点群マッチングとその応用

アジア航測株式会社
織田和夫

内容

- 画像マッチングと点群マッチング
- 移動体から得られる点群のレジストレーション
- 3Dモデルと点群のレジストレーション
- 点群の移動解析
- 3D点群の精度評価

Matching?

- ２つもしくはそれ以上の空間データの局所もしくは全体の位置合わせを行うこと
- ２段階（もしくはその複合）に分かれる

  ①概略位置合わせ

  ②精密位置合わせ

  （大体において①の方が②よりも難しい）

画像マッチングと点群マッチング

画像マッチングと点群マッチング

- 画像マッチング
  - ２次元マッチング（画像処理）
  - 自由度：平行移動（２）・回転（１）・スケール（１）（変形）
- 点群マッチング
  - ２次元マッチング
    - Z軸に投影し画像化してからマッチング
      - DSM同士のマッチング
    - 自由度：平行移動・回転・スケール（変形）
  - ３次元マッチング
    - 点群間の距離を最適化
    - 自由度：平行移動（３）・回転（３）（スケール（１））

２次元マッチング

- 空中三角測量・SfM（特徴点マッチング）
- DSM計算（エピポーラ幾何拘束下の特徴点・エリアマッチング）
- 画像認識（パターンマッチング）

・・・・・

★基本的に格子化されているデータを前提にしているので話が単純

３次元マッチング

- 点群レジストレーション（位置合わせ）
- 物体認識

★基本的に格子化（ボクセル化）されていないことが多い

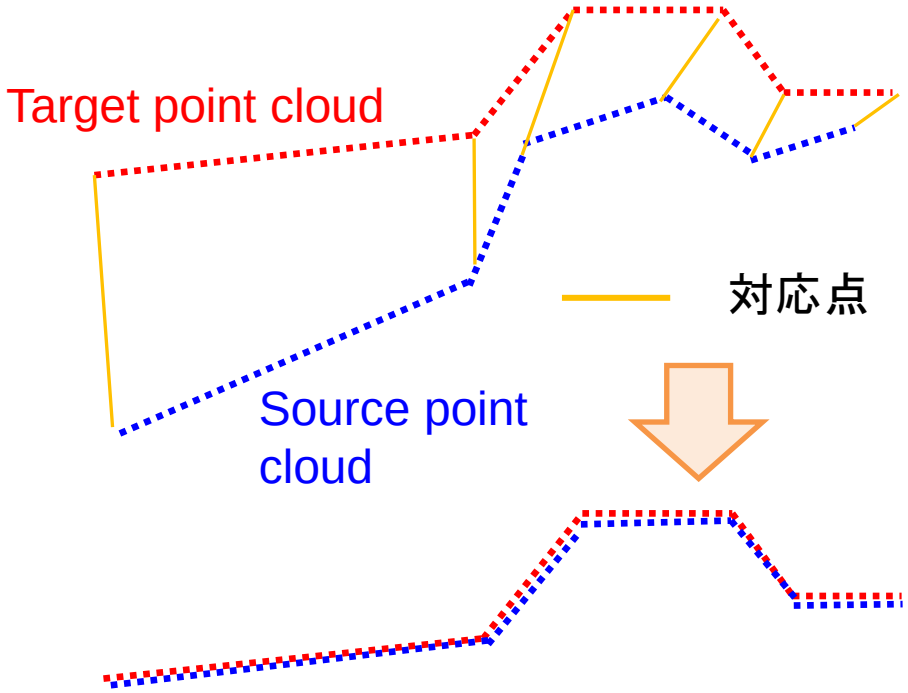
★類似度（相関）の定義が難しい

点群レジストレーション

- 概略位置合わせ
  - マニュアル操作
  - ターゲット利用
  - RANSAC
  - ・・・・・
- 精密位置合わせ
  - ICP (Iterative Closest Point)

厳密な位置合わせをいかに行うか

- ICP (Iterative Closest Point) (Besl and McKay, 1992)



1. 最も近い対応点を探索
2. 対応点の距離が近くなるように回転・平行移動パラメータを計算

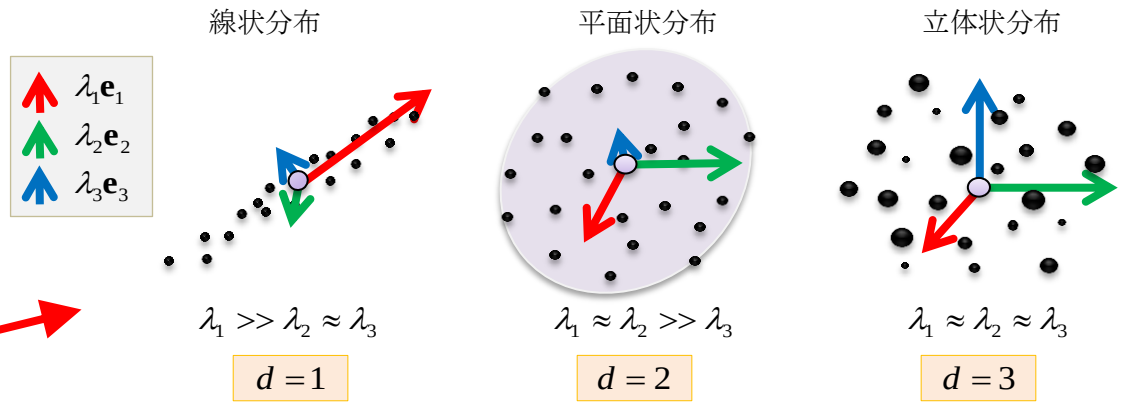
*1－2を収束するまで繰り返す

ICPの実行（局所的ずれ量の算出）

道路面同士,建物壁面同士→平面と平面を合わせたい
電柱や電線,その他構造物同士→点と点を合わせたい

混合型ICPの提案

- 点のサンプリング
- 対応抽出
- 点分類による不適対応の削除
- 誤差最小化による座標変換行列の算出
- ソース点群の移動



面状–線状，面状-立体状の対応を削除

面状–面状の対応点 ⇒ 点と平面の距離
それ以外の対応点 ⇒ 点と点の距離

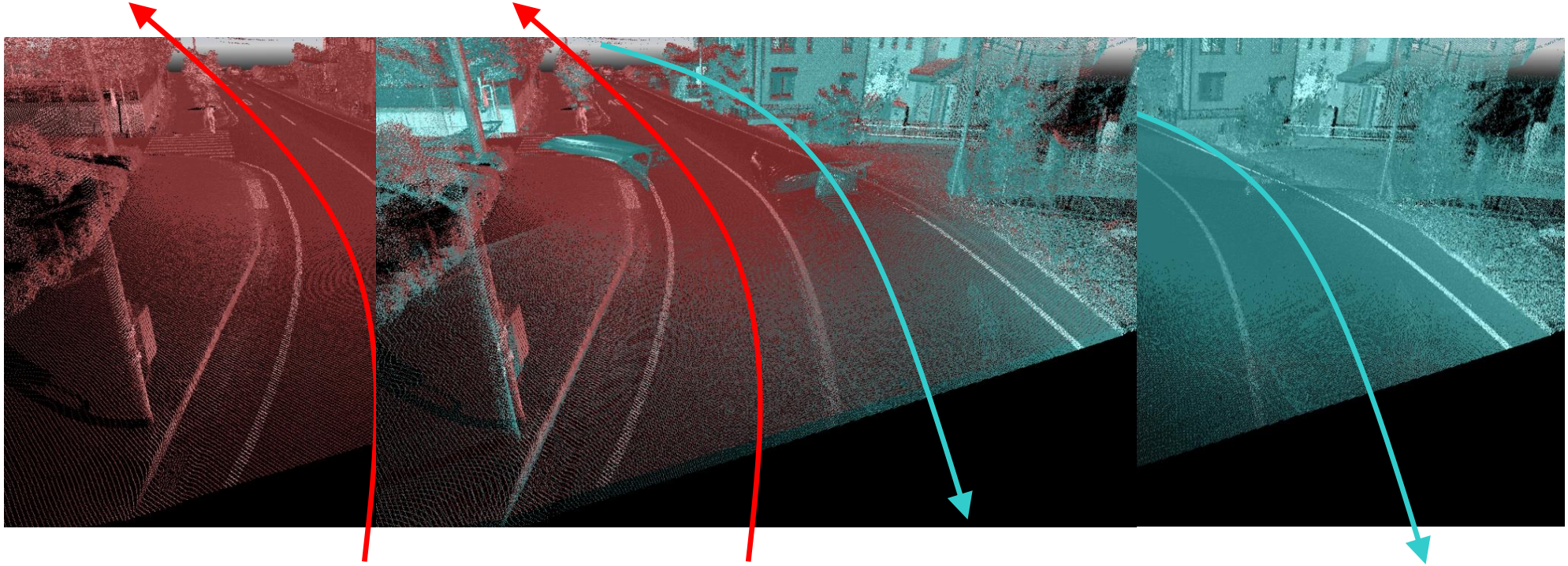
- 本研究では回転量は微小と考え、シフト量のみで最適
- 本研究におけるMMS点群間のずれ量はそれほど大きくはないと考え、ICPの初期値問題は考慮していない

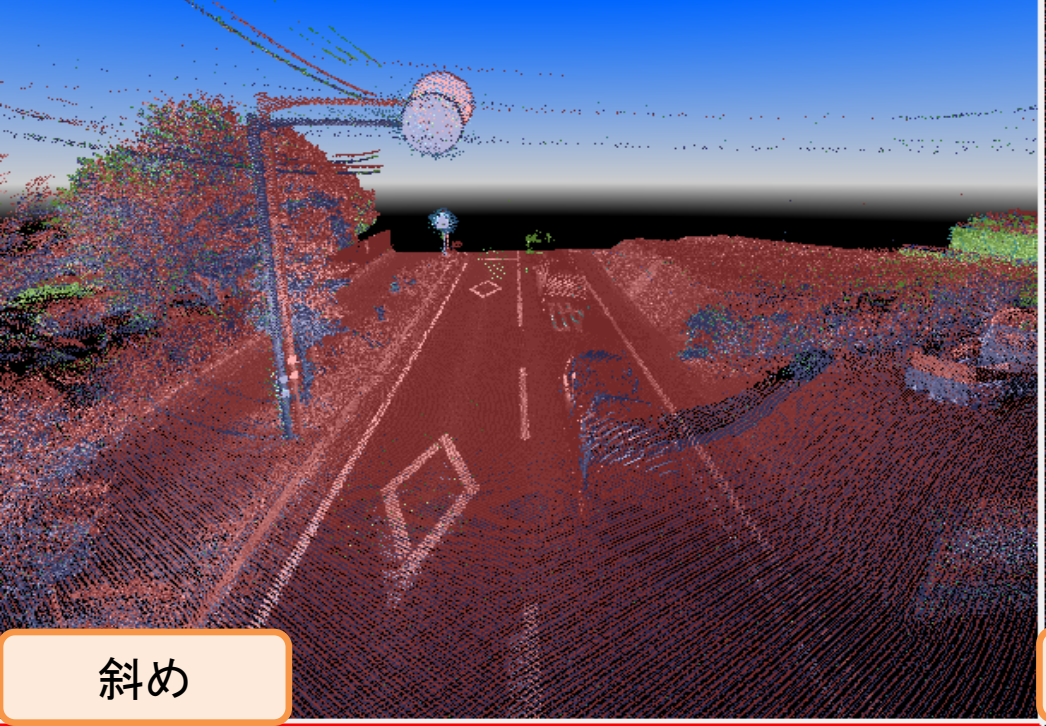
移動体から得られる点群のレジストレーション

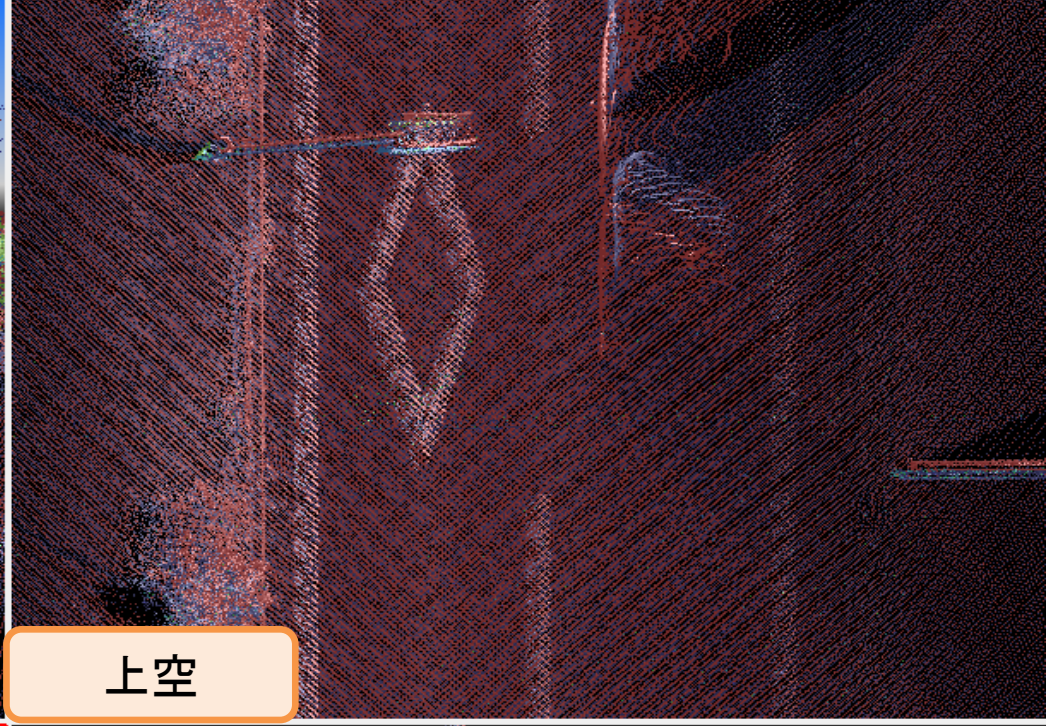
研究の背景

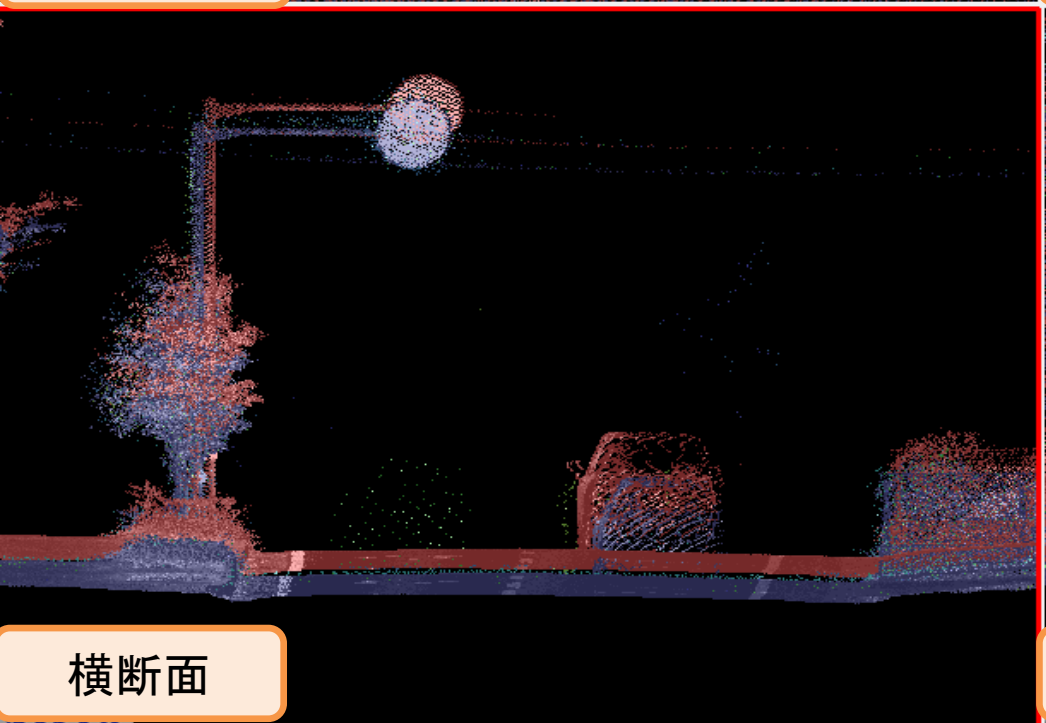
背景

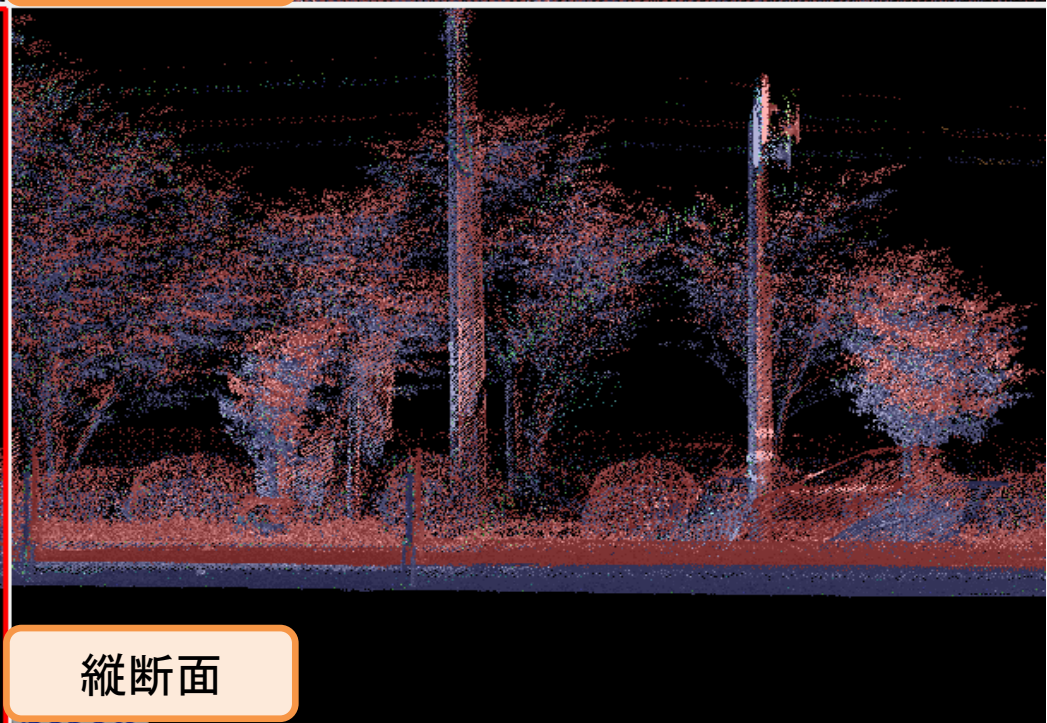
MMSで往復計測や多重走行により同一エリアを複数回計測すると、上空の視界やGPS衛星の配置状況等に起因する点群間の相対的なずれや、絶対位置のずれが生じる



