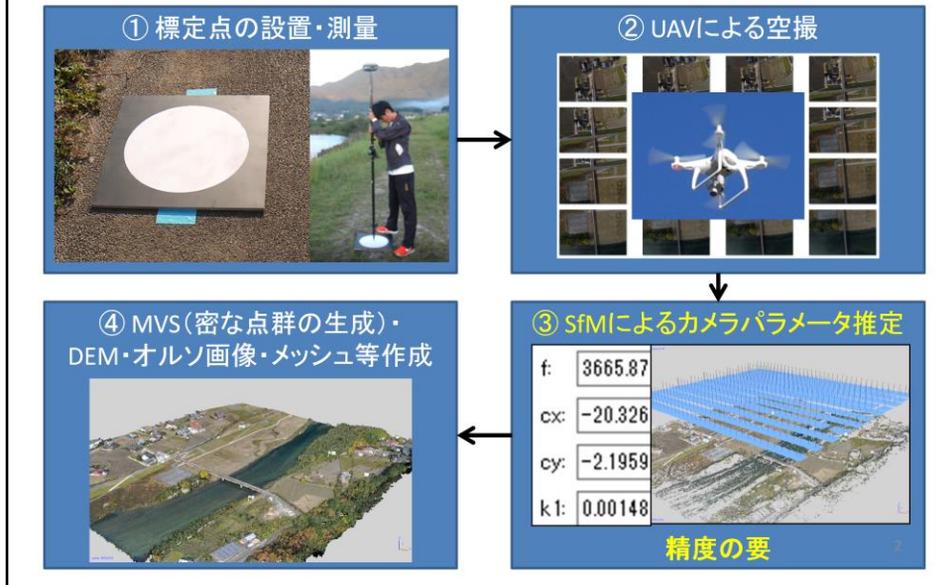


それではご覧のタイトルで、山口大学の神野が発表いたします。

## 【背景】 SfM, MVSを用いたUAV写真測量

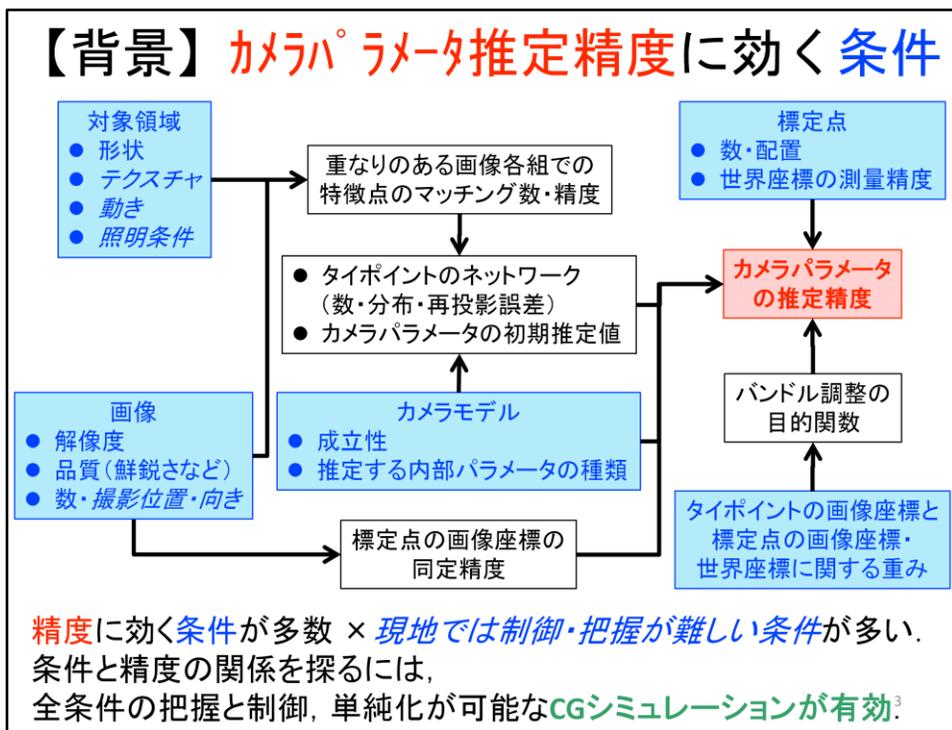
(撮影位置測位精度の低い廉価なUAVを使う場合 = 標定点が必須の場合)



