

## 斜め往復撮影による標定点不要の造成地UAV写真測量手法の開発

松岡 祐仁 野末 晃  
上原 広行

### 概 要

従来の鉛直直下向きに写真撮影するUAV空中写真測量は、復元した三次元モデルに大きな歪みや鉛直誤差が生じるため、写真と地上の座標を関係付ける標定点の設置が必須であった。しかし、事前に設置する標定点の測量作業、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、現場作業の省力化が望まれている。近年、高精度GNSS測位が可能な自己定位型UAVが登場したことにより、標定点省略の取り組みが数多く行われている。本報では、標定点を完全に省略した空中写真測量手法「斜め往復撮影」開発の取り組みについて報告する。

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できる手法である。これにより、標定点を完全に省略しても±50mmの高精度計測が可能となった。

### Development of a UAV photogrammetry method for earthworks by oblique reciprocal photography without ground control points

#### Abstract

Conventional UAV aerial photogrammetry, which takes photographs in a vertical downward direction, causes large distortions and vertical errors in a reconstructed 3D model, and requires the installation of ground control points (GCPs). However, an enormous amount of labor is required for the surveying of GCPs to be pre-installed and for the updating of GCPs as construction progresses, and it is desirable to reduce the labor on site. In recent years, with the advent of self-positioning UAVs that are able to provide high-precision GNSS positioning, many efforts have been made to omit GCPs. In this paper, we report on our efforts to develop an aerial photogrammetry method called "oblique reciprocal photography" that completely omits GCPs.

"Oblique reciprocal photography" is a method for estimating the external parameters of the camera with high accuracy using a self-positioning UAV, and at the same time, the depth scale, one of the internal parameters, can be estimated with high accuracy using a set of oblique images. This makes it possible to measure with a high accuracy of ±50 mm, even if GCPs are completely omitted.

キーワード: i-Construction、空中写真測量  
標定点、精度

## §1. はじめに

### 1.1 背景

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。

### 1.2 標定点設置作業の省力化・削減の取り組み<sup>2)</sup>

#### (1) デイリードローン

2017年に開発した簡易UAV測量システム「デイリードローン」は、現場職員が容易に扱えるシステムとして空中写真測量フローの簡易化、省力化を行った。本システムは、以下の特徴を有する。

- ① GNSS搭載対空標識(AEROBO<sup>®</sup> maker、エアロセンス社)を採用と当社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

本システムは、主に造成現場の現況測量、出来高計測や土量変化率の把握による土配計画等に活用されている。

#### (2) デイリードローンRTK

2018年秋、写真1に示す2周波GNSS搭載でRTK(Real Time Kinematic)、ネットワーク型RTK、PPK(Post

Processed Kinematic)の各高精度GNSS測位方式に対応する自己定位型UAV、Phantom<sup>®</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)の計測領域での当社検証実験では、以下の結果を得た。

- ・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。



2周波GNSS搭載UAV      RTK-GNSS基準局  
写真1 自己定位型UAV

## §2. 多様性飛行撮影の導入

### 2.1 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、撮影した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、写真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。

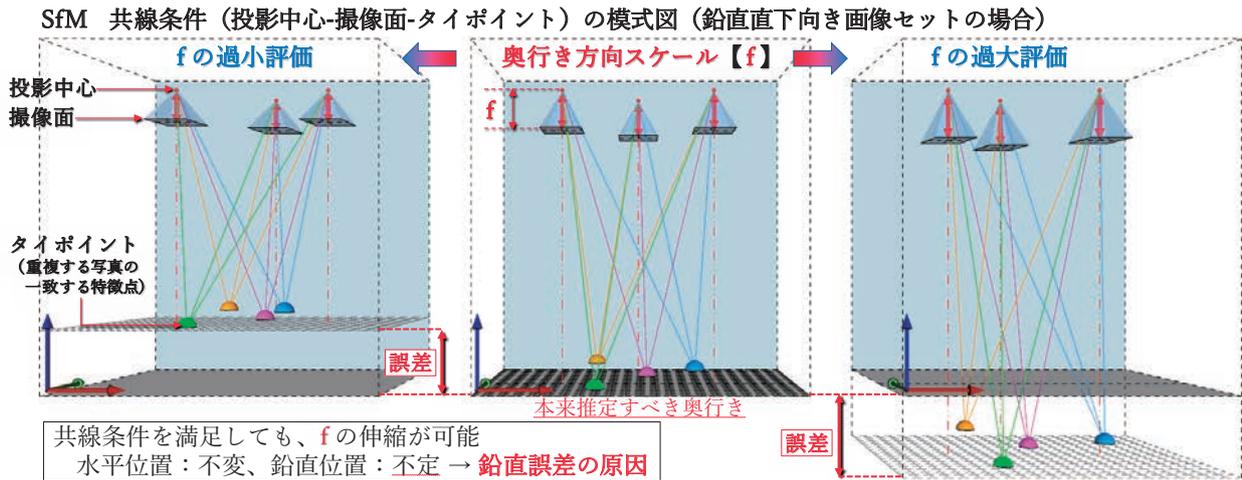


図1 奥行き方向のスケール誤推定

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 $f$ (画像距離)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、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。

