

SfM写真測量による マッピング

内山庄一郎

国立研究開発法人 防災科学技術研究所

uchiyama@bosai.go.jp

項目

スライド中のページ番号は「必携ドローン活用ガイド（内山、2018）」

1. SfM写真測量の基礎

- SfM解析のワークフロー

2. SfM解析計画基礎

- 分解能を決めるには (pp.74-86)

3. SfM計測事例

- 既存地形データとの分解能の差異
- GCPの配置と精度への影響

対象物の写真撮影
&
SfM解析実習

4. SfM技術Tips

- 精度を向上させるための知恵と工夫

5. SfMとUAVの活用

- 災害対応

1. SfM写真測量の基礎

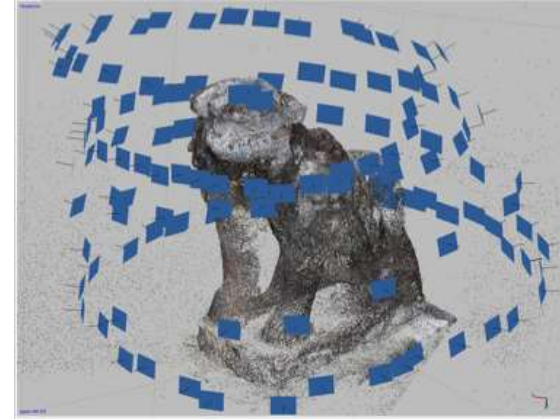
SfM多視点ステレオ写真測量

SfMは高度な推定技術：内部標定要素、外部標定要素

SfM-MVS Photogrammetry: SfM多視点ステレオ写真測量

❖ Structure from Motion (SfM)

- 撮影位置と姿勢：**外部標定要素**の推定
- レンズ歪み：**内部標定要素**の推定
- 画像特徴点の三次元分布を推定（上の図）：写真測量



❖ Multi-view Stereo (MVS)

- SfMで推定した画像特徴点と複数のステレオペア画像から高密度点群モデルを構築（下の図）



❖ 特徴

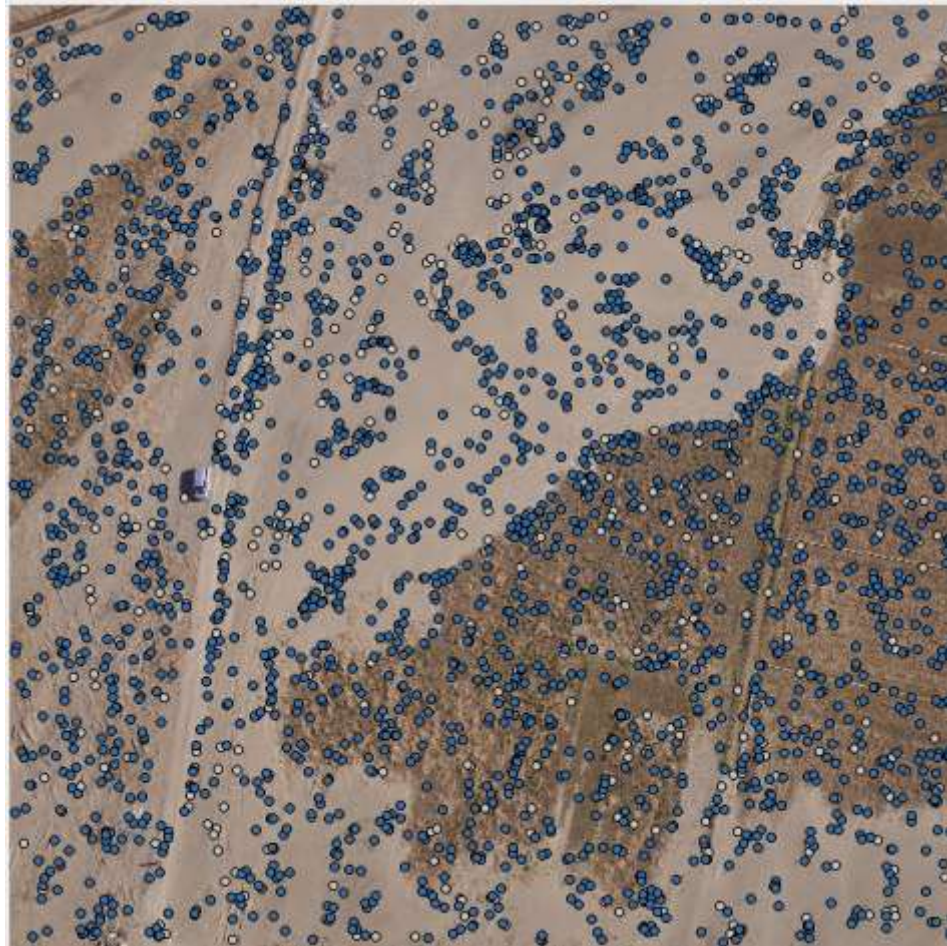
- 伝統的な「写真測量」がベースの技術
- コンピュータビジョン研究で発展、処理自動化
- ノンメトリックカメラを使用した「写真測量」が可能
- レーザー測量に比して、初期プロダクト生成までの時間が短い（迅速性）
- 写真測量の精度を求めなければ、伝統的な写真測量に比して習得・操作が容易
- 精度を必要とする計測の場合、難易度は高い

