

## UAV 写真測量の SfM における斜め撮影の効率的配置,

### 標定点の省略可能性, 水の影響と対策に関する検討

山口大学 ○神野有生, 八田滉平, 福元和真, 田村尚也  
山口大学 宮崎真弘, 米原千絵, 浦川貴季  
日本工営株式会社 清水隆博, 炭田英俊

#### 1. はじめに

近年, 小型 UAV で撮った写真を用いた 3 次元点群の作成と, それに基づく地物の測量・モデリングが, 多くのユーザーを獲得した. 土木分野の例えば河川管理でも, 広範な応用が期待されている[1]. 3 次元点群を得るまでの一般的な工程は, 標定点の設置・測量, 小型 UAV による空撮, SfM によるカメラパラメータの推定, MVS による密な点群の生成である. このうち SfM では, 各画像の撮影位置・向きを表す「外部パラメータ」のみならず, 全画像共通の画角・歪みなどを表す「内部パラメータ」をも推定対象とするのが標準的である(セルフキャリブレーション).

このような UAV 写真測量の成果物(3 次元点群等)の精度は, SfM によるカメラパラメータの推定精度に強く依存するが, さらにそれは, 撮影や対象物等に関する多数の条件に依存する. 例えば, 隣接画像の重複率, 撮影の向き・対地高度の多様性, 画像の地上画素寸法・鮮鋭さ, カメラモデルとその適合性, 対象物の形状・テクスチャ・不動性・照明環境, 標定点の数・配置・地上測量精度等である. 中には, 現実には制御はおろか把握すら難しい条件もある. そのため, UAV 写真測量の精度・適用性や, 精度と効率を両立する方法というテーマは, ユーザーから大きな関心がある一方で, 現地実験の積み重ねだけでは評価・解明できない難題となっている.

そこで私たちは, 全ての条件の把握と制御, 条件の単純化が可能な CG シミュレーションを使って, これらのテーマに取り組んできた. 2018 年度秋大会[2]では, 従来型の鉛直下向きの平行撮影に斜め撮影を加えることで, 非線形系統誤差の抑制と標定点の節減が可能であることを示した. 本発表では前回の続編として, さらに踏み込んだ検討例のいくつかを

簡潔に紹介する. 具体的には, 斜め撮影の効率的な配置, 対象が河道・海岸地形の場合における水の影響と対策(標定点が両側に置ける場合/片側にしか置けない場合), および撮影位置の高精度測位が可能な UAV を用いた場合の標定点の完全な省略可能性に関する検討である. 紙面・発表時間の都合により, 解析方法の詳細は Web 公開した別資料[3]に譲る.

#### 2. 基本的な解析方法

各検討において, 特に断らない限り, 下記の通り解析を行った. 3 次元の CG 空間において, 水平方向に X, Y 軸, 鉛直上向きを正に Z 軸を設け, 水平面上に約 200 m 四方の対象領域を定義した. 対象領域の外部に標定点, 内部に検証点を設置後, 歪みのないピンホールカメラ(内部パラメータ  $f=1333.333$ )を用いて, 高度 100 m から多数の画像の撮影(レンダリング;  $2000 \times 1500$  画素)を行った. このとき, 重複率 80% で鉛直下向きの平行撮影をベースとしたが, 0-8 枚を斜め撮影に置き換えた. その後, 撮影した画像を Agisoft PhotoScan ver 1.43 に入力し, 次の手順の試行を多数回行い, 検証点誤差の全試行に関する RMS (以下, 検証点誤差 RMS) などを評価した.

1. 特徴点の検出, 特徴量の計算, 特徴点の画像間での対応付け, カメラパラメータの初期推定.
2. 標定点・検証点の画素座標の検出と, 世界座標(絶対 XYZ 座標)の登録. ただし標定点の世界座標には RTK-GNSS 測量を模擬したランダムな誤差(正規分布に従う疑似乱数; 標準偏差は X, Y 方向に各 1.5 cm, Z 方向に 2.5 cm)を付与.
3. バンドル調整によるカメラパラメータの最適化.
4. 三角測量による検証点の世界座標の推定と, 検証点誤差(推定位置と設定位置の距離)の計算.

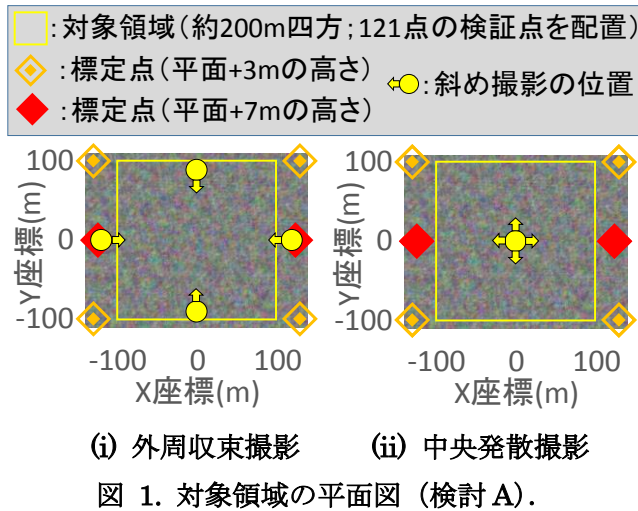


表 1. 地形の起伏と画像の歪みが共にあるいくつかのケースに関する検証点誤差 RMS (検討 A).

