

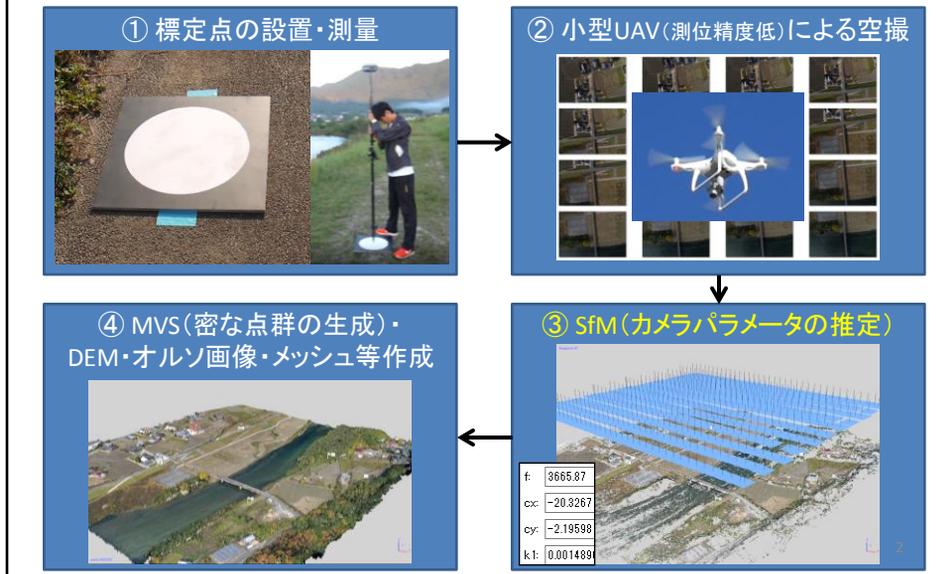
本資料は、日本写真測量学会平成30年度秋季学術講演会(2018年11月8日@アオーレ長岡)における発表スライドです。発表論文集とは内容が異なります。

# 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

山口大学 空中測量研究室  
○神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真

それではご覧のタイトルで、山口大学の神野が発表いたします。

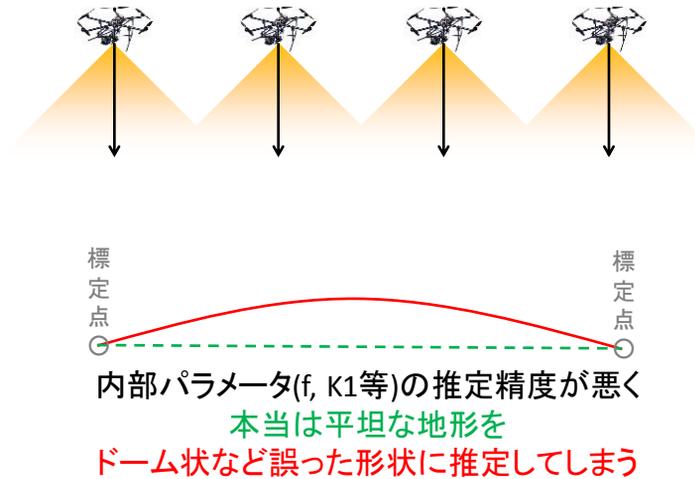
## 【背景】 小型UAV画像を用いた 地物の測量・3Dモデリング



本発表でUAV写真測量と呼ぶのは、小型UAV画像を用いた地物の測量・3Dモデリングのことです。この技術は4ステップから成り、まず現地に標定点を設置・測量し、次に空撮を行います。本発表では、cm精度の測位ができない、安価なUAVを使用する場合を想定します。その後、撮影した画像と標定点の情報を用いて、SfMによりカメラパラメータを推定します。最後に、推定したパラメータを用いて密な点群を生成し、DEM、オルソ画像などの成果物を作ります。成果物の精度は、SfMにおけるカメラパラメータの推定精度に支配されます。