✓ 外部標定要素の精度の低さ、ノンメトリックカメラを要因とする各種誤差

✓ これらの理解と把握、適切な対策が要求される

SfM解析フロー：① SfM処理

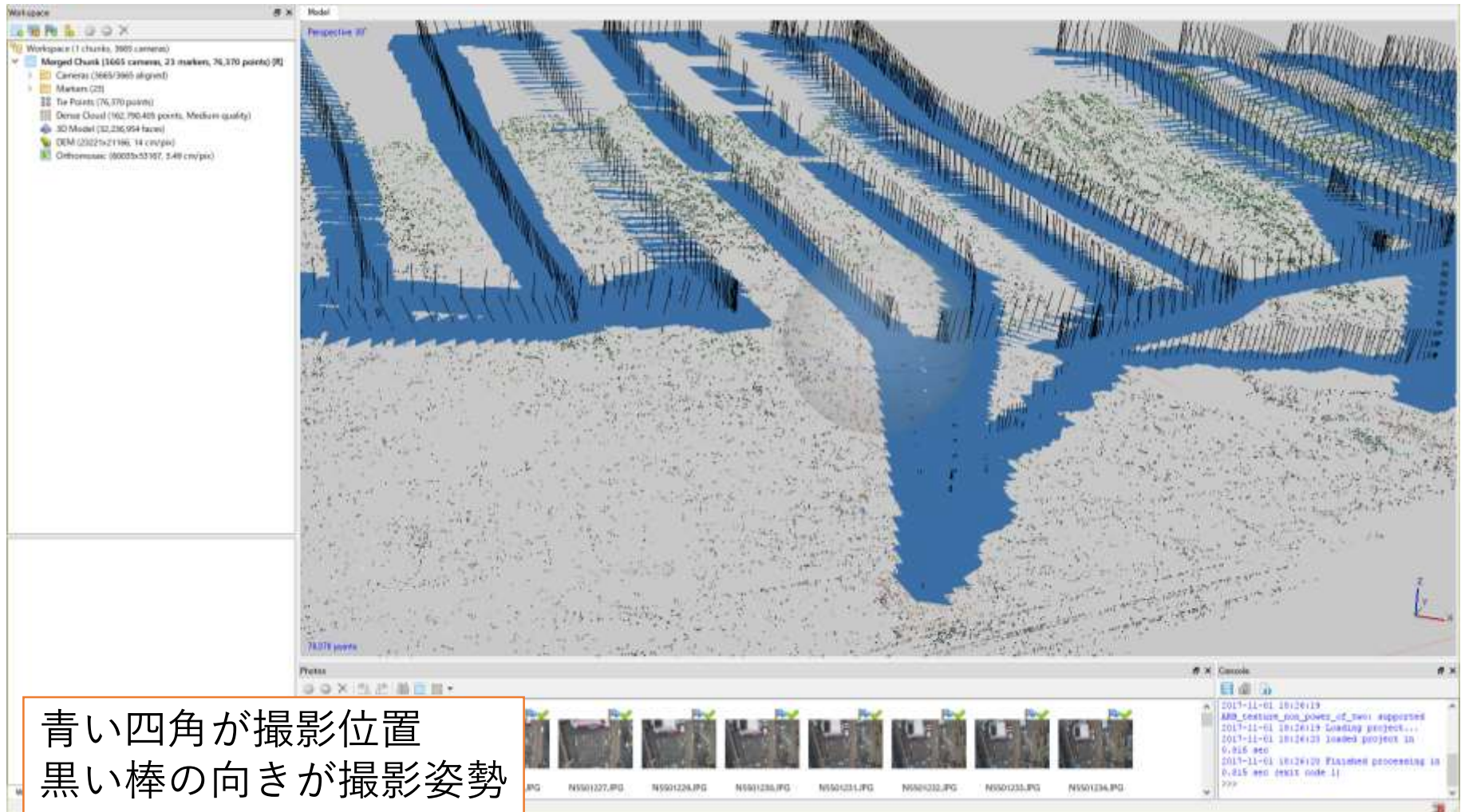
画像特徴点の抽出、タイポイントの決定



グレーの●が画像特徴点
青い●が画像特徴点のうち、タイポイントとして扱われている点

SfM解析フロー：① SfM処理

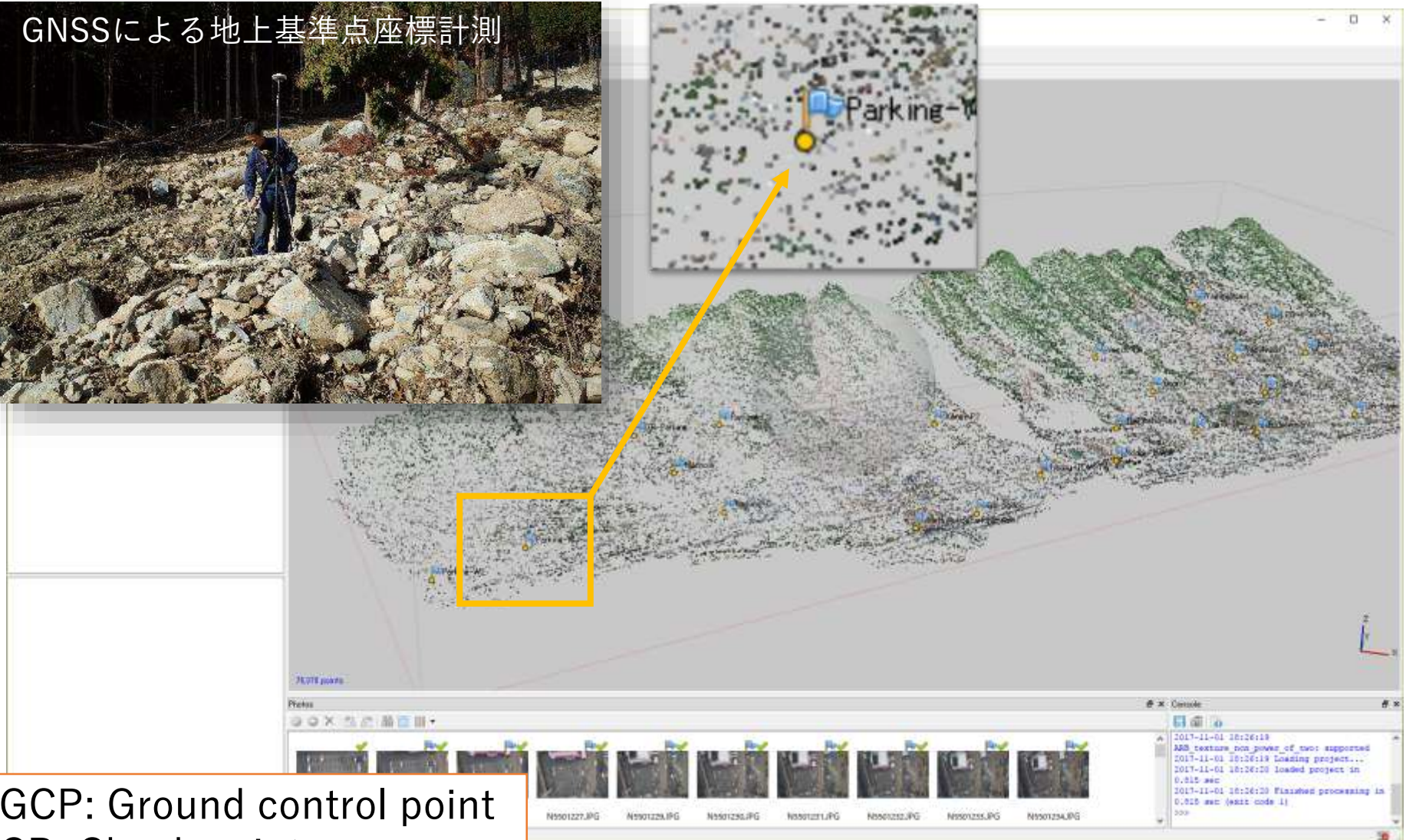
外部標定要素（撮影位置と姿勢）、内部標定要素（レンズ歪みパラメータ）の推定



青い四角が撮影位置
黒い棒の向きが撮影姿勢

SfM解析フロー：② 地上基準点（GCP）の設置

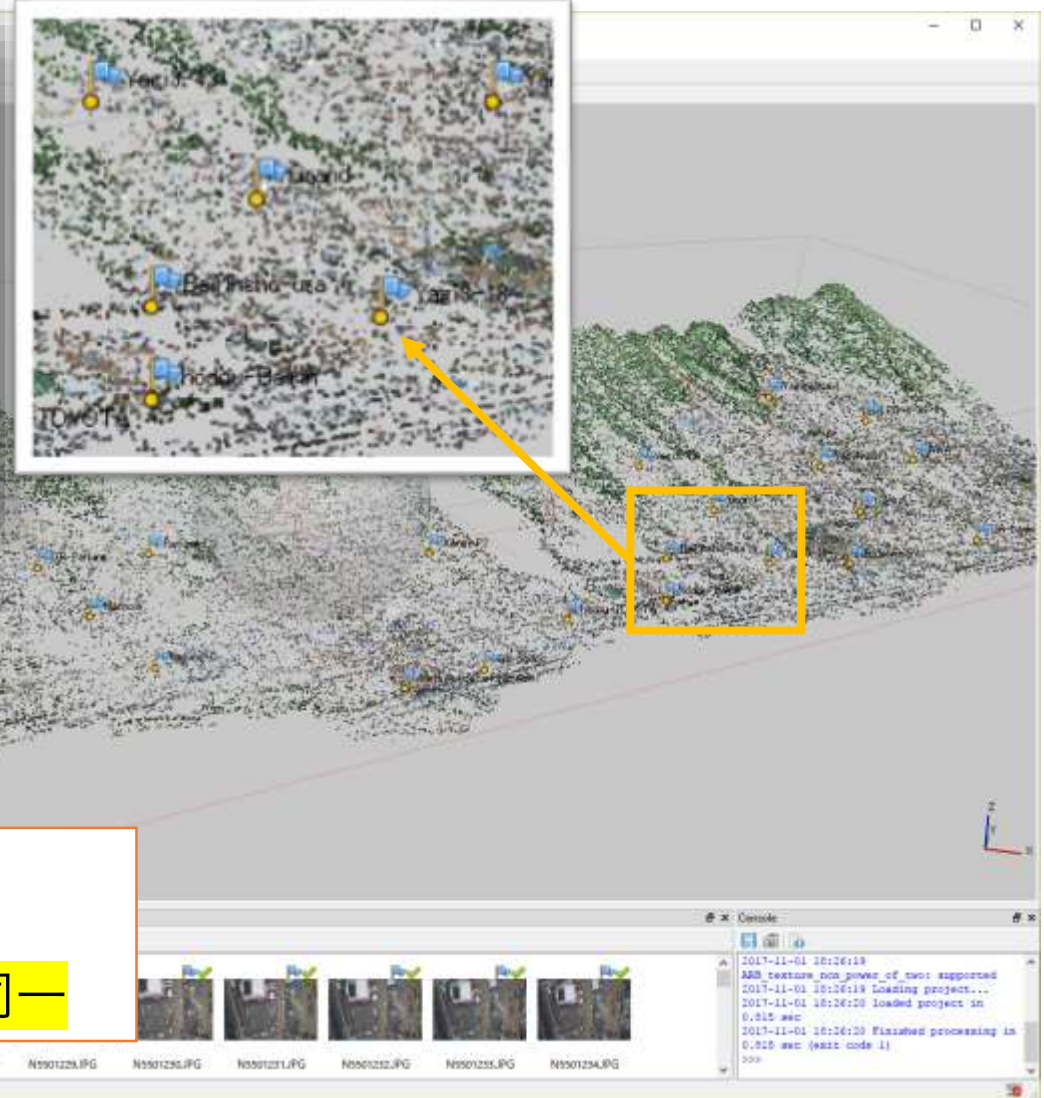
外部標定要素・内部標定要素の推定精度向上、三次元モデルのジオリファレンス



GCP: Ground control point
CP: Check point

SfM解析フロー：② 精度検証点（CP）の設置

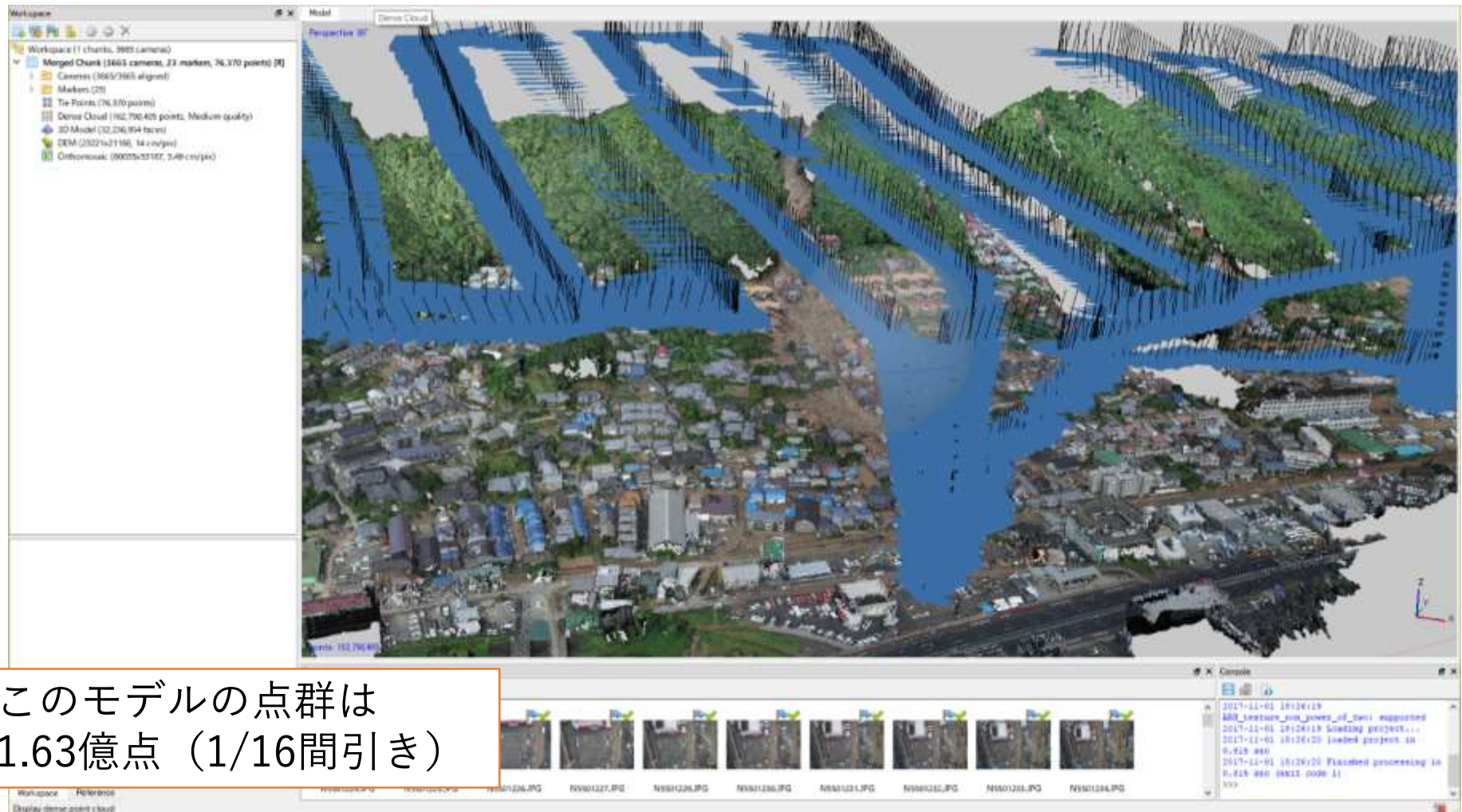
三次元モデルの精度検証に使用する地点。GCPを使用した精度検証は避けること



GCP: Ground control point
 CP: Check point
 座標計測、地点の設置の**手順は同一**

SfM解析フロー：③ 高密度点群の計算 (MVS)

全写真の全画素（または1/2, 1/16, 1/64, 1/256）に対する位置座標の計算



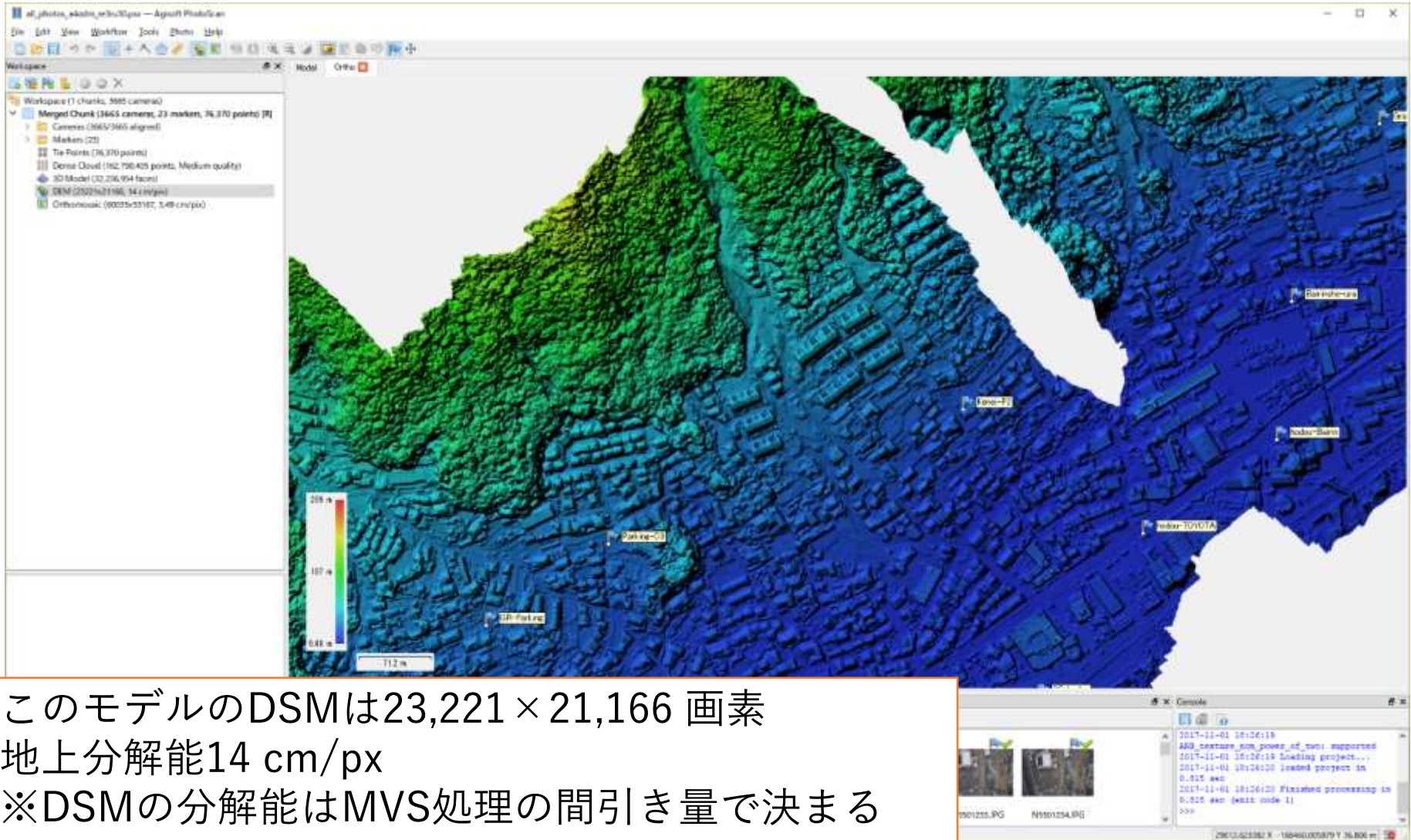
SfM解析フロー：③ 高密度点群の拡大表示

写真の画素数を1/16 (Medium) に間引いて計算した例



SfM解析フロー：④ DSMの作成と出力

地表面標高モデル (DSM: Digital Surface model)



このモデルのDSMは23,221 × 21,166 画素
 地上分解能14 cm/px
 ※DSMの分解能はMVS処理の間引き量で決まる

SfM解析フロー：⑤ オルソモザイク画像の作成と出力

オルソモザイク画像（オルソ画像）＝正射投影画像、地図と重なる画像、写真地図



このモデルのオルソモザイク画像は
 32億画素（60,035×53,167画素）
 地上分解能 3.49 cm/px
 ※オルソ画像は常に最大分解能で出力される

SfM解析と精度検証

SfM解析 = 三次元地形モデルの作成

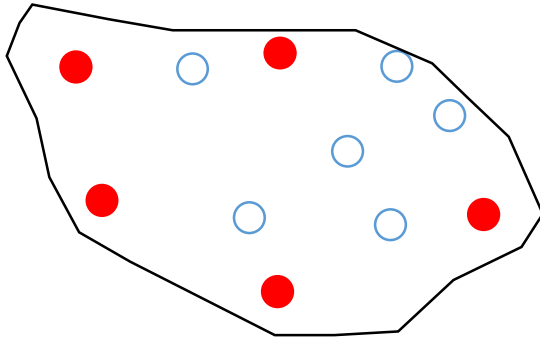
- 精度を劣化・不安定化させる要因

- 内部標定要素の推定 (レンズ歪み、約10パラメータ)
- 外部標定要素の推定 (撮影位置のX,Y,Z座標、カメラの向き3軸)
 - 対策：既知の高精度な内部標定要素パラメータの使用
 - 対策：高精度に計測・設置された地上基準点の使用 (●)

b1	-11.800820	f	4578.196040
b2	1.815484	cx	38.748427
p1	-0.000649	cy	-26.914177
p2	0.000145	k1	-0.227553
		k2	0.128918
		k3	-0.027081

- DSMの三次元精度検証 (○)

例) 三次元RMSE: 3.08 cm



CP	Error (cm)			Total
	X	Y	Z	
12	0.96	-0.08	0.49	1.08
dia	0.57	3.65	1.35	3.94
dia2	0.40	-0.38	0.03	0.56
g2	-1.01	-4.98	1.25	5.23
line-u	-0.32	2.31	0.75	2.45
p	-1.86	-1.77	-0.22	2.58
RMSE	1.00	2.79	0.84	3.08

地上基準点の高精度化

1. 空から明瞭に見えるターゲットの使用
 - 大きく、明るすぎず、周囲とのコントラストが高い
2. 設置地点数を可能な限り増やす
 - 理想は20地点（GCP/CP各10地点）以上
 - 解析時に使えない点も生じること
3. 品質の良い写真の撮影
 - ブレたり、写っていなかったり、読み取れなかったりしたら、すべての努力は水の泡
4. 測量精度の向上
 - 光波測距儀（1 mm）、搬送波測位GNSS（1 cm）
 - 内山（2018）[RTKLIBによる解析](#), JGU夏の学校2018 in 北海道.
5. ± 0.1 画素の精度で配置（SfMソフトウェア）
 - すべて手動で配置する（「自動配置」で作業をやめない）

撮影設定

条件：内部標定要素（ f , c_x , c_y , $k...$ ）が変化しないこと

- 絞り（ f 値）固定
- フォーカス固定（マニュアルフォーカス）
- 手ぶれ補正機構は使用しない
- RAW形式
- ホワイトバランスは自由（RAWで撮影する場合）
- ISOはできるだけ低く（分解能低下、ノイズ増加）

グラウンドスマアが生じないシャッタースピード

- 大画素、低空飛行時は配慮が必要
- 詳細は技術コラム(7)参照

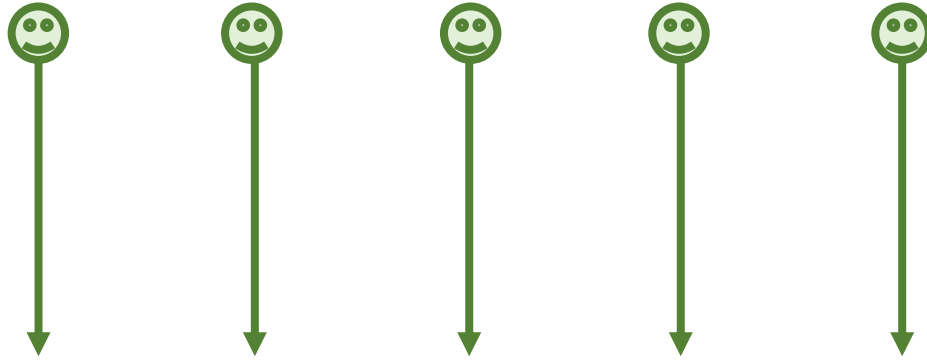
撮影の方法：基本

- カメラの位置を移動させながら撮影する
 - Structure from Motion
- 撮影範囲のオーバーラップ（重複）は80 %
 1. UAVなら垂直直下写真（空中写真）
 2. 物体なら平行移動や螺旋移動