SfM, MVSを用いたUAV写真測量は、一般にご覧の4ステップから成ります。  
具体的には標定点の設置・測量、UAVによる空撮、SfMによるカメラパラメータ推定、  
そしてMVSによる密な点群の生成です。

密な点群や、それに基づいて作られるDEM・オルソ画像などの成果物の精度は、  
SfMによるカメラパラメータの推定精度に強く依存します。

そこで私たちは、いかに効率よくSfMの精度を確保するかを研究しております。



ところが、SfMによるカメラパラメータの推定精度は、ご覧のように、対象領域や画像の撮影方法、標定点、解析の設定などの、多数の条件に複雑に依存します。条件の中には、現地では制御や正確な把握が難しい条件もあります。従って、「UAV写真測量の精度」「精度と効率の両立方法」といったテーマに対しては、現地実験だけでは限界があり、CGシミュレーションが有効です。なぜならCGシミュレーションでは、全条件の把握と制御, 単純化ができるためです。

## 今回のCGシミュレーションによる検討内容

### A) 斜め撮影の効率的配置

斜め撮影の必要性はわかったとして,  
必要な割合, 少数でも高精度を出せる撮影位置・向きは?

### B) 水の影響と対策(対象が河道で, 両側に標定点を置ける場合)

現地実験: 屈折補正係数(水深が浅く見える割合) $< 1.34$ (理論的下限)  
水面での光の屈折によって視点により動く「水底のタイポイント」は,  
カメラパラメータの推定に悪影響を与えるのではないか?

### C) 水の影響と対策(対象が河道・海岸で, 標定点を片側にしか置けない場合)

### D) 撮影位置の高精度測位が可能なUAV(例: DJI Phantom 4 RTK) を用いた場合の標定点の完全な省略可能性

時間の都合上, C, Dについては結論のみ述べさせていただきます.

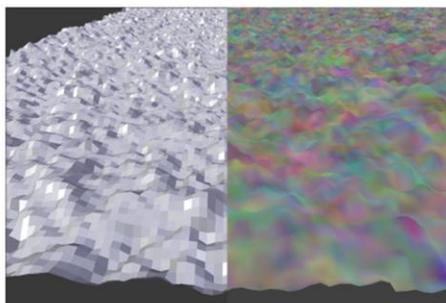
4

そこで今回も前回に続き、CGシミュレーションを行ったわけですが、今回の検討内容はご覧の4つです。具体的には、・・・。

ただし、この発表では時間の都合上、C, Dについては結論のみ述べさせていただきます。

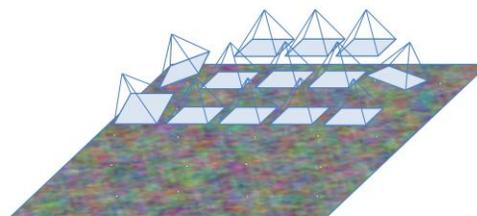
C, Dの詳細は恐縮ですが、講演論文集をご覧いただければ幸いです。

## CGシミュレーションの基本条件



対象領域

- 約200 m四方の水平面状
- 起伏(勾配が平均0, 標準偏差0.475の正規分布に従う)をつけた場合も
- ランダムなテクスチャを貼りつけ



撮影(レンダリング)

