

令和2年度建設施工と建設機械シンポジウム

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

2020年12月2日

株式会社フジタ
山口大学
山口大学

○松岡 祐仁
神野 有生
高田 雅也

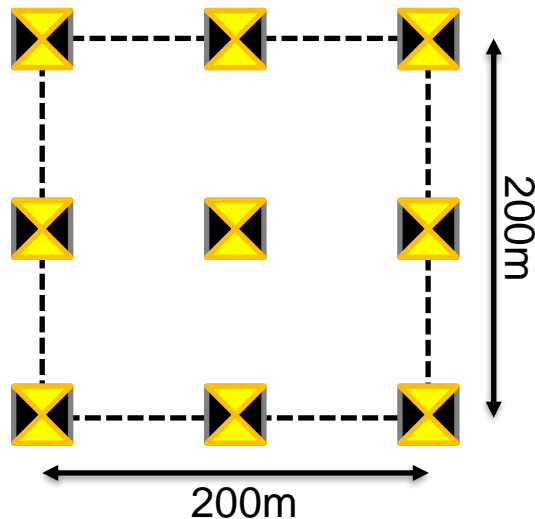
1. はじめに

【現状】

- i-Construction『ICT技術の全面的な活用』
「面管理」の導入により、面的・広範囲を計測できる技術の利用が促進
特にUAVの高機能化・低価格化により、空中写真測量が急速に普及
 - 工事測量(起工測量、岩線、出来高計測)
 - 出来形計測
 - 日常出来高管理への活用も期待

【課題】

- 「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)」に基づく場合、
100m以下の間隔で標定点を設置 ⇒ 200×200m(4ha)では9点必要(+検証点)
- TS等による測量で事前に設置位置座標を求める必要があり、設置・回収に労力とコストが発生
工事進捗により、標定点の更新作業も必要

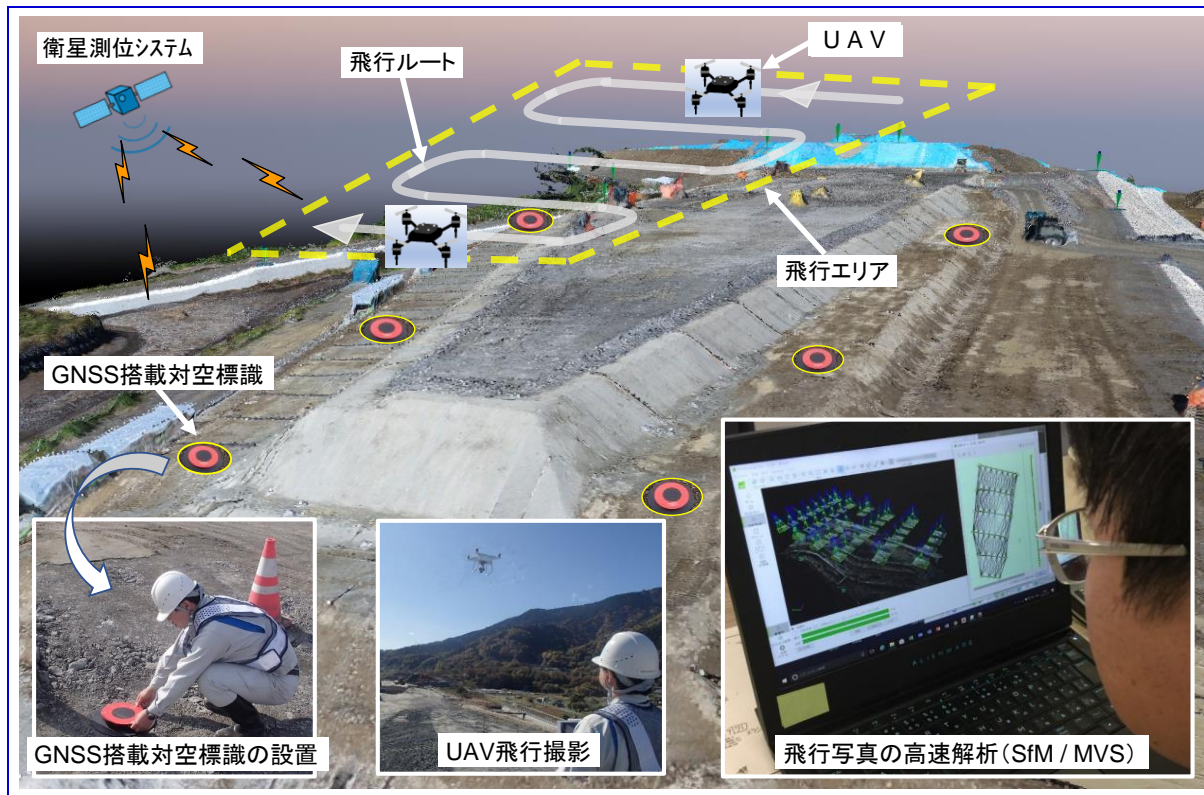


2. 標定点設置作業の省力化・削減の取組

【取り組み①】

・ 『デイリードローン』(2017年度)

- GNSS搭載対空標識を採用(事前の標定点・検証点の測量作業不要) ⇒ 設置・測量時間1/4
- フジタ独自の飛行設定(飛行時間・撮影枚数減 ⇒ 解析時間短縮)
解析設定(精度を維持したまま解析時間短縮) ⇒ 解析時間 2/5
- 対空標識設置・測量～飛行撮影～解析までを従来比1/3となる即日測量を実現