## 2.2 多様性(多視点)飛行撮影 飛行実験<sup>4)</sup>

図2に、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

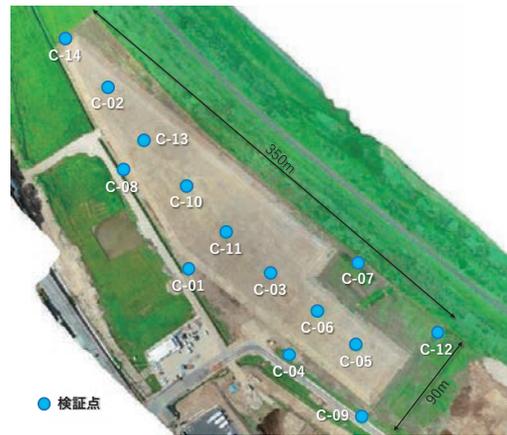


図2 多様性飛行撮影 検証領域

## 2.3 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(root mean square: 二乗平均平方根)を示す。SfM解析にはPix4D mapper (Pix4D社)を使用した。

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

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。

### §3. 斜め往復撮影

#### 3.1 撮影方法の検討

多様性飛行の実験では、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、従来の鉛直直下向き撮影の軌跡は変えず、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(写真2右、図3)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。



写真2 斜め往復撮影 カメラ角度

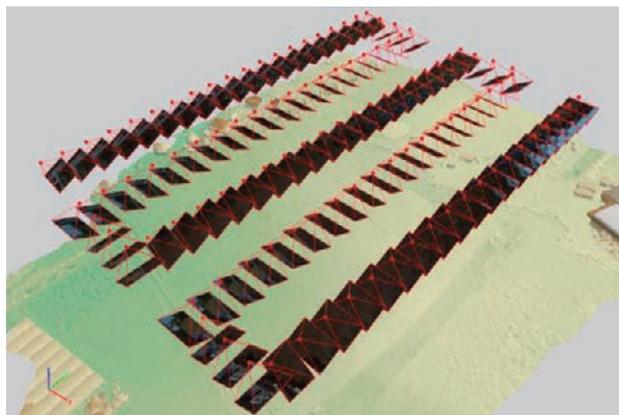


図3 斜め往復撮影 飛行経路・軌跡

#### 3.2 斜め往復撮影 飛行実験

図4に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。

- ・対地高度…73、55、36m(3種類)
- ・撮影角度…天底角0、10、20、30、40° (5種類)
- ・ラップ率…80%×60%、80%×75%(2種類)

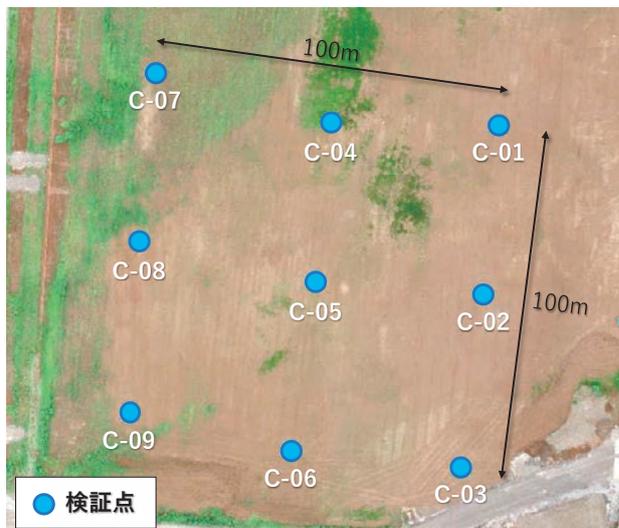


図4 斜め往復撮影 検証領域

#### 3.3 検証点誤差

表2にオーバーラップ率80×60%設定時の鉛直直下向き撮影(天底角0°)、及び斜め往復撮影(天底角10°～40°)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°の場合、50mm以上の鉛直誤差が生じている。高度73m、天底角10°のケースで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80×75%にした場合の検証点誤差の最大値(絶対値)、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80×60%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°では、鉛直誤差RMSが22mmとなったが、前項で述べたとおり、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%)