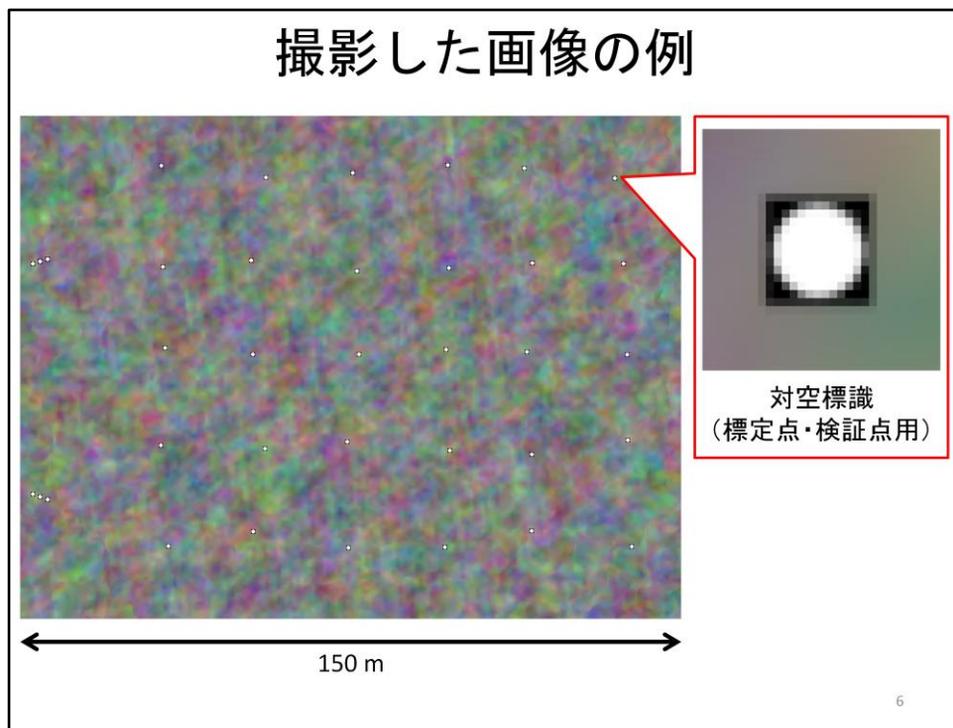
- カメラ: 歪みのないピンホールカメラ (f = 1333画素)の場合 & Phantom 4 相当の歪みを付与した場合
- 撮影高度: 100 m
- 解像度: 2000 × 1500画素(少なめ)
- 鉛直下向き撮影の重複率: 縦横80% (0 - 8枚の斜め撮影を導入)