## 【背景】 平行撮影の落とし穴

一般に、同高度から鉛直下向きに撮影することが多いが…

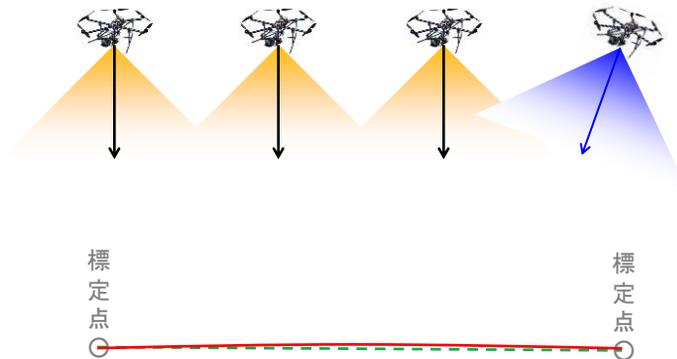


3

撮影について、一般に、同高度から鉛直下向きに撮影することが多いのですが、この「平行撮影」には落とし穴があります。具体的には、内部パラメータの推定精度が悪く、本当は平坦な地形を、ドーム状など誤った形状に推定してしまう問題です。

## 【背景】 斜め撮影導入の効果

一部の画像を傾けて撮影すると…



ドーム状変形などの非線形系統誤差を抑制できる  
(例: James & Robson, 2014)

そこで, 斜め撮影の適切な角度・数・配置について,  
(条件の完全な制御と誤差要因の分析が可能な) CGシミュレーションで検討中...<sup>4</sup>

この問題に関して、一部の画像を傾けて撮影することで、ドーム状変形などの非線形系統誤差を抑制できるということが報告されています。  
そこで私たちは、斜め撮影の適切な角度・数・配置について、CGシミュレーションを使って検討しています。

