

# 造成地における標定点不使用型の空中写真測量 一斜め往復撮影手法一

(株) フジタ 正会員 ○松岡 祐仁  
山口大学 正会員 神野 有生  
山口大学 高田 雅也

## 1. はじめに

国土交通省が、2016 年から導入した「i-Construction」の 3 本柱の一つである土工への「ICT 技術の全面的な活用」により、起工測量、及び出来形・出来高計測にレーザースキャナや UAV (Unmanned Aerial Vehicle) が活用されている。特に、UAV 空中写真測量は、UAV の高機能化、及び低価格化により、広範囲を効率的に計測できる手法として広く普及している。しかし、事前に設置する標定点の測量、工事進捗による標定点の更新作業に膨大な労力を要しており、タイムリーかつ有効に活用する上で現場実装の隘路となっていた。

近年、高精度 GNSS 測位が可能な自己定位型 UAV が低廉な価格で導入可能になり、写真測量の更なる効率化・高精度化が期待されている。令和 2 年 3 月改訂「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」では、「SfM (Structure from Motion) の利用においてカメラ位置を直接計測できる手法（RTK, ネットワーク型 RTK, PPK, 自動追尾 TS 等）を併用する場合は、標定点の設置は任意」<sup>1)</sup>となった。しかし、標定点を全く設置しない場合、従来から行われている鉛直直下向き撮影では、鉛直方向に系統誤差が生じる課題があり、標定点の設定や調整点での誤差のオフセットが必須であった。

本報では、標定点を完全に省略して作業の省力化を可能にした上で、鉛直誤差を抑制して計測の高精度化を図ることのできる「斜め往復撮影」手法を開発した経緯、及び本手法の現場検証の結果について報告する。なお、本発表は、令和 2 年度「建設施工と建設機械シンポジウム」（日本建設機械施工協会、2020.12）への投稿論文に、考察を一部加えたものである。

## 2. 標定点設置作業の省力化・削減の取り組み

### (1) GNSS 搭載標定点による省力化

株式会社フジタでは、2017 年に現場職員が容易に扱える簡易 UAV 測量システム「デイリードローン」を開発した。本システムは、以下の特徴を有し、主に造成現場において現況測量、出来高計測等で活用されている。

- ① GNSS 搭載対空標識を採用し、独自の標定点設置基準により、設置・測量時間を 1/4 に低減
- ② 独自の飛行・解析設定により、精度を損なわず解析時間を 2/5 に低減
- ③ 事前準備～解析までの作業時間を従来比 1/3 となる即日測量を実現
- ④ i-Construction 工事測量と同等の撮影・飛行設定で、出来形計測相当の計測精度±50mm を確保

### (2) 自己定位型 UAV による標定点削減

2018 年秋、写真-1 に示す 2 周波 GNSS 搭載で RTK, ネットワーク型 RTK, PPK の各高精度 GNSS 測位方式

に対応する自己定位型 UAV, Phantom<sup>TM</sup> 4 RTK (DJI 社) を導入した。写真撮影位置が高精度で記録された画像セットを取得できることから、SfM 解析時のカメラの位置や傾きといったパラメータ推定の高精度化が期待できる。2ha (100×200m), 及び 4ha (200×200m) の計測領域での株式会社フジタによる検証実験では、以下の結果を得た。



Phantom 4 RTK RTK-GNSS 基準局  
写真-1 自己定位型 UAV

キーワード UAV, 空中写真測量, 標定点

連絡先 〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-25-2 修養団 SYD ビル 株式会社フジタ TEL 03-3796-2279

- ・工事測量（起工測量，岩線・出来高計測等）… 領域中央 - 標定点 1 点（計測精度±100mm）
- ・出来形計測… 領域隅部 - 標定点 4 点（計測精度±50mm）