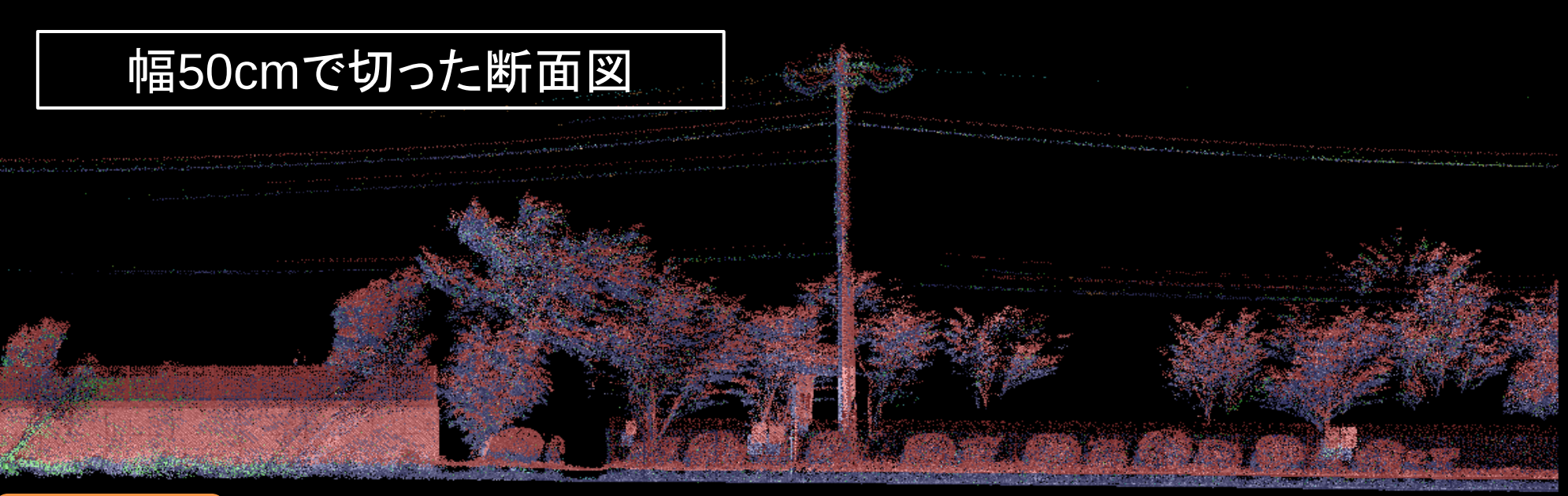

斜め


上空

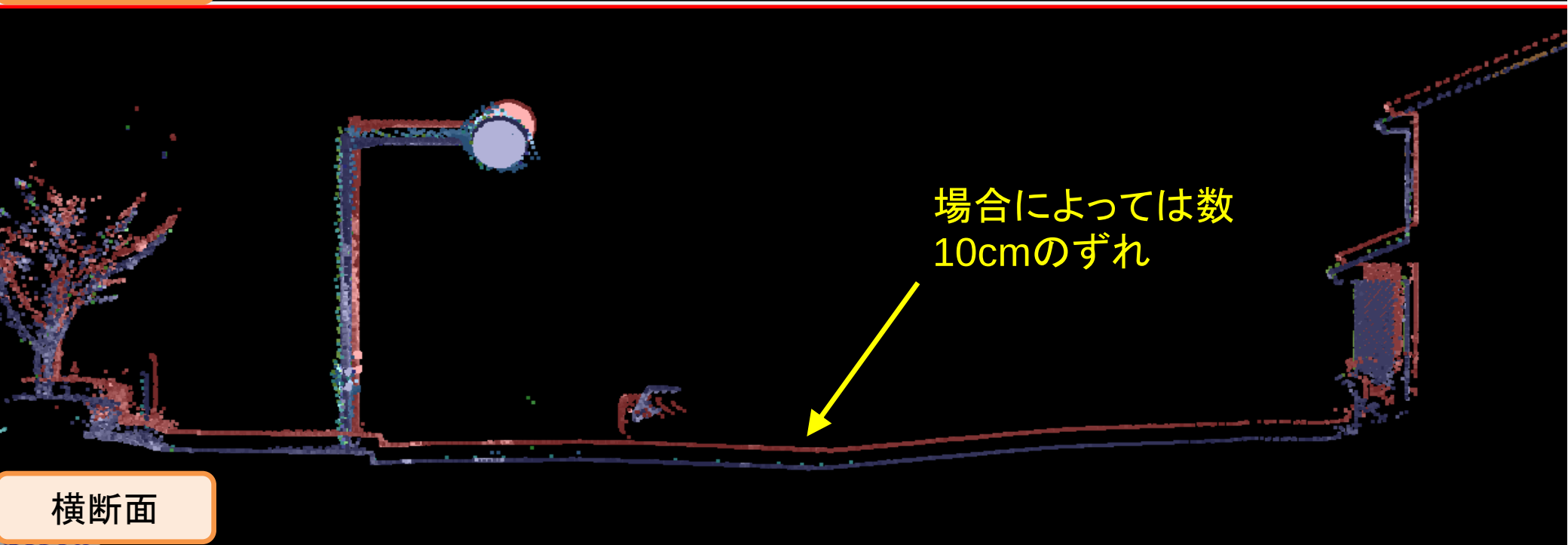

横断面


縦断面

幅50cmで切った断面図



縦断面



横断面

研究の目的と目標

目的

高精度に、且つできるだけ人手をかけずに点群間の位置ずれ（絶対位置・相対位置）を解消する手法を開発する

目標

地図情報レベル500の精度を有する点群の生成

規程上の地図情報レベル500の必要精度

	水平位置	鉛直位置
移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル　第32条	15cm	-
公共測量作業規程準則　第80条	25cm	25cm

絶対位置精度　15cm以内
相対位置精度（点群間のずれ）　5cm以内
} を目標とする

既往研究

- 走行軌跡ベースのレジストレーション (Gressinら, 2012)

ICPを用いて局所的な軌跡の修正量を求める

↓

大域的なレジストレーションで全軌跡点の修正量を求める

↓

軌跡点の修正量より各点の修正量を線形補間して求め、修正する

- 絶対位置条件

$$\boldsymbol{q}_j^* = \boldsymbol{q}_j$$

- 相対位置条件

$$\boldsymbol{q}_j^* - \boldsymbol{q}_{j-1}^* = \boldsymbol{q}_j - \boldsymbol{q}_{j-1}$$

- 局所レジストレーション条件

$$\boldsymbol{q}_{j_S}^* - \boldsymbol{q}_{j_T}^* = \boldsymbol{q}_{j_S} - \boldsymbol{q}_{j_T} + T_{j_S \to j_T}^{ICP}$$

※ ICPを行った軌跡点ペアでのみ成立

問題点

精度の劣る 点-点ICPを使用している　　基準点を用いていない

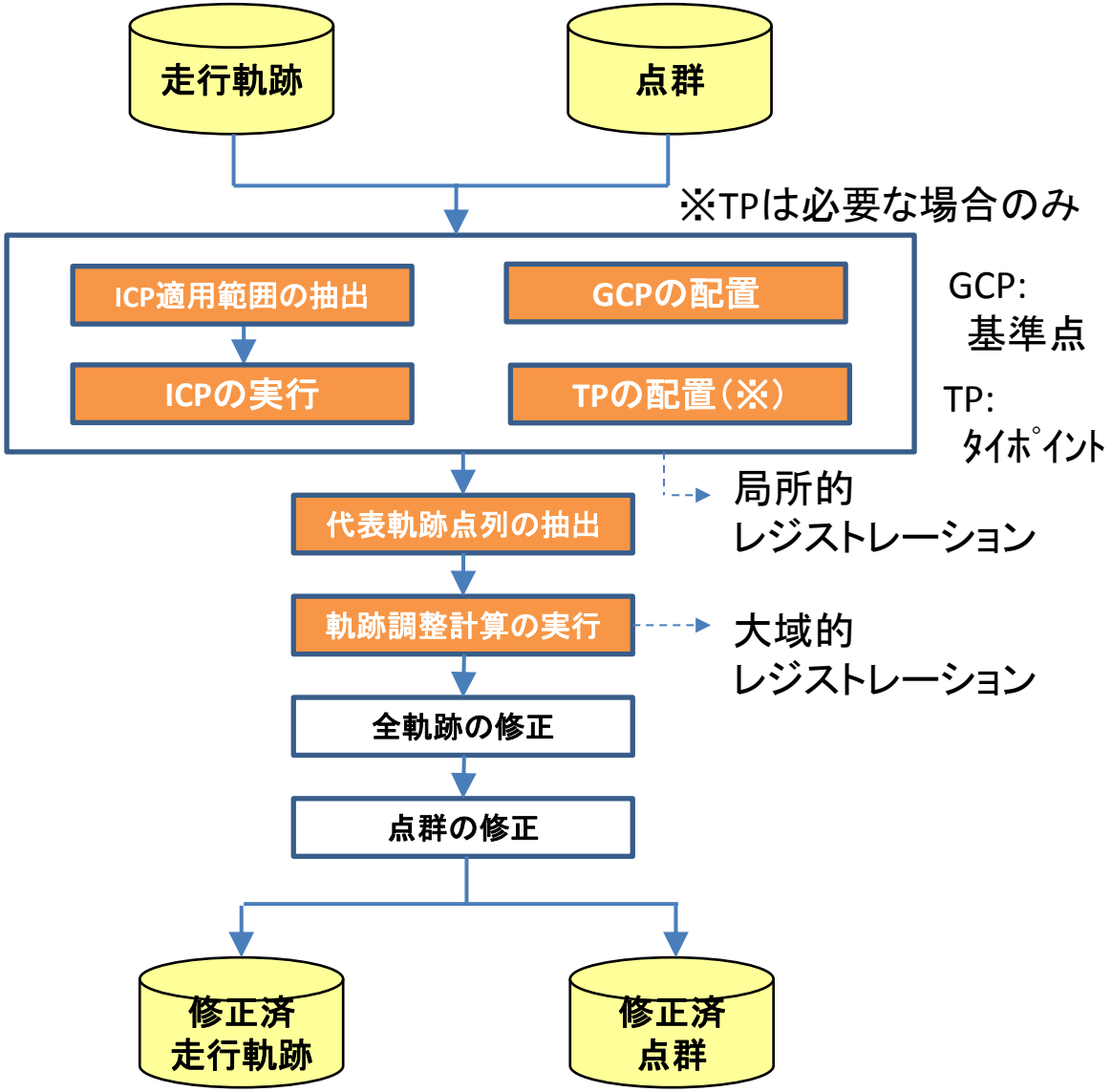
レジストレーション結果の精度評価なし

本研究でも、この走行軌跡ベースの手法を踏襲する

提案手法のフローと既往研究との差異

Gressinら(2012)との差異

- ICP適用範囲の抽出
- ICPアルゴリズム
  点-点, 面-面
- 基準点の配置
  （ﾀｲﾎﾟｲﾝﾄも配置可能）
- 代表軌跡点の抽出
- 調整計算の手法
  基準点を使用した
  絶対位置補正



ICP適用範囲の抽出

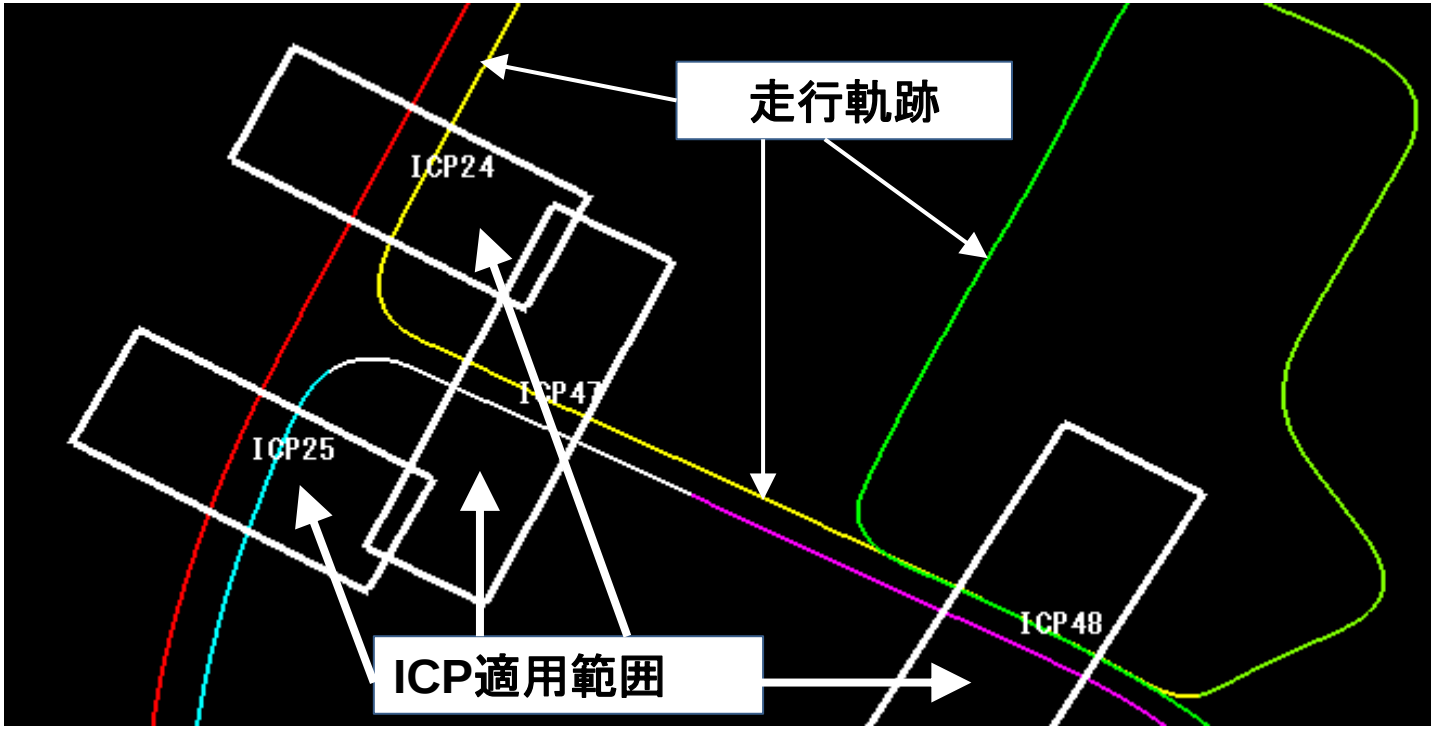
- 点群間でずれが大きいと予想される箇所や、確実にレジストレーションが必要な重要箇所を抽出すべき

- 軌跡点の位置(GPS)や姿勢(IMU)の精度が悪い箇所
- 加速度の急変箇所
- カーブ周辺
- 交差点周辺

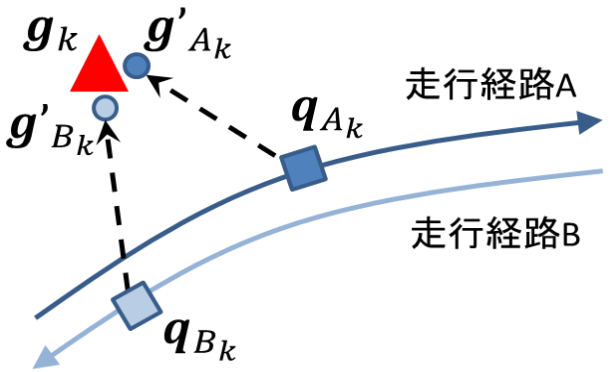
本研究では
手動で位置と範囲を設定

大きさ

約 20m x 50m



基準点・タイポイントの配置と条件式化



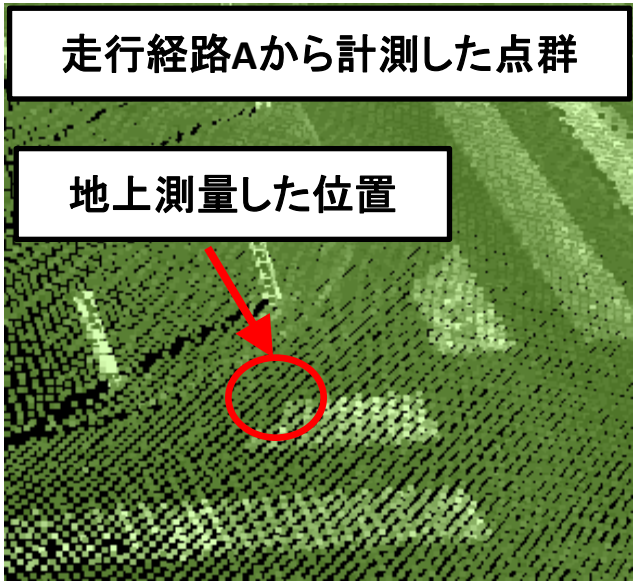
g_k: 地上測量した基準点kの位置

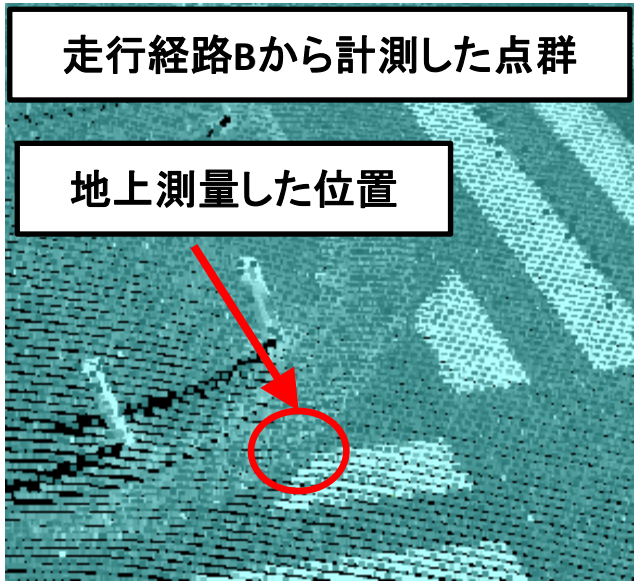
g'_{A_k}: 走行経路Aから取得した点群中での基準点kの観測位置

q_{A_k}: g'_{A_k}近傍点の計測時刻に最も近い時刻を持つ軌跡点の位置

g'_{B_k}: 走行経路Bから取得した点群中での基準点kの観測位置

q_{B_k}: g'_{A_k}近傍点の計測時刻に最も近い時刻を持つ軌跡点の位置





GCP/TP絶対位置条件

$$g_k^* = g_k$$

GCP/TP観測位置条件

$$g_k^* - q_{A_k}^* = g'_{A_k} - q_{A_k}$$

$$g_k^* - q_{B_k}^* = g'_{B_k} - q_{B_k}$$

走行軌跡の大域的調整計算

- 以下の5つの条件式で重み付き最小二乗法を用いて解く

軌跡点絶対位置条件: $\boldsymbol{q}_j^* = \boldsymbol{q}_j \quad \ldots (1)$

軌跡点相対位置条件: $\boldsymbol{q}_j^* - \boldsymbol{q}_{j-1}^* = \boldsymbol{q}_j - \boldsymbol{q}_{j-1} \quad \ldots (2)$