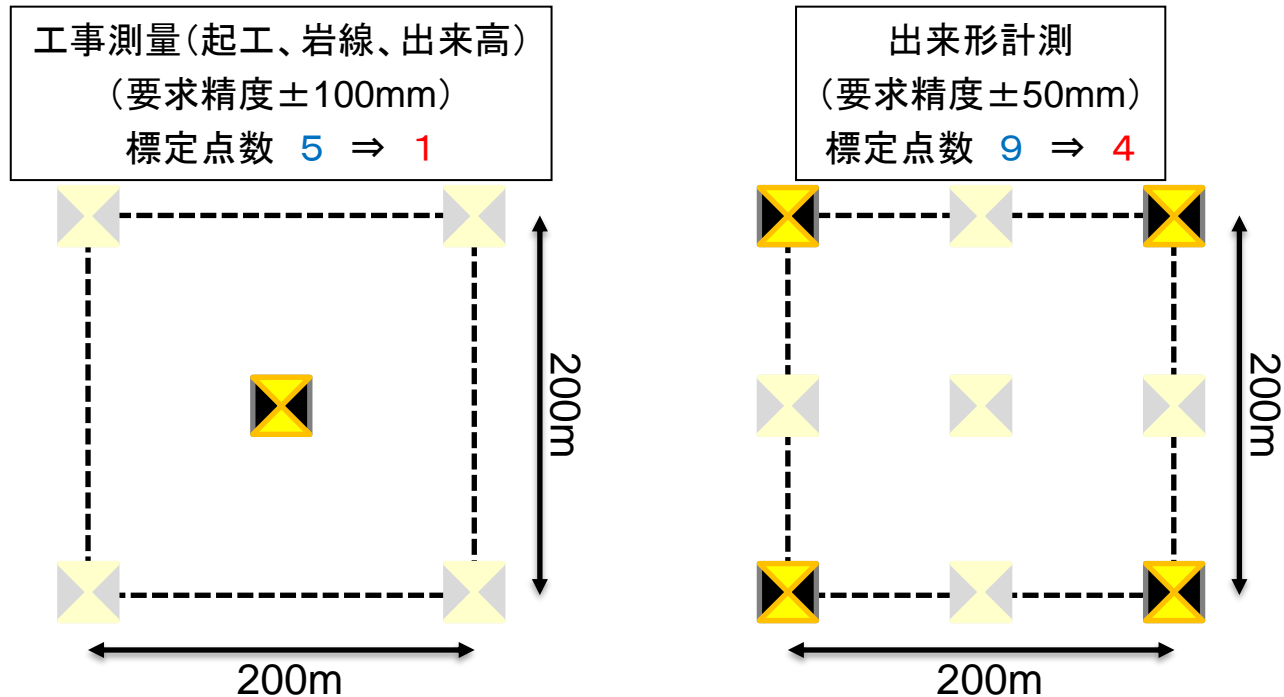


2. 標定点設置作業の省力化・削減の取組

【取り組み②】

- 『デイリードローンRTK』(2018年度～)

- 自己定位型UAV (RTK、ネットワークRTK、PPK-GNSS測位対応)の導入 (Phantom 4 RTK)
- 写真撮影位置の高精度測位によるSfM解析時の外部パラメータ推定の高精度化
- 標定点の大幅な省略(フジタ実験による)



- 標定点設置に多大な労力を要していた現場を中心に運用中 (広大な土工、高低差大など)
- **しかし、標定点の完全な削減には至っていない**

参考文献：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，2019

3. 鉛直直下向き撮影の課題

「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)」

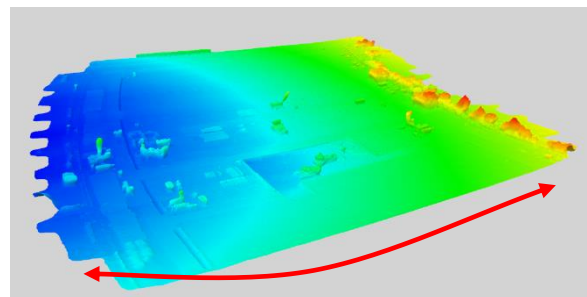
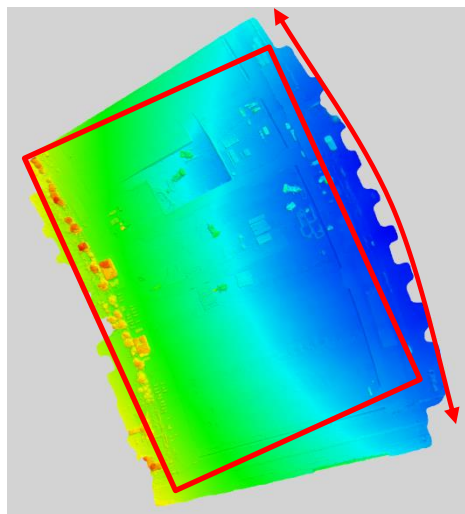
➤ 令和2年3月改定

標定点及び検証点設置・計測の留意点 (P.35より抜粋)

また、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とすることができる。

➤ しかし、これまでの「鉛直直下向き撮影」で「標定点を完全に省略」すると...

