めて SfM 画像解析を行う必要があると考えられる。そして、本研究の検討事項については、改めて再検証していきたい。

4. まとめ

本研究では、UAV と SfM 多視点ステレオ写真測量を題材とした教育教材モデルを開発することを目的に、UAV 自律飛行による空撮方法、UAV 空撮条件の方法、カメラ撮影条件の設定方法について検討した。

UAV の自律飛行による空撮方法は、正確なカメラの位置・姿勢で安定的に空撮画像を得るためには飛行速度 7.5m/s 以下で、助走距離として 20m 程度設けた飛行経路を設定するのが望ましいという結果が得られた。教育教材として UAV を用いた空撮を行う場合、UAV の操作技術が未熟な学生にとってマニュアル操作による空撮画像の取得は非常に難しいため、自律飛行による空撮が適用した方が良いと考えられる。一方、UAV が不調になった場合に安全に地上に着陸させることができるように、最低限の操作を習得させる必要がある。教材の実践するにあたっては、離陸・着陸、上昇・下降、水平移動など、基本的な操作を習得するための実技の時間を取り入れて実践していきたい。

また、カメラ撮影条件の設定方法の検討は、F 値、ISO 感度、シャッタースピードの設定値によって変

化する空撮画像のデータを取得することができた。一方、UAV 飛行条件やカメラ撮影条件について、SfM 画像解析による推定座標値を精度検証した結果では、一部想定外の結果も得られた。この原因として、DEM データを用いた面的な精度検証結果から標定点の配置が影響している可能性が示唆された。今後、対象範囲を絞り込み、標定点が写り込んでいない画像を除外した上で改めて再検討する予定である。

このように再検証が必要な検討課題が残されたが、UAV の飛行速度やカメラの撮影方向の安定性、空撮条件及びカメラ撮影条件における SfM 画像解析の推定座標値の精度に関する多くの基礎的な知見を得ることができた。さらに、本研究によって得られた知見を整理して、不完全ながら UAV を用いた写真測量に関する実習のテキストを作成した。

UAV の写真測量は、新たな技術開発により技術が進歩していくことが期待される。このような最新技術や研究の動向、そしてマニュアルの更新等を踏まえながら、引き続き本教育教材の改良を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、「国土地理協会 第 17 回学術研究助成 (2017 年度)」を受けることにより、UAV を用いた写真測量に関する教育環境を構築することができました。その他、「平成 30 年度 青森県建設技術センター研究助成金」の支援を受けました。ここに記して、深く感謝を表します。

参考文献

- 1) 早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸: 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 No. 127, pp. 107-116, 2015.
- 2) 菅井秀翔, 宮地邦英, 中村孝之, 南秀和, 橘克巳: UAV を活用した写真測量の精度検証, 国土地理院時報 No. 129, pp. 147-157, 2017.
- 3) 国土地理院: UAV を用いた公共測量マニュアル (案) (平成 29 年 3 月改正), pp. 1-35, 2017.
- 4) 国土地理院: 公共測量における UAV の使用に関する安全基準 (案), pp. 1-37, 2016.
- 5) 小花和宏之, 早川裕式, 齋藤 仁, ゴメス クリストファー: UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較, 写真測量とリモートセンシング 53: pp. 67-74, 2014.
- 6) Duane Brown: Close-Range Camera Calibration, Photogrammetric Engineering vol. 37, no. 8, pp. 855-866, 1971.
- 7) 早川裕式, 小花和宏之, 齋藤 仁, 内山庄一郎: SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用, 地形 第 37 巻第 3 号, 321-343pp, 2016.
- 8) 早川裕式, 小口 高: 地形学における地上レーザ測量の活用, 地学雑誌, 125, pp. 299-324, 2016.
- 9) 鈴木拓也, 西宏治朗, 佐伯昌之, 盛川仁: 1 周波 GPS と MEMS IMU を用いた姿勢計測システムの精度検証, 物理探査, 67 巻第 3 号, pp. 171-179, 2014.
- 10) Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K. and Hamilton, T.: Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model., Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS), Geomorphology, 194, pp. 16-24 2013.
- 11) Fonstad, M .A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L. and Carbonneau, P.E.: a new development in photogrammetric measurement. Earth Surface Processes and Landforms, 38(4), pp. 421-430, 2013.
- 12) Agisoft: PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4, pp. 1-118, 2018.
- 13) 神野有生: 山口大学 空中測量研究室の技術ノート, <https://ameblo.jp/rs-algorithm-designer/>