## 今回の発表内容

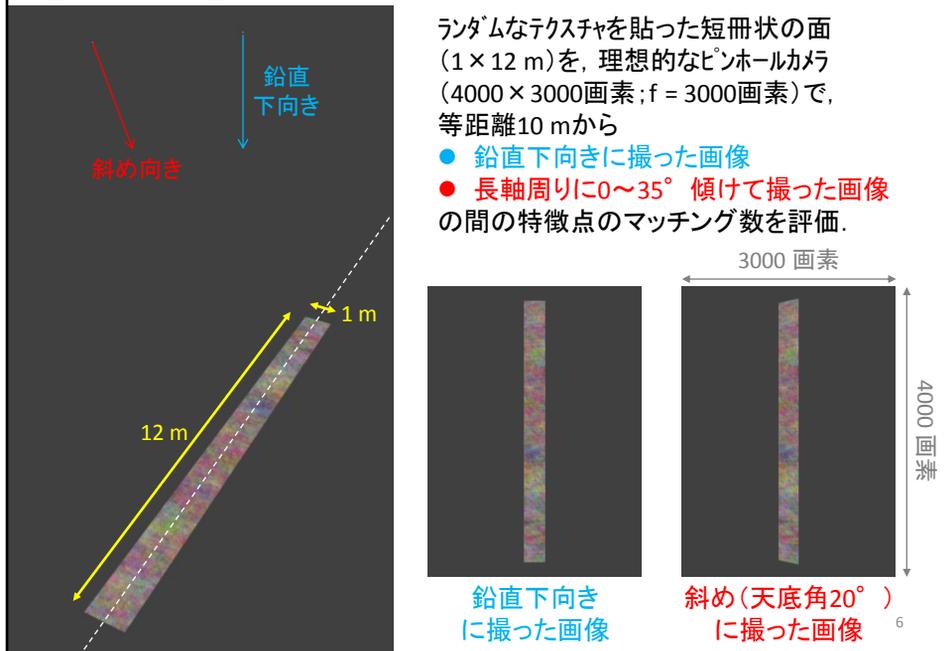
**【実験1(イントロ)】 撮影の傾きのマッチング数への影響**

**【実験2(メイン)】 傾ける角度とSfMの精度の関係**

5

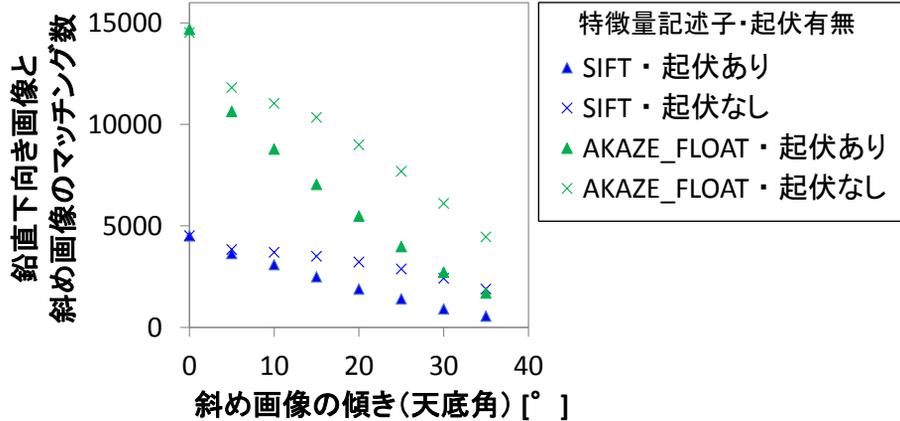
今回は、2つの実験結果を紹介します。まず1つ目は、イントロ的な実験で、撮影の傾きの、特徴点の画像間マッチングへの影響を調べたものです。

## 【実験1】 実験方法 (Blender, openMVG使用)



実験方法としては、ランダムなテクスチャを貼った短冊状の面をCGで作成し、理想的なピンホールカメラで、鉛直下向きおよび長軸周りに傾いた向きの撮影を行いました。そして、鉛直下向き画像と斜め画像との間の特徴点のマッチング数を評価しました。

## 【実験1】結果：傾きと起伏の悪影響



- 傾きが大きくなるほどマッチング減少 ← 特徴量が射影変換に頑健でないため.
- 起伏があるほうがマッチング少 ← 傾きによる見た目の変化が大きいため.

傾きが大きいくほど、個々のマッチングの非線形系統誤差抑制効果は大きいので、数と抑制効果のトレードオフにより、SfMの精度に関して**最適な傾きが存在**。

こちらが結果です。横軸が斜め画像の傾き、縦軸が斜め画像と鉛直下向き画像との間の特徴点のマッチング数です。SIFT, AKAZEという2種類の特徴量記述子について、短冊に起伏がある場合(起伏に関する事後補足: Z座標と勾配がほぼ正規分布に従い、Z座標の標準偏差が0.030 m、勾配の標準偏差が0.76)とない場合の結果をそれぞれプロットしています。このグラフからまず、傾きが大きくなるほどマッチングが減少することがわかります。これは、特徴量が射影変換つまり見る向きの変化に頑健でないためです。また、起伏があるほうがマッチングが少なくなっています。これは、起伏があるほうが傾きによる見た目の変化が大きいためです。このように、傾きが大きいくほどマッチングには不利なわけですが、一方でSfMに関しては、個々のマッチングの非線形系統誤差の抑制効果は大きくなりますので、数と抑制効果のトレードオフにより、SfMの精度に関して最適な傾きが存在することになります。