斜め撮影			平行撮影の枚数	合計撮影枚数	検証点誤差RMS	
枚数	撮影方法	天底角 [°]			m 単位	地上画素寸法単位
4	中央発散撮影	0	81	85	0.2135	2.85
4		30	81	85	0.0274	0.37
2		30	83	85	0.0314	0.42
1		30	84	85	0.0341	0.45
4	外周収束撮影	0	77	81	0.2019	2.69
4		30	77	81	0.0283	0.38
2		30	79	81	0.0307	0.41
1		30	80	81	0.0312	0.42

### 3. 検討 A: 斜め撮影の効率的な配置

#### 3. 1. 方法

標定点・斜め撮影の位置を図 1 の通りとした場合について解析した。平行撮影の枚数は 81 枚である。ただし、対象領域を定義した平面にランダムな起伏をつけた場合や、撮影した画像に DJI Phantom 4 のカメラキャリブレーションに基づく歪みを与えた場合についても解析を試みた。斜め撮影の方法についても、撮影位置について図 1 に示した外周収束撮影・中央発散撮影の 2 通りを検討し、4 枚を撮った場合の他に、うち 1 または 2 枚のみを撮った場合も試した。さらに傾きについても、0~50° の様々な天底角を設定した。中央発散撮影は、平行撮影を置き換えるのではなく、平行撮影に加える形式で行った。平面のテクスチャとしては、タイポイント (画像間に対応付けられた特徴点) の数・品質の異なる 4 種類を用いた (現実より有利でないテクスチャを含む)。

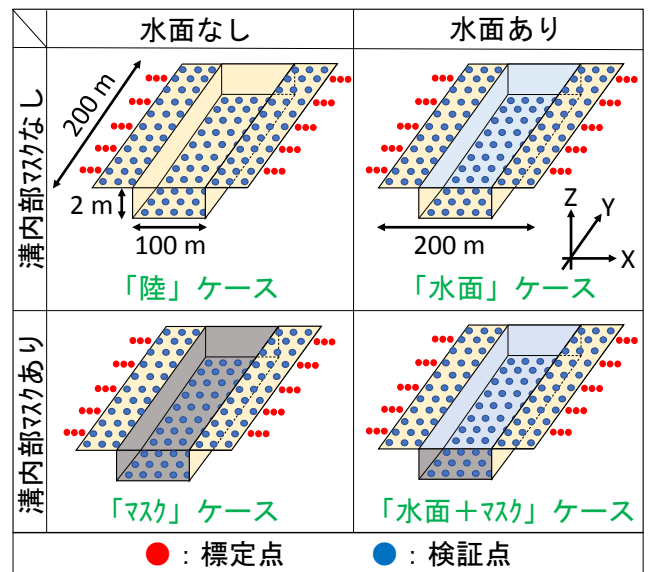


図 2. 対象領域の 3 次元模式図 (検討 B).

以上、グリッド状にはないが様々な条件を変化させた計 209 ケースについて、全 100 試行・121 検証点に関する検証点誤差 RMS を評価した。

### 3. 2. 結果

表 1 に、いくつかのケースにおける検証点誤差 RMS を例示する。天底角 0° のケースつまり実質的に全て平行撮影であるケースに比べて、天底角 30° のケースでは、斜め撮影の数や撮影位置に関わらず高精度であることが読み取れる。実際、天底角が 10~50° の全 192 ケースについて、地形の起伏や画像の歪みの有無、斜め撮影の数・配置、テクスチャに関わらず、検証点誤差 RMS は 0.050 m 未満、地上画素寸法単位で 0.66 画素未満であった。この結果から、**今回の条件の範囲では、平行撮影 81 枚に対し斜め撮影 1 枚程度の小さい割合でも、斜め撮影の存在によって高精度の SfM が可能**であることが示唆される。

また、外周収束撮影と中央発散撮影に大きな精度差は見られなかったことから、飛行距離の観点から**中央発散撮影が効率的**であると考えられる。むしろ現実には、揺れる植生や水面などの分布を考慮の上で、それらを避けた斜め撮影を行うべきである。