この結果より，標定点を従来（工事測量：200m 間隔，出来形計測：100m 間隔）に比べ大幅に削減した上で計測精度の向上が見込めることから，これまで標定点の設置に労力を要していた広大な造成土工現場や高低差の大きな現場を中心に「デイリードローン RTK」として運用を進めている<sup>2)</sup>。

### 3. 多様性飛行の導入

#### (1) 鉛直方向の系統誤差

自己定位型 UAV を用いた標定点削減の取り組みにおいて，標定点を完全に省略した場合，水平方向は高い精度が確保できているものの，鉛直方向に一律の大きな誤差が生じることがしばしば起こる．鉛直誤差の標準偏差自体は非常に小さく，復元された点群全体の歪みも許容できる程度に収まっていると考えられるが，全体的に鉛直方向に大きくオフセットされた形となる．

UAV 空中写真測量では，搭載カメラの外気温等による光学的特性の変動や正確なカメラキャリブレーションを事前に行うことが困難であることから，画像から三次元形状を復元する SfM 解析過程において，撮影画像からセルフキャリブレーションが行われる．この作業では，撮影時のカメラの位置や傾きの校正作業である外部標定，カメラのレンズ特性や撮像面との位置関係等の幾何学構造の校正作業である内部標定が行われる．

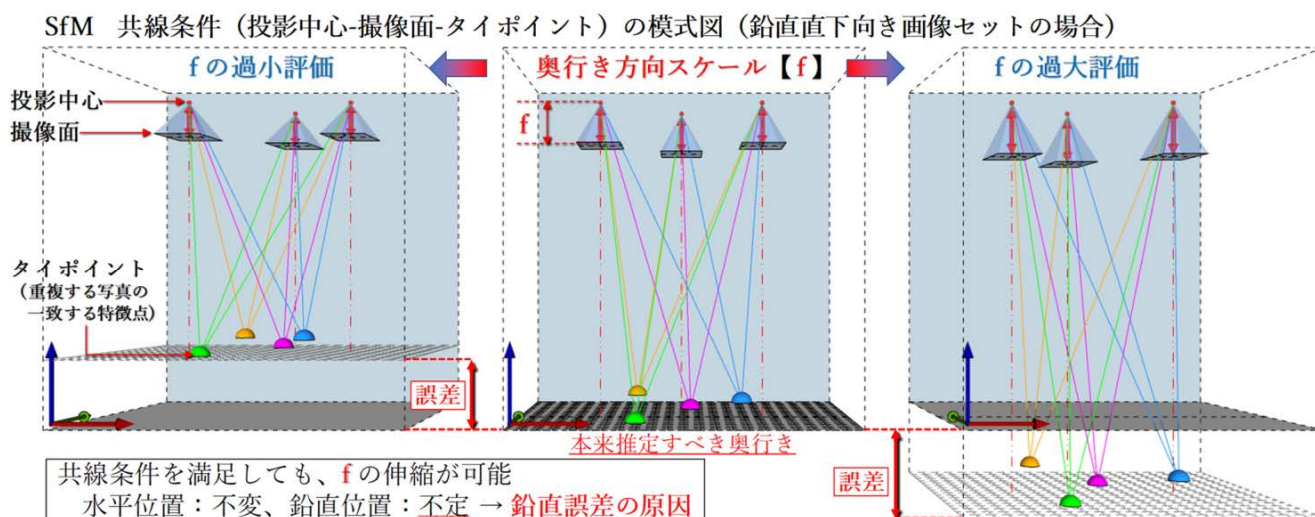


図-1 奥行き方向のスケール誤推定

図-1 に，カメラの投影中心，撮像面，重複する写真の一致する特徴点であるタイポイントの関係を模式図で示す．従来から行われている鉛直直下向き撮影の場合，投影中心から鉛直方向に光軸が伸び，投影中心から撮像面までの距離が，焦点距離（画像距離） $f$ と呼ばれる奥行き方向のスケールを表すパラメータとなる．カメラの投影中心，撮像面上のタイポイント，タイポイントは1直線で結ばれ，共線条件と呼ばれる．ここで，自己定位型 UAV を用いて外部標定が定まり投影中心－光軸が不動とした場合，共線条件を維持したままでも，焦点距離 $f$ が伸縮することが可能であり，焦点距離 $f$ は一意に定まらない．