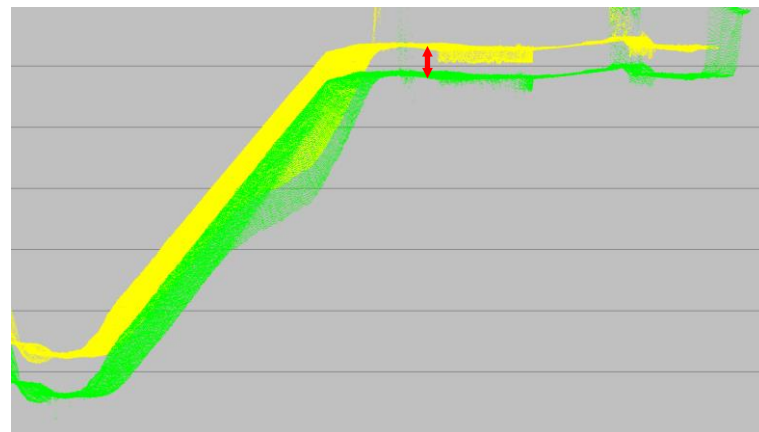
単独GNSS測位型UAV (従来)



↑ ボウル (ドーム) 状等の
全体形状の歪み

← 平面的な歪み

自己定位型UAV



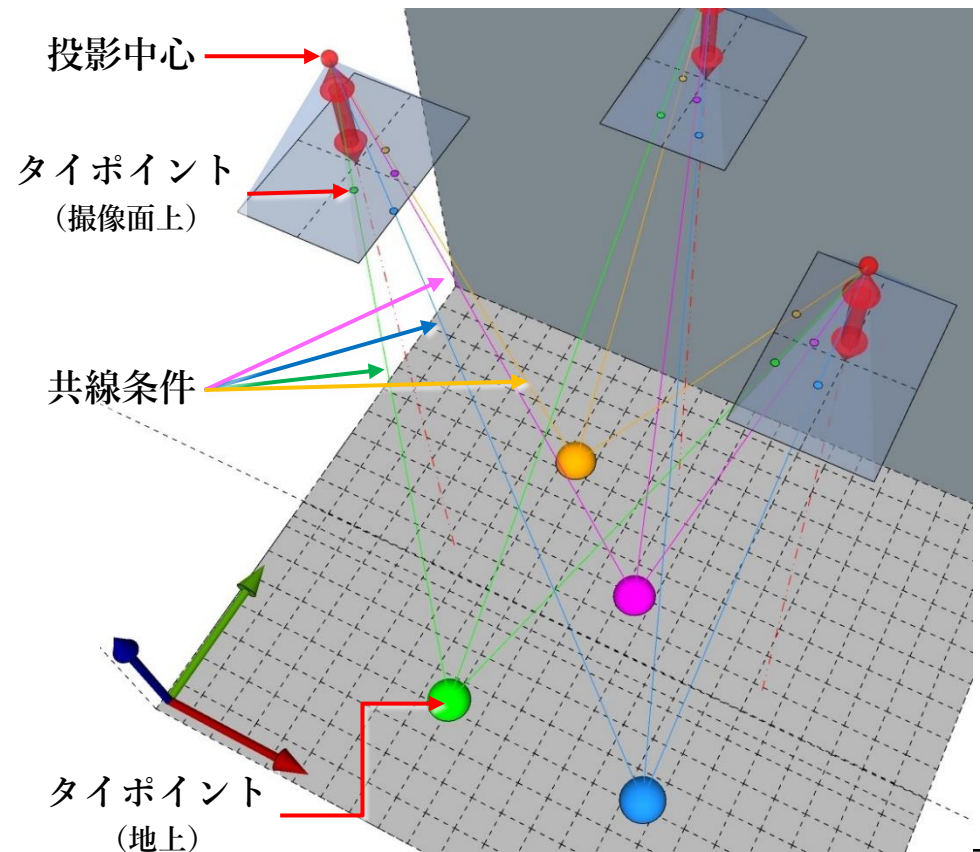
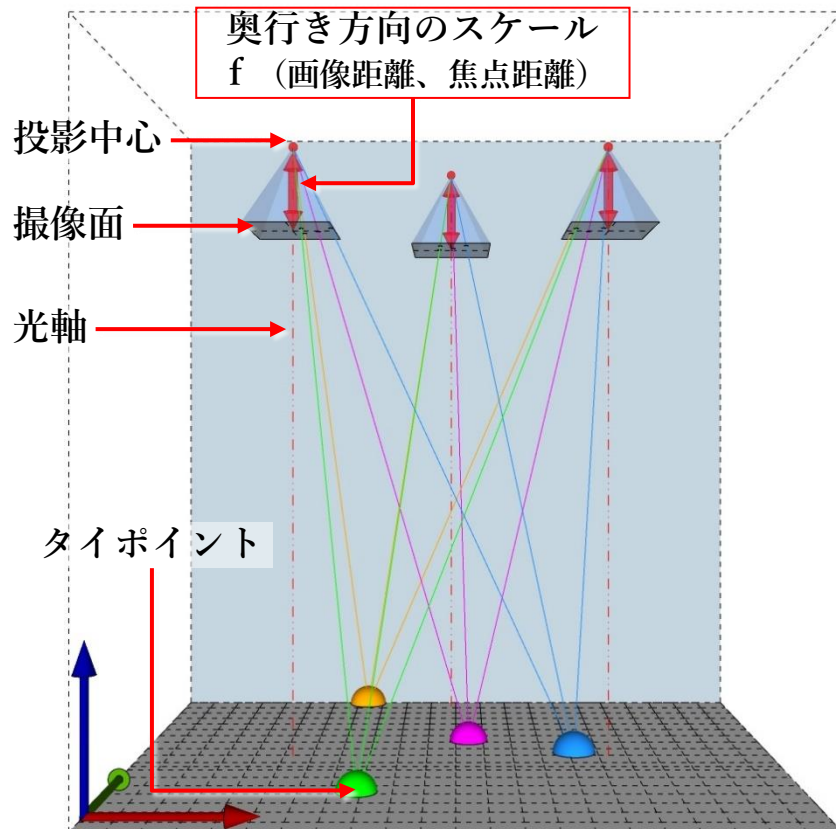
形状自体の歪みは小さいが、
高さ方向に大きくオフセットされた鉛直誤差