## 今回の発表内容

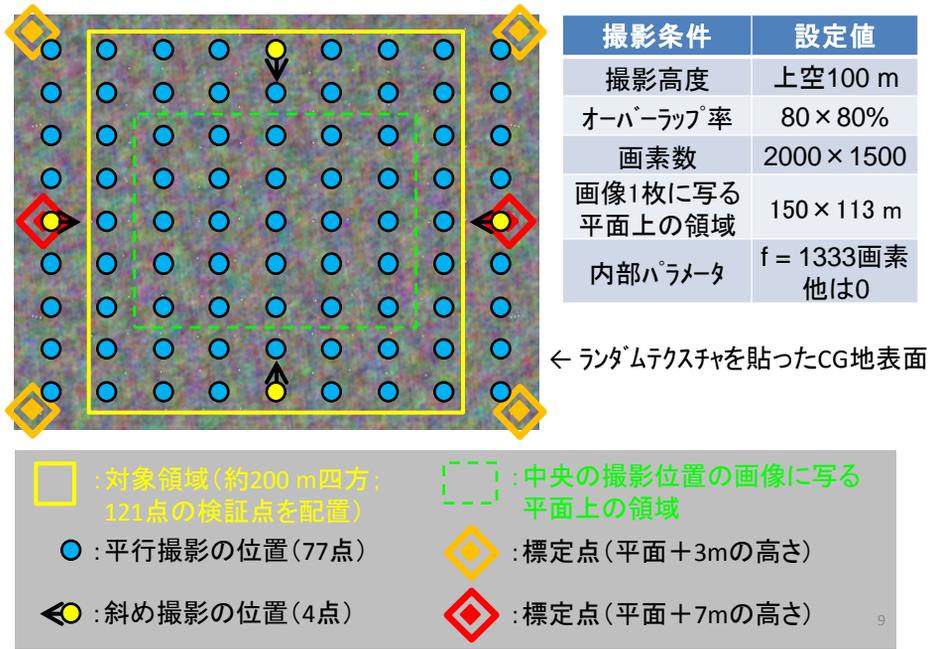
【実験1(イントロ)】撮影の傾きのマッチング数への影響

【実験2(メイン)】傾ける角度とSfMの精度の関係

8

そこでメインの実験2では、傾ける角度とSfMの精度の関係を調べました。

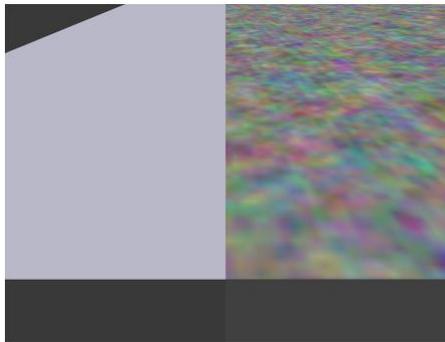
## 【実験2】対象領域と撮影条件



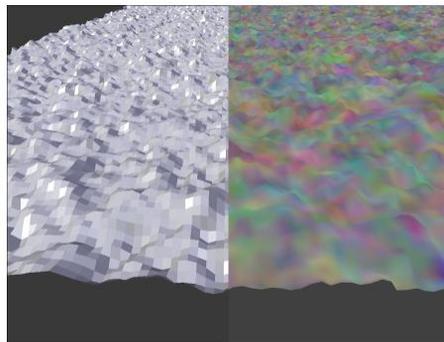
まず、対象領域と撮影条件を示します。ランダムなテクスチャを貼ったCG地表面を作り、黄色の四角形で示した約200 m四方の領域を対象領域としました。標定点はオレンジと赤で示した6点です。撮影位置は丸印で、 $9 \times 9 = 81$ 点となっています。水色で示した77点が下向き平行撮影の位置です。黄色で示した4点では、対象領域の内側に傾けた斜め撮影を行いました。撮影条件は右上の表に示した通りで、高度100 m、オーバーラップ率80%となっています。内部パラメータについてはf以外が0の、理想的なピンホールカメラとなっています。

## 【実験2】 2種類のCG地表面を検討

(Blenderで作成)



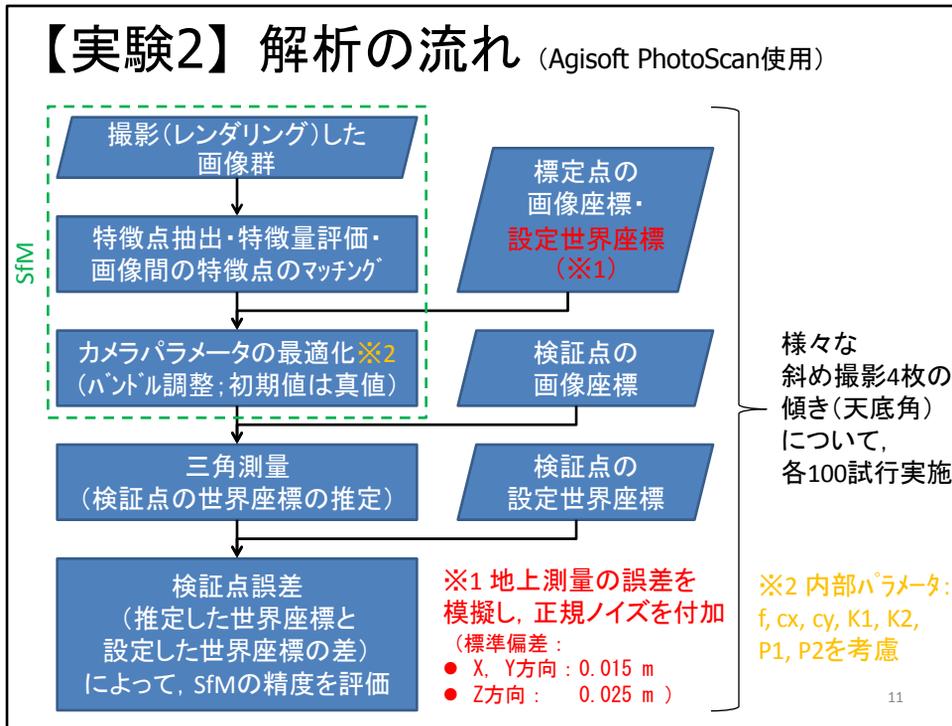
起伏なし  
(完全な平面)



