2024年4月26日
日本写真測量学会 関西支部
テクニカルセミナー/第124回空間情報話題交換会

# スマートフォンを用いた写真測量に基づく斜面のモデリングと図面生成

大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科
特任准教授　木村優介

yusuke.kimura@oit.ac.jp

## 自己紹介｜空間情報 × 都市空間・防災・土木史



| | |
|---|---|
| **都市空間** | **居住地と健康**：Walkableな環境と身体活動の定量的関係，主観的評価に基づく街路の評価 |
| | **観光地**：SNS上の写真による観光行動分析，人流データによる分析 |
| | **交通政策**：ゲーミフィケーションを用いた高速道路利用者の行動変容 |
| **防災** | **災害予兆検知**：画像解析を用いた道路のり面・斜面変状の検出手法 |
| | **防災地図**：衛星画像データを用いた開発途上国のハザードマップ作成 |
| | **災害復旧**：小規模崩落斜面の簡易三次元計測手法 |
| **土木史** | **文化財防災**：地理情報システムによる歴史的土木施設の被災状況把握 |

## 本日の話題：道路斜面のモデリング



小規模崩落斜面の三次元簡易計測手法（2020〜）

スマートフォン・小型ドローンによる3Dモデル生成

西尾美由莉，木村優介，木村亮：「スマートフォンを用いた道路面上からの斜面計測と三次元モデル生成」，2022年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，口頭III-2，2022.

西尾美由莉，木村優介，木村亮：「小型ドローンを用いた小規模崩落斜面の計測と三次元モデル生成」，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，21-2-1-04，2022.

西尾美由莉，木村優介，木村亮：「小型ドローンを用いた小規模崩落斜面の計測と精度検証」，第58回地盤工学研究発表会発表講演集，11-11-5-05，2023.

## 研究の背景



- 道路沿道の斜面崩落の復旧過程（道路管理者視点）
  1. 仮対応（立ち入り禁止 など）
  2. 災害復旧事業化（概算見積，復旧工法選定，設計者・施工者選定）
  3. 設計・施工

- 設計者の立場：復旧工法の提案，概算見積り

  林道などの小規模な崩落地：現況図面があることは稀

  → まずは設計に必要な現況図面の測量が必要

## 研究の背景・目的



現状のポール横断測量

- 測量方法自体はシンプル
- 安全性に欠ける（斜面に降りての作業，二次災害の危険）
- 一定の人工の確保（人数，時間）
- 図面化（内業）の手間
- 手戻り（再計測）の可能性

安全かつ簡易に測量でき，かつ
設計に必要な現況図面を作成できる方法を開発する

## 研究の大きな背景・目的



**小規模崩落地の測量・復旧構造物設計の**
**簡易化を図るシステムを構築**

- 測量～設計までを含むシステム開発
- 補強土壁メーカとの共同研究
  （京都大学側｜測量：木村，設計：宮﨑祐輔助教@地盤系）

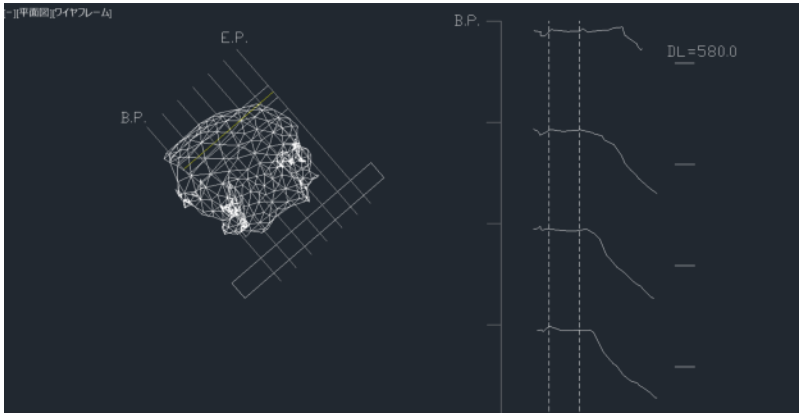
現場で即適用可能な方法の開発

設計（自動設計）に必要な情報を備えた現況図の作成

## 測量部分に必要な要件



- 作業：道路面からのみの計測（崩落斜面に降りない・登らない）
- 許容精度：ポール横断測量と同様の10 cm 程度まで
- 最終成果物： AutoCADでの平面図，横断面図　→　3次元データの生成