3. 鉛直直下向き撮影の課題

SfM (Structure from Motion)

- 撮影画像から特徴点の抽出
- 画像同士で一致する特徴点(タイポイント)の取得
- 外部パラメータ推定 ⇒ カメラの位置、姿勢の算出
- 内部パラメータ推定 ⇒ カメラレンズ、センサーの特性、撮像面との位置関係

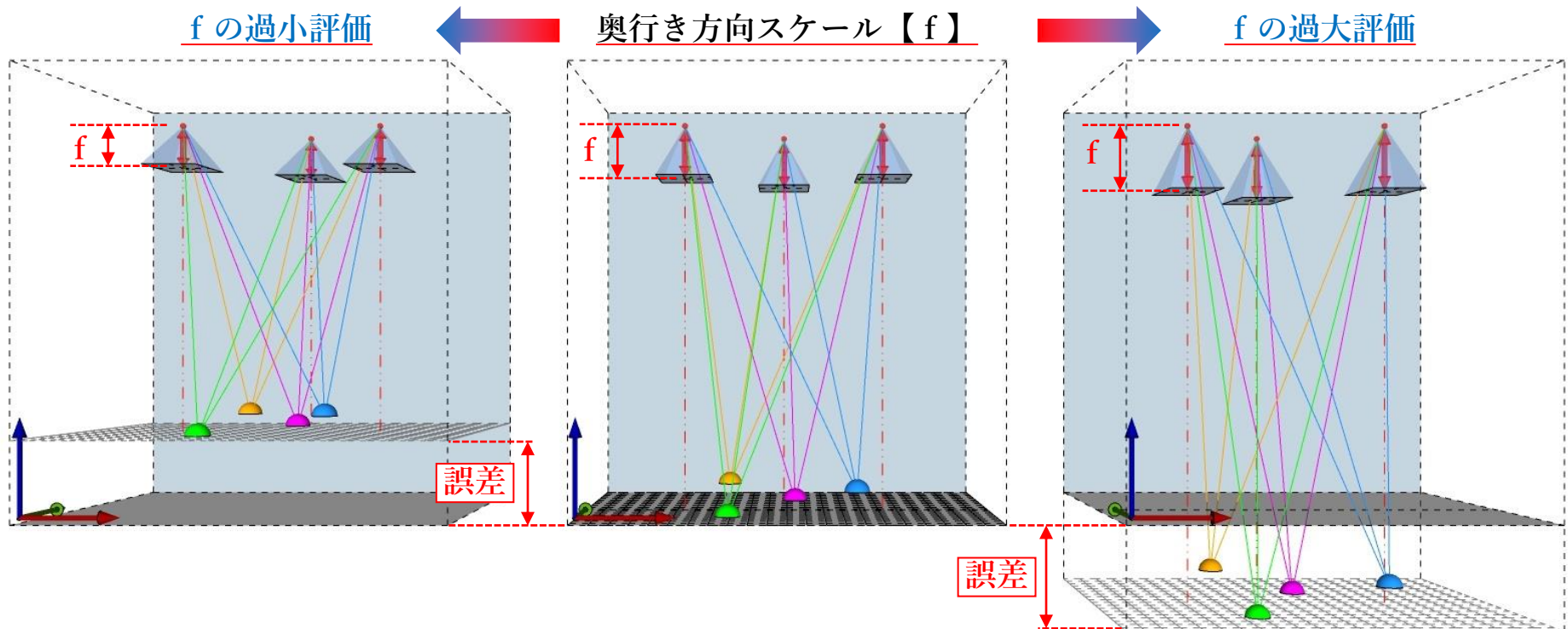
➤ SfM 共線条件(投影中心~撮像面~タイポイント)の模式図



3. 鉛直直下向き撮影の課題

これまでの鉛直直下向き撮影の課題

- 共線条件(投影中心～撮像面～タイポイント)を維持したまま、奥行き方向のスケールが伸縮可能
 - 水平位置: 不変
 - 鉛直位置: 不定



- 鉛直直下向き撮影の画像のみでは、奥行き方向のスケールが幾何学的に求まらず誤推定
- 鉛直方向の系統誤差の原因