ランダムな起伏あり  
(正規分布;  
Z座標の標準偏差0.833 m;  
勾配の標準偏差0.475)

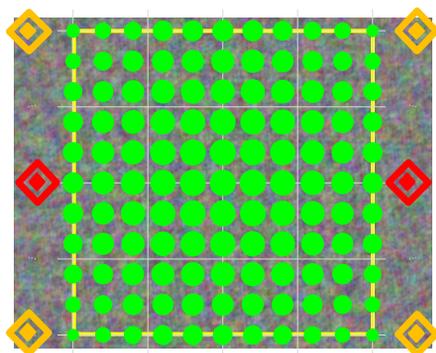
10

CG地表面については、起伏がない完全な平面の場合と、ランダムな起伏がある場合を検討しました。

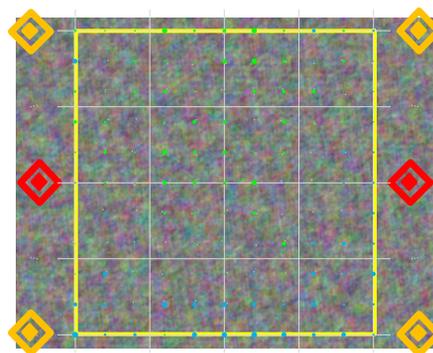


こちらが解析の流れです。まず、撮影した画像群について、特徴点の抽出、特徴量の評価、画像間の特徴点のマッチングを行います。次に、マッチング結果と標定点の画像座標・世界座標を用いて、バンドル調整、つまりカメラパラメータの最適化を行います。ただし、標定点の世界座標には、地上測量の誤差を模擬して、正規ノイズを付加します。正規ノイズのレベルは、RTK-GNSS測量を想定しています。また、バンドル調整では内部パラメータとして、Brownのカメラモデルにおいて、f以外に、真値は0であるcx, cy, K1, K2, P1, P2も最適化しています。初期値には真値を与えています。その後、三角測量によって検証点の世界座標を推定し、設定した世界座標との差、つまり検証点誤差を計算します。これによって、SfMの精度を評価します。本実験では以上の試行を、斜め撮影4枚の傾きを様々に変えながら、各100試行実施しました。毎試行ごとに、標定点の世界座標に加えられるノイズの値が異なります。

## 【実験2】 結果: ドーム状変形抑制効果



傾き0度(斜め撮影なし)



傾き30度(斜め撮影あり)

検証点誤差Z成分 (100試行の平均)

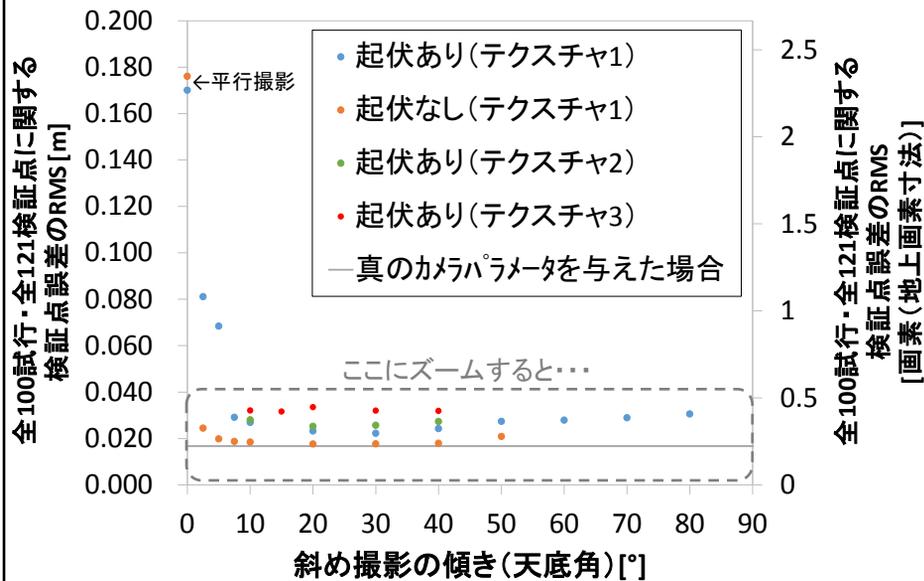
- 0.20 m
- 0.10 m
- 0.05 m
- 0.01 m
- -0.01 m