### 4. 検討 B: 水の影響と対策 (両側に標定点)

#### 4. 1. 方法

図 2 に示すように、対象領域の中央に幅 100 m ・

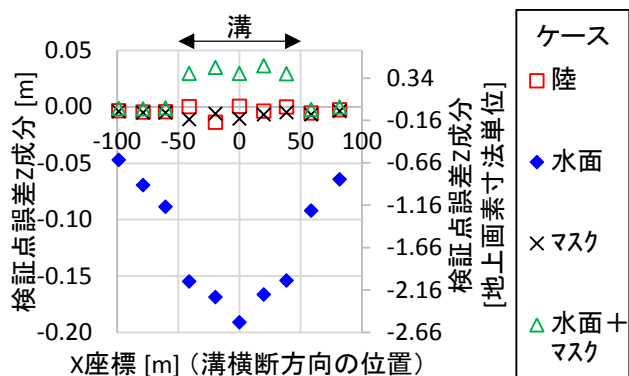


図 3. 中央部 XZ 断面における検証点誤差 Z 成分の 120 試行に関する平均 (検討 B で平行撮影のみの場合). ただし冠水部は屈折補正係数 1.42 で補正済み.

深さ 2 m の溝を掘った「陸」ケース, 溝の底面上 2 m に屈折のみを考慮した水面を張った「水面」ケース, 溝の内部のテクスチャを消した「マスク」ケース, それに水面を張った「水面+マスク」ケースを設け, それぞれ全 120 試行に関する検証点誤差の統計量を求めた. 「水面」ケースは, 水による光の消散や, 波による底面像の動きが全くない状況を表現している. 「水面+マスク」ケースはその対極で, 濁り・波により, または意図的に各画像中の冠水部 (溝の内部) をマスクする対策により, 冠水部でタイポイントが全く生じない状況を表現している.

#### 4. 2. 結果

図 3 に示すように, 「水面」ケースでは冠水部付近の陸上で Z 座標の過小評価バイアスが見られ, バイアスは対象領域中央の冠水部に近づくほど大きくなった (以降, 「谷状変形」). また冠水部については, 神野ら[4]の屈折補正係数 1.42 を適用したとき, 陸上よりさらに大きな過小評価バイアスが残った. 1.42 はカメラパラメータが正しい場合, 幅広い重複率・高度水深比に関して空間平均として適切な補正ができる値である[4]ことから, この結果から谷状変形が冠水部を含めて生じていることがわかる. 谷状変形は斜め撮影 (2-8 枚) を導入しても解消しなかった.

一方, 「マスク」「水面+マスク」の両ケースでは陸上・冠水部とも谷状変形が見られず, 検証点誤差が「水面」ケースより著しく小さくなり, 特に「マスク」ケースでは「陸」ケースと同レベルの高精度となった. 以上より, 濁り・波が小さく, 水底にも

タイポイントが生じやすい条件では, 水面での光の

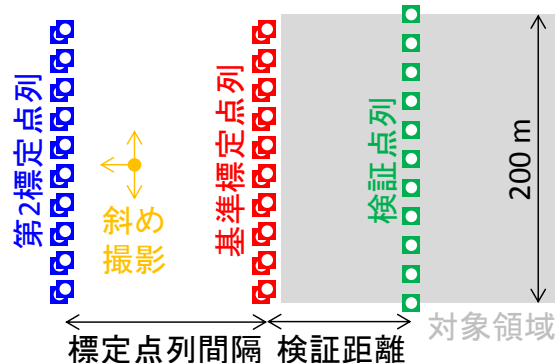


図 4. 標定点・検証点の配置などに関する平面模式図 (検討 C). 実際の各列は完全な直線状ではない.

屈折に起因する非線形系統誤差が生じること, 対策として SfM 段階では冠水部をマスクする (使わない) ことが有効で, それにより 屈折補正係数 1.42 が適用可能となることが示された. 河道の UAV 写真測量では, 冠水部が大半を占める画像が生じない撮影高度と十分な重複率を確保することが前提であるが, SfM を試みた際に水底のタイポイントが少なくない場合には, この対策を施すことが望ましい.

#### 4. 検討 C: 水の影響と対策 (片側に標定点)

##### 4. 1. 方法

図 4 のように, 対象領域の片側のみに 2 列の標定点列を, 対象領域内に検証点列を配置した場合を検討した. 図中に定義した「標定点列間隔」「検証距離」を様々に変えて, 全 100 試行・11 検証点に関する検証点誤差 RMS を評価した. 各標定点列は, 平面と同じ高さの 10 点と, 平面+2 m の高さの 10 点の, 計 20 点で構成した. 斜め撮影は, 図 4 に示す位置から 3 つの向きに天底角  $20^\circ$  で行った. この実験を, 通常の「陸」ケース, 対象領域に検討 B 同様の水面を張った「水面」ケース, 対象領域のテクスチャを消した「マスク」ケースのそれぞれについて実施した. 検証距離は, 水面やマスクでない部分が写った画像に検証点列が写る限界である 120 m までとした.