撮影の方法：課題

垂直直下写真のみでSfM解析を行うと、特定の問題が生じる



1) ドーミングと2) 内部標定要素の
不正確さによって生成された地形面

実際の地形面

- 1) **ドーミング** (程度の多少はあれ、必ず生じる)
 - 写真セットを垂直直下写真のみで構成すると生じる
- 2) **段差状**の地形面
 - 内部標定要素の推定精度が低いと生じる

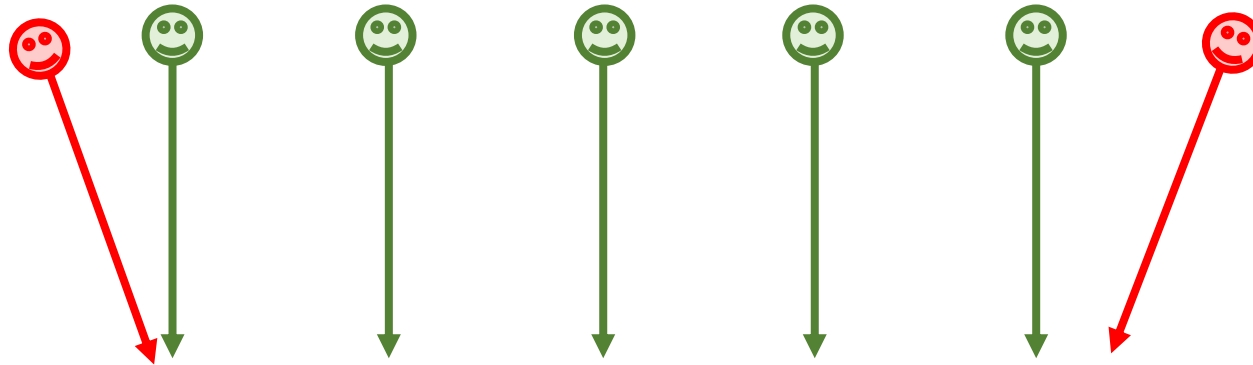
1) ドーミングによっ
て生成された地形面

歪みの大きさ

- 数センチメートルから、時に数メートルに達する
- 二時期の差分 (地形変化の計測等) を計算した時に顕著に可視化される

撮影の方法：ドーミング対策

斜め写真を追加する（オフナディア角は20度程度）



斜め写真を追加！

実際の地形面



1) ドーミングが軽減された地形面

- 斜め写真は全域に配置しなくてもよい
- オフナディア角を大きくしない
- 地平線が映るような斜め写真は避ける

参考：SfM多視点ステレオ写真測量と地上レーザー測量の違い



	SfM多視点ステレオ写真測量	地上レーザー測量
原理	写真測量（空中三角測量）	レーザーによる距離計測
ソース	写真（多視点）、既存の空中写真、ビデオ映像等	照射光の物体からの後方散乱光
計測可能	複数の写真に写っている物体 動く物体（要同期撮影）	レーザー光を反射する物体 透明、弱いテクスチャ、暗闇も可
計測不可	写真撮影ができない暗い環境、写っていない物体 特徴点が得られない物体 （過剰露光、水面、透明、弱いテクスチャ等）	動く物体 死角：レーザーが到達しない地形の影等 水面、霧等、レーザーを吸収する物質
高精度化	地上基準点の設置・位置計測	同左、レジストレーションマーカ―設置
対象範囲	撮影プラットフォームに依存：UAV 25～100 ha	作業時間・設置場所に依存：10ha/1 scan
計測時間	一瞬（カメラリグを使用） 飛行時間（垂直写真撮影）	面的な走査に要する時間
解析時間	簡易：数分～数時間 精密：数時間～100時間超	点群の編集に要する時間
分解能	中距離（数百m）で数センチメートル	同左
精度	数cm～数十cm、ただし地上基準点等に依存	同左
総合難易度	高：内部・外部標定要素推定の高精度化ノウハウ	平：比較的精度のばらつきは少ない
導入コスト	100万円未満（空撮機材含む）	数百万円～
観測コスト	ほぼゼロ（旅費等を除く）	同左
機動性	気象条件がよければ即計測可能	同左
可搬性	輸送の可否、梱包数、重量による	同左
成果物	オルソモザイク画像、点群、DSM（地表面高）	点群、DEM（地形面高）、DSM
データ量	大：写真、解析途中生成データ、成果物データ	中：観測データ、成果物データ

2. SfM解析計画基礎

分解能を決めるには (pp.74-86)

映像・画像判読の基礎 (pp.74-75)

映像や写真はもっとも身近な情報源の一つ

- 眺めるだけなら、専門的な知識も訓練も不要
- ✓ 基本的な画像判読の知識があれば、読み取れる情報の正確性や内容の信頼性は大きく向上する

ポイント

- **分解能**：対象物までの距離（飛行高度）、カメラ画素数およびレンズ焦点距離により変化する。
- **識別レベル**：ジョンソン基準（1958）による5段階の識別レベルにより、画像中に見えるものと見えないものを区別することができる。
- 識別レベルを考える時は、ターゲットの実サイズを分解能で除してターゲットが何画素に見えるのかを求めればよい。

John Johnson (1958) Analysis of image forming systems, in Image Intensifier Symposium, AD 220160, pp. 244–273.

映像・画像判読の基礎：識別レベル (p.75)

・ジョンソン基準 (1958) による識別レベル

1. 検知不可 (物体を発見することができない) : -
2. **検知** (物体が存在していることが分かる) : **2画素 ± 0.5画素**
3. 向き (物体の向きが分かる) : 2.8画素 ± 0.7画素
4. **認識** (物体が何だかわかる) : **8.0画素 ± 1.6画素**
5. **識別** (物体の個々を区別できる) : **12.8画素 ± 3.0画素**

※ターゲットとなる物体とその背景とのコントラストが大きいことを条件とする

映像・画像判読の基礎：識別レベル (p.75)



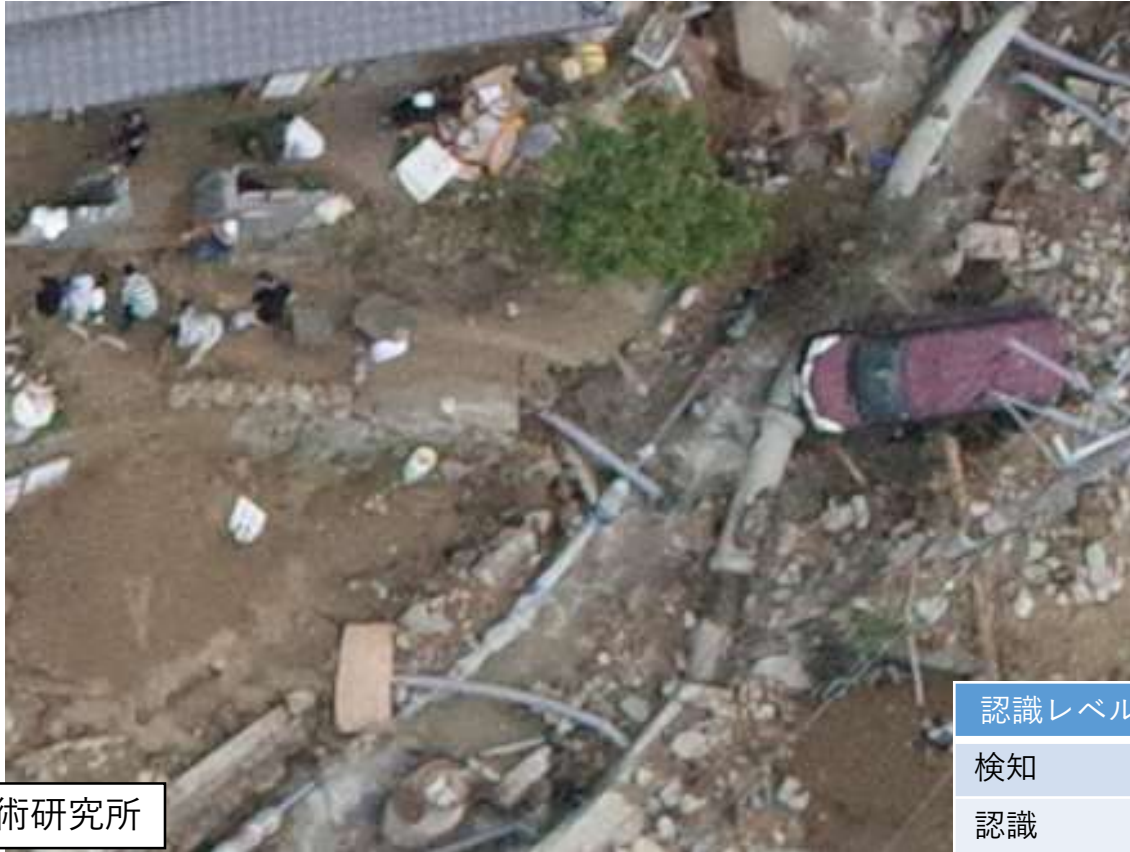
オルソ画像作成：防災科学技術研究所
空中写真：国土地理院撮影

認識レベル	必要画素
検知	2画素±0.5画素
認識	8.0画素±1.6画素
識別	12.8画素±3.0画素

分解能16.5 cmのオルソ画像における識別レベルの例

上から見た人間 (50 cm×30 cm: 3.0画素×1.8画素) に着目すると、「検知」と「認識」の中間レベル。周囲の状況や服装の想定を踏まえれば、人間であることを「認識」できる。しかし、もしこの中に知り合いがいたとしても、個人まで「識別」することはできない。

映像・画像判読の基礎：識別レベル (p.76)



認識レベル	必要画素
検知	2画素±0.5画素
認識	8.0画素±1.6画素
識別	12.8画素±3.0画素

分解能5.0 cmのオルソ画像における識別レベルの例

この分解能では、上から見た人間 (50 cm×30 cm: 10画素×6画素) は「認識」に相当する。もしターゲットとなる人物の服の特徴が分かっていたら「識別」も可能であろう。このクラスの分解能では、画面から得られる情報量が大幅に増加する。

映像・画像判読の基礎：識別レベル (p.82)



認識レベル	必要画素
検知	2画素 ± 0.5画素
認識	8.0画素 ± 1.6画素
識別	12.8画素 ± 3.0画素

分解能3.3 cmの空中写真における識別レベルの例

350 mlペットボトル (6 cm × 15 cm: 1.8画素 × 4.5画素) は「検知」と「認識」の間だが、コントラストが低いため発見は難しい。しかし、事前の情報として「緑色のラベルの緑茶」という情報があれば、それらしい地点を示すことができる。このように、コントラストが低ければ識別レベルは下がる。しかし、動く物体や、種類や色、形などの事前情報があれば識別レベルは上がる。

3. SfM計測事例

既存地形データとの分解能の差異

GCPの配置と精度への影響

2013年11月伊豆大島の斜面崩壊地形

計測目的：

既存の数値地形データとUAV-SfM地形データの定性的な違いの検討

撮影日：

平成25（2013）年11月14日

対象地：

伊豆大島の斜面崩壊地形

対象範囲：約12 ha

使用カメラと撮影方法：

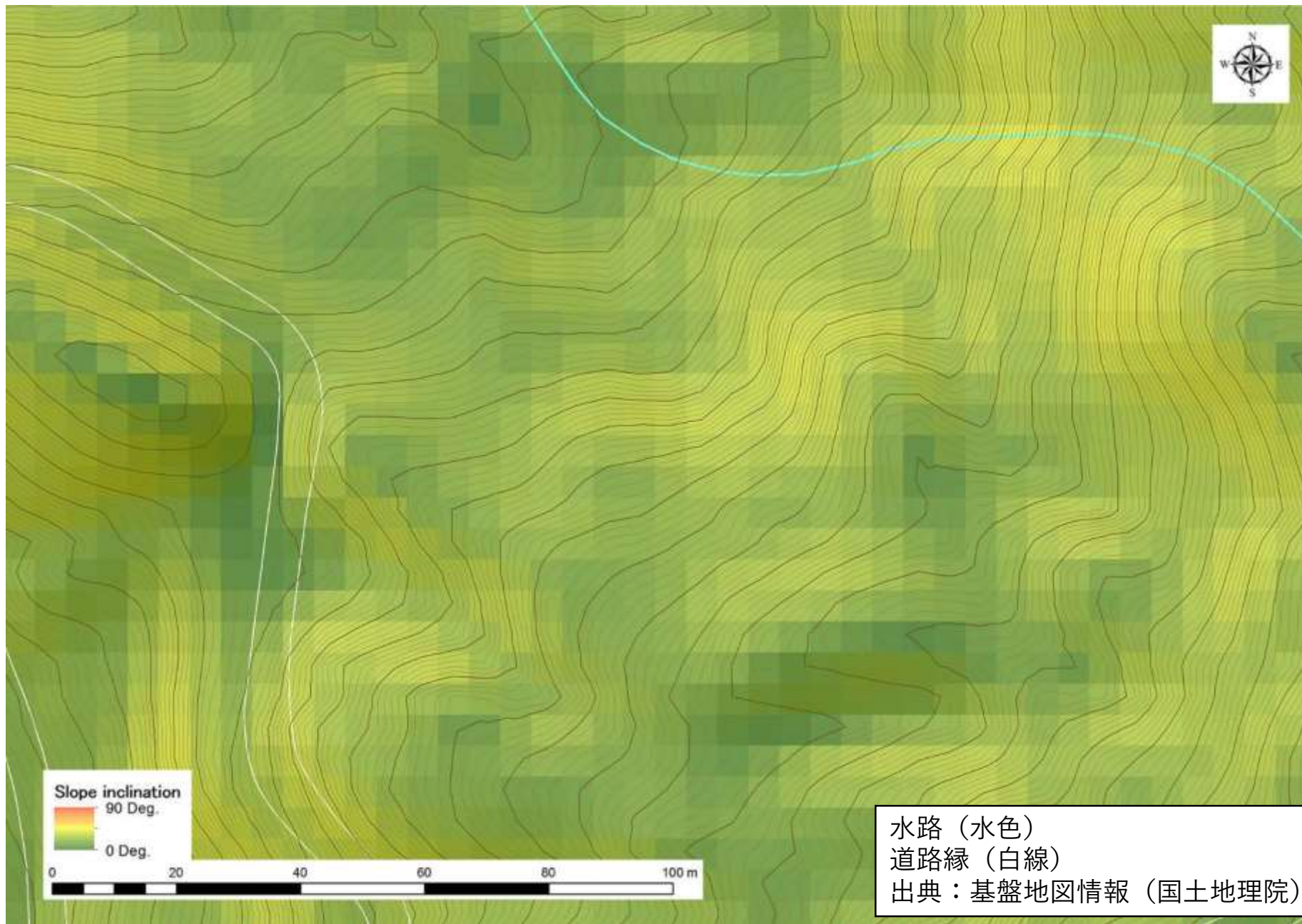
Ricoh GR (APS-C 16 Mpx CMOSセンサ、焦点距離18.3 mm)