わずか4枚の斜め撮影の導入により、ドーム状変形をほぼ完全に解消！

12

では結果にまいります。これらの図は、検証点誤差のZ成分の空間分布を示しています。左が傾き0度、つまり平行撮影のみの場合で、対象領域の中心に向かうにつれて大きくなる、つまり地表面の高さを過大評価する、ドーム状変形が発生しています。ドームの高さは、中心部では20 cmを超えています。ここに示しているものは100試行の平均ですが、毎試行、標定点の世界座標に含まれる誤差のわずかな違いによって、ドームの高さは大きく変動し、精度のバラつきも大きい結果となりました。一方、右の図は、傾き30度の斜め撮影を行った場合で、わずか4枚の斜め撮影の導入によって、ドーム状変形がほぼ完全に解消していることがわかります。

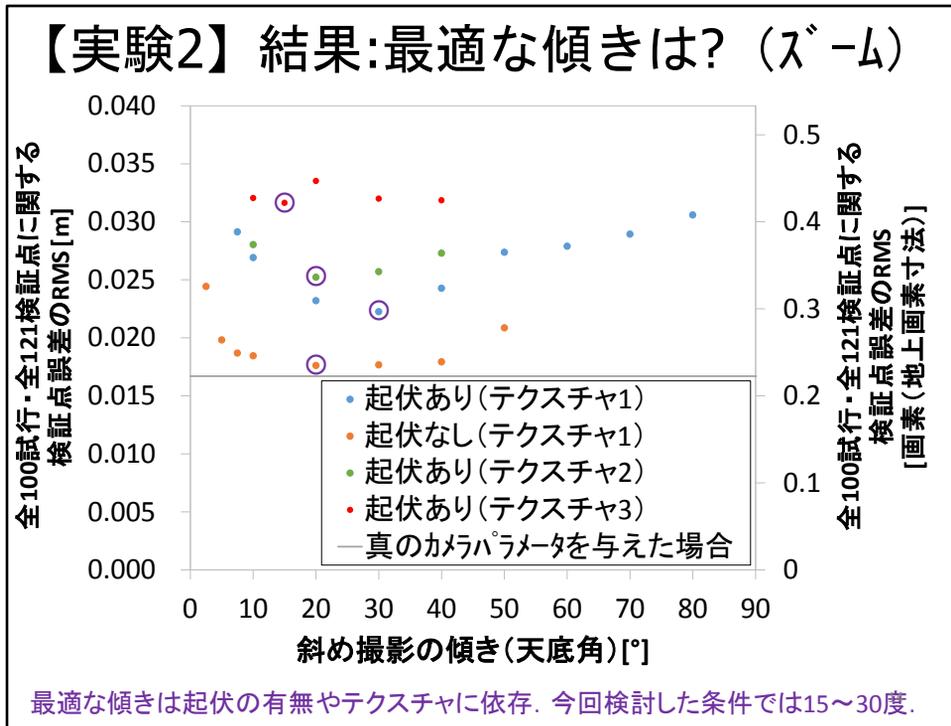
## 【実験2】 結果:色々な条件での精度



傾き7.5度～40度では, 誤差が0.5画素未満(地上画素寸法換算)の圧倒的高精度!