5

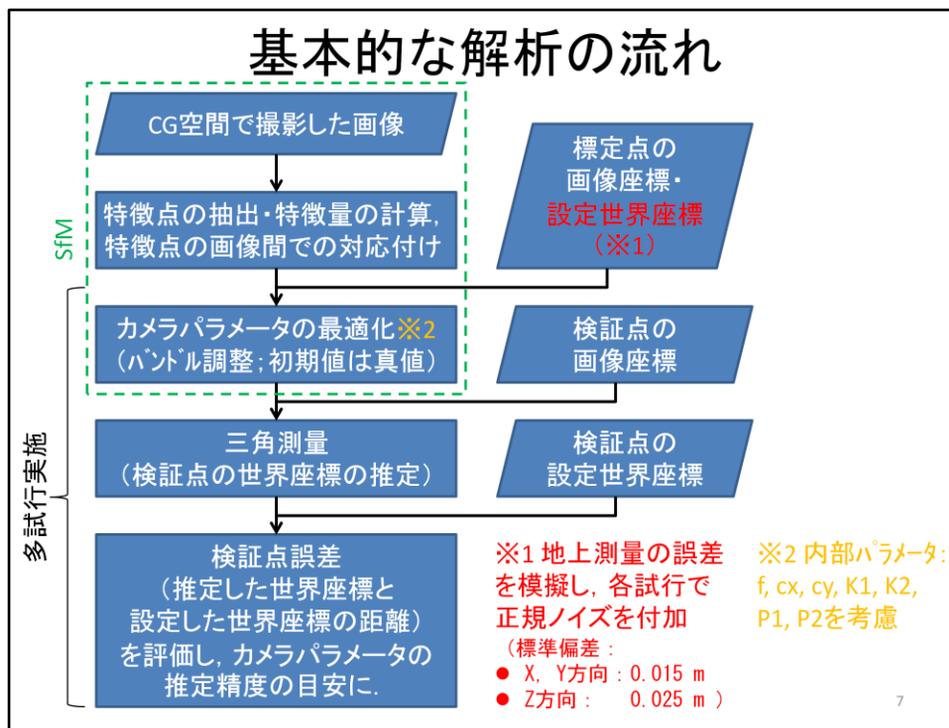
今回のCGシミュレーションの基本条件を示します。

対象領域は・・・

撮影については・・・



こちらは撮影した画像の例になります。  
小さい粒々は対空標識で、標定点・検証点として使うために置いたものです。

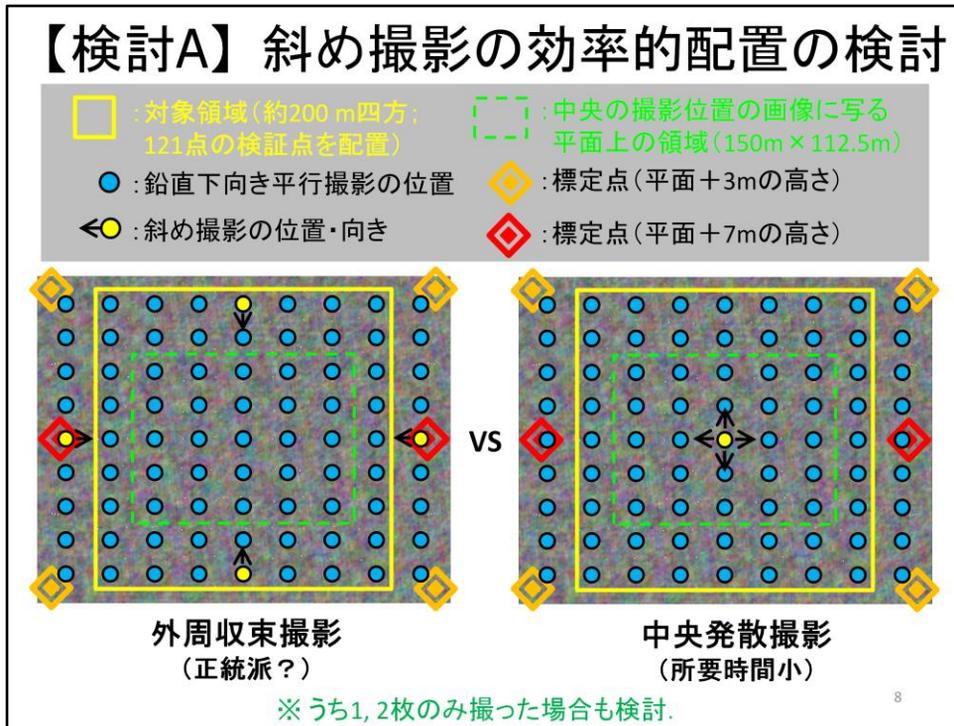


こちらが解析の流れです。

まずはSfMによってカメラパラメータを推定します。この際、標定点の世界座標には、地上測量の誤差を模擬して、各試行で異なる正規ノイズを付加します。

次に、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距離つまり検証点誤差を評価して、カメラパラメータ推定精度の目安とします。

このような誤差評価を多数回実施し、平均的な精度を議論します。



それでは検討Aの説明に入ります。

図中の黄色い枠が対象領域、青い●が鉛直下向き平行撮影の撮影位置、黄色い●と矢印が、斜め撮影の位置と向きを示しています。

検討Aは、斜め撮影の効率的な組み込み方の検討ということで、外側4点から内向きに撮る「外周収束撮影」と、中心部のほぼ同じ位置から外向き4方向に撮る「中央発散撮影」の2通りを試しました。中央発散撮影の方が飛行時間は少なくて済みます。またそれぞれについて、斜め撮影を4枚ではなく、うち1, 2枚のみを撮った場合についても検討しました。

## 【検討A】 検証点誤差RMS (121検証点×100試行) の評価例

●: 外周収束撮影 ●: 中央発散撮影

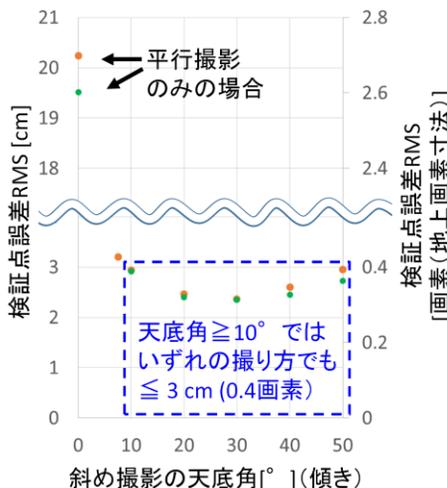


図. 斜め撮影4枚, 起伏有り, レンズ歪みなし, テクスチャ1の場合の結果.