前述した鉛直方向に一律に生じる誤差は，完全に鉛直直下向きの画像のみでは，内部標定要素の内，焦点距離に代表される奥行き方向のスケールが幾何学的に求まらず誤推定されることに起因した系統誤差<sup>3)</sup>である．

鉛直直下向き撮影でも目標鉛直精度を得られるケースがあるが，風による急激な機体の揺れ，ジンバルの制御誤差等で撮影画像の向きに微小なばらつきが生じて奥行き方向の誤推定が抑制されていると考えられる．しかし，偶発的事象に期待することは，運用上現実的でない．このため，奥行き方向のスケールを幾何学的に安定して求めて鉛直精度の改善を図るため，鉛直直下向き画像セットに別高度や斜め向き画像を加える多様性（多視点）飛行撮影に取り組むこととした．

## (2) 多様性（多視点）飛行撮影 飛行実験

図-2 に、飛行実験対象領域と検証点 14 点の配置を示す。撮影には Phantom 4 RTK を用い、RTK-GNSS 測位により写真撮影位置を記録した。対地高度 73m（地上画素寸法 GSD20mm/pixel）から鉛直直下向きに撮影を行い、進行方向 80%、隣接コース間 60% のオーバーラップ率で飛行した。本ケースを基本ケース（122 枚撮影）とする。

次に基本ケースとは別に多様性飛行として、以下の別高度鉛直直下向き、及び斜め向き撮影画像取得のため追加撮影を行った。

- ① 高度 55m（別高度鉛直直下向き） 1 枚
- ② 高度 73m（天底角 30° 斜め向き） 26 枚

## (3) 検証点誤差

表-1 に基本ケース 122 枚、及び基本ケース＋多様性飛行撮影画像（①，②：ケース 1～6）を追加して SfM 解析を行った場合の検証点誤差の最大値（絶対値）、RMS を示す。SfM 解析には Pix4D mapper (Pix4D 社) を使用した。

いずれのケースにおいても、水平誤差は小さく高精度の結果を得られている。しかし、基本ケースの場合、鉛直成分は全体的に約 1.1m オフセットされた結果となり系統誤差が確認できる。

ケース 1～6 の鉛直誤差は、基本ケースに別高度や斜め向き撮影画像を加えることにより、標定点の設定なしで工事測量要求精度 100mm を確保した。ただし、別高度の鉛直直下向き撮影 1 枚（ケース 1）や斜め向き画像全 26 枚（ケース 2）を加えるだけでは、出来形計測要求精度 50mm 以下にはならない。そこで SfM 解析の過程でノイズとなり、画像間マッチング、内部標定要素の推定に悪影響を与える可能性がある領域周辺の植生が写る割合の大きな画像、抽出タイポイント数が少ない画像を段階的に除去して解析を行った。結果、ケース 4～6 では、1～3 枚と少数の多様性飛行撮影画像を加えることで鉛直誤差が 50mm 以内となった。

以上より、鉛直直下向き撮影画像セットに多様性飛行撮影画像を加えることにより、鉛直誤差を大幅に抑制する効果が得られたといえる。一方、多様性飛行撮影画像は、単に枚数を加えるだけでは、十分な効果が得られない可能性があり、少数でも画像同士のマッチングに有利な画像の追加が重要であることが示唆された<sup>4)</sup>。

## 4. 斜め往復撮影

### (1) 撮影方法の検討

多様性飛行撮影の実験では、鉛直誤差の抑制効果を得ることができたが、マッチングに有利な画像を取得するためには、対象領域に応じて事前検討された適切な位置、高度、角度からの撮影が必要となることが示唆された。多数の画像を撮影して SfM 解析時に有利な画像を選定する方法も考えられるが、実運用では、追加飛行、解析回数・時間を要するため、手法として一般化は難しい。