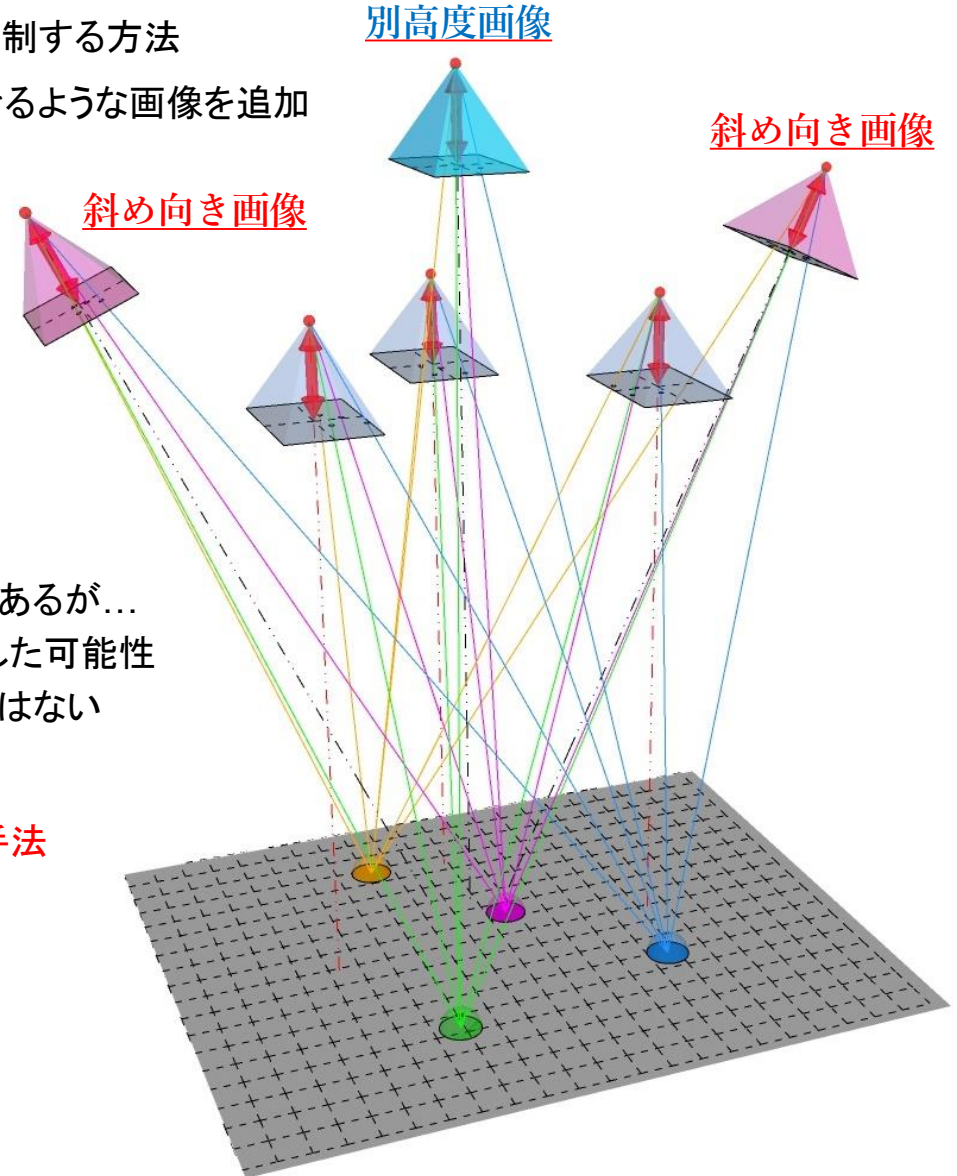
山口大学大学院創成科学研究科 神野准教授よりご提供いただいた図を加工・編集

参考URL: <https://ameblo.jp/rs-algorithm-designer/entry-12435609768.html> (山口大学の空中測量研究室の技術ノート)

3. 鉛直直下向き撮影の課題

鉛直直下向き撮影時の鉛直方向の系統誤差を抑制する方法

- 奥行き方向のスケールを幾何学的に推定できるような画像を追加
 - 別視点からの画像を追加
 - 別高度画像
 - 斜め向き画像
 - 奥行き方向のスケールが安定して推定
 - 鉛直精度の改善
- 鉛直直下向き撮影でも鉛直精度が出ることもあるが...
 - 風などの揺れにより、斜め写真が混入した可能性
 - 偶発的事象に期待 ⇒ 運用上現実的ではない
- 向きや高度に変化を付けた画像を含む撮影手法
⇒ 導入