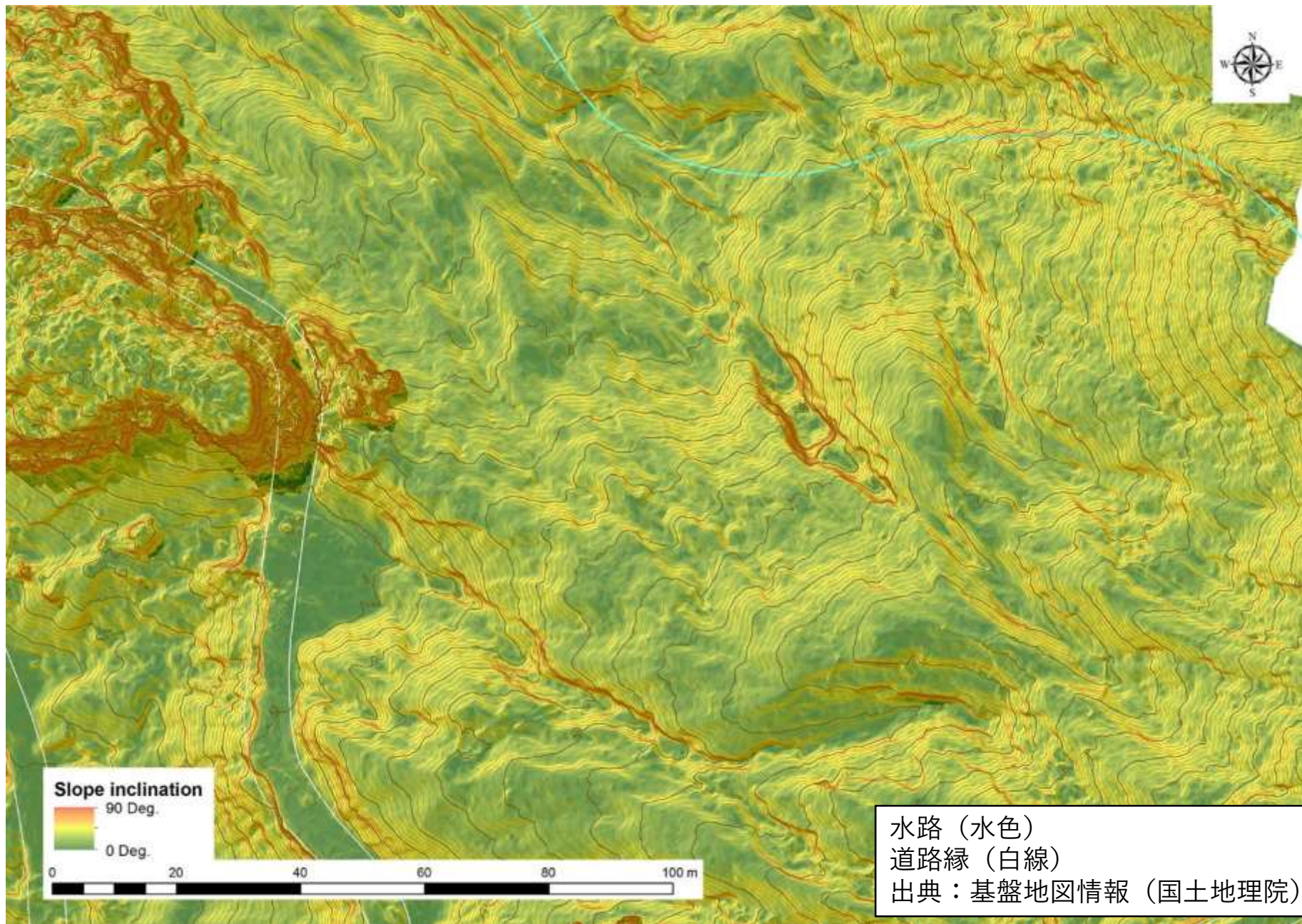
UAVにより対地高度50 mから合計578枚の垂直写真を撮影

結果：

1. DSM: 分解能 0.09 m
2. オルソモザイク画像：分解能 0.02 m

内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子 (2014) SfMを用いた3次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所報告. 81, 37-60.





2013年11月伊豆大島の斜面崩壊地形

既存地形データとUAV-SfM地形データの定性的な差異

UAV-SfMデータの特徴

1. 高分解能

- 既存の詳細な地形データ（5 m DEM）より高分解能
- UAV-SfMにより得られる成果はDSM（地表面数値モデル）であり、DTM（Digital Terrain model: 地形モデル）ではない

2. 低コスト・高機動

- 地上/航空レーザー測量に比して低コスト
- 持ち運びが可能な機材の場合、機動性も高い

➤精度は未検証

- この事例では精度を検証していない
- 高分解能 = 高精度ではない

2014年4月福島県西会津の斜面災害跡地

目的：

UAV-SfMの簡易的な精度検証

撮影日：

平成26（2014）年4月17日

対象地：

福島県（西会津方面）の斜面災害跡地（斜面長100 m×斜面幅30 m）

撮影範囲：約200 m×約100 m

使用カメラと撮影方法：**外部標定要素は無し**

Ricoh GR (APS-C 16 Mpx CMOSセンサ、焦点距離18.3 mm)

対地高度50 mと100 mから合計426枚の垂直写真を撮影

地上基準点と精度検証点：

トータルステーション (TS)で地上基準点と精度検証点の位置座標を測量

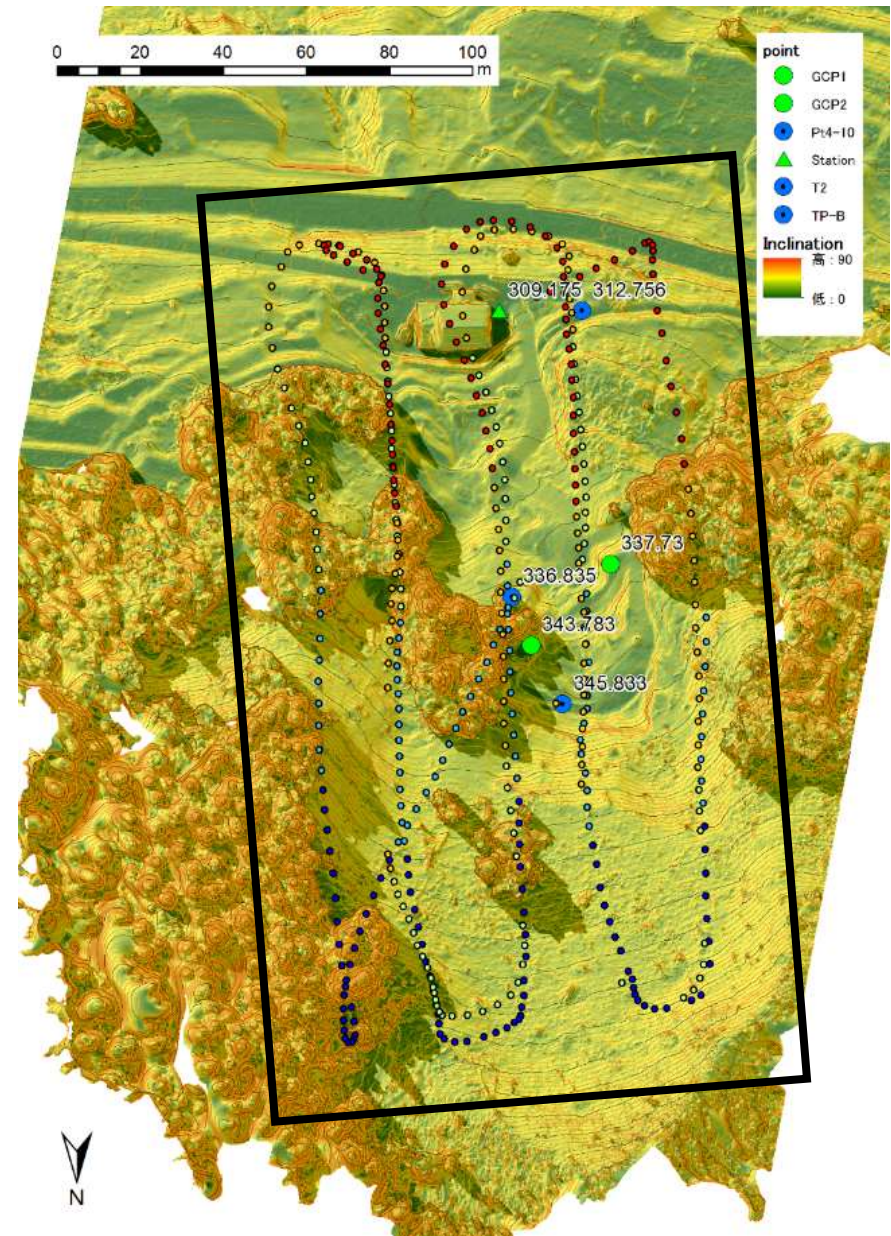
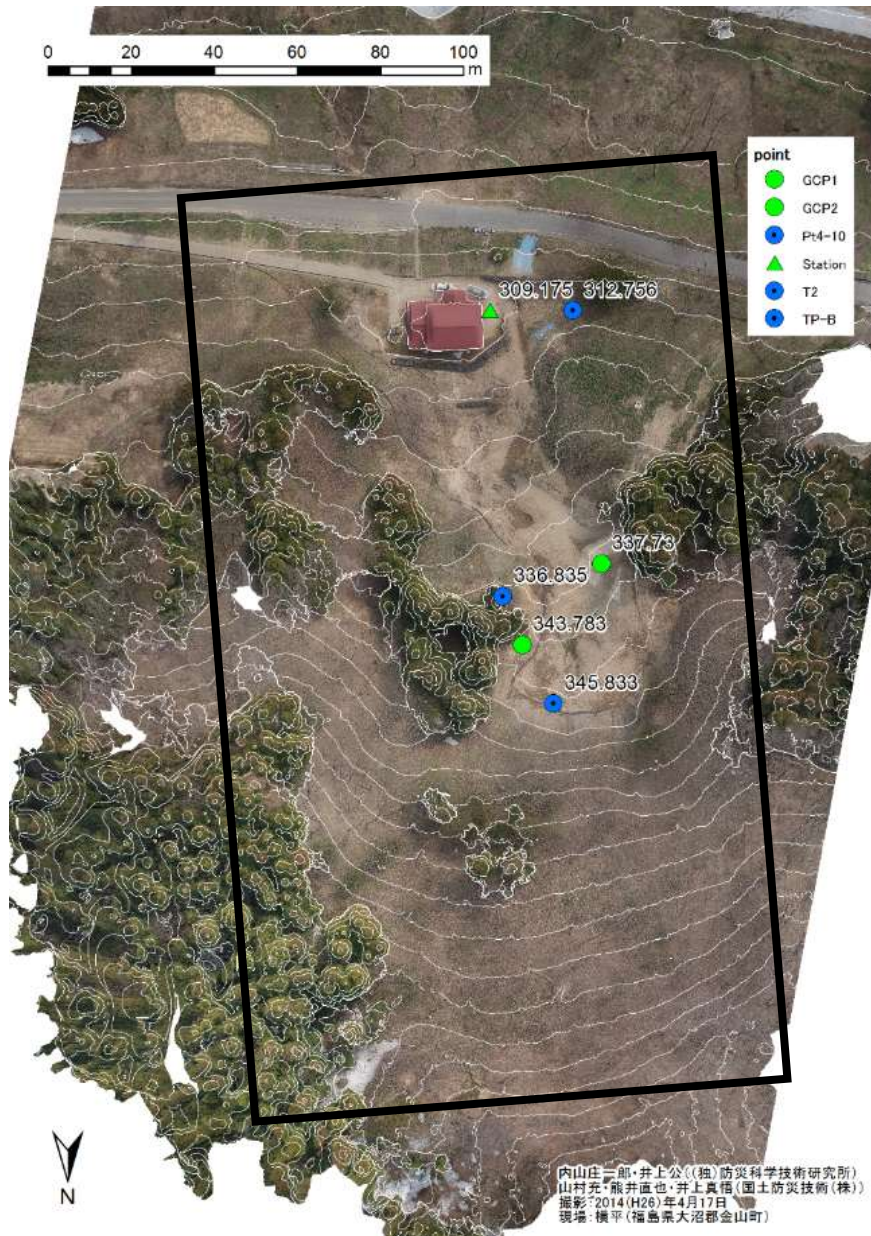
成果：

1. DSM: 分解能 0.01 m
2. オルソモザイク画像：分解能 0.02 m

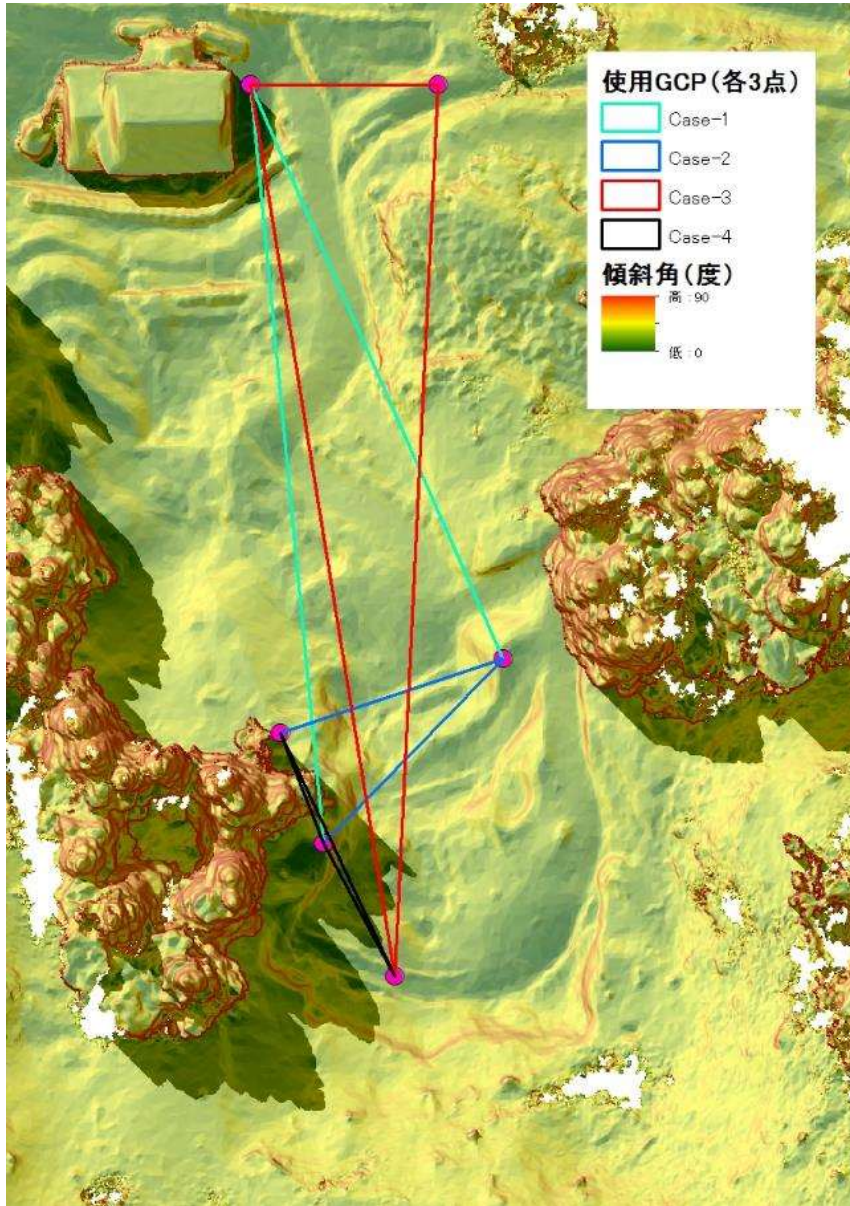
内山庄一郎・山村充・井上公・熊井直也 (2014) 小型UAVとSfMによる斜面変動地形の三次元モニタリング, 第53回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.40-41.