軌跡点ICP条件: $\boldsymbol{q}_{j_S}^* - \boldsymbol{q}_{j_T}^* = \boldsymbol{q}_{j_S} - \boldsymbol{q}_{j_T} + T_{j_S \to j_T}^{ICP} \quad \ldots (3)$

GCP/TP絶対位置条件: $\boldsymbol{g}_k^* = \boldsymbol{g}_k \quad \ldots (4)$

GCP/TP観測位置条件: $\boldsymbol{g}_k^* - \boldsymbol{q}_{j_k}^* = \boldsymbol{g'}_{j_k} - \boldsymbol{q}_{j_k} \quad \ldots (5)$

未知数

$\boldsymbol{q}_j^*$：軌跡点の調整後座標

$\boldsymbol{g}_k^*$：GCP/TPの調整後座標

重み

$(3) = (5) > (2) > (4) > (1)$

※タイポイントは(4)の重みゼロ

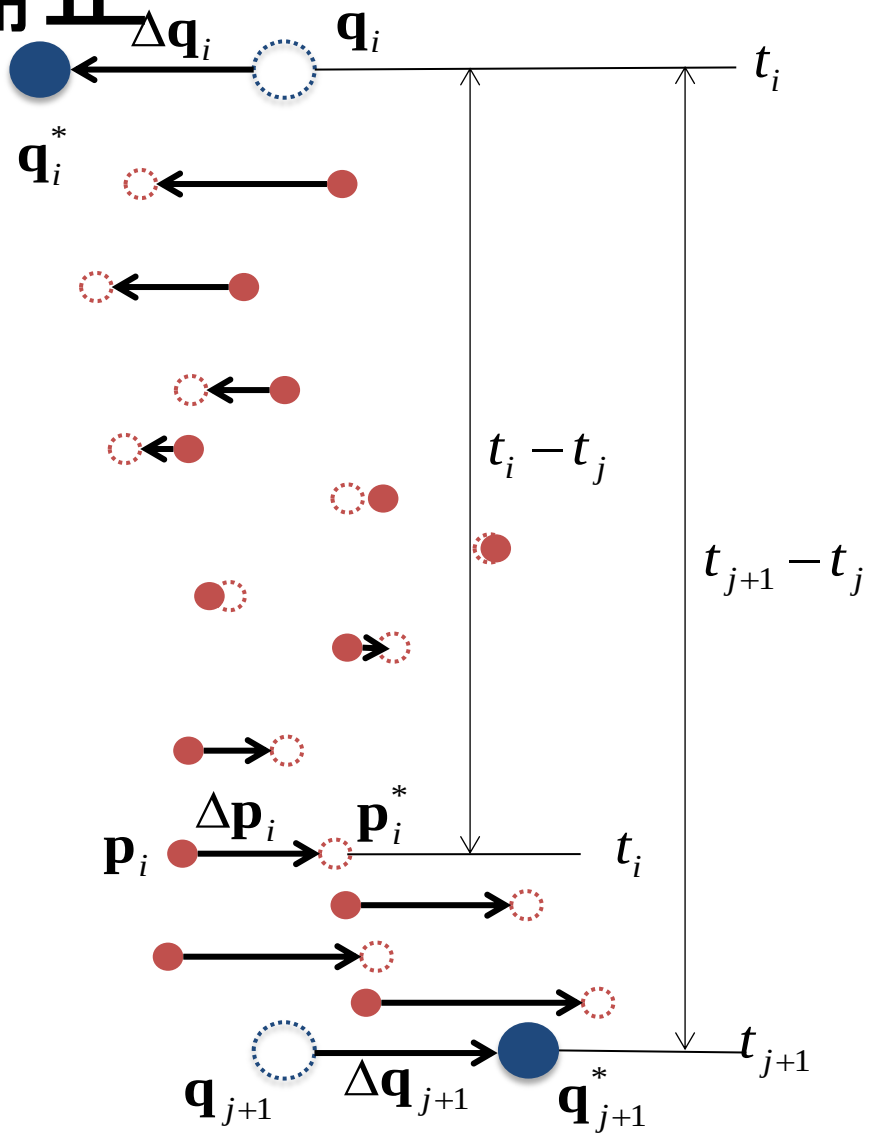
代表軌跡点列数がm、GCP/TP数がnとすれば、未知数は$3 \times (m + n)$ 個

点群の補正

- 代表点間に存在する点群内の
  点の移動量計算
  - 代表点列の移動量から,時刻に基づく線形補間を用いて，点群内の点の移動量を決定

$$\Delta \mathbf{p}_i = \Delta \mathbf{q}_j + \frac{\Delta \mathbf{q}_{j+1} - \Delta \mathbf{q}_j}{t_{j+1} - t_j}(t_i - t_j)$$

Δq 軌跡代表点の移動量
Δp 点群内の点の移動量
ただし $t_j \leqq t_i \leqq t_{j+1}$



点群内の点の補正

$$\mathbf{p}_i^* = \mathbf{p}_i + \Delta \mathbf{p}_i$$

実験データの概要

- 計測諸元

計測日	**2012年12月14日**
計測地域	小田急新百合ヶ丘駅 南側周辺
車両走行速度	40 km / h
GPS/IMU	Heading: 0.01 deg (RMS)
	Roll/Pitch: 0.004 deg (RMS)
絶対位置計測精度	10 cm以下 (GPS良好時)
スキャンレート	100 Hz
発射レート	200 kHz
計測密度	900点 / m^2
計測距離 (MAX / 実効)	500 m / 100 m
測距精度 (1σ)	10 mm

取得データ

走行距離	**7.046 km**
走行時間	22分53秒
総点数	423,465,399
抽出代表軌跡点	1,497

実験

- 基準点7点
- 検証点7点

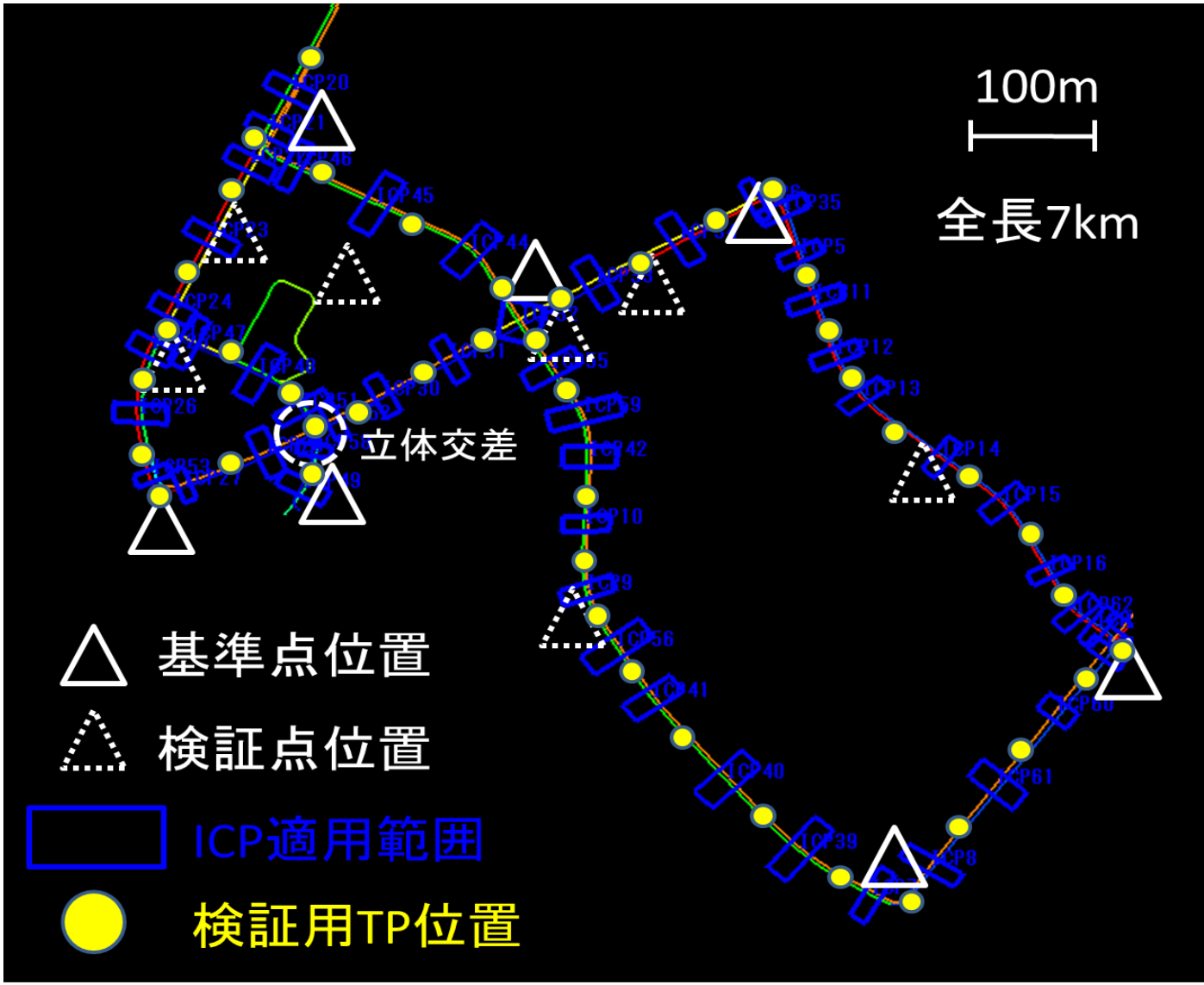
調整計算には用いず、調整後の絶対位置の検証に使用

- ICP57箇所

交差点付近、その他100mに一ヵ所程度設置

- 検証用TP54点

ICP実行箇所の中間付近に設置。調整計算には用いず、調整後の相対位置の較差の検証に使用



ICP実行結果

ICP平均実行点数	ターゲット	1,096,398点
	ソース	523,261点
ICP対応点残差（RMSE）		3.1 cm
実行時間）	全体	63分38秒
	1回平均	1分7秒

使用PC

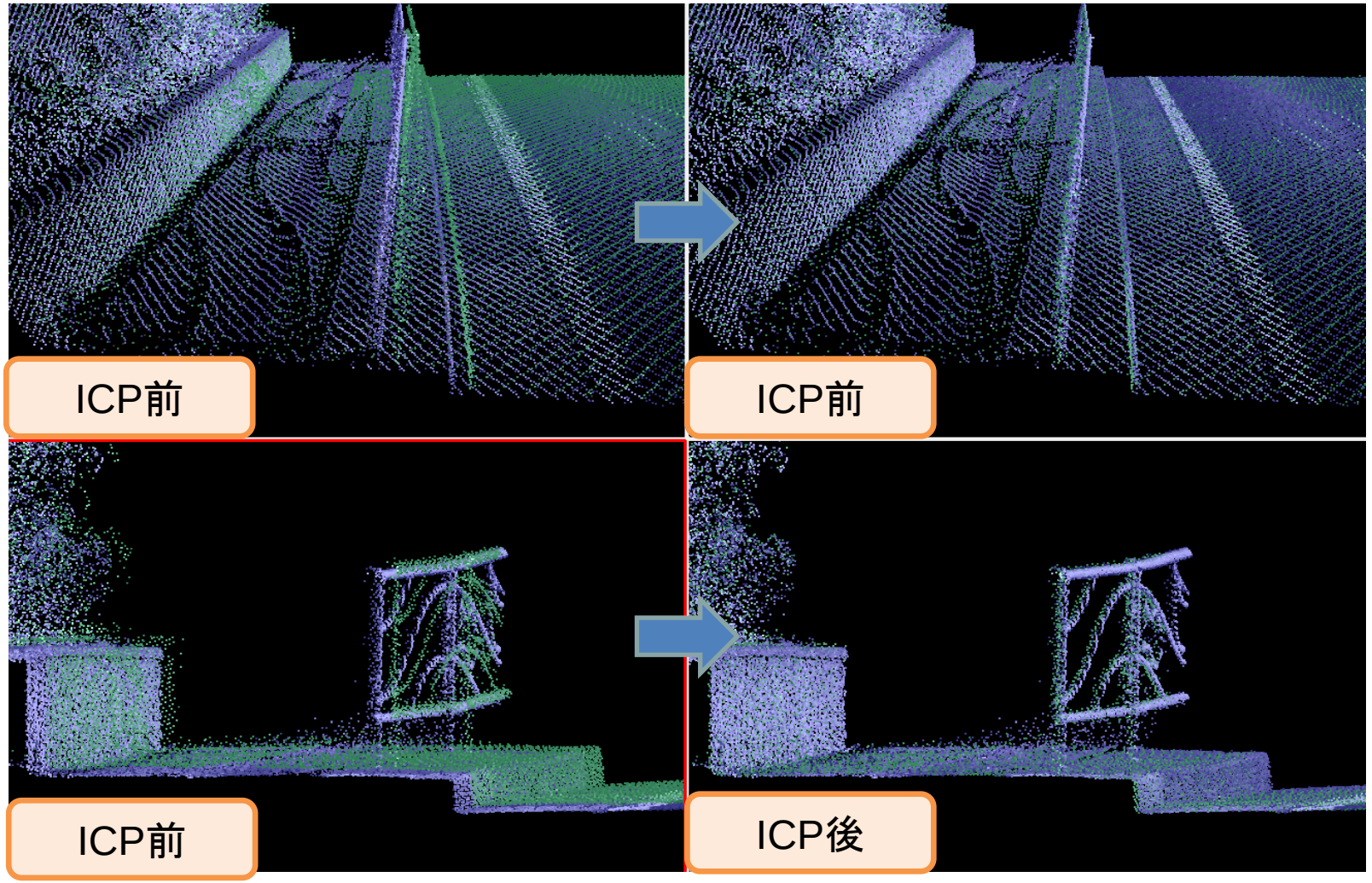
OS: Windows 7 64bit
CPU: Intel® Core™ i7-2700K@3.50GHz
メモリ: 16GB

※並列化処理は行っていない

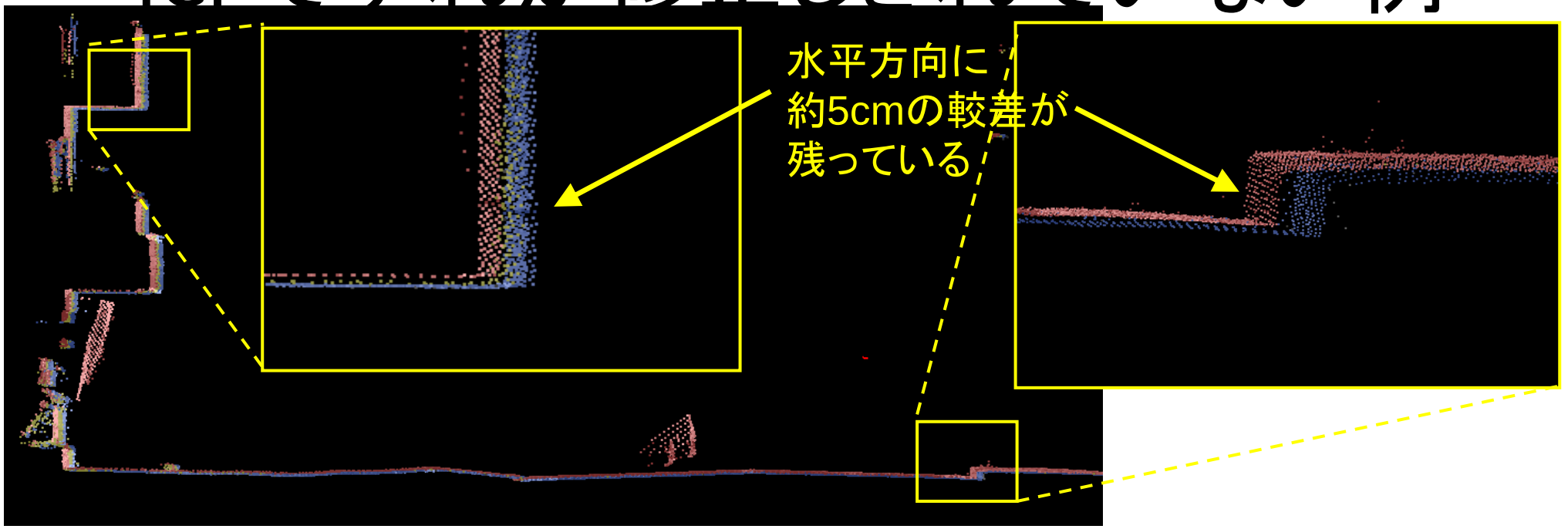
算出された並進パラメータを点群に反映させ目視検査を行った結果、多くの箇所で位置ずれが解消

ICP実行結果の視覚化

- ICPで算出されたシフト量を点群に反映した結果の例



ICPでずれが修正しきれていない例



- ICPがうまくいかない場合に考えらえる原因
  - オブジェクトの種類（面状地物が少ない等）
  - オブジェクトの配置状態
  - 単純なシフト（並進パラメータ）だけでは合わせきれない