そこで、鉛直直下向き撮影の軌跡（図-3 左、写真-2 上）は変えず、カメラ角度を進行方向に対して一定角に固定した斜め向き重畳画像を取得する手法（図-3 右、写真-2 下）を試行することとした。本手法であれば、隣接コース間の計測領域は 2 方向から撮影され、多様性飛行撮影による鉛直誤差抑制効果が期待できる。



図-2 多様性飛行撮影 検証領域

表-1 多様性飛行撮影画像追加時の検証点誤差

| ケース | 基本+追加(枚数) |      | X誤差(m) |       | Y誤差(m) |       | Z誤差(m) |       |
|-----|-----------|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|     | ①鉛直       | ②30° | 最大     | RMS   | 最大     | RMS   | 最大     | RMS   |
| 基本  | -         | -    | 0.021  | 0.009 | 0.017  | 0.008 | 1.127  | 1.097 |
| 1   | 1         | -    | 0.034  | 0.012 | 0.019  | 0.008 | 0.052  | 0.028 |
| 2   | -         | 26   | 0.037  | 0.013 | 0.015  | 0.008 | 0.079  | 0.060 |
| 3   | -         | 6    | 0.035  | 0.012 | 0.018  | 0.008 | 0.083  | 0.065 |
| 4   | -         | 3    | 0.037  | 0.013 | 0.020  | 0.008 | 0.046  | 0.031 |
| 5   | -         | 1    | 0.035  | 0.012 | 0.018  | 0.008 | 0.024  | 0.011 |
| 6   | 1         | 1    | 0.037  | 0.012 | 0.018  | 0.008 | 0.025  | 0.011 |