4. 鉛直直下向き撮影＋向きや高度の異なる撮影

○ 従来の鉛直直下向き撮影に向きや高度の異なる画像セットを追加した検証例

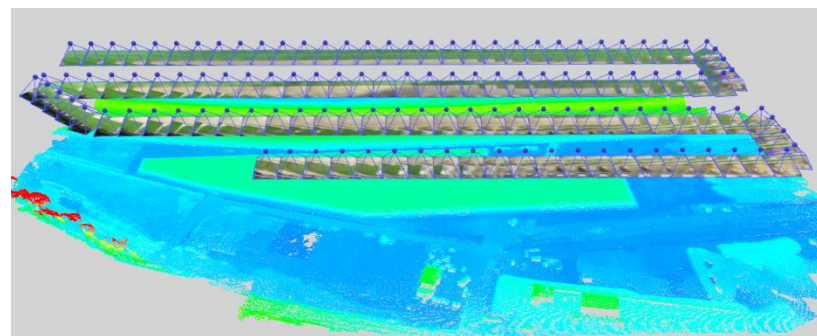
条件

範囲 : 350 × 90m (3.15ha)
状況 : 裸地(造成地)、周囲に植生繁茂
検証点 : 14点
撮影機体 : Phantom 4 RTK
(RTK-GNSS測位)



① 基本ケース(鉛直直下向き撮影)

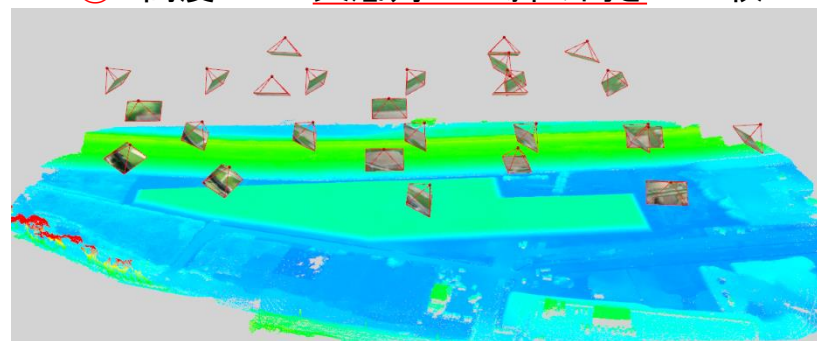
ラップ率 : 80 × 60%
対地高度 : 73m (地上画素寸法20mm/pixel)
撮影枚数 : 122枚



追加画像セット(多様性飛行撮影)

基本ケースに加えて

- ② 高度55m 別高度鉛直直下向き... 1枚
- ③ 高度73m 天底角30° 斜め向き... 26枚



4. 鉛直直下向き撮影＋向きや高度の異なる撮影

検証点誤差 (Pix4DmapperによるSfM解析結果)

| ケース | 画像枚数 | | | X誤差(m) | | Y誤差(m) | | Z誤差(m) | |
|-----|--------------|-----------|--------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | ①基本 画像セット | ②追加 鉛直 | ③追加 斜め30° | 最大 | RMS | 最大 | RMS | 最大 | RMS |
| 基本 | | - | - | 0.037 | 0.013 | 0.015 | 0.008 | 0.079 | 0.060 |
| 追加1 | | 1 | - | 0.035 | 0.012 | 0.018 | 0.008 | 0.083 | 0.065 |
| 追加2 | | - | 26 | 0.037 | 0.013 | 0.020 | 0.008 | 0.046 | 0.031 |
| 追加3 | 122 | - | 6 | 0.035 | 0.012 | 0.018 | 0.008 | 0.024 | 0.011 |
| 追加4 | | - | 3 | 0.037 | 0.012 | 0.018 | 0.008 | 0.025 | 0.011 |
| 追加5 | | - | 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 追加6 | | 1 | 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

※各誤差の最大は絶対値

- 基本ケース 鉛直方向に1.1mの大きな鉛直誤差
- 別高度、斜め向き撮影を加えることで鉛直誤差を100mm以内に抑制(追加1～6)
- 追加画像セットをすべて加えるよりも、植生の写る割合が少ない画像、抽出タイポイント数が多い画像を追加することで誤差を50mm以内に抑制(追加4～6)
- 鉛直誤差の抑制に大きな効果
 - 鉛直直下向き画像(基本ケース)に組合わせる追加画像は、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る
 - 少数でも画像マッチングに有利な画像の追加が重要
 - 計測領域に応じた追加画像の撮影、選定が必要となり、手法の一般化は複雑

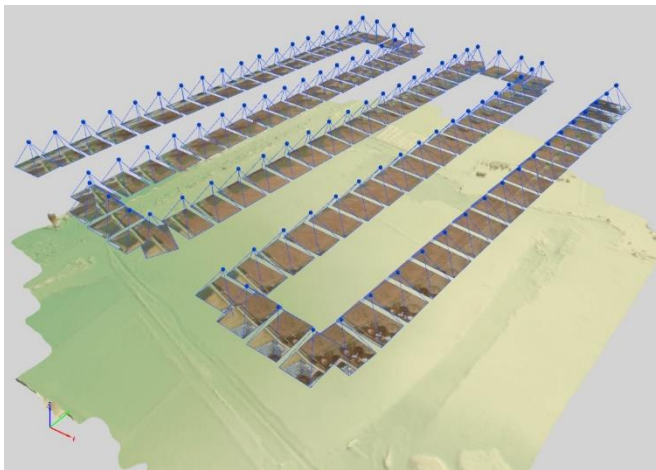
参考文献：高田雅也，水津祐輔，松岡祐仁，野末晃，神野有生：造成地のGCP不使用型UAV写真測量のSfM段階における撮影方法・解析設定の影響，日本写真測量学会 令和2年度年次学術講演会，pp43-46，2020