左：オルソモザイク画像 (分解能 0.01 m)

右：DSM (分解能 0.02 m)から求めた傾斜量・等高線図



GCP設置地点に対するDSM精度の変化



目的：

- 精度を下げるGCP配置の特徴
- 3地点のGCPで得られるDSMの精度
- ✓ 撮影範囲に立ち入れない場合の対応

基準データ：

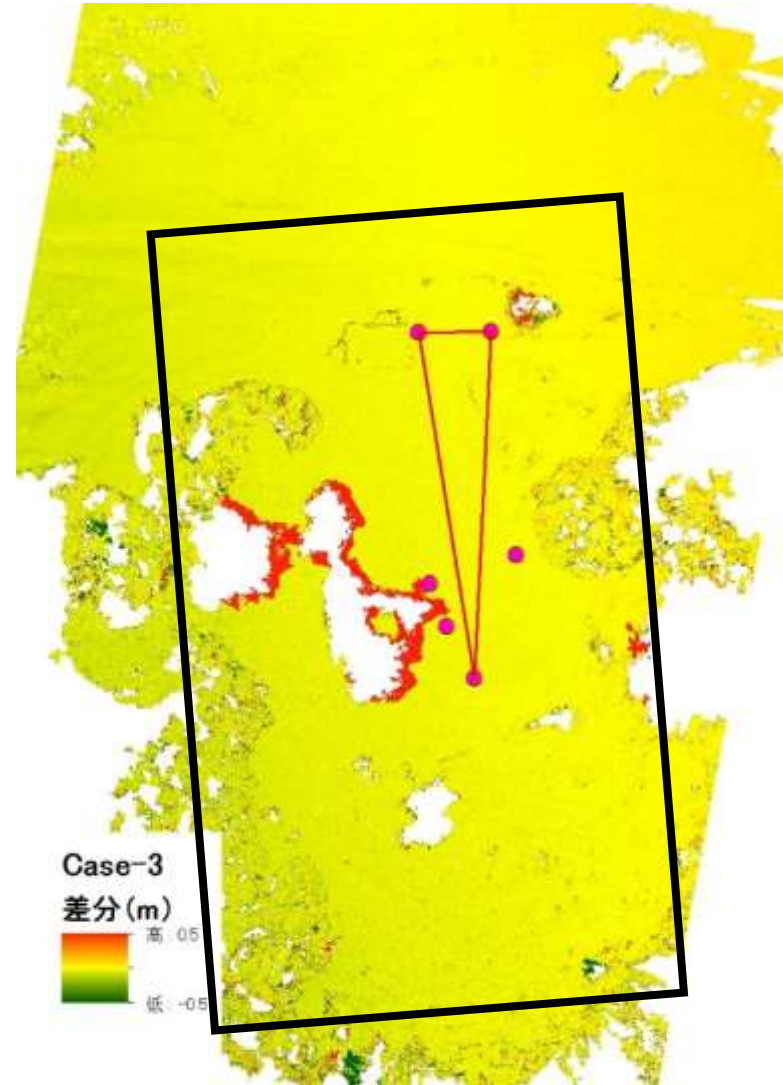
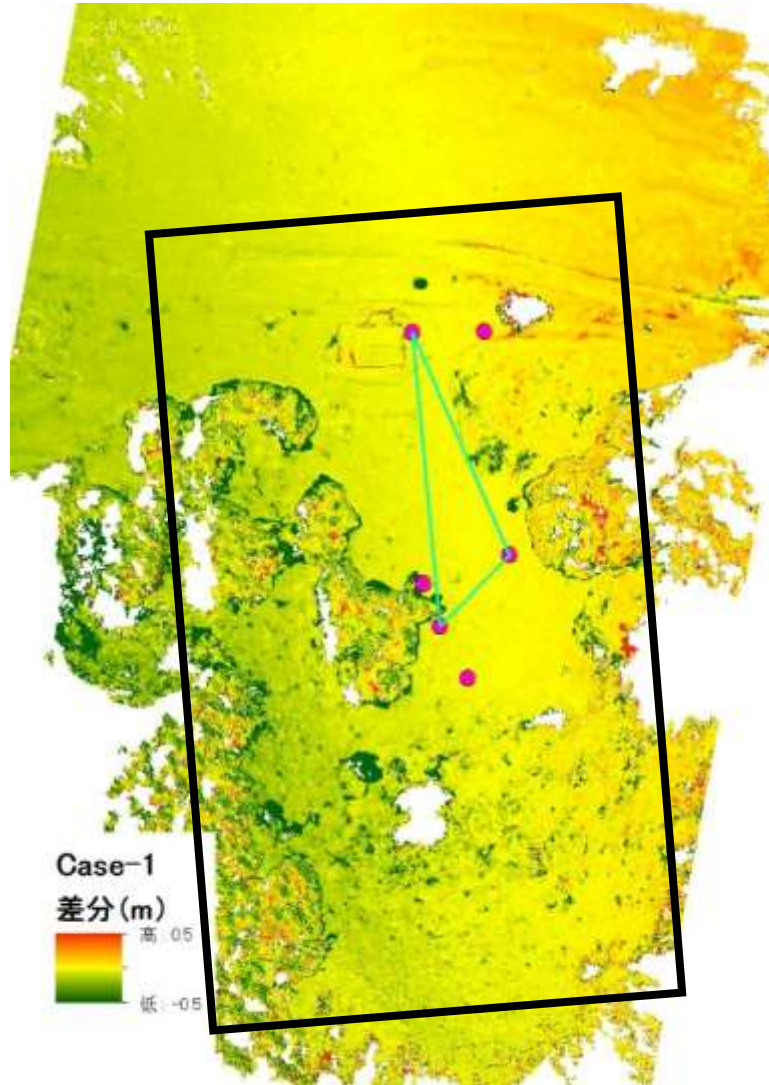
- 外部標定要素なしの写真を使用
- 6地点のGCPを使用して出力したDSM
包囲面積（GCPが囲む面積）：1,798.8 m²
（対象範囲の9.0 %）

GCP設置パターンと包囲面積

- Case 1: 842.1 m² (4.2 %)
- Case 2: 157.2 m² (0.8 %)
- Case 3: 942.6 m² (4.7 %)
- Case 4: 11.4 m² (0.06 %)

検証2：基準DSMとの差分：Case-1, 3

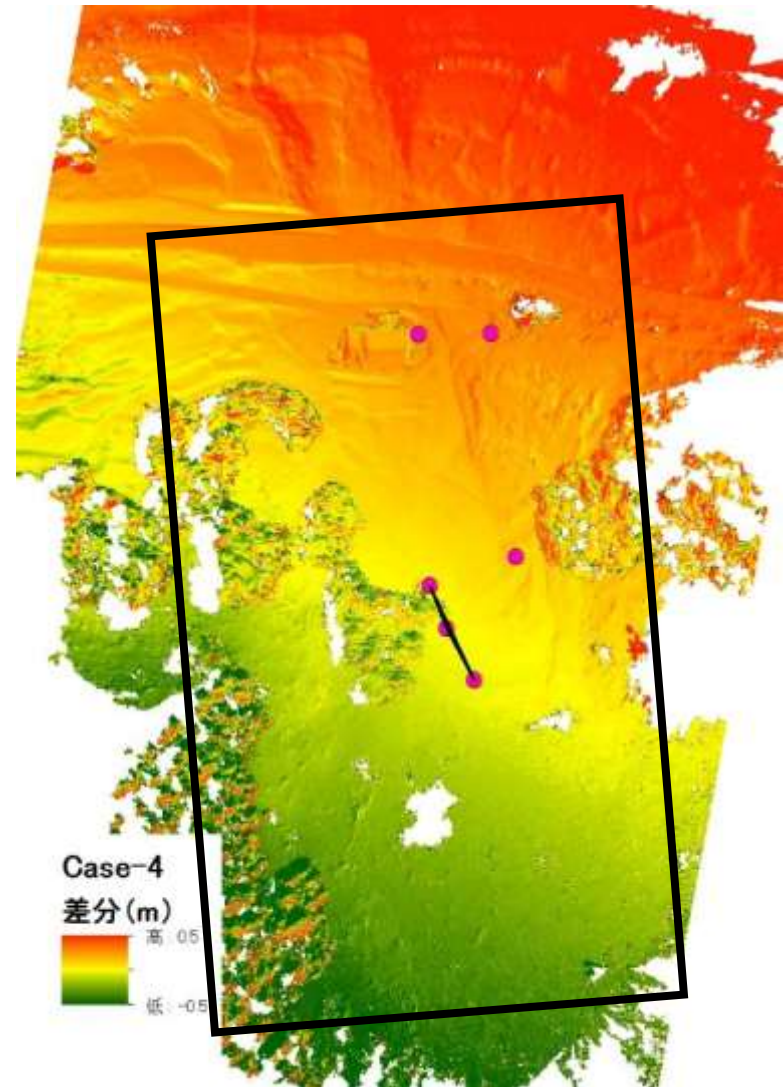
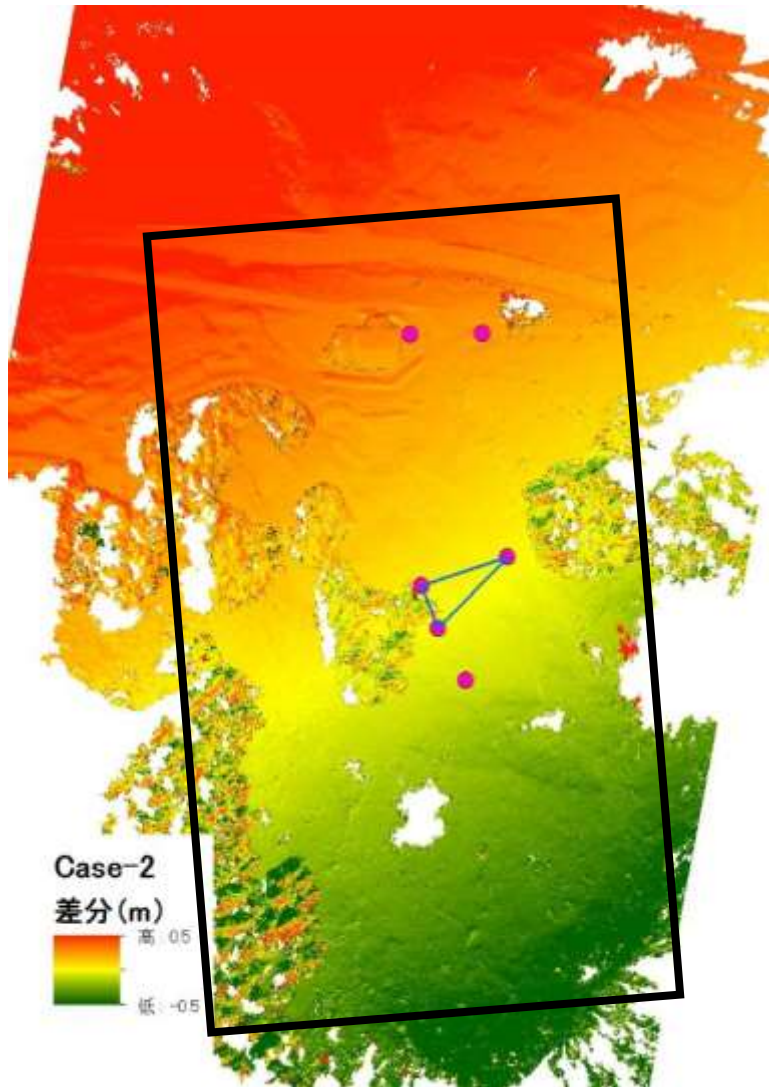
- Case-1 (左)：地形面全体が西下がり (東上がり) に傾いている
- Case-3 (右)：基準DSMとほぼ同じ精度



検証2：基準DSMとの差分：Case-2, 4

いずれのケースでも、地形面全体が大きく傾いている

Case-2（左）では北西側が高く、Case-4（右）では北東側が高い



2014年4月福島県西会津の斜面災害跡地

結論：

- 地上基準点（GCP）の配置は、DSMの精度に影響を与える
- 精度を劣化させるGCP配置
 - NG例) 局地的な配置（GCPが囲む面積が小さい）
 - NG例) 線状の配置、配置GCP数が少ない
 - 外部標定要素がない場合、精度はGCPの影響を特に受ける

UAV-SfMのメリット：

- 計測作業が比較的簡易であり、全体として低コスト化できる
- 局地的ながら迅速かつ容易に高分解能な地形情報が得られる
- 地図情報レベル250クラスの図面を作成できるポテンシャルがある

課題：

- 高い計測精度を求める場合、適切なGCPの配置と高精度な測量が必要

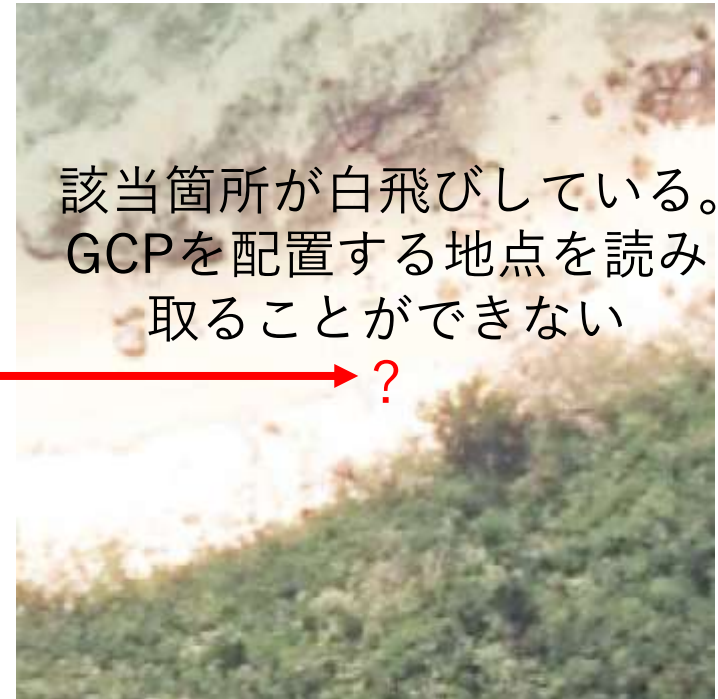
4. SfM技術Tips

精度を向上させるための様々な配慮と工夫と基礎知識

技術コラム(1) GCP品質の重要性 (1)

品質上の留意点：位置座標を正確に計測するだけでは不十分！

- SfM解析に使用する実際の写真画像上で、GCP設置地点が正確に読み取れること



該当箇所が白飛びしている。
GCPを配置する地点を読み
取ることができない

?