## 開発・検証の流れ



1. 全体の枠組みの検討
2. 計測機材の候補の選定

予備的実験

3. 候補機材を用いた実験
   - 機器に応じた測量方法の検討
   - 三次元モデル生成，精度検証による評価
   - 現地の条件と測量方法との対応づけ
   - 追加の検証

学生との共同研究
実地試験

4. CADへのデータ移行方法の検討
5. マニュアル化・試行

## 1. 全体の枠組みの検討



近接写真測量の応用

- 面的な計測が可能
- Photog-CAD
  （日本建設情報総合センター JACIC）
  デジタルカメラによる写真測量で
  災害復旧事業費申請を効率化

https://www.jacic.or.jp/movie/jseminar/20120413/shiryo/20140807_PhotogCAD.pdf

## 1. 全体の枠組みの検討



商用のSfMソフトウェアの活用

- SfM: Structure from Motion, Shape from Motion
- 写真測量におけるバンドル調整の自動化（特に特徴点抽出）
  大量の（精度が保証されない）画像から自動標定
  ⇔ 数少ない画像を用いて精確に標定
- 点群・メッシュ生成も可能（MVS: Multi-View Stereo）
- 代表的な（商用）ソフトウェア
  - Pix4Dmapper
  - Metashape (旧Photoscan)
  - Recap
  - RealityCapture

PIX4D PIX4D

https://www.pix4d.com/jp/blog/pix4d-anniversary

Metashape

© Agisoft, CC-BY-SA-4.0

## 2. 計測機材の候補の選定



### 1. デジタルカメラ（ミラーレス一眼）

- 解像度が非常に高く，撮影点から遠い場所の点群生成に有利
- 機材が重い

### 2. デジタルカメラ（コンデジ，タフカメラ）

- 機材が軽く，取り扱いが良好
- GNSS受信機を搭載した機種もあり

https://jp.omsystem.com/product/compact/tg6/index.html

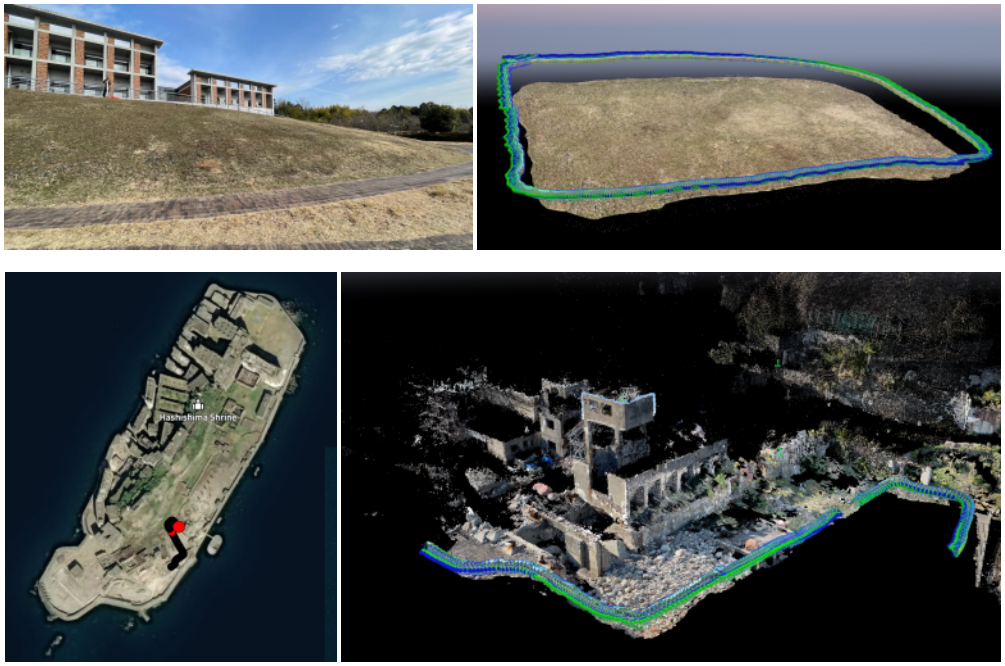
## 2. 計測機材の候補の選定



### 3. スマートフォン

- カメラ機能のみではコンデジに同じ
- 特定機種・アプリの使用により操作性，PCとの連携，精度が向上
  - LiDAR SLAMによるカメラ位置の高精度推定
  - GCPなしでも相対座標内でのスケール合わせ不要