調整計算結果

- **検証点残差 ⇒ 絶対精度**

  検証点の調整後座標（点座標の修正を行った後の座標）と既知の測量座標との差を算出

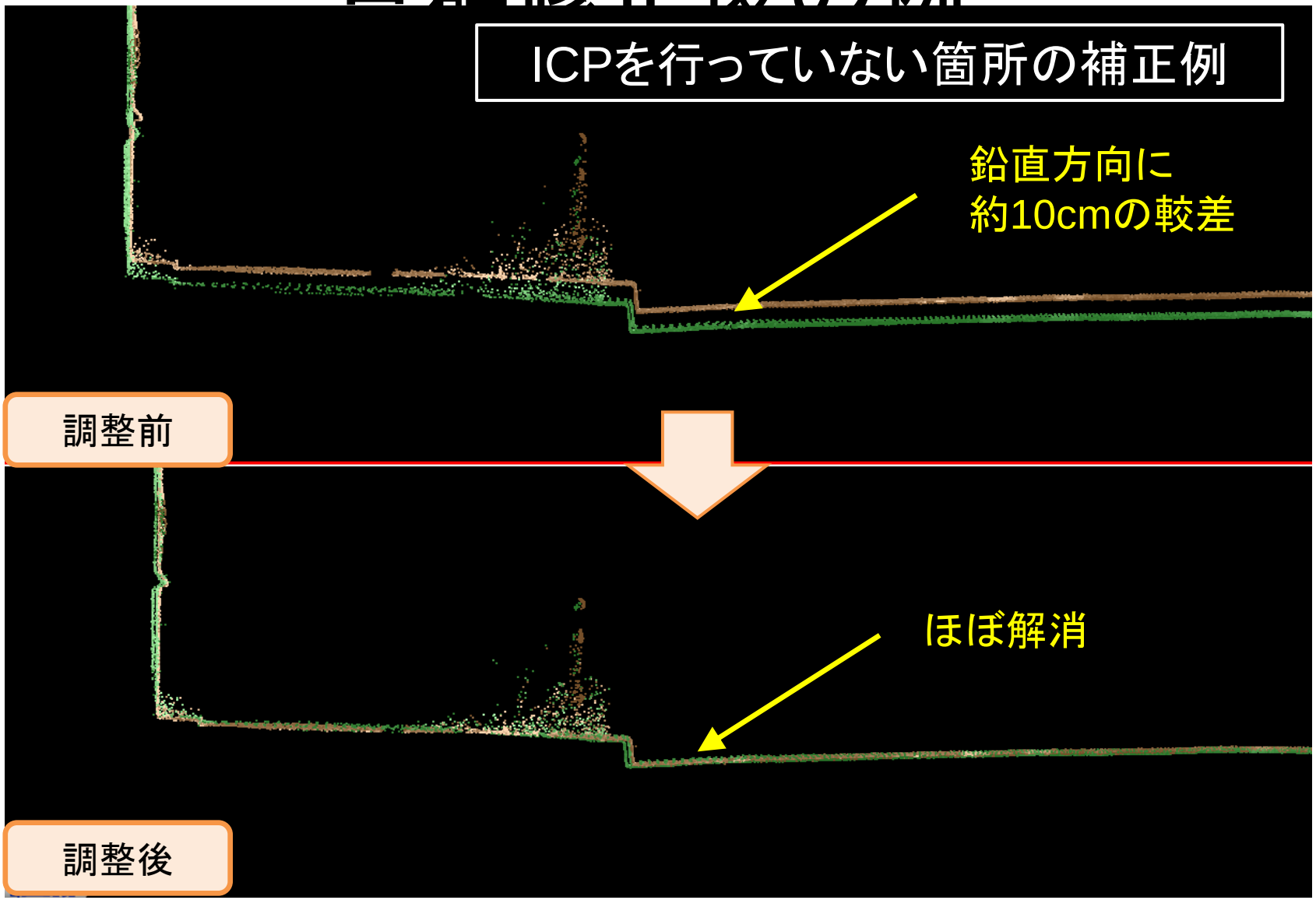
- **タイポイント残差 ⇒ 相対精度**

  異なる走行の点群中から計測した検証用タイポイント間の調整後座標の差を算出

種別		水平方向		鉛直方向	
		修正前	修正後	修正前	修正後
検証点残差（絶対精度）	RMSE	6.4cm	6.0cm	5.6cm	4.2cm
	最大	11.2cm	9.2cm	11.7cm	7.4cm
ﾀｲﾎﾟｲﾝﾄ残差（相対精度）	RMSE	6.4cm	4.7cm	3.5cm	1.5cm
	最大	21.5cm	10.7cm	10.6cm	5.0cm

絶対精度15cm、相対精度5cmの目標値はクリア

点群修正後の例



3Dモデルと点群のレジストレーション

点群の移動解析

概要：研究開発の目的

- **三次元点群の差分解析技術による落石等のモニタリング技術を開発する**

<u>従来の落石調査</u>

- <u>巡視時の目視による点検</u>
  - 定量的な落石移動量の把握が困難
  - アプローチが難しい落石状況の把握が困難

提案する落石調査　点群による落石調査

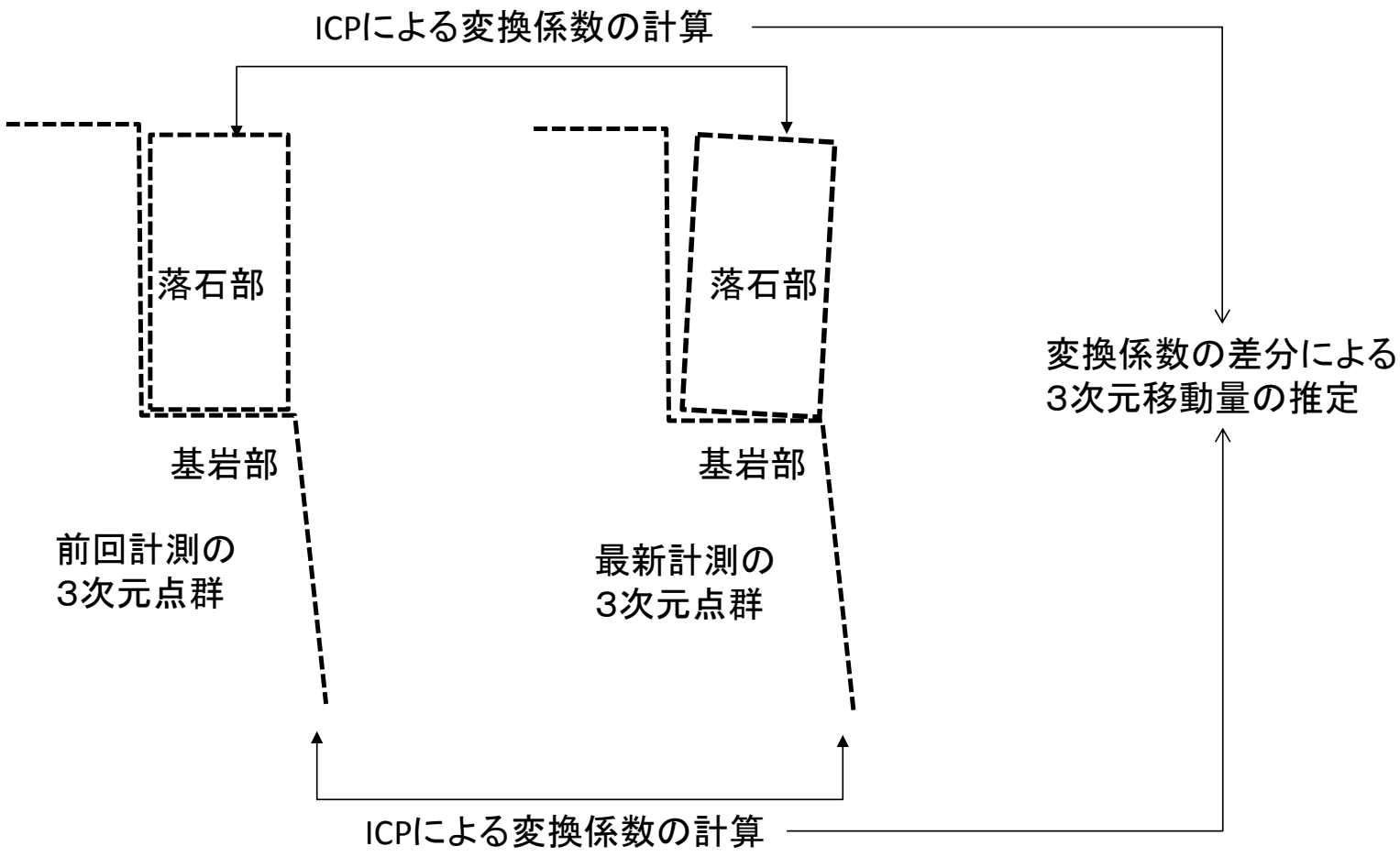
- <u>巡視時に写真撮影を取り入れた点検</u>
  - 写真を撮影するだけで3次元点群処理が可能（SfM技術の採用）
    →客観的データの蓄積が可能
  - 3次元点群（ポイントクラウド）の差分解析による定量的な移動量の把握が可能
  - UAVの活用によりアプローチが難しい落石状況の把握が可能
  - 従来の点検業務に対する追加のコストをかけずに高度化が可能
  - ★ 従来の巡視業務　→　業者発注の場合一箇所〇万円
  - → 職員の点検時に写真撮影を行うことにより、3次元的な落石の移動量を把握可能
  - → 詳細な移動解析については必要時に別途実施
    例：解析サービス：　1か所一回当たり1万円
    例：地元業者にノウハウを提供：　ソフトウェア販売　1ライセンス100万円
  - ★ 点群の前後把握によって数mmの移動量の把握を実現

概要：従来技術との比較

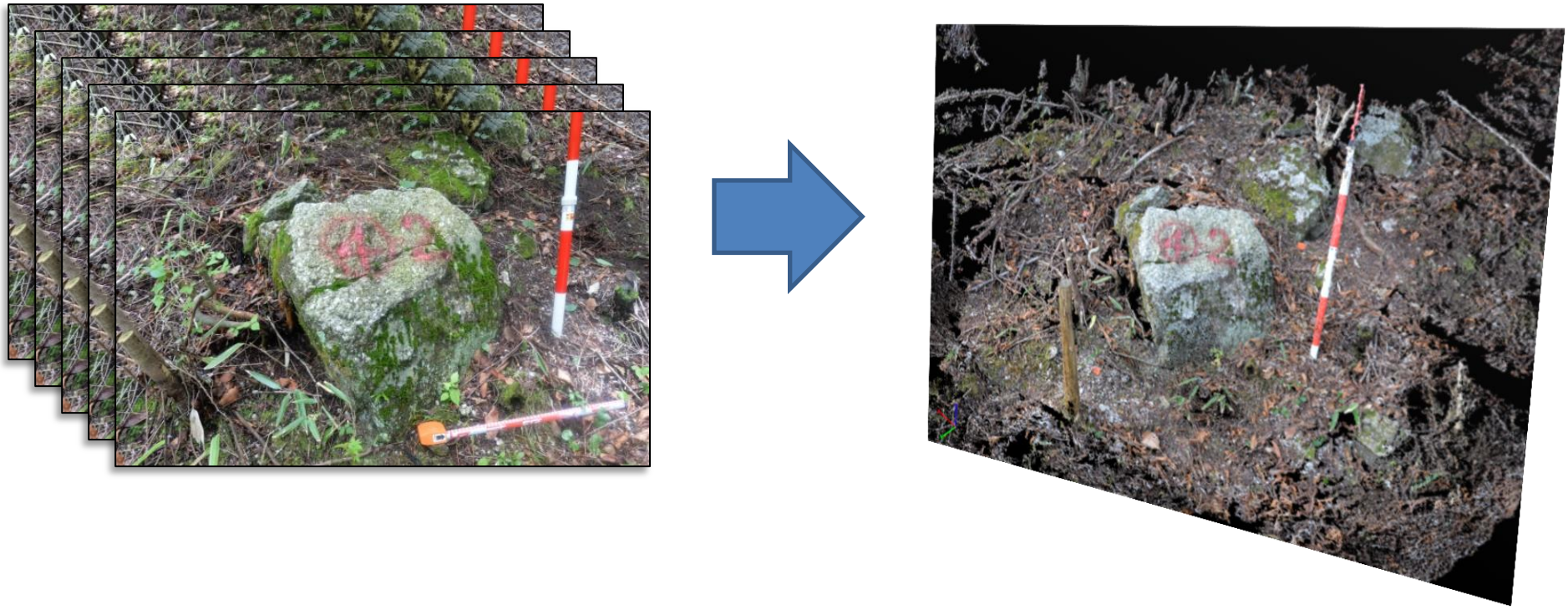
	本技術	目視点検	傾斜計等	GNSS常時観測	監視カメラ
即時性	△	△	△	○	○
観測頻度	△	△	○	○	○
コスト	○	○	△	△	△
動きの詳細性	回転も含む観測が可能	観測者の主観に依存	回転等を見るには複数設置が必要	回転等を見るには複数設置が必要	
定量解析	○	×	○	○	△
精度	mm～cm	―	mm	mm～cm	

＊本技術は実際に移動が起こっている落石のスクリーニングに活用可能

概要：研究開発の内容


ICPによる変換係数の計算
落石部
基岩部
前回計測の
3次元点群
落石部
基岩部
最新計測の
3次元点群
変換係数の差分による
3次元移動量の推定
ICPによる変換係数の計算