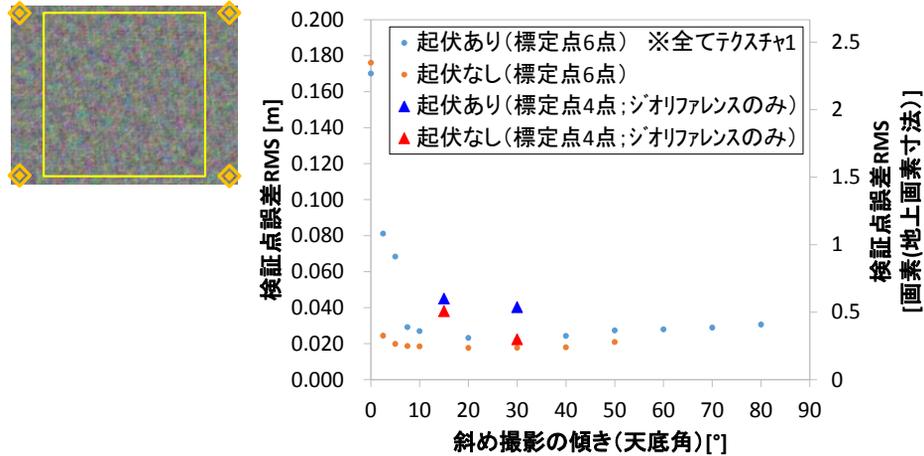
次に、色々な条件での精度を見ていきます。このグラフは、横軸が斜め撮影の傾きつまり天底角、縦軸が、全試行・全検証点に関する検証点誤差のRMSです。起伏がある場合、ない場合に加え、3種類のテクスチャに関する結果を示していますが、多くの角度で計算出来ているのはテクスチャ1ですので、テクスチャ1に着目します。オレンジが起伏なし、青が起伏ありの場合ですが、どちらの場合も平行撮影のみでは誤差が17 – 18 cmと大きくなっており、わずかでも傾けた撮影を導入すると誤差が激減することがわかります。特に傾き7.5度から40度では、誤差が地上画素寸法換算で0.5画素未満と、平行撮影に比べて圧倒的な高精度となっています。

最適な傾きを詳しく見るために、y軸の小さい部分にズームインすると、



ご覧のように、最適な傾きは起伏の有無やテクスチャに依存することがわかります。今回検討した条件では、15- 30度の範囲にあります。

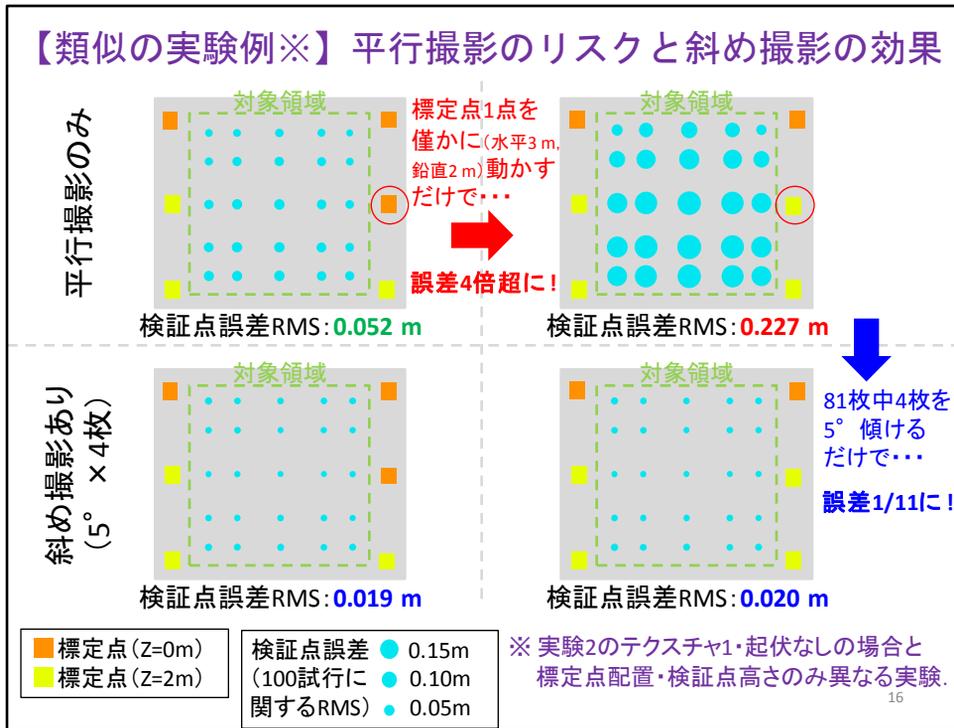
## 【実験2番外】 標定点は4隅だけでOK！



標定点を同一平面上の4隅のみに置き、  
 ジオファレンスのみに用いた場合でも、  
 検証点誤差RMSが0.045 m(0.60画素)以下の高精度！

15

こちらは実験2の番外ですが、標定点を6点ではなく4隅の4点だけとして、バンドル調整に動員せずジオファレンスつまり座標系の決定のみに用いた場合の結果を、先ほどのグラフに重ねてプロットしたものです。この場合にでも、検証点誤差RMSが約4.5 cm、地上画素寸法換算で0.6画素以下という高精度になっています。