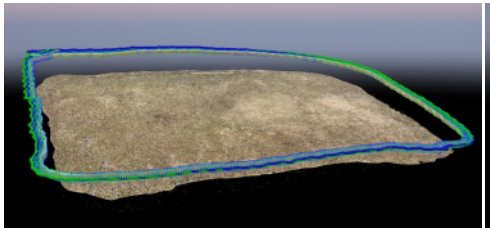
https://www.pix4d.com/jp/product/pix4dcatch



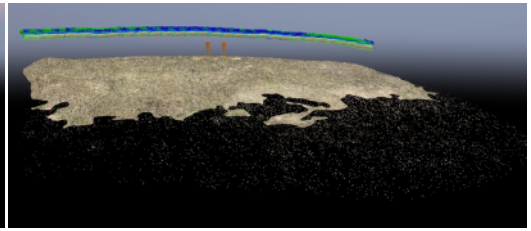

## 2. 計測機材の候補の選定



- 撮影方法の工夫



対象地を取り囲むように撮影したパタン



道路（上側）からのみ撮影したパタン

長い一脚に取り付けて視点を変えると解決？

## 2. 計測機材の候補の選定

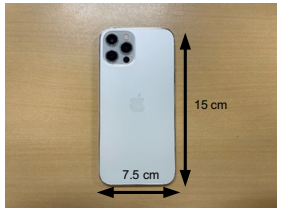


### 4. ドローン

- 道路面上に限定されない多視点からの撮影が可能
- 操作能力が必要．航空法の各種規制
- 無人航空機ではない軽量・小型ドローンも利用可（2022年6月以前）

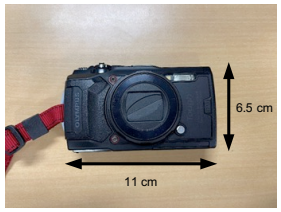
## 2. 計測機材の候補の選定

- スマートフォン｜Apple iPhone 12 Pro
  - LiDAR機能を搭載．Pix4Dcatchとの連携で，位置推定の精度向上



iPhone 12 Pro

- コンパクトデジタルカメラ｜Olympus TG-6
  - GNSS受信機を搭載



デジタルカメラ（OLYMPUS Tough TG-6）

- ドローン｜DJI Mavic mini
  - 2021年度時点では無人航空機の対象外（199 g）
  - GNSS, IMU搭載：操縦が容易

小型ドローン（Mavic mini）

## 開発・検証の流れ



1. 全体の枠組みの検討
2. 計測機材の候補の選定

予備的実験

3. 候補機材を用いた実験
   - 機器に応じた測量方法の検討
   - 三次元モデル生成，精度検証による評価
   - 現地の条件と測量方法との対応づけ
   - 追加の検証

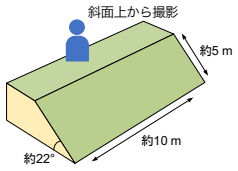
学生との共同研究
実地試験

4. CADへのデータ移行方法の検討
5. マニュアル化・試行

## 3. 候補機材を用いた実験｜実施内容



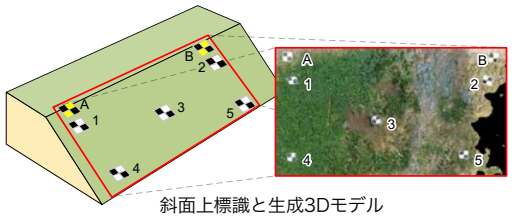
1. 測量
   - 仮想地：京都大学桂図書館横の人口斜面
   - 斜面形状を複数の計測方法で測量
     iPhone 12 Pro / TG-6 / Mavic Mini