基礎技術：写真から3次元点群へ
― Structure From Motion ―



基本アルゴリズム（特許申請中）

初回画像撮影

モニタリング画像撮影

既存SfMソフトウェアを活用

点群生成

仮GCP計測

仮GCPを用いた点群生成

参照点群

モニタリング点群

既開発システムを援用

分類

背景点群

監視部分点群

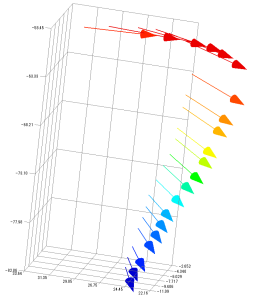
開発部分

位置合わせ

位置合わせ

移動分析

取り扱い注意（H28WG限り）

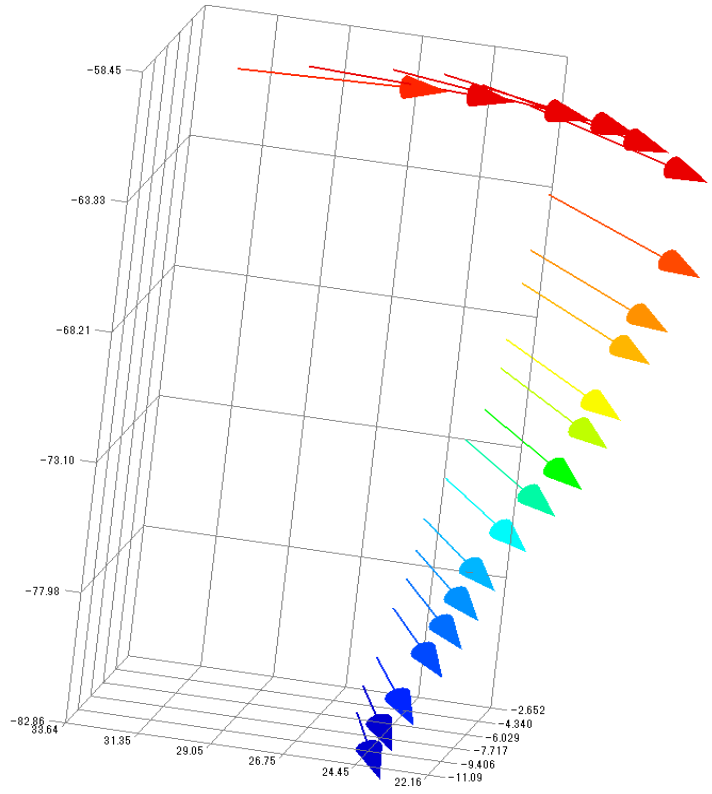


概要：実施事例

移動前

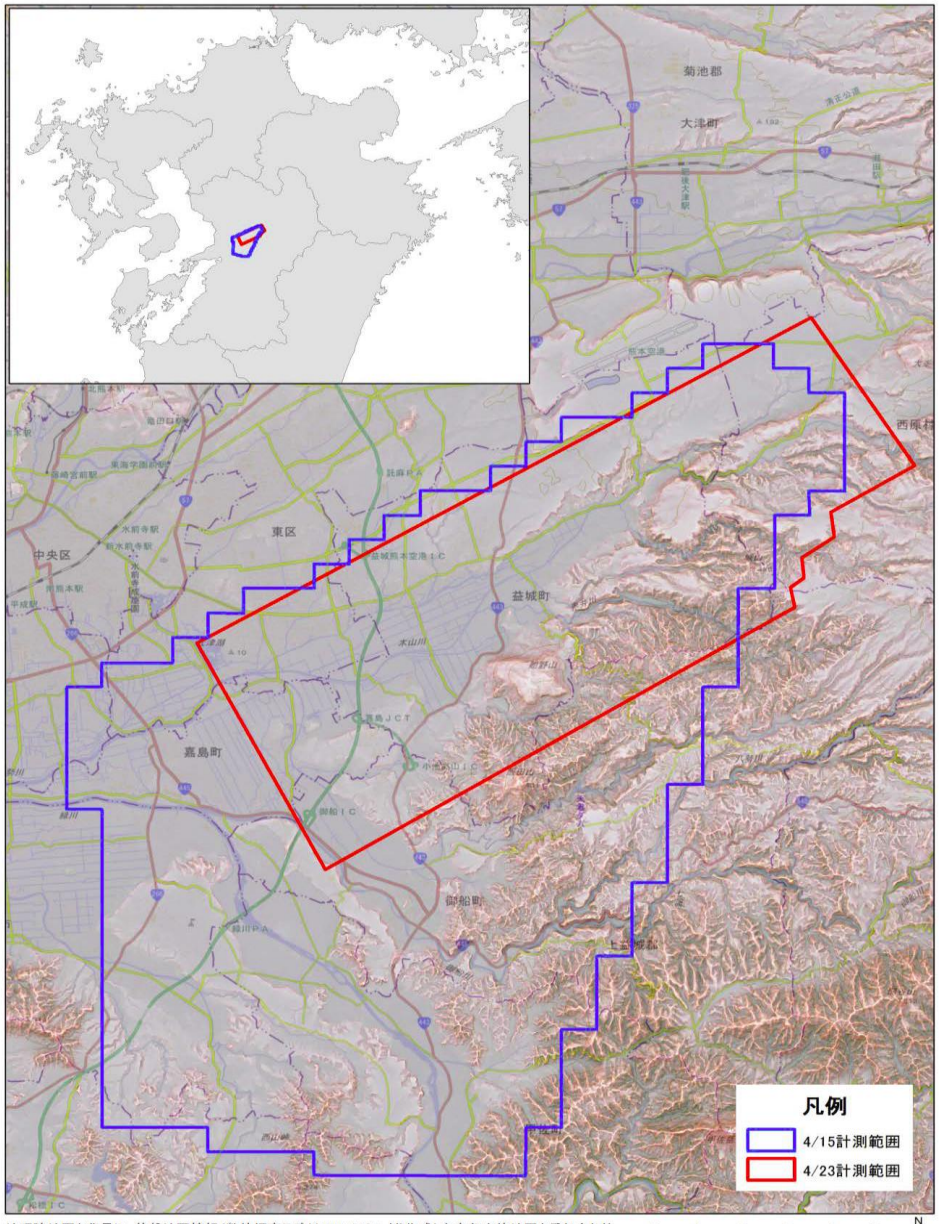
移動後

差分解析結果表示



移動前後の落石の移動を
3次元的に分析

熊本地震本震前後の航空レーザデータ差分解析



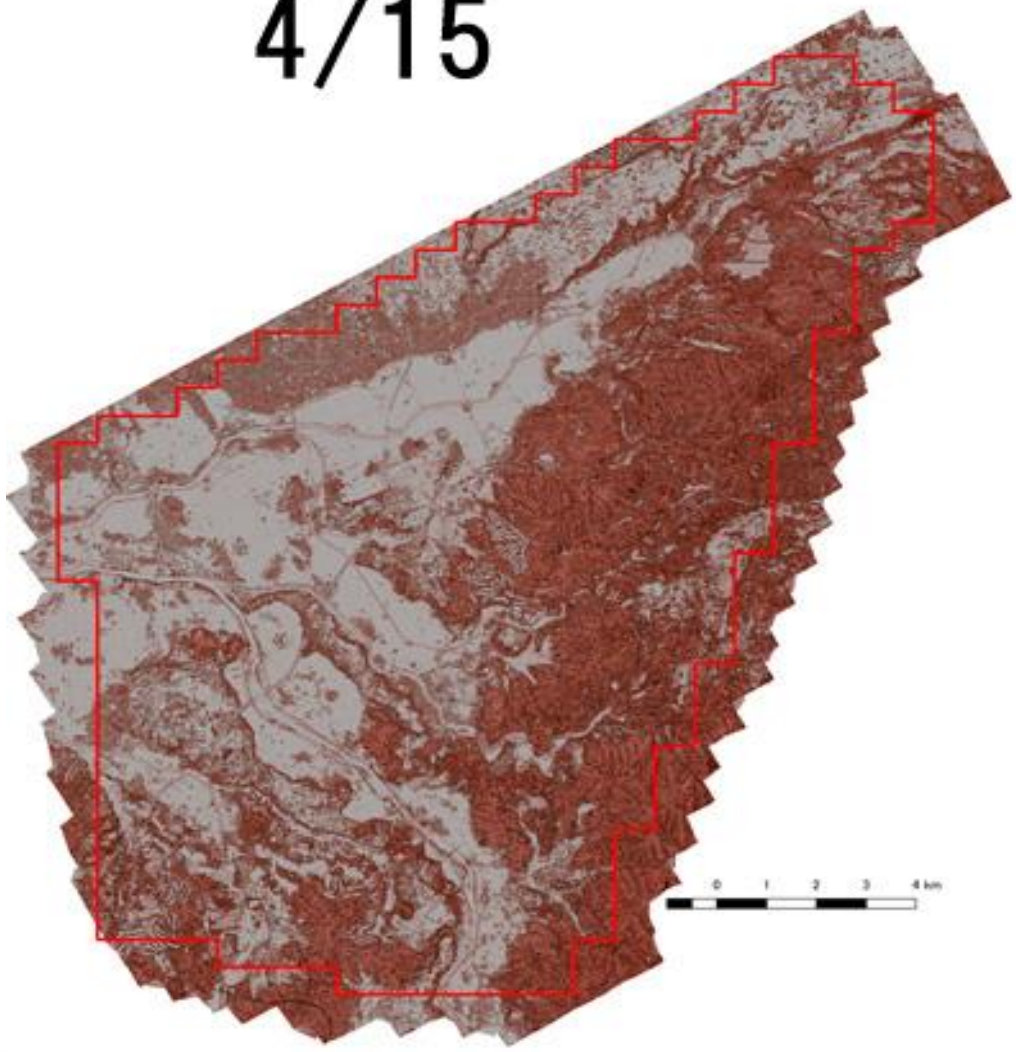
地理院地図を背景に、基盤地図情報（数値標高モデル）10mメッシュより作成した赤色立体地図を重ね合わせ