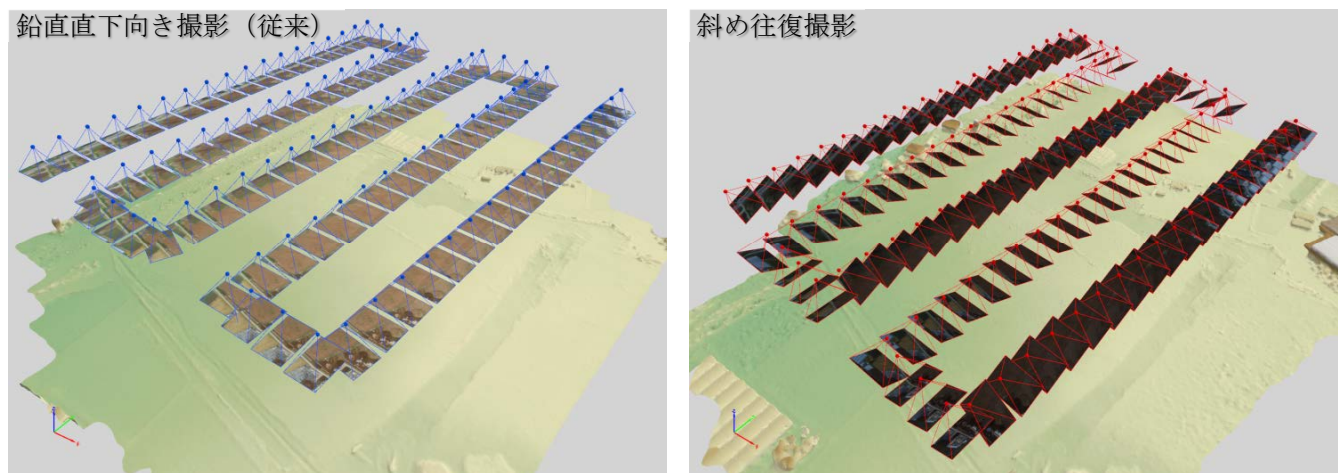


図-3 鉛直直下向き撮影（左），斜め往復撮影（右） 飛行経路・軌跡



写真-2 斜め往復撮影 カメラ向き

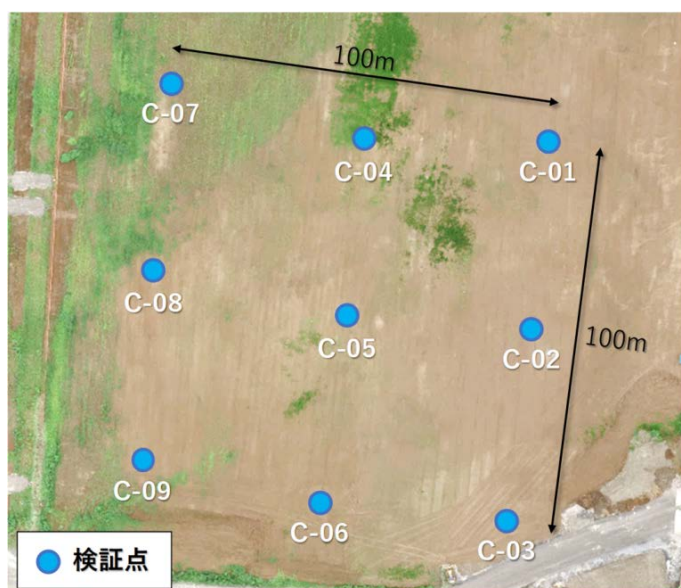


図-4 斜め往復撮影 検証領域

## (2) 斜め往復撮影 飛行実験

図-4 に斜め往復撮影の飛行実験対象領域と検証点 9 点の配置を示す。対象領域は、一部植生が分布しているものの大半は裸地の造成地である。撮影には Phantom 4 RTK（RTK-GNSS 測位）を用い、以下の組み合わせで計 30 ケースの飛行実験を実施した。天底角  $0^\circ$  のケースは、従来の鉛直直下向きの撮影となる。

- ・対地高度…73, 55, 36m（3 種類）
- ・撮影角度…天底角  $0, 10, 20, 30, 40^\circ$ （5 種類）
- ・ラップ率… $80\% \times 60\%$ ,  $80\% \times 75\%$ （2 種類）

## (3) 検証点誤差

表-2 にオーバーラップ率  $80 \times 60\%$  設定時の鉛直直下向き撮影（天底角  $0^\circ$  ），及び斜め往復撮影（天底角  $10 \sim 40^\circ$  ）において、飛行高度を変化させた時の検証点誤差の最大値（絶対値），RMS を示す。いずれのケースも天底角  $0^\circ$  の場合、50mm 以上の鉛直誤差が生じている。高度 73m，天底角  $10^\circ$  のケース 2 で 62mm の鉛直誤差が生じているが、その他のケースも含め、斜め往復撮影により鉛直精度の改善が確認できる。

表-3 にオーバーラップ率  $80 \times 75\%$  にした場合の検証点誤差の最大値，RMS を示す。隣接コース間の重複を大きくすることで画像間のマッチングに有利になると考えられるため実施したが、今回の実験ではオーバーラップ率  $80 \times 60\%$  と比較して位置精度への大きな影響は見られなかった。高度 36m，天底角  $0^\circ$  のケース 26 では、鉛直誤差 RMS が 22mm となったが、3 (1) で述べたとおり、何らかの要因により鉛直直下向きではない画像が混入して鉛直誤差が抑制されたことが要因として推測され、偶発的で再現性の難しい結果と考える。