実験現場の様子・イメージ

2. 画像処理ソフトを用いた三次元モデル生成
   - 欠損なく撮影範囲を図面化できているか確認

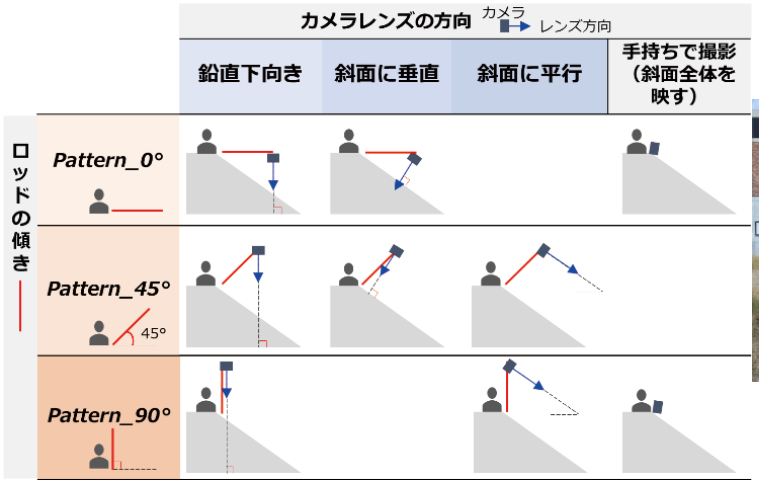
3. 三次元モデルの精度検証
   - 実座標とのずれの程度を確認



斜面上標識と生成3Dモデル

## 3. 候補機材を用いた実験｜計測パタン（iPhone/TG-6）





- パタン90°（鉛直）：崩落箇所上部が開けている場合を想定
- パタン0°（水平）：崩落箇所上部に植生がある場合を想定

## 3. 候補機材を用いた実験｜計測パタン（Mavic Mini）

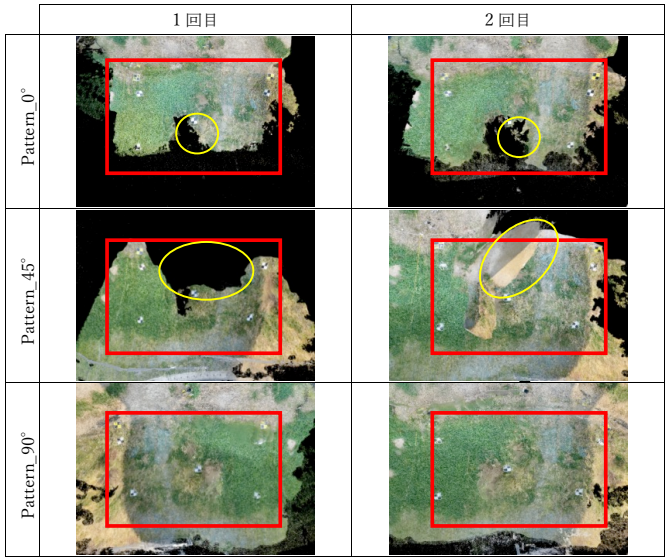


| H=high, L=Low, P=Parallel<br>C=Circle, R=Return | | 計測範囲を取り囲むように1周 | 計測範囲を覆うように折り返しを繰り返す |
|---|---|---|---|
| 高い高度 | | Pattern_H_C | Pattern_H_R |
| 低い高度 | | Pattern_L_C | Pattern_L_R |
| 斜面の高さに合わせて変動 | | Pattern_P_C | Pattern_P_R |

- 高い高度（道路面から5 m程度）：崩落箇所上部が開けている場合を想定
- 低い高度（道路面から1.5 m程度）：崩落箇所上部に植生がある場合を想定
- 斜面の高さに合わせて変動：地上解像度を一定にした方が良い結果が得られるという想定