5. 斜め往復撮影

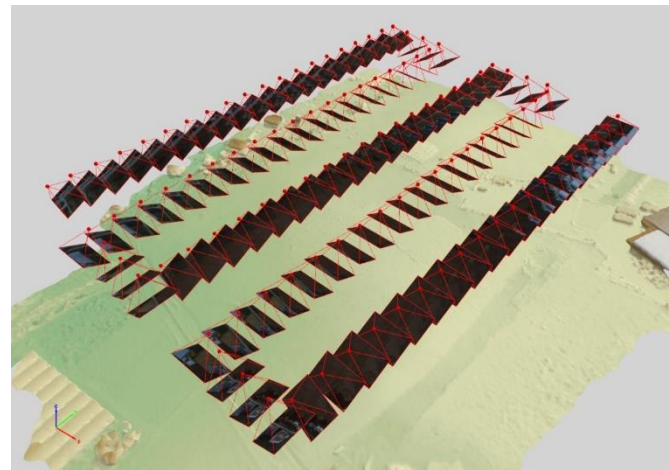
斜め往復撮影

- 従来の鉛直下向き撮影の軌跡と同じ
 - カメラ角度を進行方向に対して一定角に固定して撮影
 - 隣接コース間の計測領域は2方向から撮影
- ⇒ 斜め向き重畳画像セットによる鉛直誤差抑制効果が期待できる

鉛直直下向き撮影（従来）



斜め往復撮影



5. 斜め往復撮影

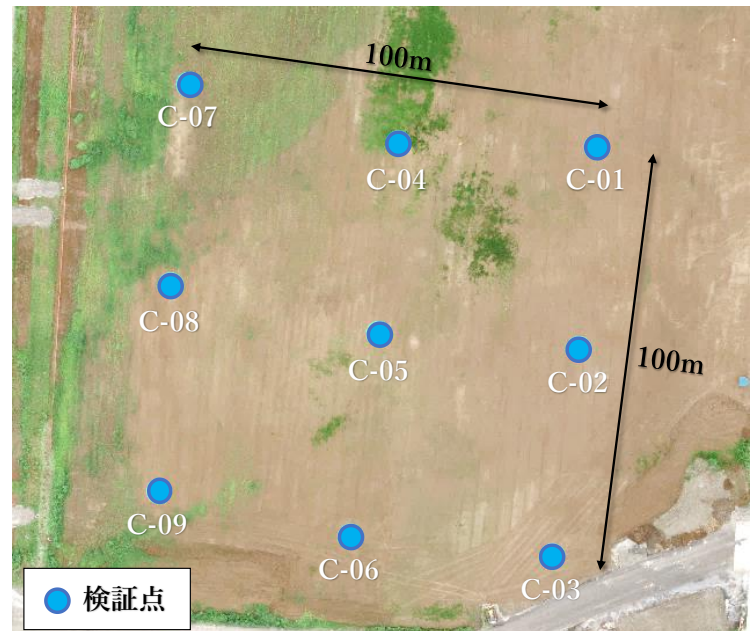
条件

- 範囲 : 100 × 100m (1.0ha)
状況 : 裸地(造成地)、一部植生分布
検証点 : 9点
撮影機体 : Phantom 4 RTK
(RTK-GNSS測位)



実施ケース(計30ケース)

- 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)



5. 斜め往復撮影

検証点誤差 (Pix4DmapperによるSfM解析結果)

ラップ率80×60%

| ケース | 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 |
| 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 |

ラップ率80×75%

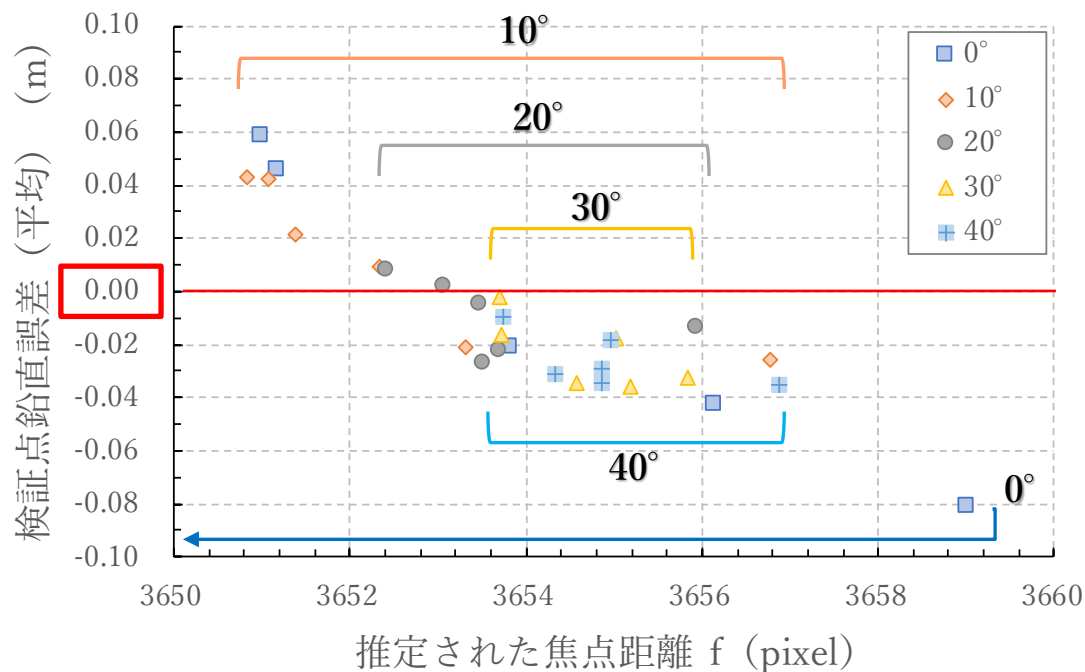
| ケース | 高度73m | | | | | | |
|-------|------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 天底角 (°) | X誤差(m) | | Y誤差(m) | | Z誤差(m) | |
| | | 最大 | RMS | 最大 | RMS | 最大 | RMS |
| 16 | 0 | 0.023 | 0.014 | 0.033 | 0.024 | 0.633 | 0.624 |
| 17 | 10 | 0.031 | 0.019 | 0.025 | 0.016 | 0.048 | 0.043 |
| 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 |