左：GCP取得地点のUAV写真

右：デジタル空中写真（地上分解能20 cm）

右下：GCPを計測した地点の地上写真

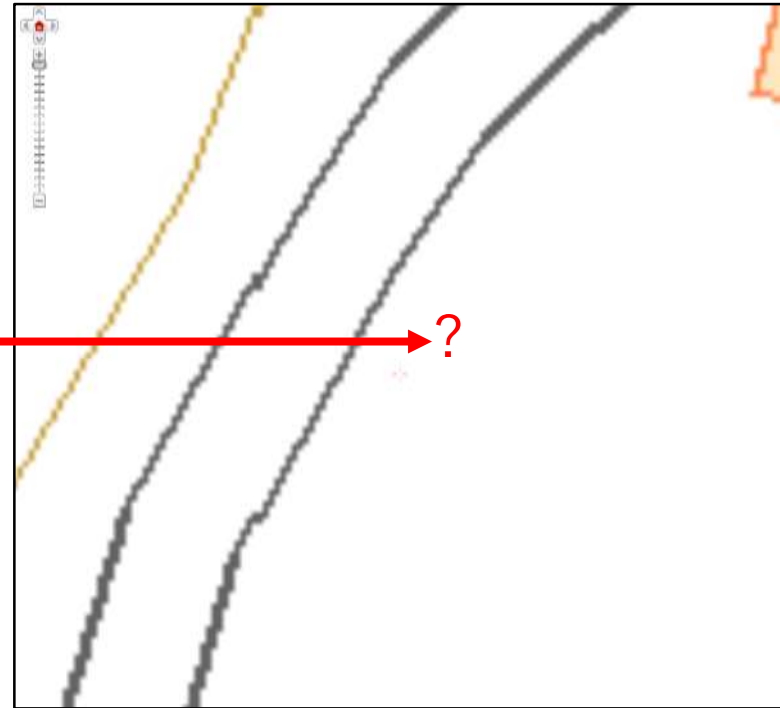


技術コラム(1) GCP品質の重要性 (2-1)

地理院地図から読み取ることができる地点の正確さには限界がある



デジタル空中写真 (地上分解能20 cm)



地理院地図 (最大まで拡大)

左：現場で選定したGCP地点を写真上で明確に特定できた

右：地理院地図上では該当する地点を特定することができなかった。また、該当地域の最新のオルソ画像が公開されていなかった

技術コラム(1) GCP品質の重要性 (2-2)

地理院地図から読み取ることができる地点の正確さには限界がある

(数値地形図データの精度)

第80条 数値地形図データの位置精度及び地図情報レベルは、次表を標準とする。

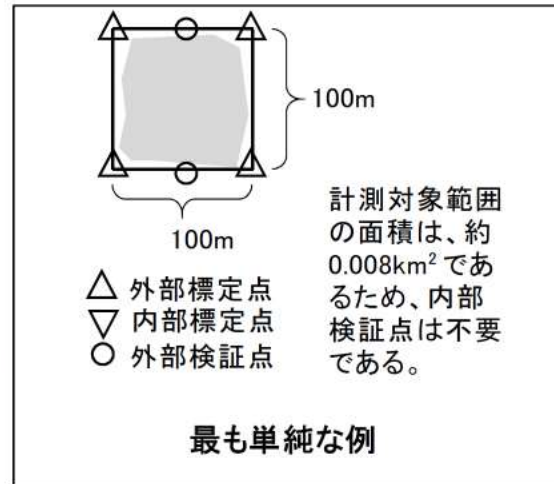
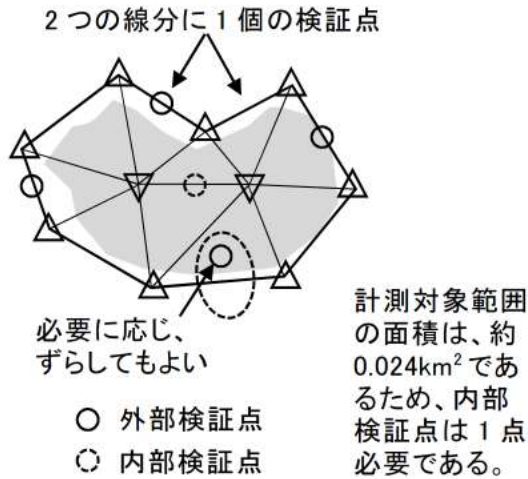
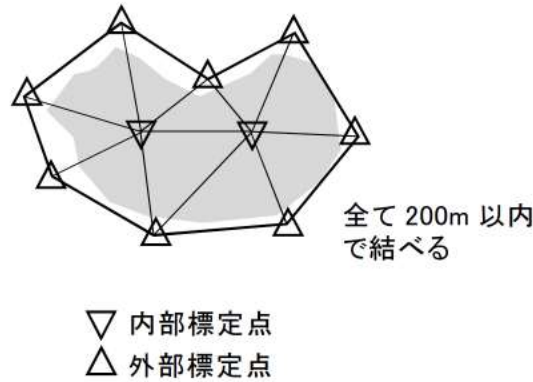
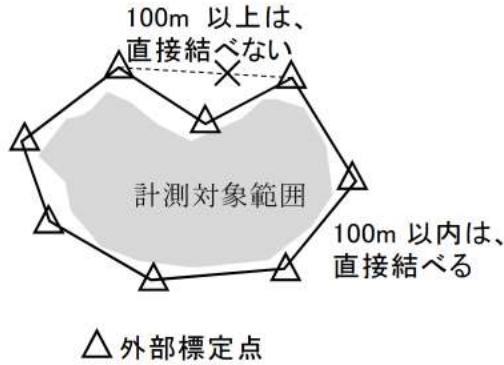
地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	等高線の標準偏差
250	0.12m以内	0.25m以内	0.5m以内
500	0.25m以内	0.25m以内	0.5m以内
1000	0.70m以内	0.33m以内	0.5m以内
2500	1.75m以内	0.66m以内	1.0m以内
5000	3.50m以内	1.66m以内	2.5m以内
10000	7.00m以内	3.33m以内	5.0m以内

出典：測量法の規定に基づく作業規定の準則（平成28年3月）、国土交通省

- 地理院地図で使用されている数値地形図の地図情報レベルは2500
- 標高値は5 mメッシュDEMまたは10 mメッシュDEM
- すなわち、水平精度、垂直精度ともに、メートル級の誤差を内包する
- 無人航空機で撮影したcm級の分解能を持つ写真には、地理院地図から読み取った地点の位置座標の誤差レンジは、そもそも大きすぎる

技術コラム(1) GCP品質の重要性 (3)

理想的なGCPの配置



理想的なGCP配置の基本 (左)

- ✓ 計測対象範囲の全域を地図化するための測量技術 (市街地等を対象)

- UAV-SfM技術が必要とされる事態では、理想的なGCP配置を行うことは困難または不可能な場合がある (例：災害時、森林域、海・河川、ダム等の水域を含む領域、等)

- ✓ 立ち入りができない
- ✓ 緊急性が高く作業時間が短い
- ✓ GCPの代替になる人工物がない、あるいは設置できる環境ではない
- ✓ 地表面のテクスチャがほとんど無い
- 作業目的に適したGCPの設置と計測戦略の立案が必要

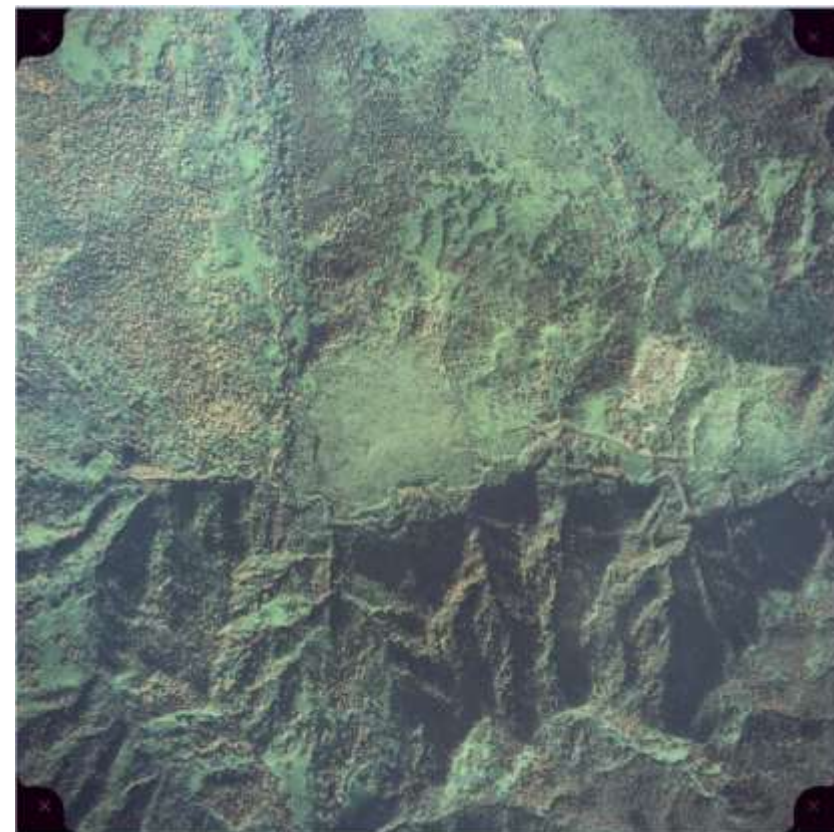
図 標定点の配置の事例

出典：UAVを用いた公共測量マニュアル (案)、P35 (国土交通省国土地理院、2016.03)

防災科学技術研究所

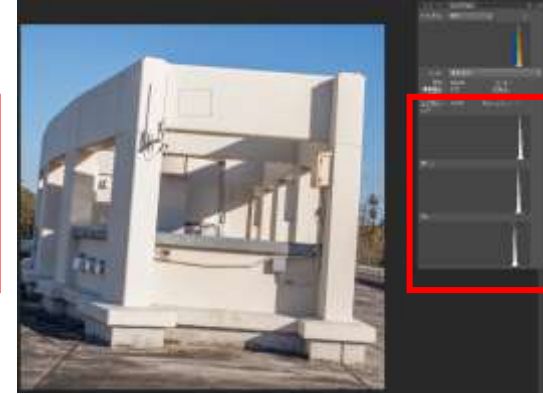
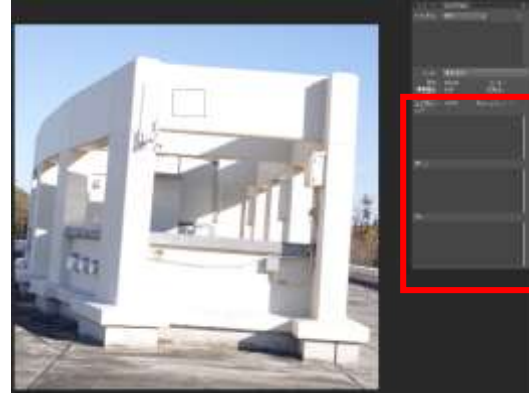
スキャニングしてデジタル化されたアナログ空中写真をSfM解析で使用する場
合、同じカメラによる同じ撮影セットの写真について次の補正処理を行う

➤ 指標を用いた画像の回転、主点位置合わせ、画像サイズ合わせ



Shoichiro Uchiyama and Toyohiko Miyagi (2014) Application of Digital Surface Model due to Structure from Motion. Proc. SATREPS 2014 Workshop "Landslide Risk Assessment Technology", pp.128-136. Springer

技術コラム(3): SfM解析に使用してはならない写真集(1)



上：画素数は多いがレンズ性能が悪い例
安いカメラで多発する

下：赤枠拡大。まったく解像していない



上左：白飛びした面、上右：RAW画像でハイライト補正
中左：黒潰れした面、中右：RAW画像でシャドウ補正



左：画角170度の画像、右：幾何補正で赤枠外が失われる

技術コラム(3): SfM解析に使用してはならない写真集(2)



左：全体的にアンダー（暗い）な画像。ブルーチャンネルのヒストグラムが左に寄っており、階調（色の変化）の一部が失われている。輝度値が最小値（または最大値）に達すると、シャドウ補正（またはハイライト補正）による復元はできない。（ゼロに何を乗算してもゼロ）

上右：フォーカスが合焦していない画像。オートフォーカスは使用せず、事前にフォーカスを調整して固定する（カメラの内部機構が動かない状態で撮影する）

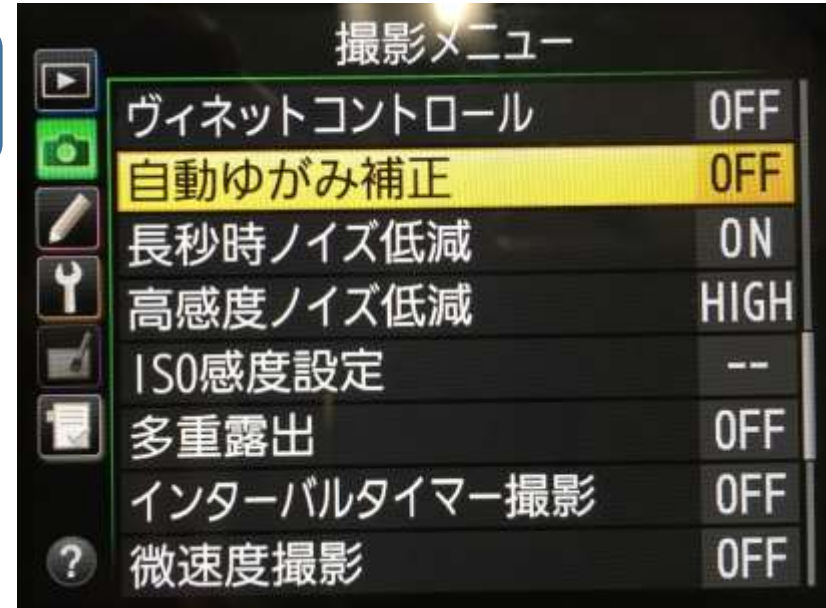
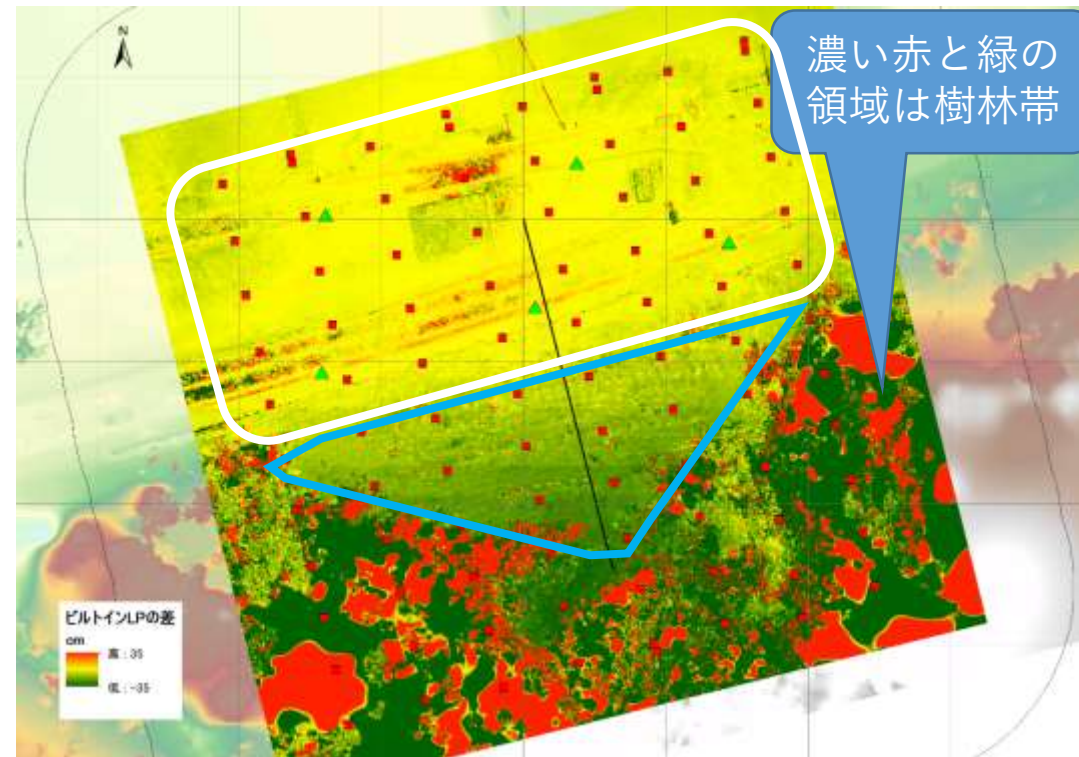
✓ カメラの手ぶれ補正機構もオフにする