## 3. 候補機材を用いた実験｜モデル生成結果（iPhone）





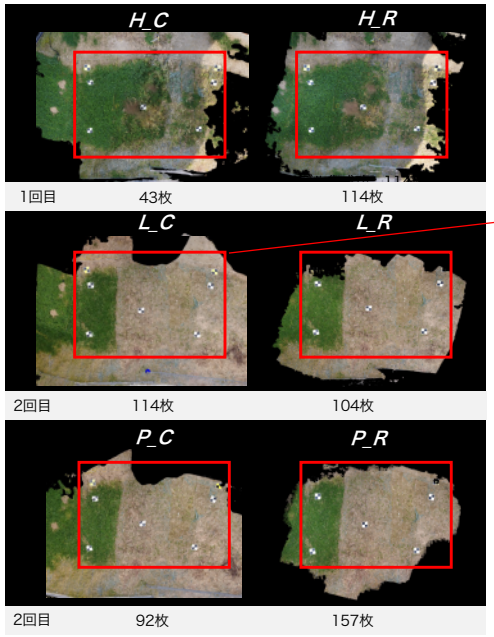

高茎草本の影による欠損

大きな欠損・誤生成
→ 不必要なカメラの回転によるエラー

欠損なくモデル生成に成功

## 3. 候補機材を用いた実験｜モデル生成結果（Mavic Mini）






欠損なくモデル生成に成功

手動でタイポイントを生成

- 大きな欠損が生じた
⇒ 撮影高度が低くオーバーラップ率を確保できなかったことが原因

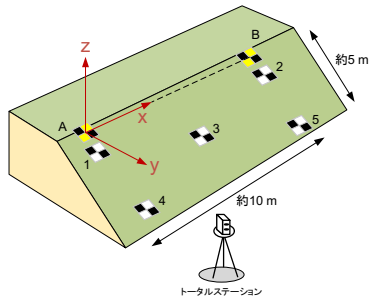
- 撮影地点間の移動量を小さくして2回目の撮影を実施したところ、欠損なくモデルを生成できた

## 3. 候補機材を用いた実験｜精度検証



**方法**

1. 現地にてトータルステーションで各標識の座標を計測
2. 生成した三次元モデル上での各標識の座標を取得
（7点すべての標識の座標取得に成功したもののみ）
3. 1～5を検証点とし，パタンごとに対応する座標値から平方平均二乗誤差を算出



## 3. 候補機材を用いた実験｜精度検証結果



iPhoneの平方平均二乗誤差一覧（Pattern_45°は欠損）

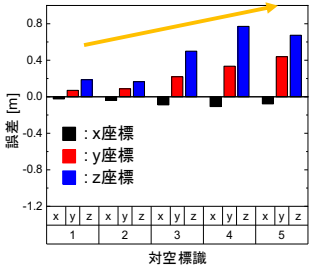
| 撮影パタン | 1回目 | 2回目 |
|---|---|---|
| Pattern_0° | 0.342 m | 0.068 m |
| Pattern_45° | - | 0.277 m |
| Pattern_90° | 0.073 m | 0.379 m |

Mavic Miniの平方平均二乗誤差一覧

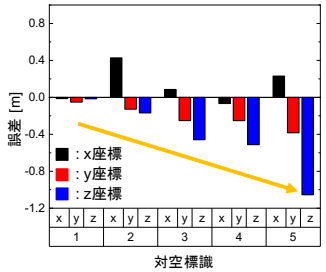
| 撮影パタン | RMSE | 撮影パタン | RMSE |
|---|---|---|---|
| Pattern_H_C | 0.038 m | Pattern_H_R | 0.069 m |
| Pattern_L_C | 0.127 m | Pattern_L_R | 0.079 m |
| Pattern_P_C | 0.041 m | Pattern_P_R | 0.580 m |