表. 起伏有り, レンズ歪み有り, テクスチャ1, 斜め撮影の天底角 $30^\circ$ の場合の結果例.

| 斜め撮影 |      |               | 合計撮影枚数 | 検証点誤差RMS |          |
|------|------|---------------|--------|----------|----------|
| 枚数   | 撮影方法 | 天底角 $[\circ]$ |        | cm単位     | 地上画素寸法単位 |
| 4    | 中央   | 30            | 85     | 2.74     | 0.37     |
| 2    | 発散   | 30            | 85     | 3.14     | 0.42     |
| 1    | 撮影   | 30            | 85     | 3.41     | 0.45     |
| 4    | 外周   | 30            | 81     | 2.83     | 0.38     |
| 2    | 収束   | 30            | 81     | 3.07     | 0.41     |
| 1    | 撮影   | 30            | 81     | 3.12     | 0.42     |

いずれの撮り方でも4枚の時に最小だが、2枚・1枚でも、 $< 3.5 \text{ cm}$  (0.5画素)

それでは結果の例として、検証点誤差の121検証点×100試行に関するRMSの評価例を2つ示します。

左の図は、...の場合における、検証点誤差のRMSの評価結果です。縦軸の検証点誤差RMSは、cmと地上画素寸法の2つの単位で示しています。横軸は、斜め撮影の天底角つまり傾きで、 $0^\circ$  は平行撮影のみの場合に相当します。

この図から、天底角が $10^\circ$  以上の場合、外周収束・中央発散のいずれの撮り方でも、検証点誤差RMSが3 cm以下、地上画素寸法にして0.4画素以下の高精度が得られています。

2つの撮り方の間に顕著な精度差は認められません。

一方、右の表は、...の場合における結果例です。

検証点誤差RMSは、斜め撮影4枚の時に最も小さいですが、2枚でも1枚でも、3.5 cm未満、地上画素寸法にして0.5画素未満の、高い精度が得られていることが分かります。

## 【検討A】 結果のまとめ

斜め撮影の天底角が $10\sim 50^\circ$ の全192ケースについて,

- 斜め撮影の数(1-4枚)・配置
- 地形の起伏やレンズ歪みの有無
- テクスチャ(4種)

によらず, 検証点誤差RMSは地上画素寸法単位で**0.66画素未満**.



今回の条件の範囲では,

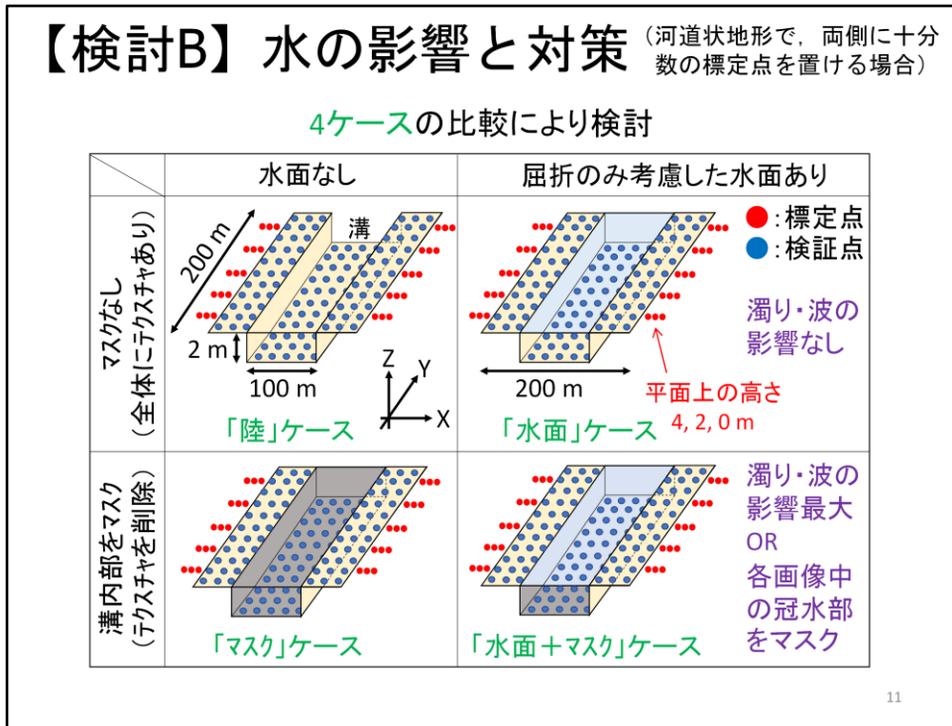
- ✓ 平行撮影81枚に対し1枚程度の割合でも, 斜め撮影の存在により高精度なSfMが可能に.
- ✓ 撮影位置の影響は小.