下右：カメラブレが生じている画像。シャッタースピードが遅い場合に発生する。カメラボディの姿勢安定化機構（ジンバル）を持たない場合は、1/1000より速いシャッタースピードが必要。

技術コラム(4): 内部標定要素の推定 : ビルトインレンズプロファイルの影響

ビルトインレンズプロファイル (BiLP) : カメラメーカーが提供するレンズ歪みの簡易補正情報 (右)

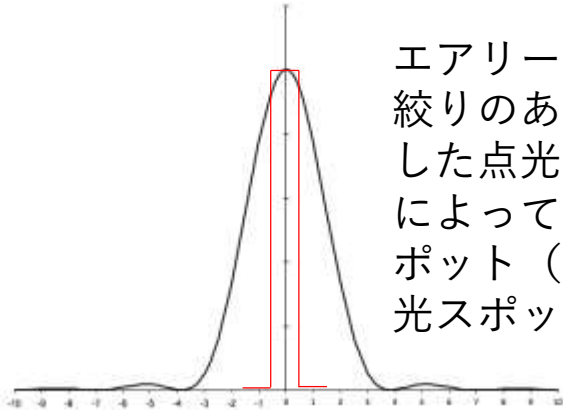
- SfM解析では内部標定要素の推定 (セルフキャリブレーション) を行う。BiLPが適用された画像では正確に推定できず、高さ方向の精度が低下する
- 計測目的の撮影ではBiLPを排除する



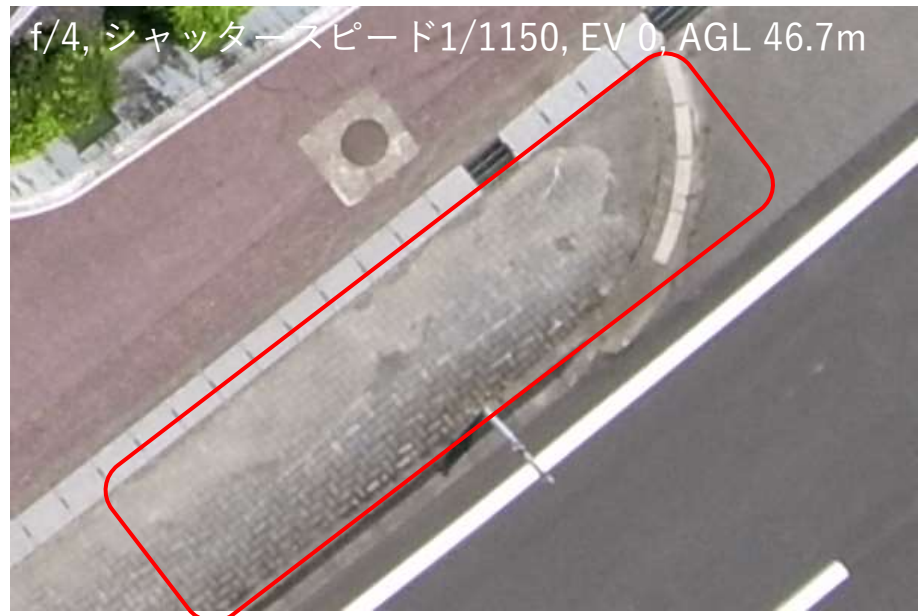
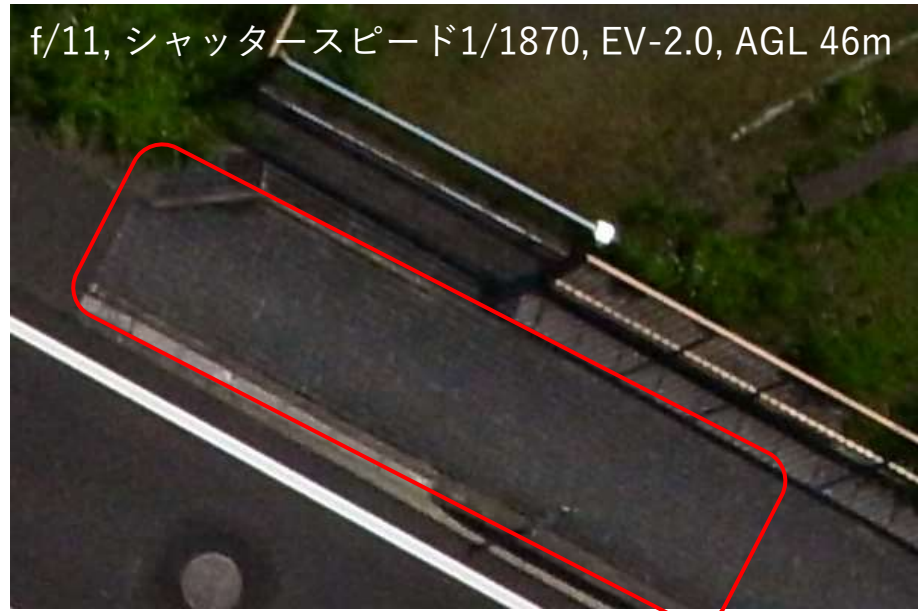
BiLPに関する設定項目の例 (Nikonの例)
 ※設定変更できない場合はRAW形式で記録し、現像時にBiLPを削除する

BiLP画像から作成したDSMと基準DSMとの差 (単位cm) : 撮影位置 (■)、GCP (▲)
 GCP周辺 (白枠内) では差は小さいが、GCPから離れた南側の範囲 (水色枠内) では高さの差が大きい

技術コラム(5) 回折の影響



エアリーディスク：
絞りのあるレンズを通過した点光源の光線が回折によって広がった集光スポット（赤線は理想の集光スポット）



回折：光が回り込む現象。波長と絞りで決まる。物理的な分解能の限界を決める要素

- 絞ると大きくなり、分解能が低下する
- 細かい画素ピッチの素子で発生しやすい

➤ エアリーディスク径 (AD) :

$$AD = 2 \times 0.61 \lambda / (1 / (2 \times f\text{値}))$$

例：緑 ($\lambda = 0.52 \mu\text{m}$) における回折

- f/4のエアリーディスク径：5.08 μm
- f/11のエアリーディスク径：13.96 μm

例) Ricoh GR Digital IIIの画素ピッチ：2.04 μm

上は絞りf/11で撮影。回折の影響により、歩道ブロックのパターンが不鮮明。下の写真に比して分解能が低下している

技術コラム(6)

「分解能」とは

分解能の決定で重要な評価項目

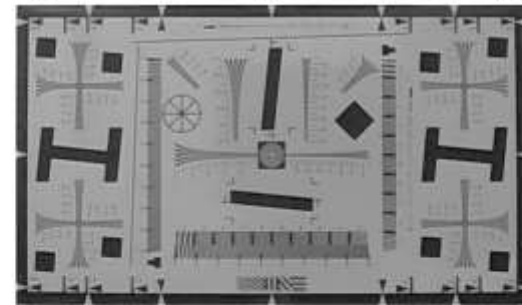
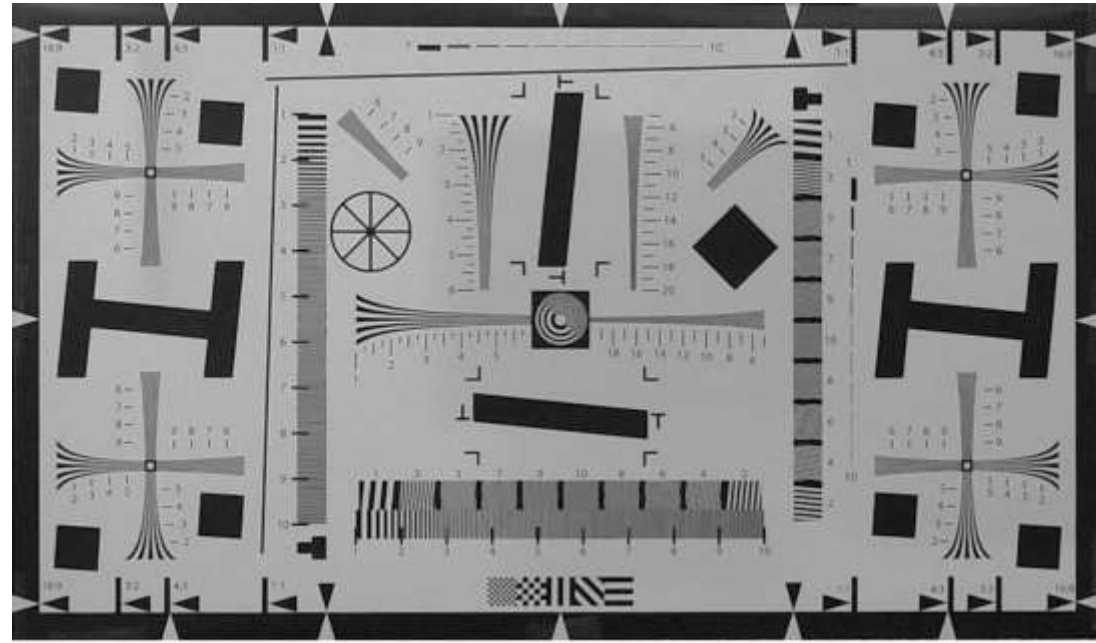
- 実際に読み取り可能な細かさ
- ✓ 論理分解能では評価できない

ISO 12233テストチャート

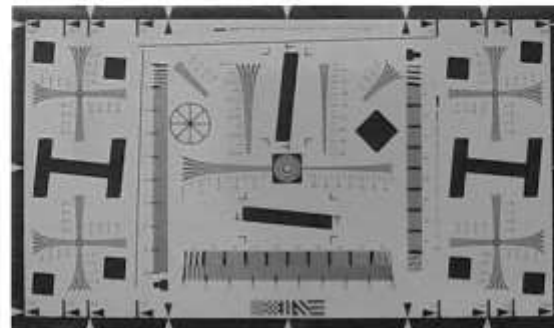
- 分解能を定量化（計測）する
- 撮像素子・レンズ性能の総合的評価

試験方法

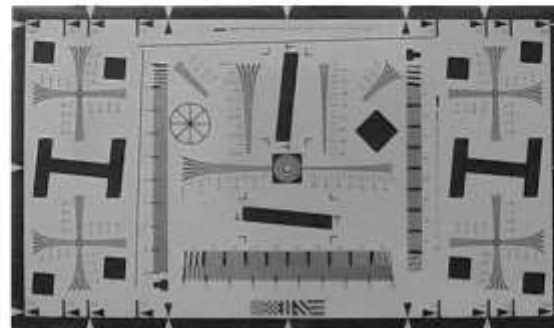
- 絞り・ISOを同一にして撮影
- 明瞭に読み取れる目盛の数値を確認
 - 試験1（右図）：同一距離から撮影
 - 試験2：同一論理分解能で撮影



Ricoh GR



GoPro3



GoPro2

技術コラム(7)グラウンドスマミアとは

撮像素子への露光時間中に地上分解能の半分を超えるカメラの移動が生じた場合に発生する画像のブレ

例：巡航速度10 m/s、分解能0.04 m/画素におけるシャッタースピードと

グラウンドスマミアの発生判定

- $1/125 : 10 \text{ (m/s)} \times 1/125 \text{ (s)} = \text{移動距離 } 0.08 \text{ (m)} \rightarrow \text{NG!}$
- $1/250 : 10 \text{ (m/s)} \times 1/250 \text{ (s)} = \text{移動距離 } 0.04 \text{ (m)} \rightarrow \text{NG!}$
- $1/500 : 10 \text{ (m/s)} \times 1/500 \text{ (s)} = \text{移動距離 } 0.02 \text{ (m)} \rightarrow \text{NG!}$
- $1/1000 : 10 \text{ (m/s)} \times 1/1000 \text{ (s)} = \text{移動距離 } 0.01 \text{ (m)} \rightarrow \text{OK}$