## 3. 候補機材を用いた実験｜考察

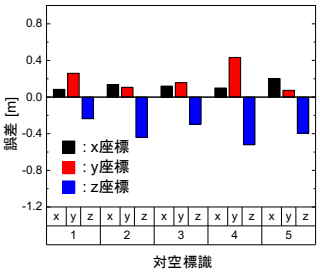





Pattern_0° 1回目




Pattern_90° 2回目



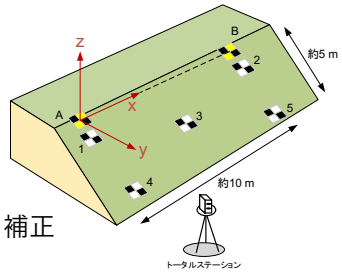

Pattern_45° 2回目

y, z方向の系統的な誤差

→ yz平面内の長さの補正，z軸の補正が必要

対策：鉛直に立てた棒を使用し鉛直軸を補正

道路横断方向に任意の2点間の距離を測り長さを補正



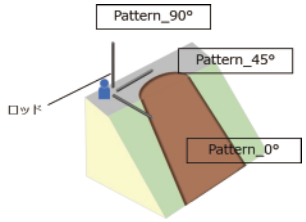

## 3. 追加の検証実験｜実際の崩落現場

## 3. 追加の検証実験｜撮影パタンと生成モデル



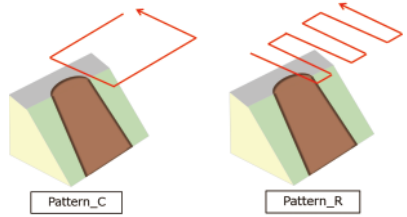
### iPhone

ロッド（全長4.5 m）伸ばす方向を変え，斜面上辺を歩いて撮影する3パタン



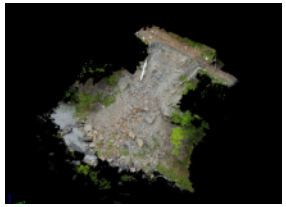

### 小型ドローン

- 高度一定（道路面から約5 m）で崩落箇所を取り囲むように撮影
- 崩落箇所を覆うようにジグザグに撮影




### 3次元モデル

全てのパタンについて斜面全体の3次元モデルの生成に成功



Pattern_C

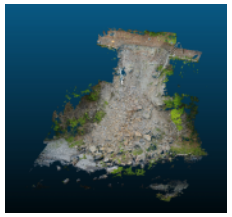
## 3. 追加の検証実験｜斜面形状の精度検証



写真測量から得られた点群と，LiDAR計測機器から得られた点群とを重ね合わせ，
各点群間の距離を調べることにより実施

RIEGL 社 VZ-400

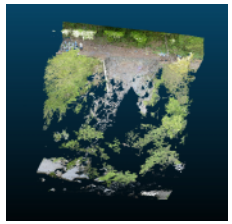
ソース点群｜写真測量結果



- 特徴点マッチング
- Iterative Closest Points (ICP)

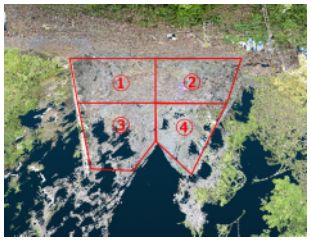
ソース点群からターゲット
点群に剛体変換するのに
必要な変換行列を推定・出力

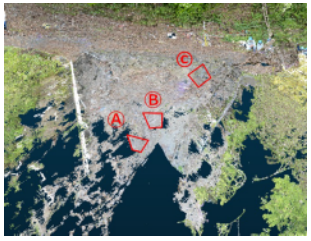
ターゲット点群｜LiDAR計測結果



**点群の比較方法**

1. 斜面を４分割した
   エリアで比較
2. 斜面上の小さな範囲で比較




## 開発・検証の流れ



1. 全体の枠組みの検討
2. 計測機材の候補の選定

予備的実験

3. 候補機材を用いた実験
   - 機器に応じた測量方法の検討
   - 三次元モデル生成，精度検証による評価
   - 現地の条件と測量方法との対応づけ
   - 追加の検証

学生との共同研究
実地試験

4. CADへのデータ移行方法の検討
5. マニュアル化・試行

## 4. CADへのデータ移行方法の検討



- 各ソフトウェアメーカーともに自社の製品群の関連を強化
  計測 ～ 点群生成 ～ CAD
- 異なる製品群（メーカー）を跨ぐデータフォーマットが限定
  事実上はDXFのみ
  - モデルに付与されていた座標が一旦削除される
    ＞ 移行後に別データを用いて復元
  - 書き出しによりエラーが生じる（dxfのバグ？）
    ＞ データ量（三次元モデルのメッシュ数）を調整

## 5. マニュアル化・試行



iPhoneによる実現場での試行（メーカー設計者による）

- 測量時間｜2日程度　→　30分程度
- 測量人数｜2人以上必要　→　1人でも可能
- 断面図の作成時間｜1週間程度　→　2時間程度

安全かつ効率的な計測を実現