表-2 検証点誤差（ラップ率 80×60%）

| ケース   | 高度73m      |        |       |        |       |        |       |
|-------|------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|       | 天底角<br>(°) | X誤差(m) |       | Y誤差(m) |       | Z誤差(m) |       |
|       |            | 最大     | RMS   | 最大     | RMS   | 最大     | RMS   |
| 1     | 0          | 0.016  | 0.009 | 0.034  | 0.022 | 0.072  | 0.046 |
| 2     | 10         | 0.017  | 0.012 | 0.027  | 0.021 | 0.062  | 0.046 |
| 3     | 20         | 0.029  | 0.020 | 0.024  | 0.017 | 0.028  | 0.016 |
| 4     | 30         | 0.020  | 0.011 | 0.028  | 0.017 | 0.014  | 0.008 |
| 5     | 40         | 0.013  | 0.008 | 0.024  | 0.015 | 0.017  | 0.012 |
| 高度55m |            |        |       |        |       |        |       |
| 6     | 0          | 0.030  | 0.021 | 0.034  | 0.023 | 0.077  | 0.060 |
| 7     | 10         | 0.026  | 0.017 | 0.027  | 0.017 | 0.040  | 0.028 |
| 8     | 20         | 0.019  | 0.011 | 0.026  | 0.018 | 0.029  | 0.018 |
| 9     | 30         | 0.017  | 0.011 | 0.020  | 0.013 | 0.044  | 0.034 |
| 10    | 40         | 0.023  | 0.012 | 0.026  | 0.018 | 0.041  | 0.035 |
| 高度36m |            |        |       |        |       |        |       |
| 11    | 0          | 0.018  | 0.011 | 0.029  | 0.021 | 0.055  | 0.047 |
| 12    | 10         | 0.018  | 0.013 | 0.027  | 0.021 | 0.021  | 0.013 |
| 13    | 20         | 0.019  | 0.012 | 0.028  | 0.019 | 0.014  | 0.008 |
| 14    | 30         | 0.012  | 0.007 | 0.025  | 0.018 | 0.032  | 0.020 |
| 15    | 40         | 0.017  | 0.010 | 0.025  | 0.020 | 0.032  | 0.019 |

表-3 検証点誤差（ラップ率 80×75%）

| ケース   | 高度73m      |        |       |        |       |        |       |
|-------|------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|       | 天底角<br>(°) | X誤差(m) |       | Y誤差(m) |       | Z誤差(m) |       |
|       |            | 最大     | RMS   | 最大     | RMS   | 最大     | RMS   |
| 16    | 0          | 0.023  | 0.014 | 0.033  | 0.024 | 0.633  | 0.624 |
| 17    | 10         | 0.031  | 0.019 | 0.025  | 0.016 | 0.048  | 0.043 |
| 18    | 20         | 0.026  | 0.019 | 0.023  | 0.015 | 0.014  | 0.007 |
| 19    | 30         | 0.030  | 0.021 | 0.028  | 0.017 | 0.025  | 0.017 |
| 20    | 40         | 0.028  | 0.019 | 0.023  | 0.017 | 0.037  | 0.031 |
| 高度55m |            |        |       |        |       |        |       |
| 21    | 0          | 0.024  | 0.017 | 0.025  | 0.018 | 0.099  | 0.082 |
| 22    | 10         | 0.022  | 0.016 | 0.026  | 0.018 | 0.037  | 0.024 |
| 23    | 20         | 0.035  | 0.025 | 0.024  | 0.016 | 0.032  | 0.023 |
| 24    | 30         | 0.025  | 0.016 | 0.027  | 0.018 | 0.040  | 0.035 |
| 25    | 40         | 0.028  | 0.020 | 0.023  | 0.017 | 0.041  | 0.035 |
| 高度36m |            |        |       |        |       |        |       |
| 26    | 0          | 0.031  | 0.020 | 0.027  | 0.018 | 0.028  | 0.022 |
| 27    | 10         | 0.029  | 0.018 | 0.027  | 0.018 | 0.034  | 0.022 |
| 28    | 20         | 0.026  | 0.016 | 0.024  | 0.015 | 0.038  | 0.028 |
| 29    | 30         | 0.029  | 0.021 | 0.028  | 0.018 | 0.040  | 0.036 |
| 30    | 40         | 0.023  | 0.016 | 0.025  | 0.018 | 0.033  | 0.029 |