分解能が高いほど発生しやすい（以下の条件に該当する場合）

画素数の大きなカメラを使用

より低空を飛行

より画角（FOV: Field of View）の狭いレンズを使用

✓ 画素数が多いことは、SfM解析にとって必ずしもベストではない

- 飛行の制限条件が増える。より低速または高高度を飛行する必要が生じる
- 高度を上げることができない場合、飛行速度が下がるため作業時間が長くなる

5. SfMとUAVの活用

災害対応
調査研究
計測図化

災害対応事例：平成26年8月広島土石流災害

目的：

要救助者の捜索を支援する地図情報の提供

- 縮尺1:1,500に印刷した大判地図を提供
- A3サイズに分割した地図のPDFデータも提供

活動期間：

2014年8月24日に撮影・解析、翌25日の午後3時に地図提供



災害対応事例：平成26年8月広島土石流災害

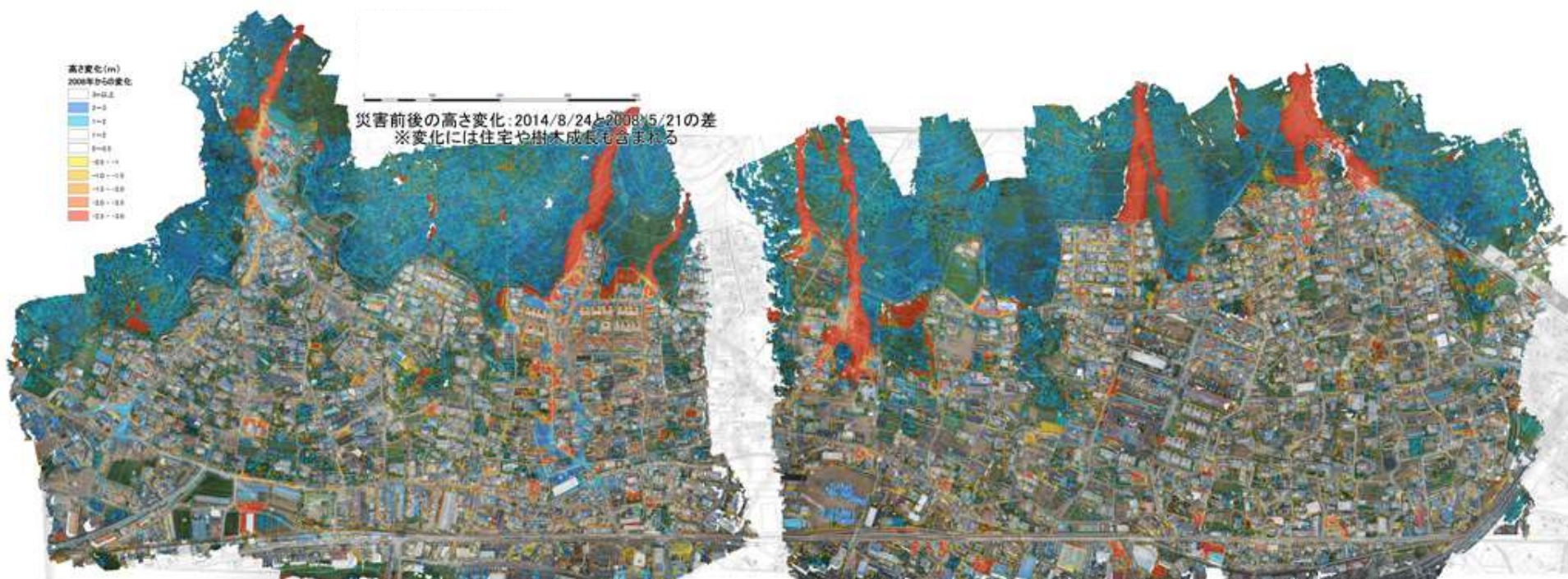
実施内容：**搜索支援地図**の作成

実際の自然災害での無人航空機の飛行と写真撮影
 災害初期対応期間での地図成果の提供
 災害前のデジタル空中写真の活用
 流失家屋、土砂堆積範囲および堆積厚さの可視化
 住宅地図のオーバーレイ

使用機材: 回転翼 自作機
 カメラ: Ricoh GR, 16 Mpx
 飛行対地高度: 150 m
 使用写真数: 750枚
 地上分解能: 3.5 cm

結果:

実際の搜索救助活動で活用され、要救助者位置推定に有用として評価を得た



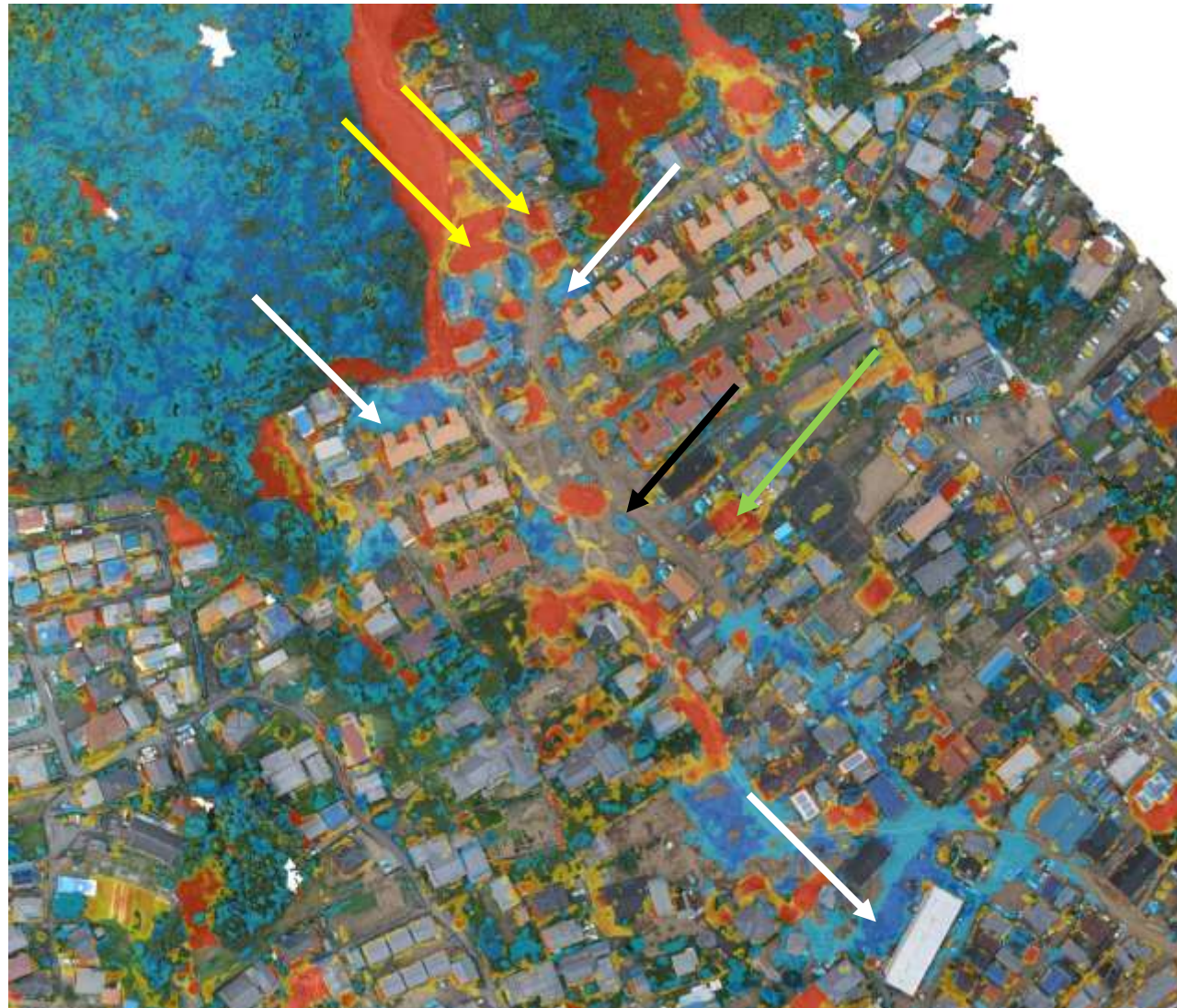
内山庄一郎・ほか (2014) 平成26年8月豪雨による広島土石流災害における空撮写真を用いた搜索支援地図の作成, CSIS DAYS 2014, p.16.

災害対応事例：平成26年8月広島土石流災害

搜索支援地図：災害後オルソ画像、高さ変化、住宅地図の重ね合わせ

要救助者の位置推定：流失家屋、被災家屋、堆積土砂厚さ、土砂流れ止まり

搜索効率低下の予防：高さ変化が小さい場所（元の地表面以下への掘削防止）

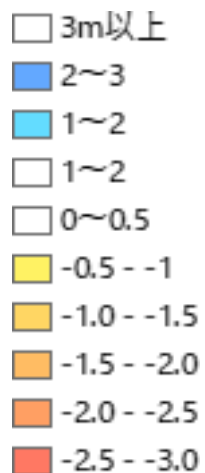


【黄矢印】
流失家屋

【白矢印】
土砂の流れ
止まり
特に流失家
屋直下の流
れ止まりが
搜索上重要

【黒矢印】
高さ変化が
小さい領域

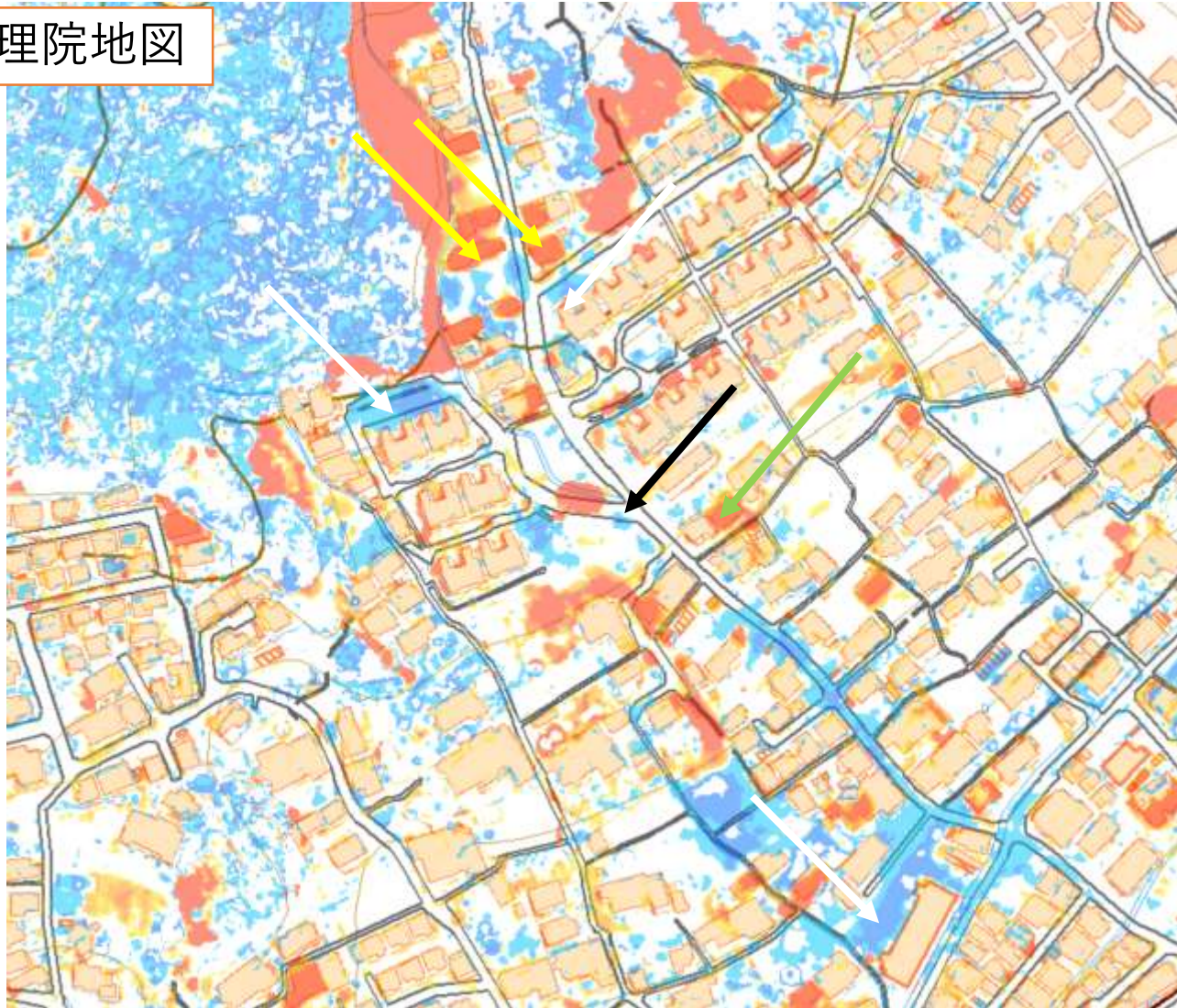
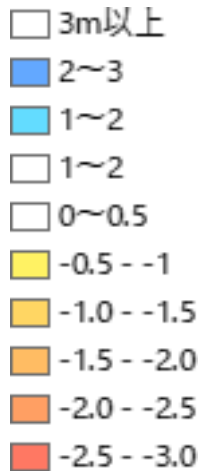
【緑矢印】
家が更地に
なった場所。
非被害域



災害対応事例：平成26年8月広島土石流災害

災害後オルソ画像と住宅地図（家屋形状、表札情報）の重ね合わせイメージ
 実際には、表札情報（居住者名）が入った地図を使用

背景：地理院地図



【黄矢印】
流失家屋

【白矢印】
土砂の流れ
止まり
特に流失家
屋直下の流
れ止まりが
搜索上重要

【黒矢印】
高さ変化が
小さい領域

【緑矢印】
更地になっ
たため高さ
が低下した
領域（非被
害域）

平成26年8月広島土石流災害

1. 検索支援地図の作成と提供

- 災害状況の可視化により、要救助者の位置推定を合理化
- 現地実動機関に実際に活用された
- 「災害状況把握のスピードが飛躍的に向上し、搜索上の課題を解決する先進的な情報取得技術」（村上・松上、2016）

2. 災害前後の地表面高さ変化の可視化

✓ 高精度な計測技術としてのUAV-SfMの応用

1. 変化抽出：災害前のDSM（比較基準データ）が必要

- 既存の航空レーザー測量DSM
- 既存の空中写真のSfM処理

2. 高精度化：地上基準点の取得が必要

➤ 被災領域に立ち入れない場合の対応策

- ベースラインDSMから災害前後の共通位置の座標を読み取る
- 内部標定要素の高精度化：事前の高精度キャリブレーション
- 外部標定要素の高精度化：撮影位置 (GNSS), 撮影姿勢 (IMU)

村上圭・松上倫也 (2016) 土砂災害時における災害対応の標準化, 都市政策, 第164号, pp.63-68.

まとめ

SfM多視点ステレオ写真測量

1. オルソ画像の作成ツール

- 既存手法と比較すると驚異的に簡単

2. 高精度な計測技術

- 推定要素を高精度化するための技術理解と努力と工夫が必要
 - 内部標定要素：レンズの歪み
 - 外部標定要素：撮影位置・撮影姿勢

3. 事例：UAV-SfMによる災害対応の高度化

- 迅速：例) 400 m四方のオルソ画像の完成まで2分
- 超高分解能：地上で活動する個人まで識別できる分解能
- 変化抽出：災害前後や災害経過の二時期から地表変化の把握

おつかれさまでした ありがとうございました

地理情報システム学会2018年度学術大会 ハンズオンセッション H4

平成30年10月21日(日) 12:20～14:00

首都大学東京 南大沢キャンパス 11号館108

参考文献（本文中以外）：

- 内山庄一郎，2018，必携ドローン活用ガイド，東京法令出版。
- 内山庄一郎，2014，地すべりキーワード101「8 地理情報システム」，日本地すべり学会誌，第50号，pp.32-33.
- 内山庄一郎，2016，地すべりキーワード101(21)無人航空機：安全運航編，日本地すべり学会誌，Vol.53, No.6，pp.25-27.
- 内山庄一郎，2015，自然災害研究における三次元形状取得のためのSfM-MVS技術の活用，東京大学空間情報科学研究センターディスカッションペーパー「高解像度地形情報シンポジウム論文集～地形情報のすべて～」，137，pp.20-23.