こちらは類似の実験例で、実験2のテクスチャ1・起伏なしの場合と、標定点配置・検証点高さのみ異なる実験の結果です。平行撮影のみの場合でも、左上の配置では、ドーム状変形が比較的軽度にとまっています。しかし、標定点のうち1点をわずかに、水平方向にたった3m、鉛直方向にたった2m動かすだけで、顕著なドーム状変形が発生し、誤差が4倍以上になっています。このように平行撮影のみでは、標定点のわずかな違いで誤差が大きく変わるとい、不安定さがあります。一方、右上の標定点配置でも、81枚中たった4枚を5度だけ傾けるだけで、ドーム状変形が解消し、誤差が1/11になりました。このように、わずかでも斜め撮影を入れると、安定した高精度が得られます。

## 結論

本シミュレーションと同様の条件で撮影する場合には,

通常の下向き平行撮影に,

少数枚(5%程度),  $15\sim 30^\circ$  傾けて撮った画像を含めるだけで,  
ドーム状変形などの非線形系統誤差を解消できる。

斜め撮影を導入した場合,

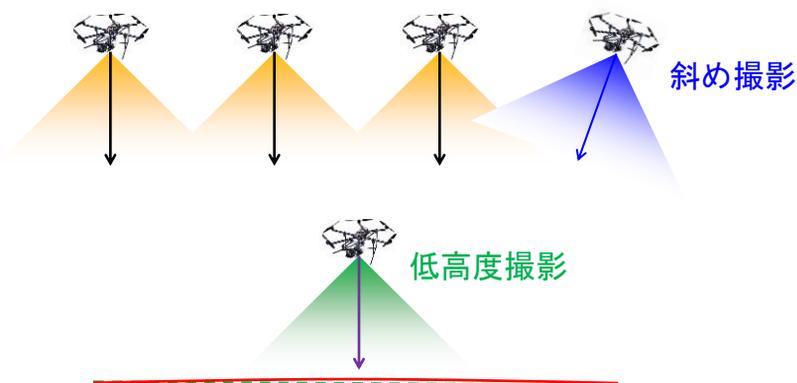
カメラパラメータは標定点なしで高精度に推定可能であり,  
(要求精度にもよるが)

標定点はジオリファレンスのためだけに必要となるため,  
対象領域4隅に置けば十分となる。

17

結論を示します・・・(スライドを読む)・・・200 m四方くらいの領域を対象とする場合には、対象領域の4隅に置けば十分となります。

## 【付録】撮影位置を高精度に測れるUAVを使う場合に 標定点をゼロにするための撮影戦略案



カメラパラメータの推定を高精度化する**斜め撮影**に加え、  
ジオリファレンスを高精度化するための**低高度撮影**を織り交ぜれば、  
標定点なしでも誤差数 cmを達成可能か(今後要検証)。

18

最後に付録ですが、今後、撮影位置をcm単位の高精度に測れるUAVが、より普及していくことが予想されます。そうしたUAVを使う場合には、標定点をゼロにすることが目標になりますが、そのための撮影戦略を提案させていただきます。たとえ撮影位置をcm単位の高精度で測れたとしても、どんな撮り方をしても標定点が省略できるわけではありません。カメラパラメータの推定を高精度化するための斜め撮影を混ぜ込むことは必須と考えます。また、上空100 mでの測位結果のみでジオリファレンスをする、と、推定された座標軸のわずかな傾きで、地上ではcmレベルの誤差が生じると考えられます。そこで、着陸直前に低高度での撮影を数枚加えることで、ジオリファレンスを高精度化することが望ましいと考えられます。このような工夫をすれば、標定点なしでも誤差数cmを達成可能かと期待されますが、この点については今後検証していきたいと思えます。