空間情報コンサルタント
アジア航測株式会社

LIDAR data of KUMAMOTO earthquake site

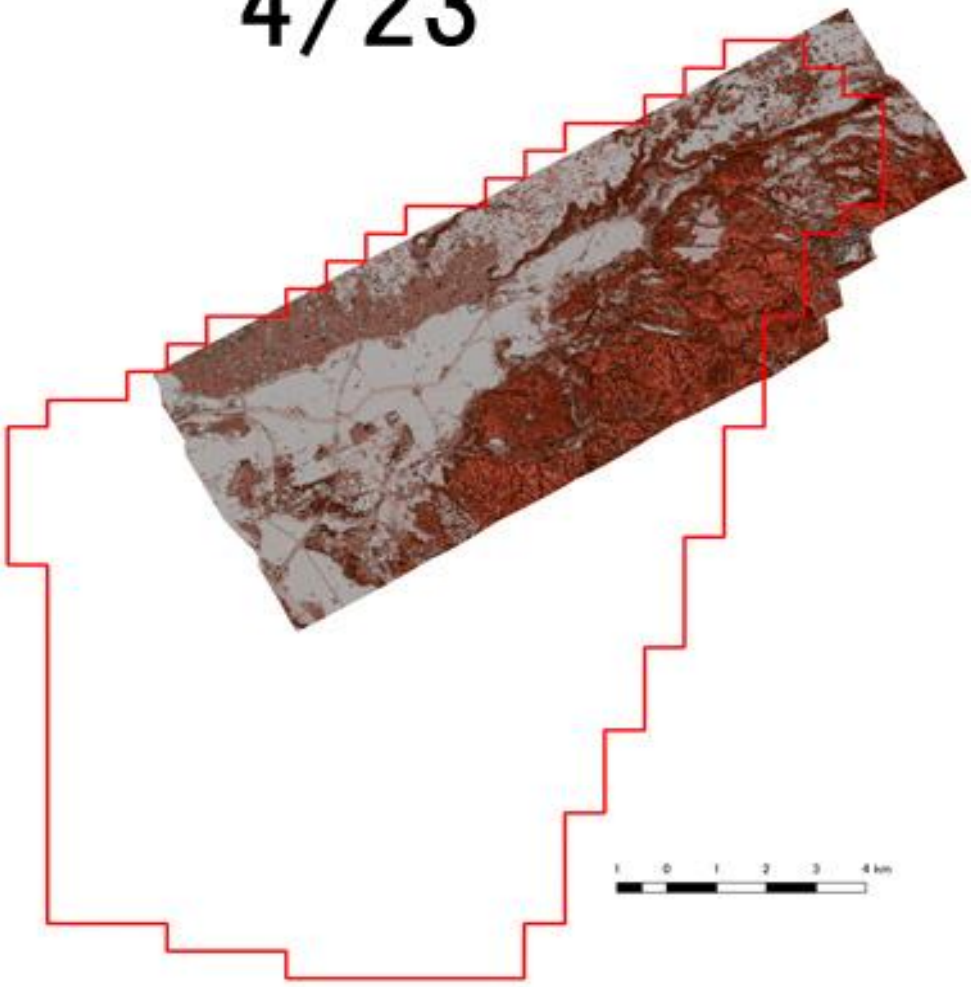
Pre-event

4/15

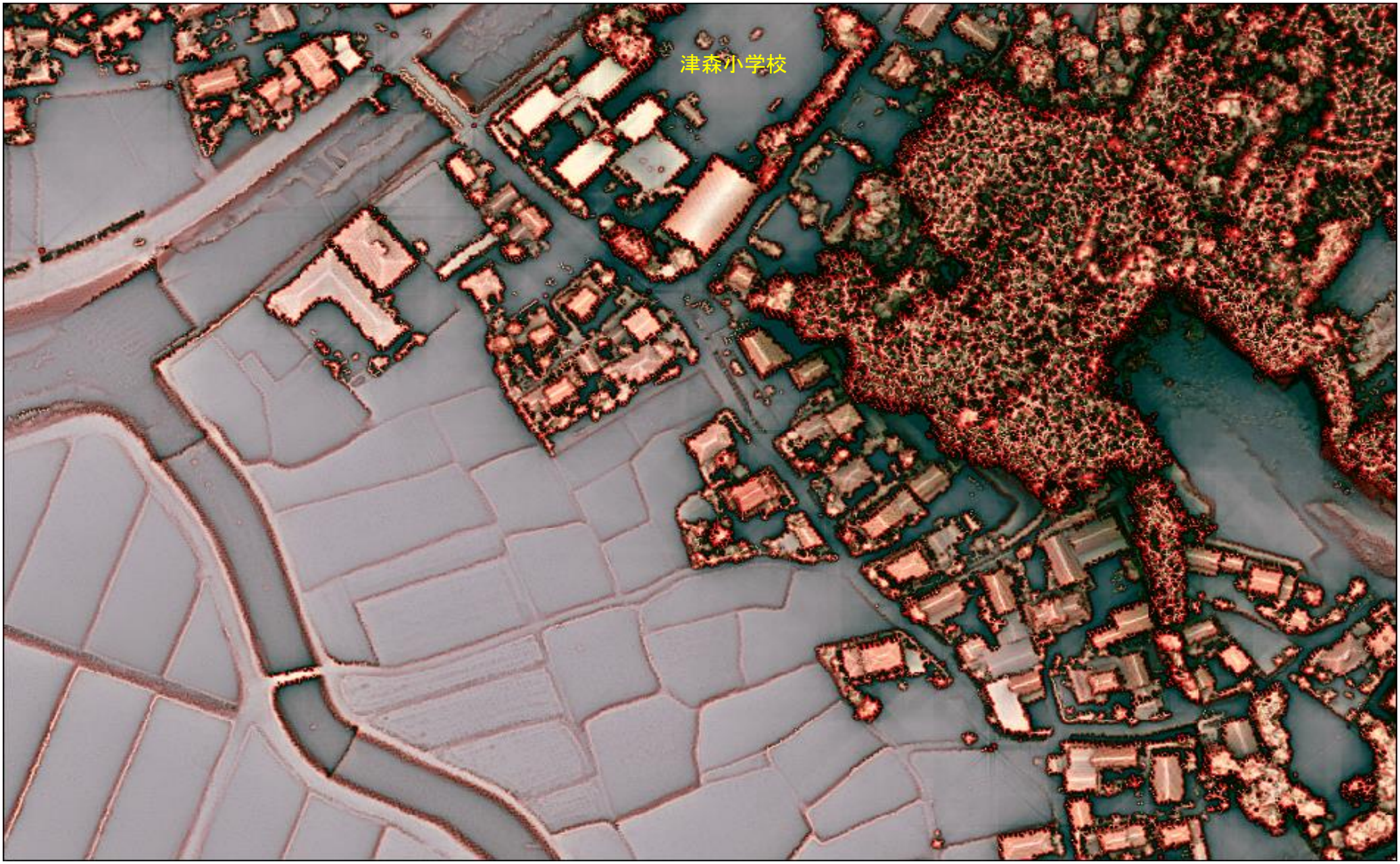


Post-event

4/23

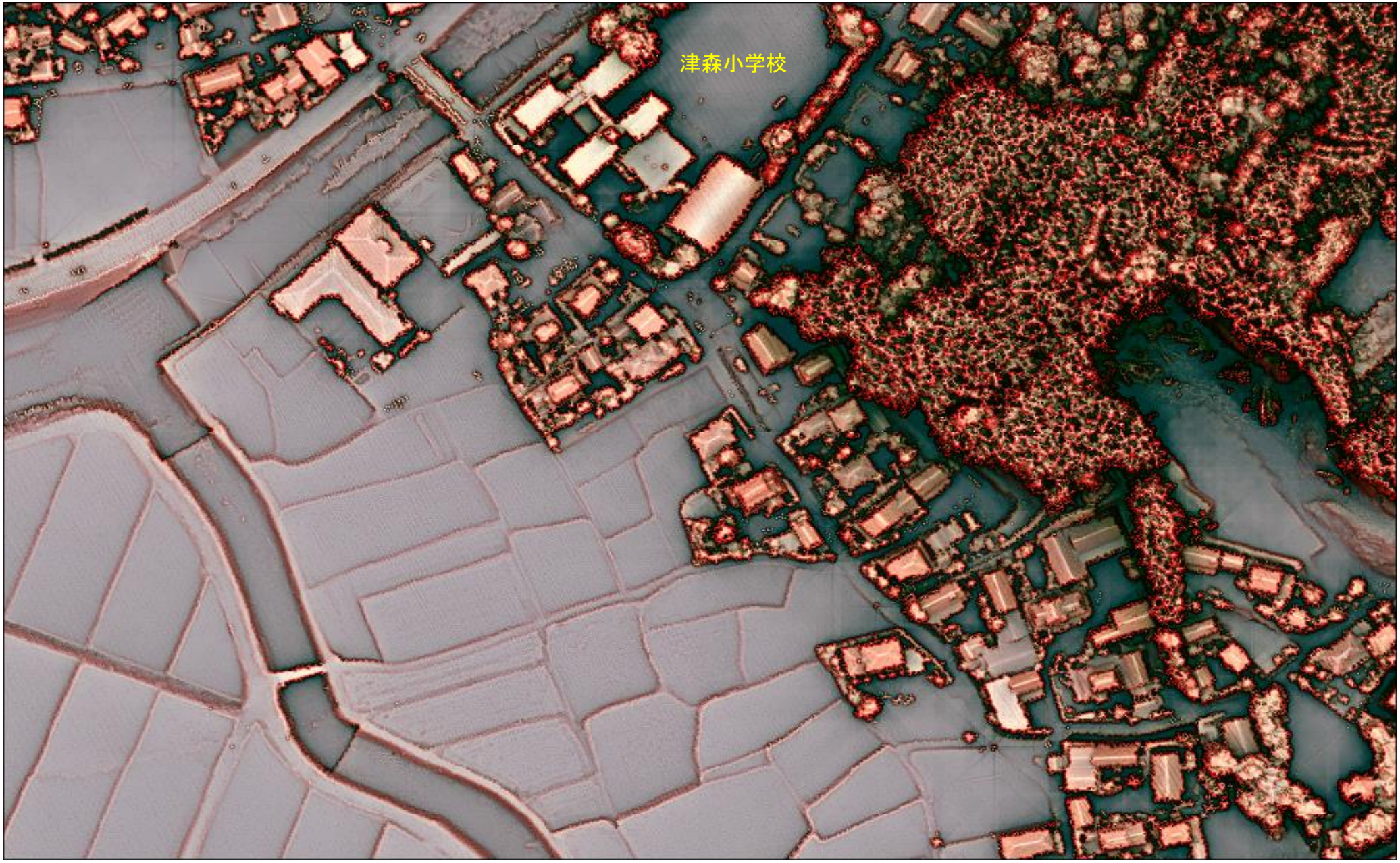


空間情報コンサルタント
アジア航測株式会社



4/15計測　DSMデータによる赤色立体地図
益城町　津森小学校周辺

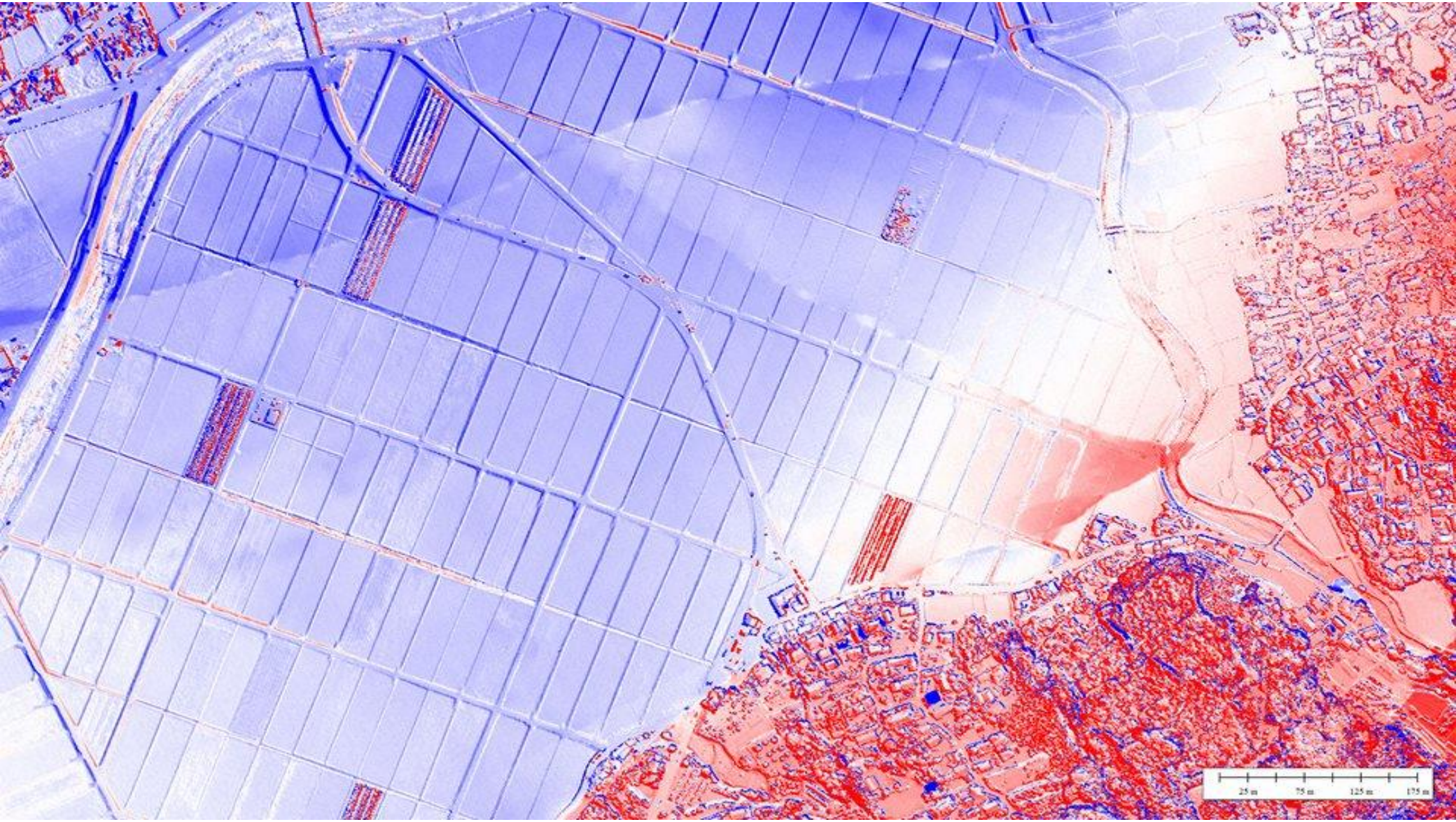
空間情報コンサルタント
アジア航測株式会社



4/23計測　DSMデータによる赤色立体地図
益城町　津森小学校周辺

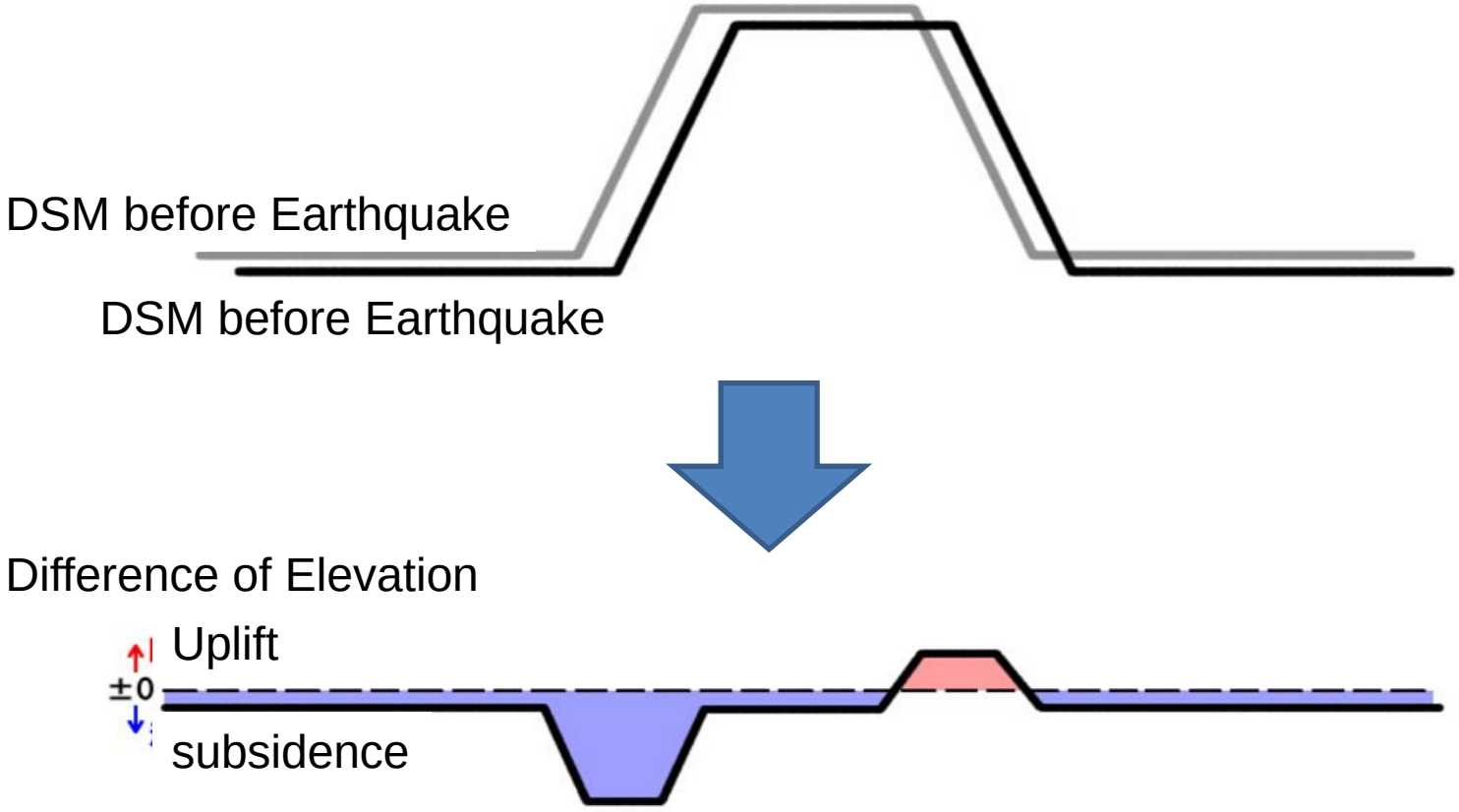
断層（右ずれ）による地盤変動が確認される

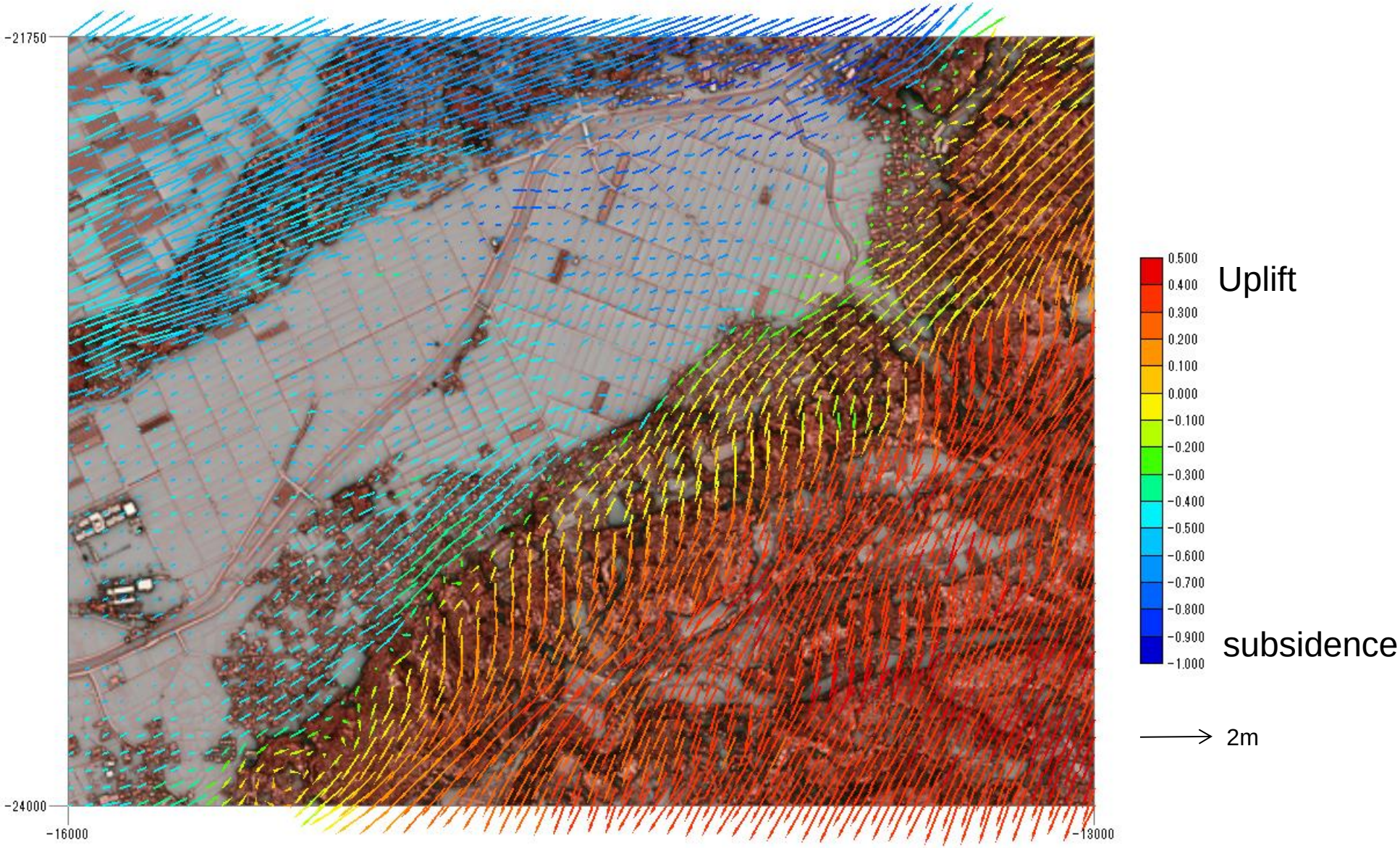
空間情報コンサルタント
アジア航測株式会社



空間情報コンサルタント
アジア航測株式会社

Coseismic displacement with horizontal movement





空間情報コンサルタント
アジア航測株式会社

3D点群の精度評価

The theme of this research

- How can we evaluate the precision of a point clouds created by SFM software (Pix4Dmapper, PhotoScan, Smart3DCapture, …)?
  - We use GCP or checking points
  - We compare it with a reference point cloud (measured by laser scanning)
  - In most case evaluations treat the position of the point cloud, not shape of objects

The theme of this research

- How can we evaluate the quality of the **shape** of a point cloud created by SFM software?
  - If we cannot get any reference point clouds
  - If point cloud **have not correct scale**

The idea of this research

- If the quality of the point cloud is good, we can expect that we get almost same result in another measurement of point cloud.

⇒ Measure twice and compare!

How to compare two point clouds?

- One point clouds should be fit (registered) to the other point cloud

  ⇒ ICP algorithm

  ⇒ Distance between two point cloud may be one index of the quality of the point cloud(s)

Point cloud precision

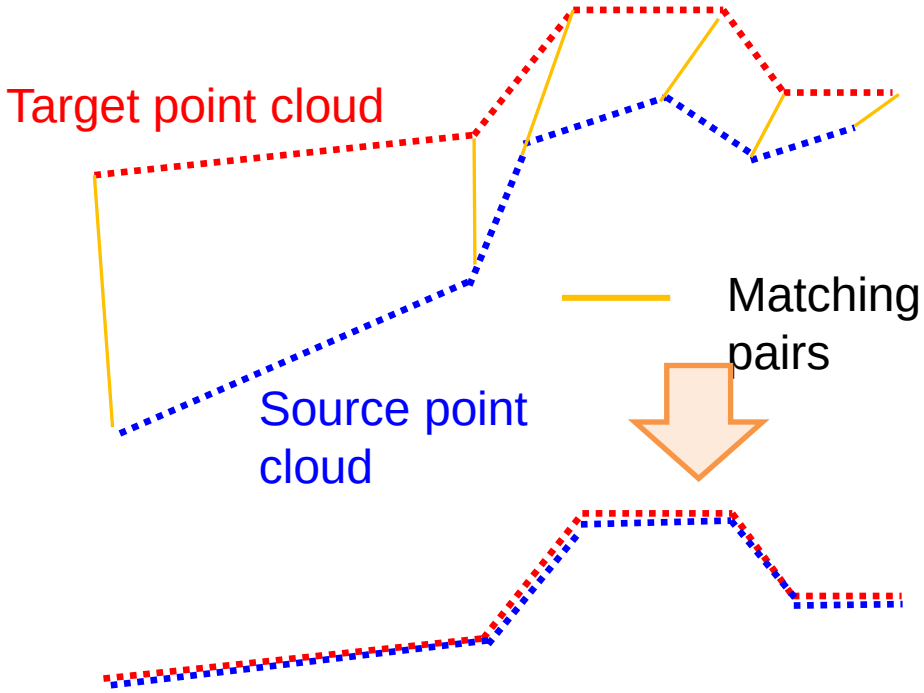
- Precision / quality of point cloud created by SFM software is affected by:
  - Imaging
  - Quality of camera calibration (inner orientation)
    - Systematic error
  - Quality of Aerial triangulation (bundle adjustment)
    - Systematic error
  - Quality of Image matching
    - Random error / Outliers
    - Systematic error (tendency of software, in other words, **bug!)**

How to compare two point clouds?

- If two measurement have same systematic error, it cannot be extracted.
- To avoid systematic error to have same tendency, two point clouds should be created independently
  - Camera Calibration
  - Aerial Triangulation (bundle adjustment)

Point Cloud Registration by ICP

- ICP (Iterative Closest Point) (Besl and McKay, 1992)

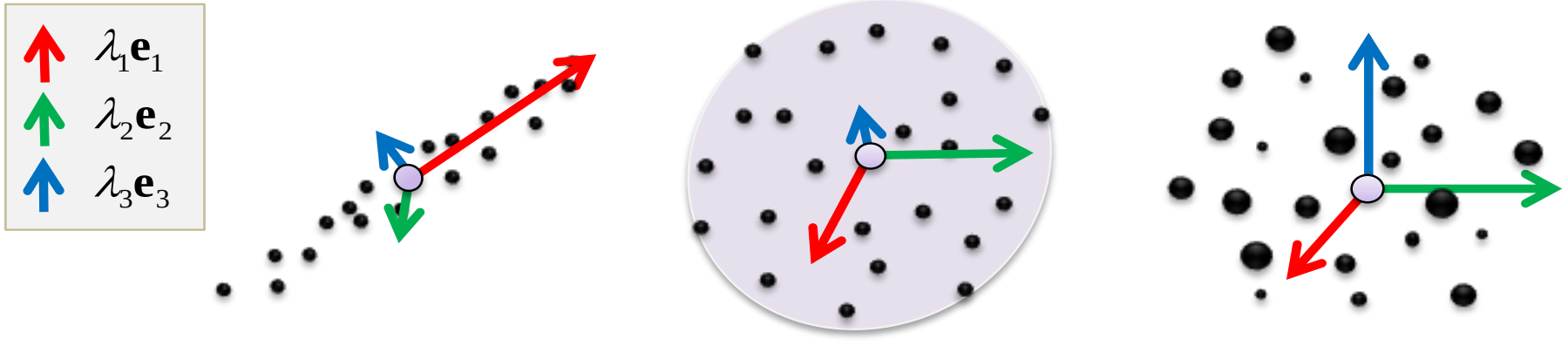


1. Find closest matching point
2. Move points by rotation and transformation so as to minimize square distances of matching point

*Repeat 1-2 till convergence

CCICP (Classification and Combined ICP) (Takai et al 2013)

- Before registration, CCICP classifies all points into linear points, planar points and scatter points by analyzing local point distribution by PCA (Principle Component Analysis)



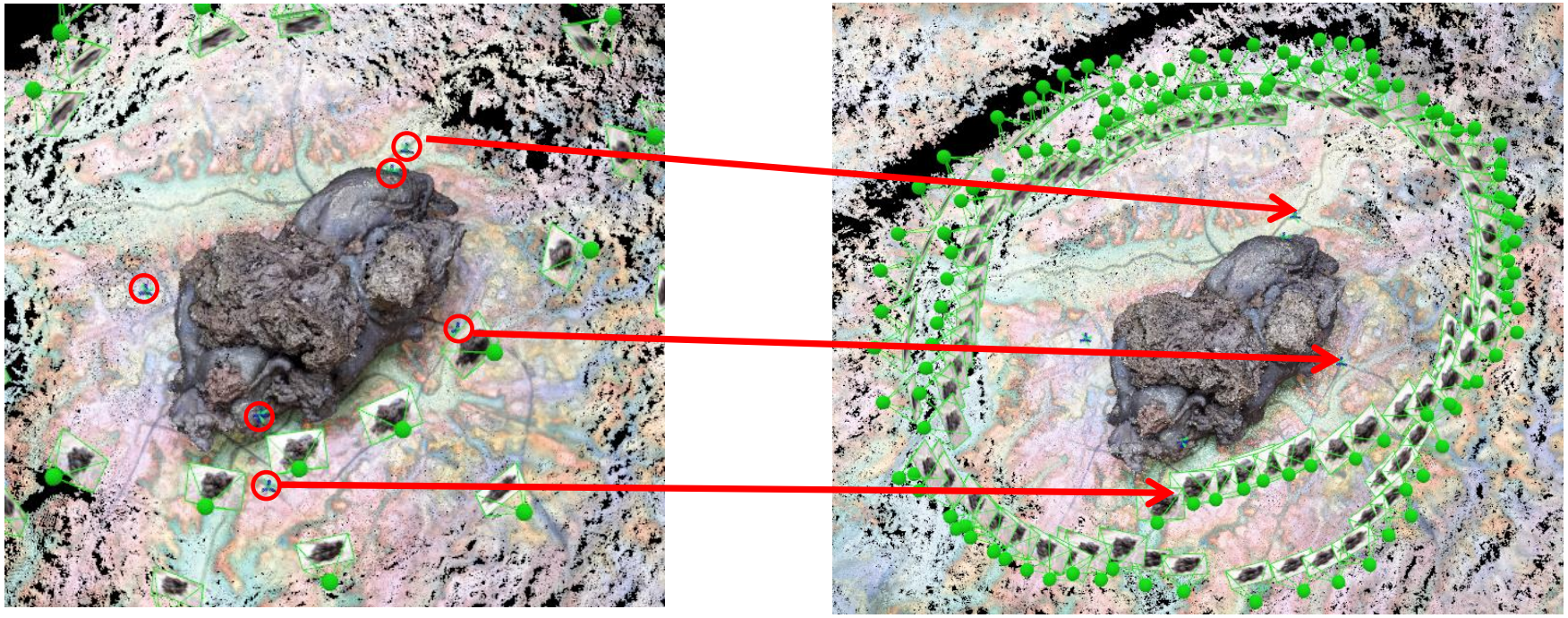
The CCICP algorithm (Takai et al 2013)

- Matching pairs are selected within the same classification by PCA
- Point-to-plane distance is adopted for planar point pairs to get better fit on surface of an object
  - Point -to-point distance: $|T \cdot Ps - Pt|$
  - Point-to-plane distance: $|(T \cdot Ps - Pt) \cdot nt|$
    - nt: normal vector around Pt calculated by PCA
- The CCICP calculates the transformation matrix T between two point clouds to minimize sum of both type of square distances simaltaneously