- 天底角0° (鉛直直下向き撮影)の場合、ケース26を除き、50mmを超過する鉛直誤差が発生
- ケース2を除く斜め往復撮影では、50mm以内の鉛直誤差となり、鉛直精度の改善を確認
- 今回の対象領域では、ラップ率の違いによる精度への大きな影響は見られない

5. 斜め往復撮影

焦点距離と鉛直誤差の関係①

- SfM解析ソフトにより推定された『焦点距離f』と『鉛直誤差(平均)』の関係



- 焦点距離fと鉛直誤差(平均)には、強い負の相関(相関係数-0.8117)
- 焦点距離fの推定誤差が鉛直バイアスの支配的要因

5. 斜め往復撮影

焦点距離fと鉛直誤差の関係②

- SfM解析により推定された焦点距離fの標準偏差
(f 推定の不確実性)

| 天底角 (°) | ラップ率80×60% | | | ラップ率80×75% | | |
|------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | 高度 (m) | | | | | |
| | 73 | 55 | 36 | 73 | 55 | 36 |
| 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 |

鉛直誤差RMS

| 天底角 (°) | ラップ率80×60% | | | ラップ率80×75% | | |
|------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | 高度 (m) | | | | | |
| | 73 | 55 | 36 | 73 | 55 | 36 |
| 0 | 0.046 | 0.060 | 0.047 | 0.624 | 0.082 | 0.022 |
| 10 | 0.046 | 0.028 | 0.013 | 0.043 | 0.024 | 0.022 |
| 20 | 0.016 | 0.018 | 0.008 | 0.007 | 0.023 | 0.028 |
| 30 | 0.008 | 0.034 | 0.020 | 0.017 | 0.035 | 0.036 |
| 40 | 0.012 | 0.035 | 0.019 | 0.031 | 0.035 | 0.029 |

- 鉛直下向き撮影(天底角0°): 数画素程度の大きな値、斜め往復撮影: 1/2画素程度以下
- 天底角の増加に比例して焦点距離の推定が安定
- 天底角の増大による焦点距離fの標準偏差と鉛直誤差RMSの傾向は異なる
 - RTK-GNSS測位の誤差レベルの可能性
 - 天底角の増大による悪影響の可能性
 - 画素フットプリントの増大・変形
 - 起伏・植生の見え方の変化によるマッチングの不利
 - 検証点の同定(マーキング)精度低下 など
 - 今後の検証により明らかにしたい

◆ 今回の対象領域では、天底角20°以上の斜め往復撮影で、鉛直精度50mmの安定的な確保を確認

6. まとめ

『斜め往復撮影』

- 自己定位型UAVによる外部パラメータ推定の高精度化
- 斜め向き重畳画像セットにより、内部パラメータの奥行き方向のスケールを高精度に推定
- 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
 - ① 従来の鉛直直下向き撮影の飛行経路のまま、カメラを進行方向に傾けることで向きの異なる斜め撮影画像セットを取得
 - ② 斜め往復撮影画像セットのSfM解析により、鉛直誤差を大幅に抑制
 - ③ 鉛直直下向き撮影の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

➤ 留意点

- ✓ 標定点・調整点に依存していた位置精度確保が、撮影画像の情報のみに依存
 - ⇒ 計測対象の植生被覆等の地表面状況、撮影画像の品質などの状況に大きく依存
 - ⇒ 造成現場(土工、裸地)に限定すれば、斜め往復撮影(20~40°)により、安定した鉛直精度を得られている
- ✓ SfM解析の解析画像サイズ、抽出する特徴点数、推定する内部パラメータの種類などの解析設定の変更が精度の安定性に寄与※ (本稿の結果は標準設定)
 - ⇒ 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

※参考文献：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

6. まとめ

斜め往復撮影の運用状況

- 主に造成現場での着工前などの現況測量
- 土量変化率の把握による土配計画での運用
- 現場運用、検証実験を通してデータ蓄積中

今後の展開

- 標定点が不要となり飛行撮影前の準備工程が大幅に削減 ⇒ **運用上の大きなメリット**
 - 人の立ち入りが困難な場所での測量
 - 近年頻発する災害発生時の初動調査への展開可能性
- ICT基準類との整合性・対応を図る
 - 斜め向き撮影による光軸が傾くことによる飛行高度、地上画素寸法、オーバーラップ率の関係