斜め画像の役割が, 全画像共通の内部パラメータの推定精度向上であることから考えても現実の斜め撮影の位置・向きは, 対象領域に占める位置よりも, 周囲の画像との**マッチング性を基準に選ぶべきか**  
(例: 揺れる植生や水面を避けて撮る).

10

検討Aで得られた結果を総合しますと, ……0.66画素未満でした。  
従って, 今回の条件の範囲では, ご覧の2つのことが言えます。すなわち, ……。

よって, 現実における斜め撮影の位置は, 対象領域に占める位置よりも, 周囲の画像とのマッチング性を基準に選ぶべきかと思われます。



次に、検討Bの説明に入ります。

検討Bでは、河道状地形で、両側に十分数の標定点を置ける場合について、水の影響と対策を、ご覧の4ケースの比較により検討しました。

具体的には、

対象領域の中央に幅100 m・深さ2 mの溝を掘っただけの「陸」ケース、

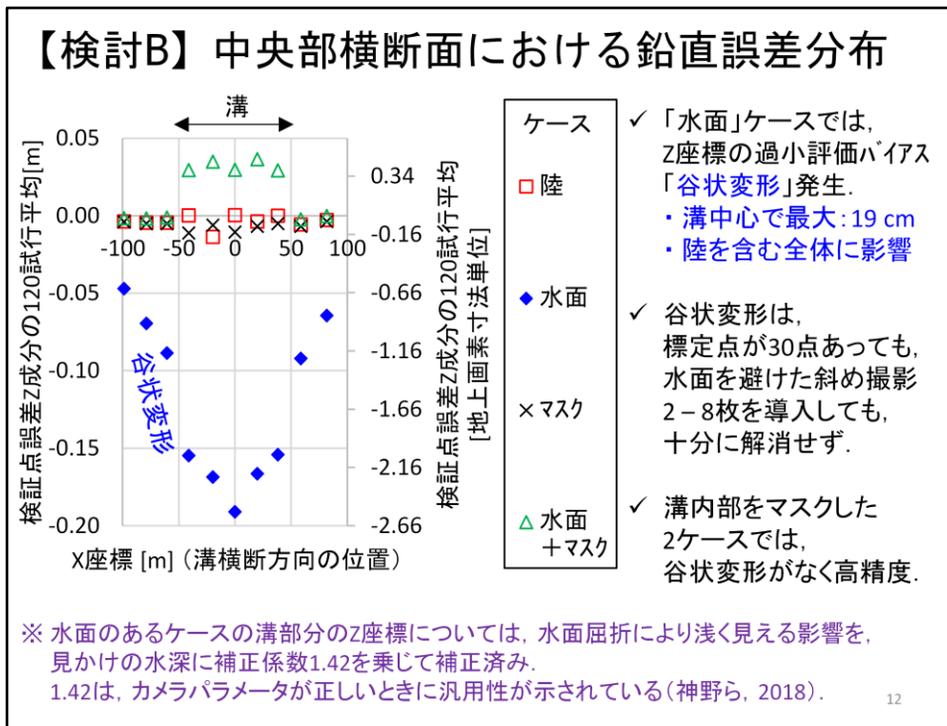
溝の底面上2 mに屈折のみを考慮した水面を張った「水面」ケース、

溝の内部のテクスチャを消した「マスク」ケース、

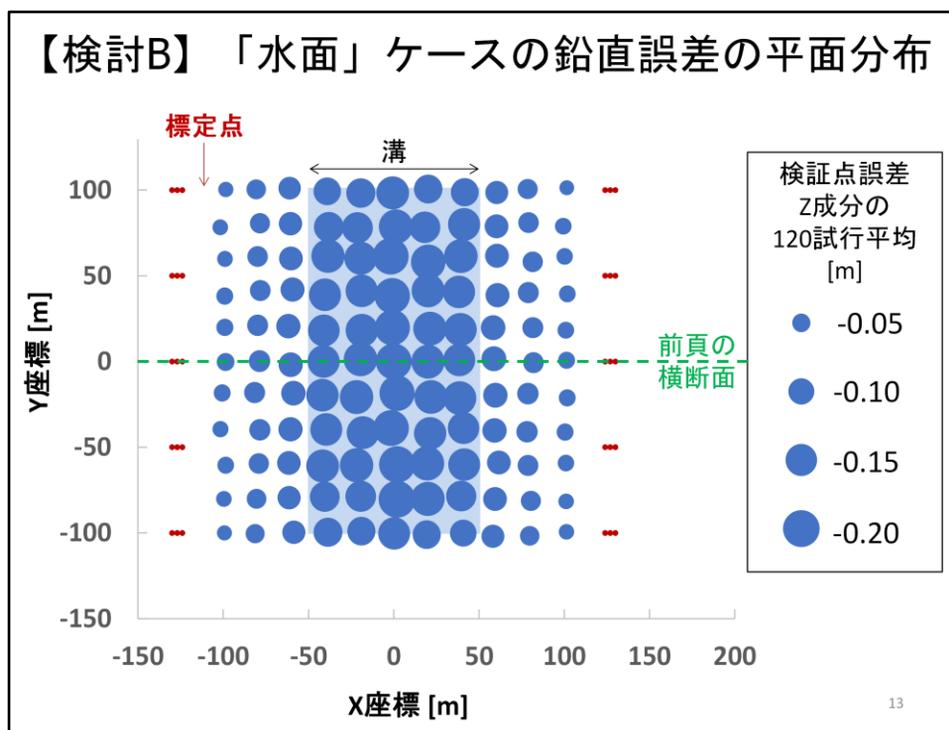
それに水面を張った「水面+マスク」ケース、です。

「水面」ケースは、濁り・波の影響が全くなく、水底のテクスチャが最も明瞭に写る状況を表しています。

「水面+マスク」ケースはその対極で、濁り・波の影響により、もしくは各画像中の冠水部をマスクする対策により、水底が全く見えない状況を表しています。



この図は結果の例で、中央部横断面における鉛直誤差の分布を示しています。具体的に、縦軸は、検証点誤差のZ成分の、120試行に関する平均です。まず、「水面」ケースでは、・・・  
 ただしこの図で、水面のあるケースの溝部分のZ座標については・・・