Creating point clouds with temporary GCPs

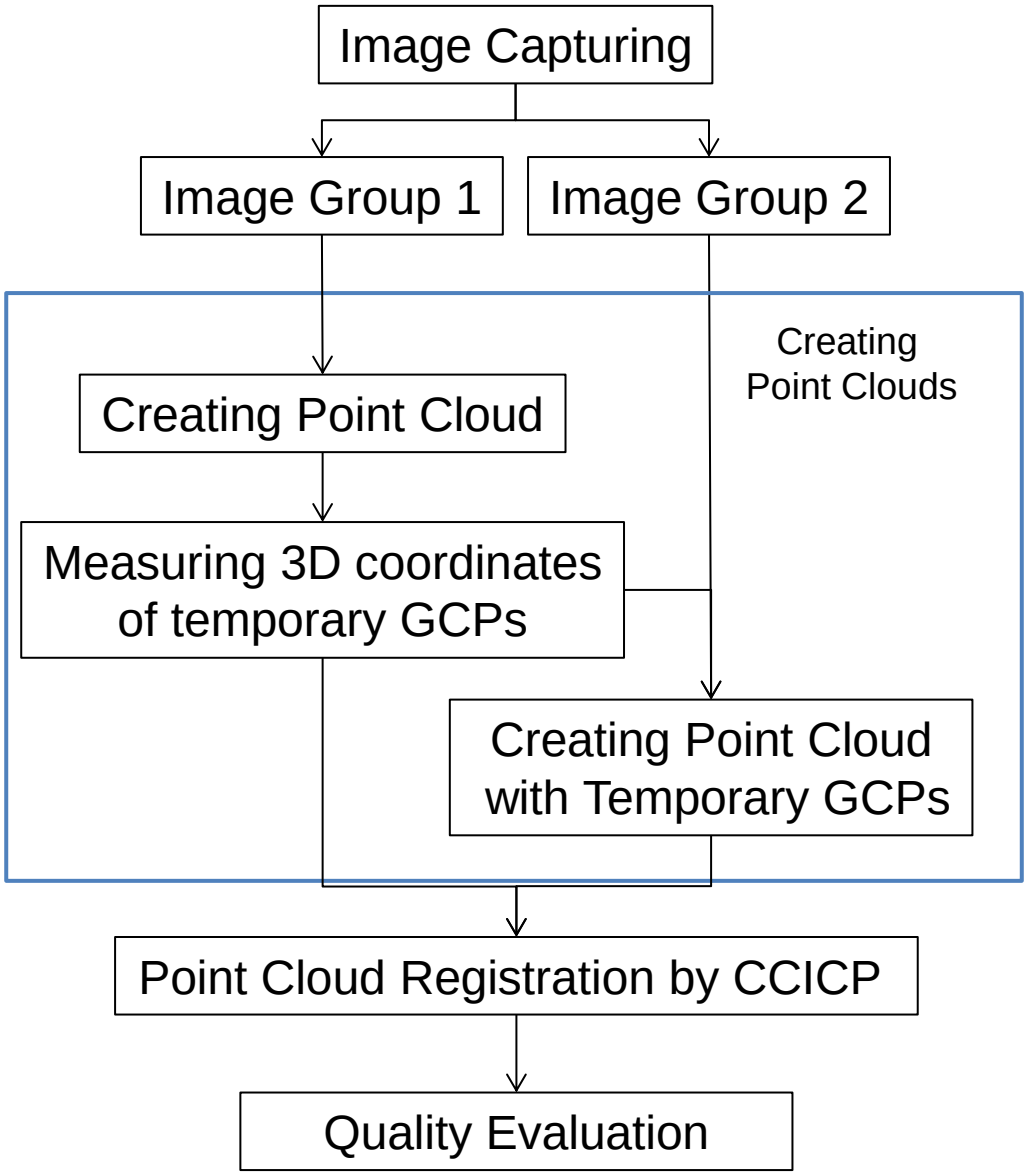
Point cloud of image group 1

Point cloud of image group 2



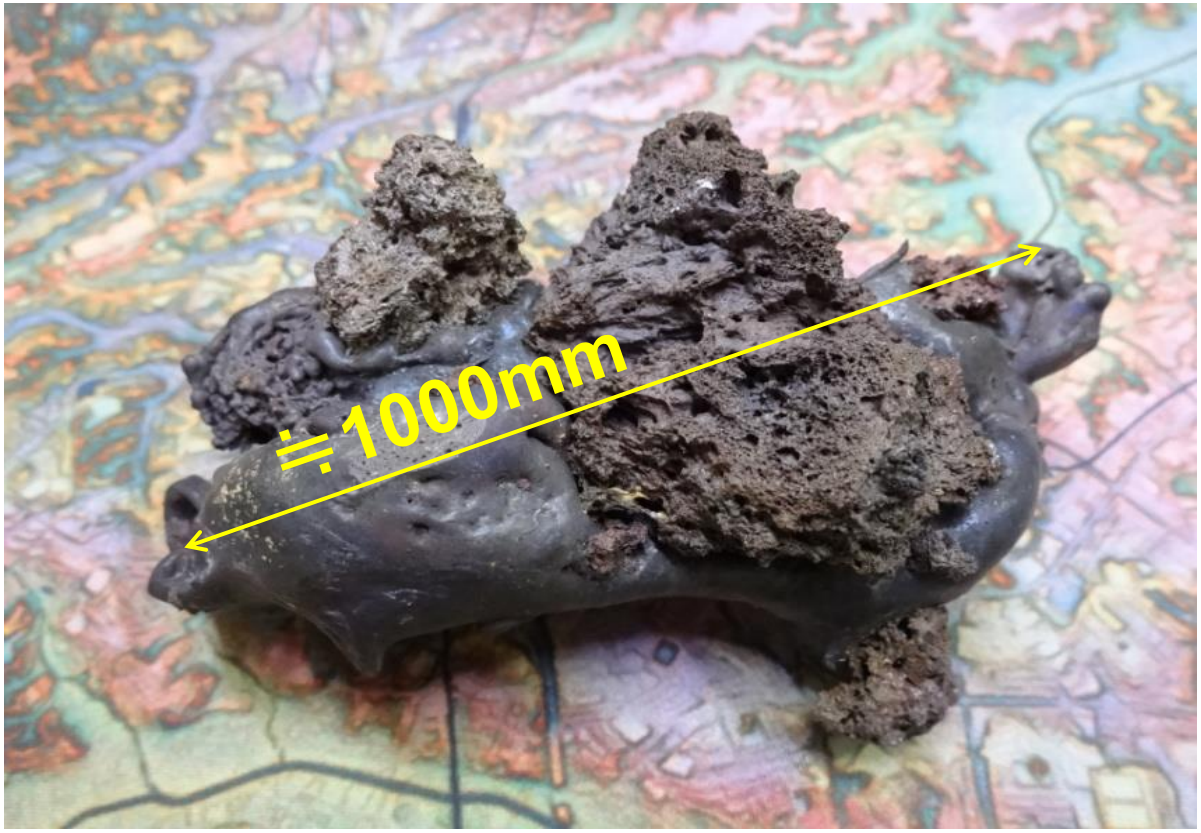
- The two of these point clouds are adjusted to have almost the same coordinate system by:
- - creating temporary GCPs measured in the point clouds of one group of images
- - using the GCP for creating point clouds of the other group of images
- ⇒ Good initial estimation of CCICP is achieved.

Outline of the Qualification



Test and Result

Test Object



Lava stone of Izu Oshima Island

Image Capturing

Convergent image capturing
(more than hundred images were captured twice)

Image resolution: 0.03mm/pixel

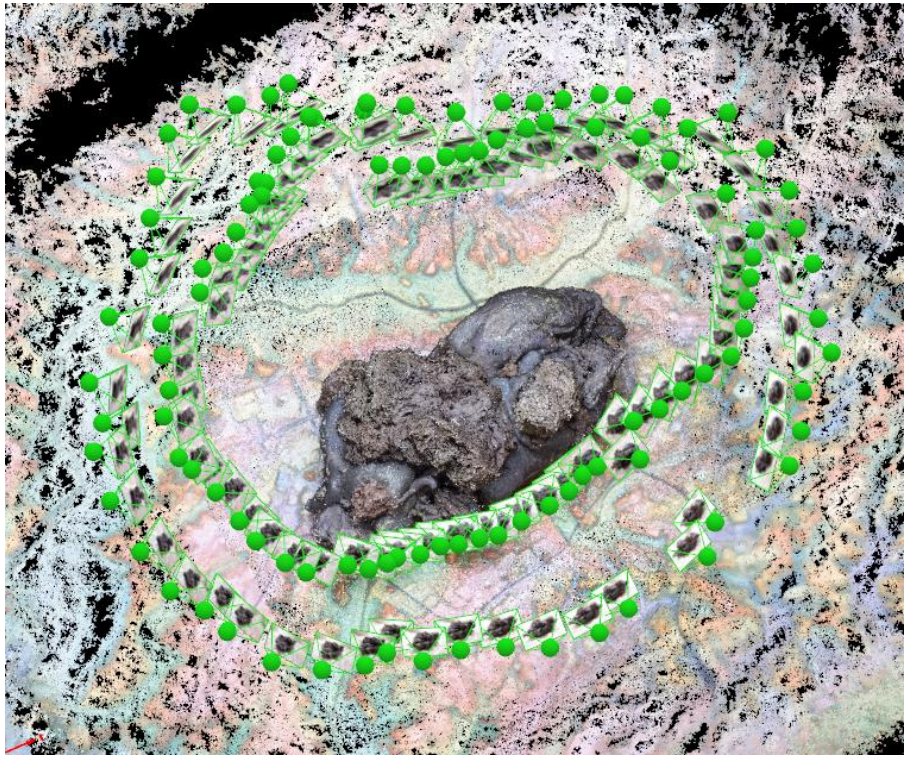
SONY Cyber-shot DSC-WX200
(common consumer type of digital camera)

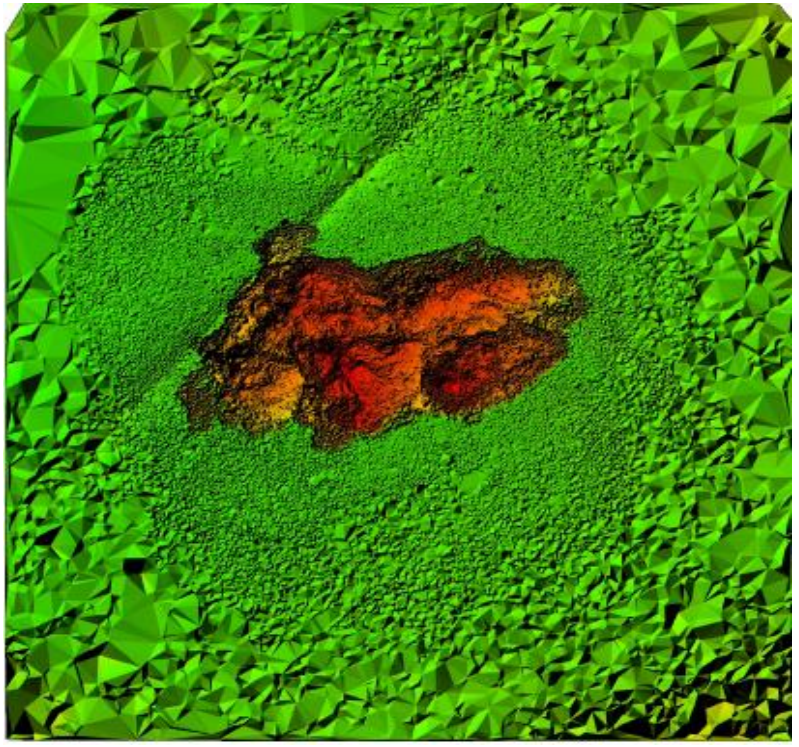
Two set of images

	Image Set A	Image Set B
Number of Images	111	125
Camera	SONY Cyber-shot DSC-WX200	SONY Cyber-shot DSC-WX200
Image Resolution	About 0.03mm	About 0.03mm

*Focusing, aperture, shutter speed and ISO were set automatically.

Creating point clouds



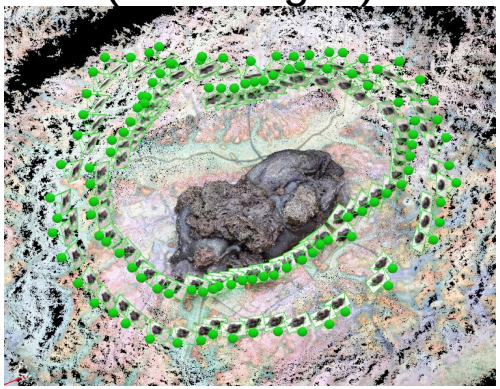


-3D point clouds were created by SFM Software (Pix4Dmapper)
-The unit length of the point cloud was about 1mm
(In following presentation, 1 unit length is mentioned as “1mm”)

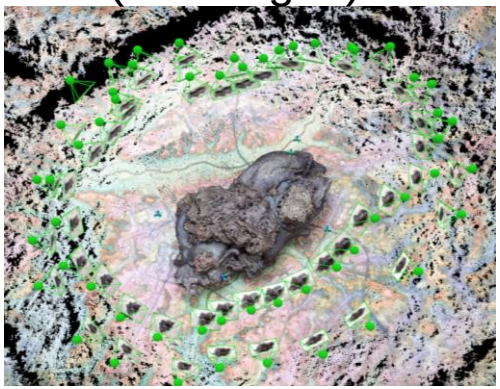
Four registration test patterns

Point clouds created from image set A

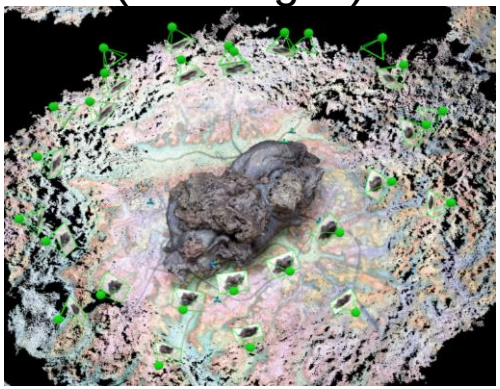
A-1 (111 images)



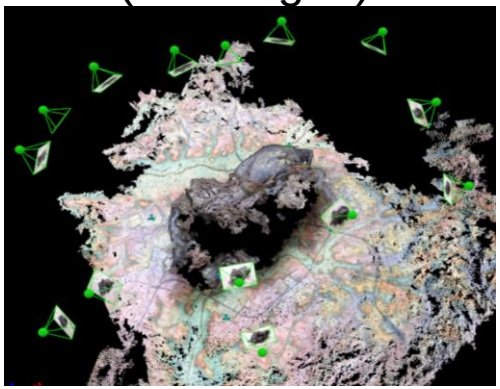
A-2 (56 images)



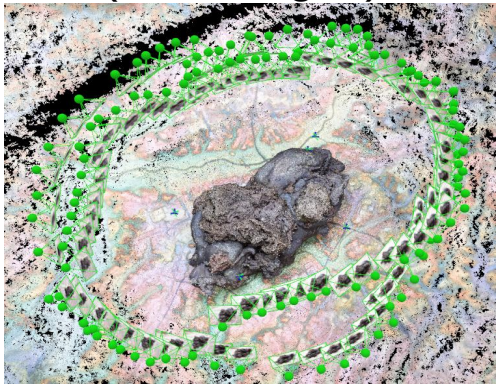
A-3 (28 images)



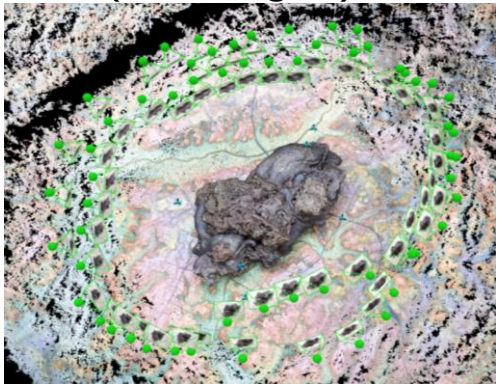
A-4 (14 images)



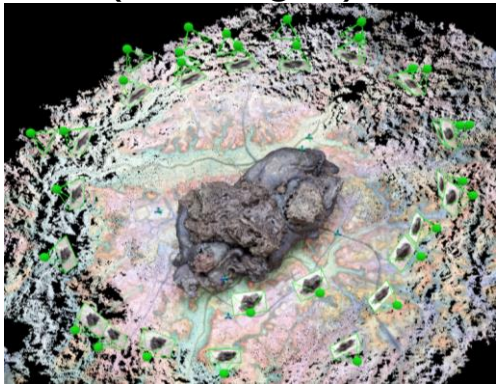
B-1 (125 images)



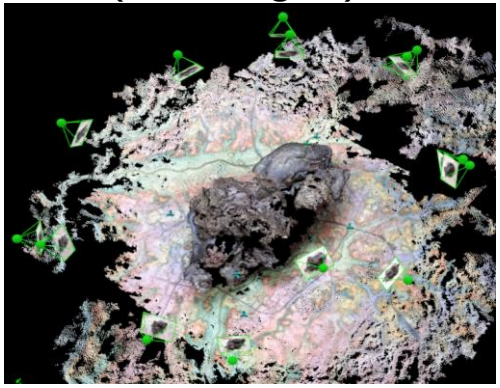
B-2 (63 images)



B-3 (32 images)



B-4 (16 images)