高度73m						
天底角 (°)	X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
0	0.016	0.009	0.034	0.022	0.072	0.046
10	0.017	0.012	0.027	0.021	0.062	0.046
20	0.029	0.020	0.024	0.017	0.028	0.016
30	0.020	0.011	0.028	0.017	0.014	0.008
40	0.013	0.008	0.024	0.015	0.017	0.012
高度55m						
0	0.030	0.021	0.034	0.023	0.077	0.060
10	0.026	0.017	0.027	0.017	0.040	0.028
20	0.019	0.011	0.026	0.018	0.029	0.018
30	0.017	0.011	0.020	0.013	0.044	0.034
40	0.023	0.012	0.026	0.018	0.041	0.035
高度36m						
0	0.018	0.011	0.029	0.021	0.055	0.047
10	0.018	0.013	0.027	0.021	0.021	0.013
20	0.019	0.012	0.028	0.019	0.014	0.008
30	0.012	0.007	0.025	0.018	0.032	0.020
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%)

高度73m						
天底角 (°)	X誤差(m)		Y誤差(m)		Z誤差(m)	
	最大	RMS	最大	RMS	最大	RMS
0	0.023	0.014	0.033	0.024	0.633	0.624
10	0.031	0.019	0.025	0.016	0.048	0.043
20	0.026	0.019	0.023	0.015	0.014	0.007
30	0.030	0.021	0.028	0.017	0.025	0.017
40	0.028	0.019	0.023	0.017	0.037	0.031
高度55m						
0	0.024	0.017	0.025	0.018	0.099	0.082
10	0.022	0.016	0.026	0.018	0.037	0.024
20	0.035	0.025	0.024	0.016	0.032	0.023
30	0.025	0.016	0.027	0.018	0.040	0.035
40	0.028	0.020	0.023	0.017	0.041	0.035
高度36m						
0	0.031	0.020	0.027	0.018	0.028	0.022
10	0.029	0.018	0.027	0.018	0.034	0.022
20	0.026	0.016	0.024	0.015	0.038	0.028
30	0.029	0.021	0.028	0.018	0.040	0.036
40	0.023	0.016	0.025	0.018	0.033	0.029

### 3.4 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全30ケースの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。焦点距離 $f$ と鉛直誤差の平均には、負の相関がみられ、図1に示す模式図と同様に焦点距離 $f$ が鉛直誤差の決定に強く関係していることが確認できる。若干のばらつきが見られるが、今後検証の追加により、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・評価したい。

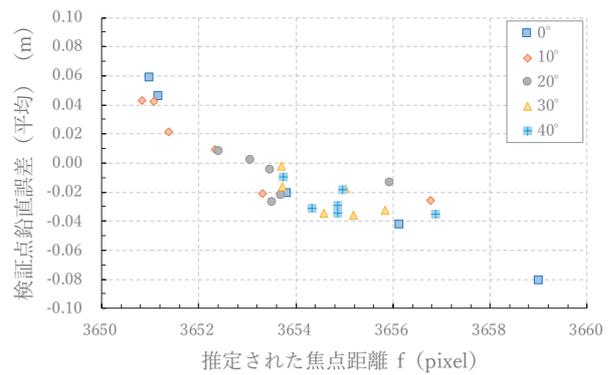


図5 斜め往復撮影 焦点距離と鉛直平均誤差の関係

表4 各ケースの焦点距離 $f$  標準偏差(pixel)

天底角 (°)	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

表4に、SfM解析により推定された全30ケースの焦点距離 $f$ (focal length)の標準偏差を示す。値が大きいほど焦点距離 $f$ 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°)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。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より、鉛直誤差RMSは必ずしも天底角の増加とともに減少していない。この要因のひとつとして、他の内部標定要素の推定誤差による影響が考えられる。また、斜め往復撮影は、天底角が大きくなるほど鉛直方向の情報が多くなり、奥行き方向のスケール推定に

有利になると考えられる。半面、撮影画像の地上投影形状が進行方向に広がる台形に変形し、画像前方ほど画素当たりの密度が小さくなり、特徴点の形状自体も変形することから、画像間のマッチングに不利になると考えられる。このトレードオフの関係が、天底角の大きさと鉛直精度が比例しない可能性のひとつと考えられるが、今後の検証項目としたい。

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。

#### §4. 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。

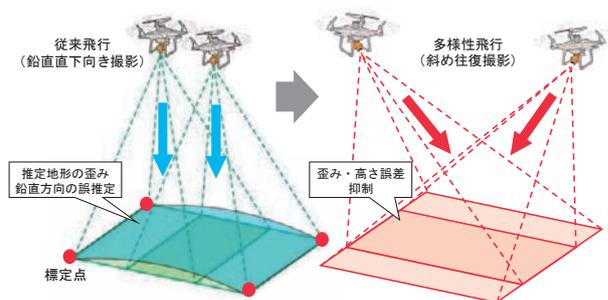


図6 斜め往復撮影手法 概念図

謝辞 本検討にあたり、山口大学大学院准教授 神野有生先生、研究室各位には貴重なご意見とご指導を賜りました。ここに記して感謝いたします。

#### 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、2020.3
- 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、2019.12
- 3) 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・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、2018.11
- 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、2020.5

#### ひとこと

本手法が一般的な普及技術として広く使われるよう、運用を通してデータの蓄積と検証を引き続き行いたい。



松岡 祐仁