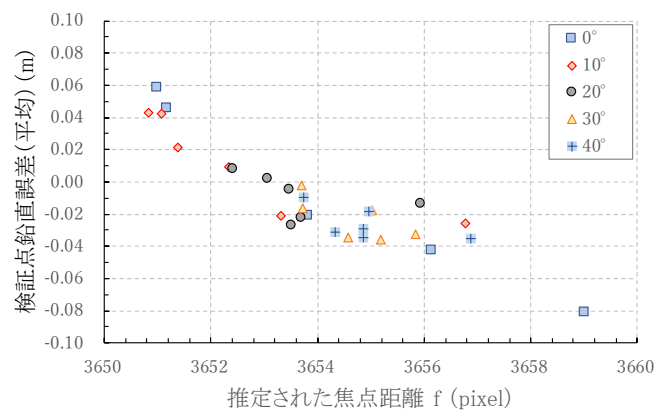
#### (4) 焦点距離と鉛直誤差の関係

図-5 に SfM 解析により推定された奥行き方向のスケールを表す主要パラメータのひとつである焦点距離  $f$  (focal length) と検証点鉛直誤差の各平均値の関係を示す（ただし、極端に鉛直誤差の大きいケース 16 は除外して 29 ケースを表示）。 $f$  と鉛直誤差の平均には、強い負の相関（相関係数：-0.8117、図示 29 ケースでの値）がみられる。斜め往復撮影のケースを含めても、図-1 に示す模式図と同様に  $f$  の推定誤差が鉛直バイアスの支配的要因であることが確認できる。若干のばらつきが見られるが、今後の検証によりデータを補強するとともに、他の内部標定要素による影響についても検討したい。

表-4 に、SfM 解析により推定された全 30 ケースの  $f$  の標準偏差を示す。値が大きいほど  $f$  の推定において不確実性が増すが、鉛直直下向き撮影（天底角  $0^\circ$ ）では、鉛直誤差 50mm 以内のケースも含め数画素程度の大きな値となった。天底角  $10^\circ$  以上の斜め往復撮影では、全てのケースで 1/2 画素程度以下となり、天底角の増加に比例して焦点距離  $f$  の推定が安定的になり、本手法の導入効果が顕著に表れたといえる。

一方、表-2、3 に示した鉛直誤差 RMS に関しては、高度 73m かつラップ率 80×60%のケース群（ケース 1～5）を除き、天底角が大きい  $30^\circ$ 、 $40^\circ$  のケースで、 $20^\circ$  のケースよりも大きくなっている。これらのケースの鉛直誤差 RMS は、RTK-GNSS 測位の誤差レベルであり、写真測量の精度の優劣を反映していない可能性もあるが、天底角の増大による悪影響（画素のフットプリントの増大・変形、起伏や植生の見え方の変化によるマッチングの不利、検証点マーカの同定精度の低下など）が寄与している可能性がある。

今回の対象領域では、検証した各高度において天底角  $20^\circ$  以上の斜め往復撮影であれば、鉛直精度 50mm の安定的な確保が確認できた。

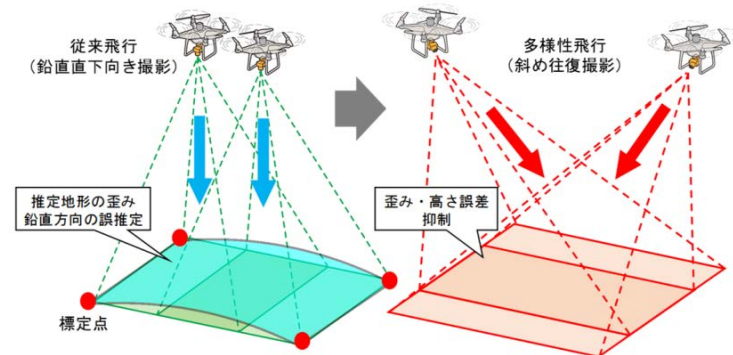
表-4 各ケースの焦点距離  $f$  標準偏差 (pixel)