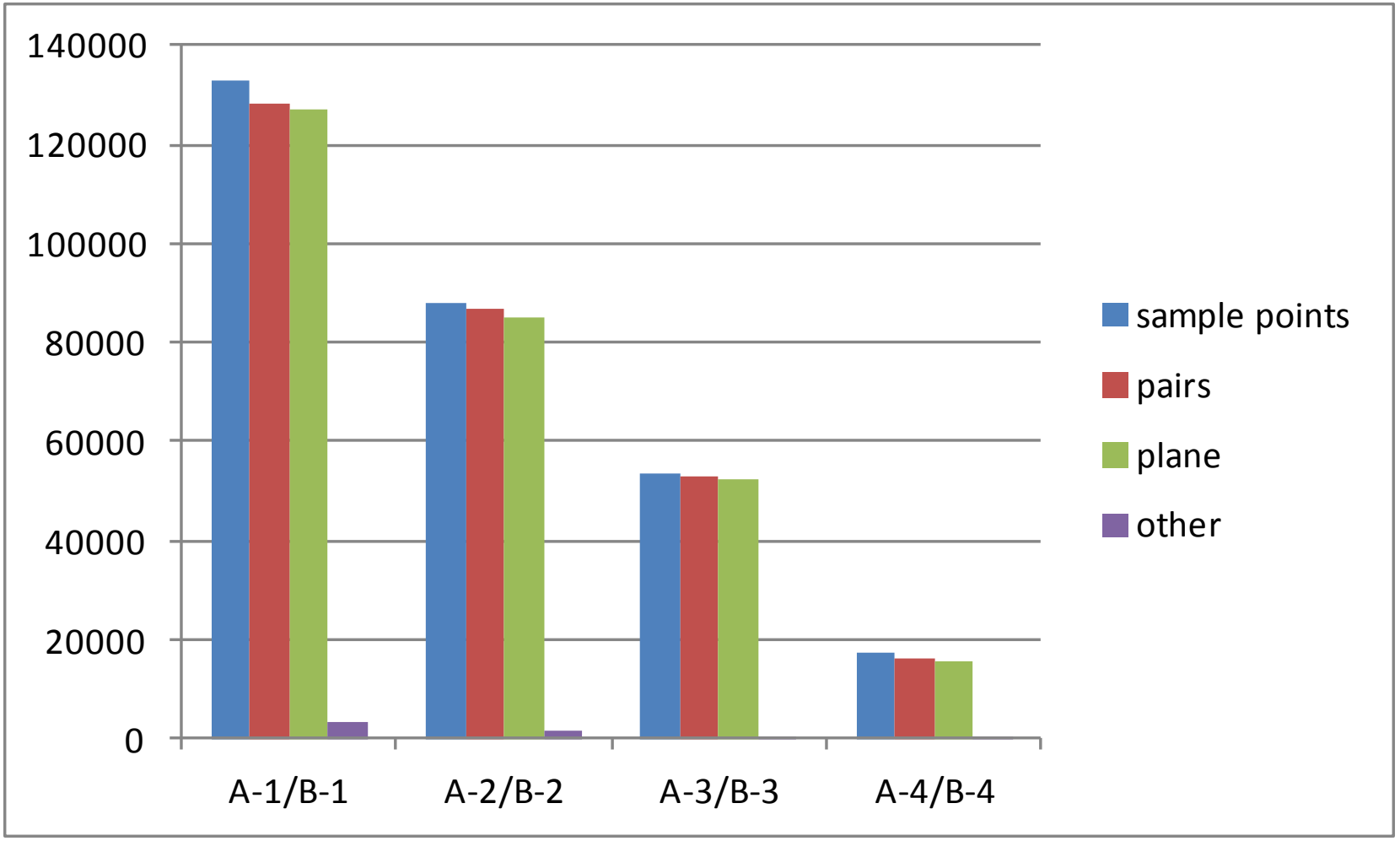


Point clouds created from image set B

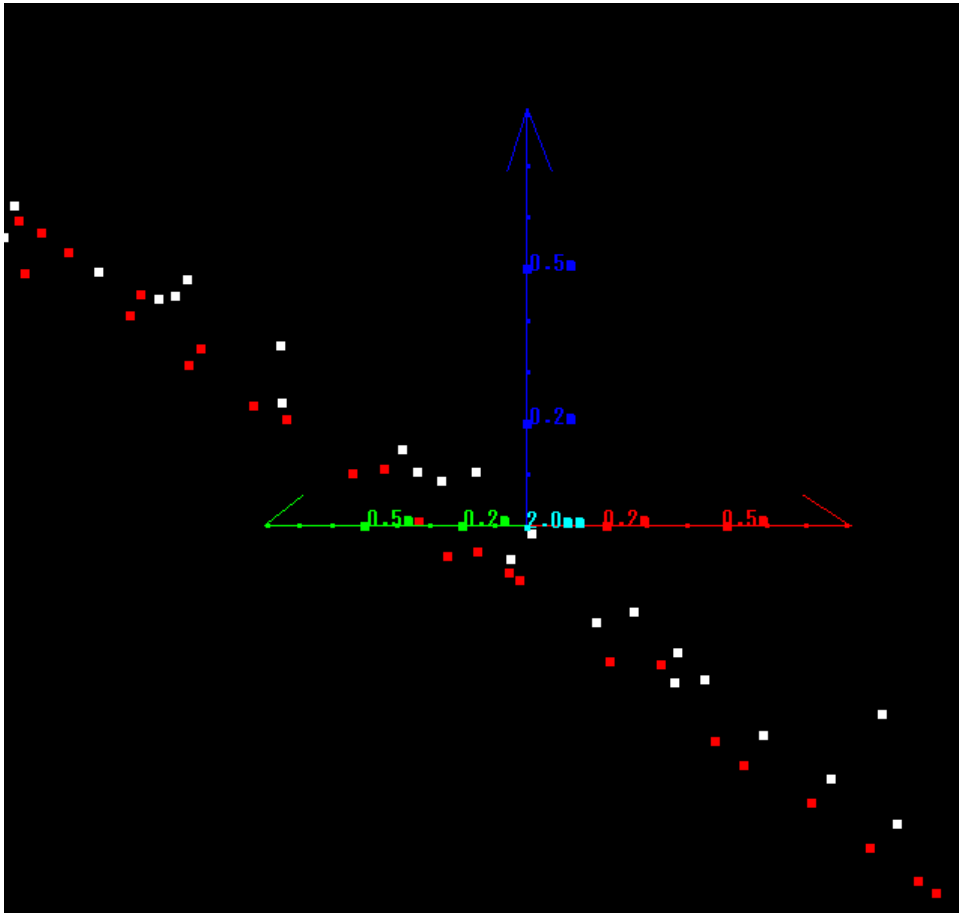
CCICP parameters

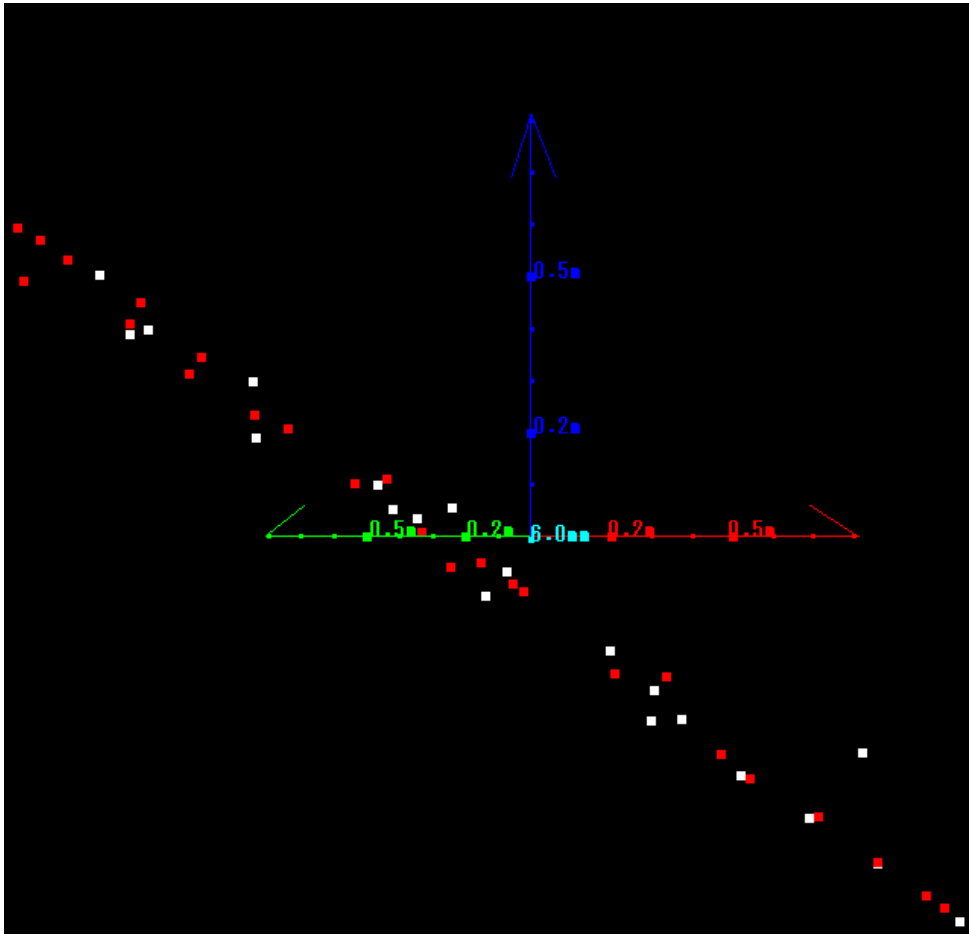
- Search distance for PCA was set to 0.8mm.
- Search distance of matching point was set to 1mm.
- Ten percent of point data of point clouds were used as source points in CCICP.
- Matching points were limited to the object stone.

Matching point numbers in CCICP

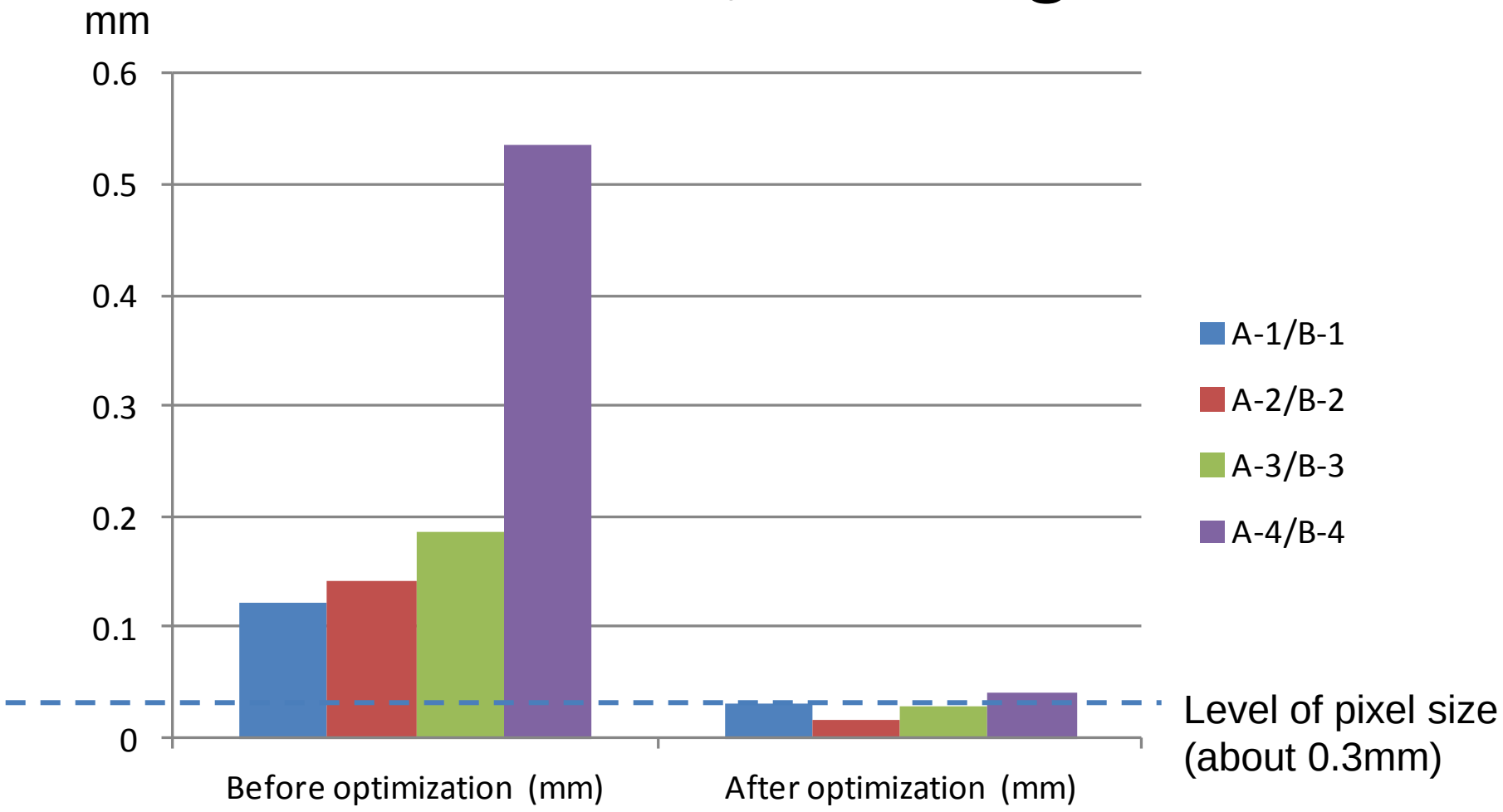


Point cloud profile before/after registration

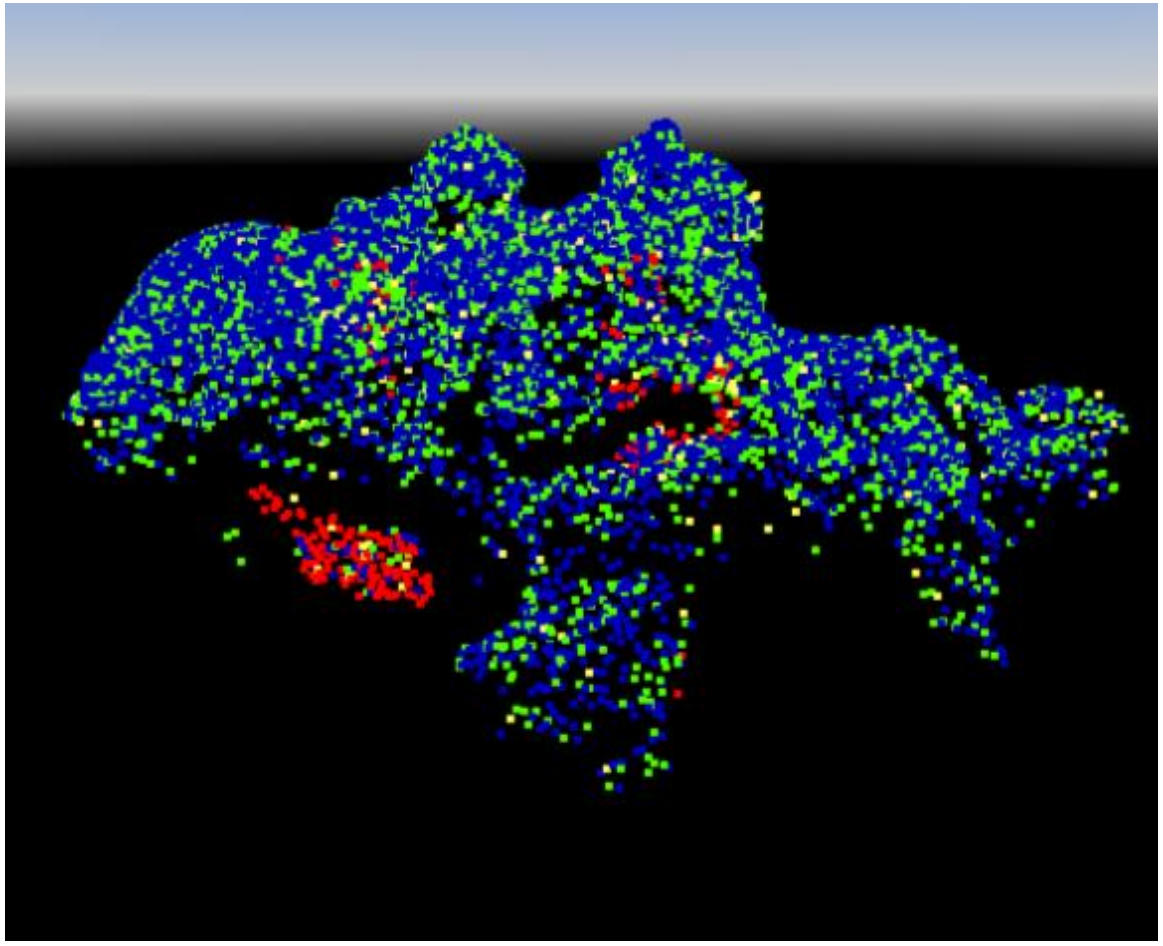




Standard deviation of matching point distances before/after registration



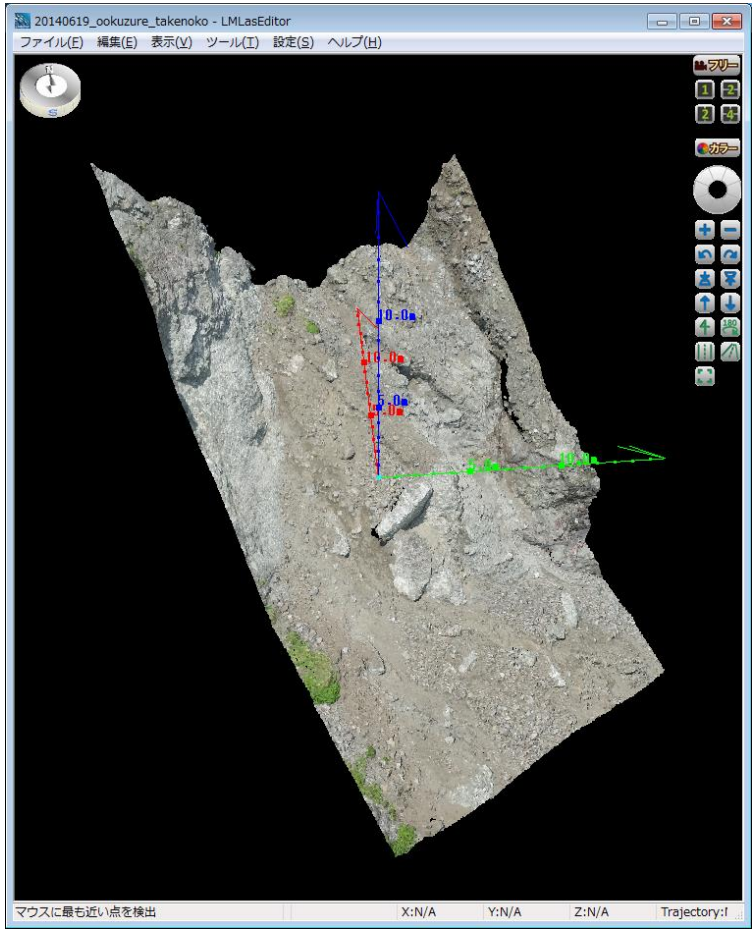
Distribution of matching distance after registration

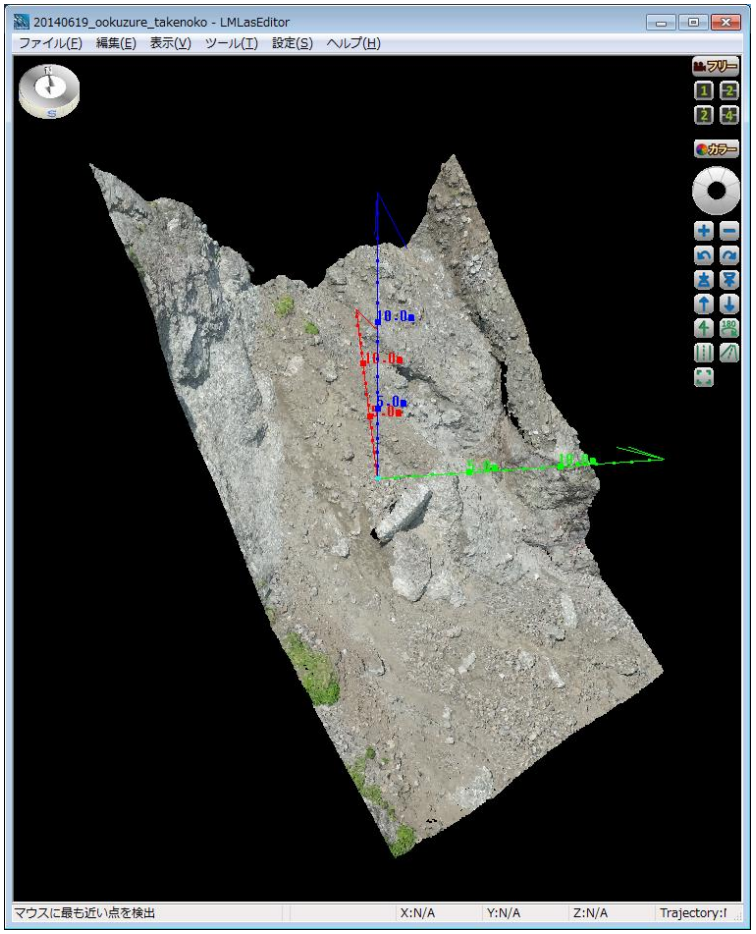


Blue : < 0.03mm
Green : < 0.06mm
Yellow : < 0.09mm
Red : >0.09mm

There is no eminent distribution bias except sparse part of point clouds

3D Point Clouds by UAV Photogrammetry





*Approximate Image Resolution: 1.6cm
*Matching Point Distances after registration: 1.4cm

今後の“夢”

- 画像マッチングにおける相関係数のような“似ている”という指標の開発