こちらは、「水面」ケースの鉛直誤差を、平面分布つまり上から見た図として示したものです。

緑の点線が前頁の中央部横断面となります。

この図から、谷状変形の形状が前頁の横断面に限らず、上流から下流まで「谷状」である傾向がわかります。

## 【検討B】 結論

1. 濁り・波が小さく, 水底が明瞭に見える状況では, 冠水部を中心とする非線形系統誤差「谷状変形」が発生.
2. 谷状変形は, 水面における光の屈折の影響を受けた水底上のタイポイントに起因する, カメラパラメータの推定誤差による.
3. SfM段階では画像上の冠水部をマスクする(使わない)対策が有効で, それにより, 正しいカメラパラメータを前提とした屈折補正係数1.42が使える (ただし基本的条件として, 十分な撮影高度と重複率の確保は必要).



元の画像



冠水部をマスクした画像

14

検討Bに関する結論を示します。

...

## 検討C, Dの結論

C) 水の影響と対策(対象が河道 or 海岸で, 標定点を片側にしか置けない場合)

- ✓ 陸上に2列の標定点列を設け, その間隔を十分大きくとる
- ✓ SfM段階では冠水部をマスクすること, 高精度のSfMが可能.

D) 撮影位置の高精度測位が可能なUAV(例: DJI Phantom 4 RTK)を用いた場合の標定点の完全な省略可能性

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ゼロにできる.

### 今後の課題:

- 今回得た結論の更なる一般性検討・具体化 → 実務で使いやすい知見へ
- 谷状変形の数学的な発生機構の解明

15

最後に、詳細を発表できなかった検討C, Dの結論を示します。

検討Cについては、・・・

検討Dについては、・・・

以上で発表を終わります。