| 天底角<br>( ° ) | ラップ率80×60% |       |       | ラップ率80×75% |       |       |
|--------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|              | 高度 (m)     |       |       |            |       |       |
|              | 73         | 55    | 36.5  | 73         | 55    | 36.5  |
| 0            | 6.552      | 4.649 | 2.028 | 4.611      | 3.894 | 3.039 |
| 10           | 0.510      | 0.433 | 0.467 | 0.413      | 0.513 | 0.511 |
| 20           | 0.182      | 0.155 | 0.180 | 0.137      | 0.181 | 0.240 |
| 30           | 0.104      | 0.084 | 0.108 | 0.082      | 0.099 | 0.129 |
| 40           | 0.067      | 0.059 | 0.079 | 0.062      | 0.077 | 0.128 |

## 5. まとめ

「斜め往復撮影」は、自己定位型 UAV による外部標定要素推定の高精度化と併せて、斜め向き重畳画像セットにより内部標定要素の内、奥行き方向のスケールを高精度に推定し、標定点を不要とした造成地等の土工を対象とする空中写真測量手法である。その特徴を以下に示す。

- ① 従来の鉛直直下向き撮影の飛行経路はそのままにカメラを進行方向に傾けることで、多様性飛行撮影画像セットを取得できる。
- ② 斜め往復撮影画像セットの SfM 解析により、鉛直成分の誤推定が大幅に抑制できる。
- ③ 従来の鉛直直下向き撮影での地上画素寸法 GSD20mm/pixel に相当する高度からの斜め往復撮影でも、i-Construction の出来形計測要求精度に相当する 50mm の計測が標定点不要で達成可能である。



標定点が不要となり飛行撮影前の準備工程が大幅に軽減されることは、運用上大きなメリットである。また、この特徴を活かして、人の立ち入りが困難な場所での測量、例えば近年頻発する災害発生時の初動調査への展開が期待できる。

一方、本手法では、従来標定点や調整点に依存していた位置精度の確保が、撮影画像の情報のみとなる。これまで検証実験、運用において、裸地が多くを占める造成地では良好な位置精度を得ているが、計測対象の植生被覆などの地表面状況、撮影画像の質等の状況に大きく依存することに留意が必要である。また、これまでの蓄積データの検証では、従来標準設定で行われることの多かった SfM 解析において、解析画像サイズ、抽出する特徴点数、推定する内部標定要素の種類等解析設定の変更が精度に大きく影響<sup>4)</sup>することが明らかになっている。計測対象の状況に大きく依存する本手法が、より安定して精度を確保するために適した解析設定について継続して詳細検討を行う予定である。

現在、本手法は、主に造成現場での着工前等の現況測量、土量変化率の把握による土配計画での運用、及び検証実験により、事例を蓄積しているところである。今後は、斜め向き撮影で光軸が傾くことによる飛行高度と地上画素寸法、オーバーラップ率の関係を明確にして ICT 基準類との整合性を図ることや、カメラ角度等撮影条件の最適化を行い、現場の生産性向上に資する技術として発展させていく所存である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案），p35，2020
- 2) 松岡祐仁，野末晃，上原広行：切盛土の日々の出来高管理に簡易 UAV 測量を適用，日本建設機械施工協会，令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム，pp99-102，2019
- 3) 神野有生・宮崎真弘・八田晃平・福元和真：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，pp67-70，2018
- 4) 高田雅也，水津祐輔，松岡祐仁，野末晃，神野有生：造成地の GCP 不使用型 UAV 写真測量の SfM 段階における撮影方法・解析設定の影響，日本写真測量学会 令和 2 年度年次学術講演会，pp43-46，2020