##### 4. 2. 結果

表 2 に示すように「水面」ケースでは, 検証距離の増加とともに検証点誤差 RMS が加速的に増加し, 検証距離 100 m では 0.20 m を超えた. 一方, 表 3 に

表 2. 標定点列間隔・検証距離別の検証点誤差 RMS [m] (検討 C の「水面」ケース).

		標定点列間隔 [m]				
		20	60	100	140	180
検証距離 [m]	20	0.029	0.019	0.018	0.019	0.018
	40	0.050	0.038	0.040	0.039	0.038
	60	0.075	0.059	0.064	0.064	0.063
	80	0.127	0.114	0.123	0.123	0.120
	100	0.211	0.201	0.213	0.213	0.210
	120	0.320	0.312	0.327	0.327	0.323

表 3. 標定点列間隔・検証距離別の検証点誤差 RMS [m] (検討 C の「マスク」ケース).

		標定点列間隔 [m]				
		20	60	100	140	180
検証距離 [m]	20	0.021	0.016	0.015	0.015	0.015
	40	0.031	0.019	0.017	0.017	0.017
	60	0.042	0.022	0.020	0.020	0.019
	80	0.053	0.027	0.024	0.023	0.022
	100	0.065	0.031	0.027	0.026	0.024
	120	0.075	0.037	0.032	0.030	0.028

示すように「マスク」ケースでは、表に載せた全ての条件において、検証点誤差 RMS が 0.075 m (地上画素寸法単位で 1 画素) 以下であり、特に標定点列間隔を十分に確保した場合には、検証距離が 100 m 以上でも 0.037 m (0.5 画素) 以下の高精度となった。「マスク」ケースと「陸」ケースの検証点誤差 RMS の差は、検証距離とともに増加したものの、検証距離 120 m でも 0.0031 m (0.04 画素) 以下であり、両ケースの精度は同レベルであった。以上より、検討 B と同様の結論が得られる。

## 5. 検討 D : 標定点の完全な省略可能性

### 5. 1. 方法

近年低廉化した、撮影位置の高精度測位が可能な UAV (例 : DJI Phantom 4 RTK) を用いた場合、標定点を完全に省略できる可能性がある。ここでは、画像に埋め込まれる世界座標をジオリファレンスのみに利用する状況を想定し、全 100 試行・121 検証点に関する検証点誤差 RMS を求めた。具体的に各試行では、撮影位置の世界座標に含まれる誤差 (2 の手順 2 で標定点の世界座標に与えたのと同様に

RTK-GNSS 測量レベルの誤差を与えた) に起因するジオリファレンスの誤差と、画像のみに基づくカメラパラメータの推定誤差をそれぞれ検証点誤差として評価し、両者を足し合わせた。後者は、バンドル調整をタイポイントのみに基づいて行い、その後正しくジオリファレンスを行ったときの検証点誤差である。撮影の方法は検討 A の外周収束撮影の場合 (図 1) と同一であり、4 枚の斜め撮影の天底角は 5° とした。対象領域のテクスチャについては、現実より有利でないテクスチャを含む 2 種類を用いた。

### 5. 2. 結果

ジオリファレンスに起因する検証点誤差 RMS は 0.0082 m (地上画素寸法単位で 0.11 画素) と小さく、カメラパラメータの推定誤差に起因する検証点誤差 RMS を合成しても、検証点誤差 RMS は有利なテクスチャで 0.0287 m (0.38 画素)、不利なテクスチャで 0.0487 m (0.65 画素) と、地上画素寸法 0.075 m を下回った。この結果より、撮影位置の高精度測位が可能な UAV を用いる場合、斜め撮影の導入を前提とすれば、条件によっては**標定点を全く置かなくとも、十分な精度が得られる**と考えられる。

### 謝辞

解析の一部は JSPS 科研費(16K21194)の助成を受けた。

### 参考文献

- [1] 野間口芳希・秋田麗子・炭田英俊・山崎崇徳, 2018. 河川管理における新技術の活用に関する一考察, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp.251-256.
- [2] 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真, 2018. UAV 写真測量の SfM における斜め撮影の導入に関する基礎的シミュレーション, 日本写真測量学会平成 30 年度秋季学術講演会.
- [3] 神野有生, 2019. 空中測量研究室の技術ノート, URL: <https://ameblo.jp/rs-algorithm-designer/>.
- [4] 神野有生・米原千絵・IGD Yudha Partama・小室隆・乾隆帝・後藤益滋・赤松良久, 2018. UAV と SfM-MVS を用いた河床冠水部の写真測量のための水面屈折補正係数に関する検討, 河川技術論文集, 第 24 巻, pp. 19-24.