

月面地上測量および土質・地盤調査向け測位のための LiDAR-SfM/MVS

○中川 雅史（芝浦工業大学）

野口果鈴，重藤李佳子，杉原朋樹（芝浦工業大学）

滝川正則，北村啓太郎，平松孝晋，佐野寿聰（アジア航測）

小林泰三（立命館大学）

mnaka@shibaura-it.ac.jp

測量&土質&地盤調査ローバ

LiDAR-SfM/MVS搭載型月面地上測量システムの実証実験 (2023)

立命館+東大+アジア航測+芝浦工大などなど

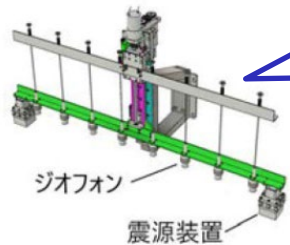
地形測量だけでなく、
多種属性データを
位置情報つきで取得

载荷・せん断
試験

アクティブ
地震探査

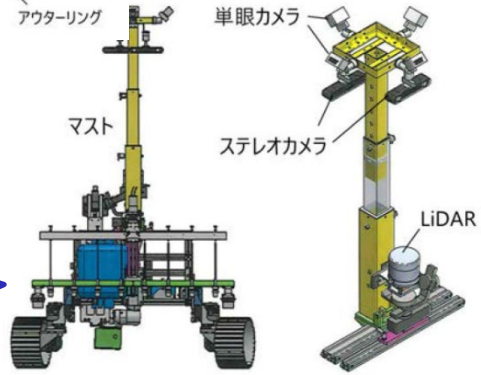
モデルローバ

地震探査ツール

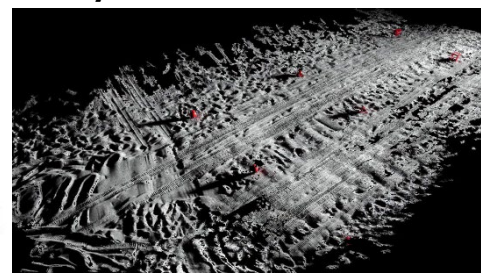


ロボットアーム
(市販品)

载荷・せん断
試験ツール



SfM/MVS点群

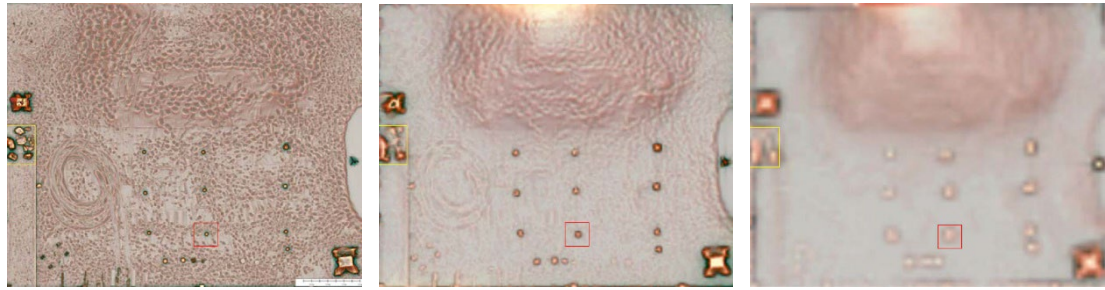


RI密度
計測

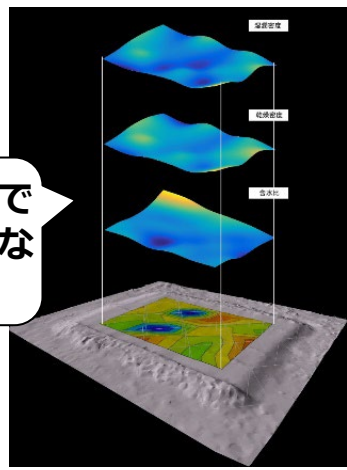
掘削バケット

測位・3D計測

赤色立体図を利用した微地形表現制御



取得データを位置情報で
重畳することで、多様な
パラメータ推定可能



3D土質・
地盤GIS

GNSS/非GNSS環境対応の航法装置の開発アプローチ

研究室で開発してうまくいっている事例と、月面ローバの課題

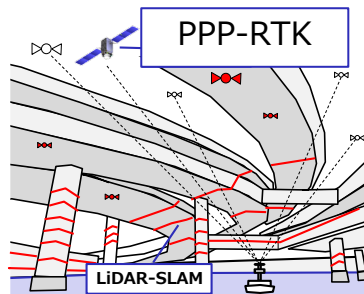
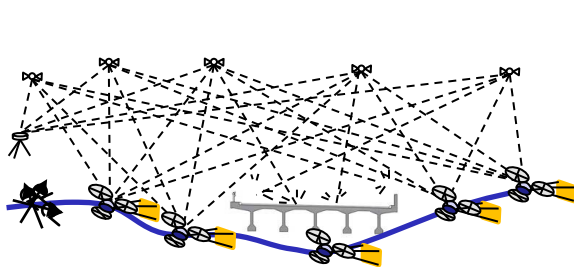
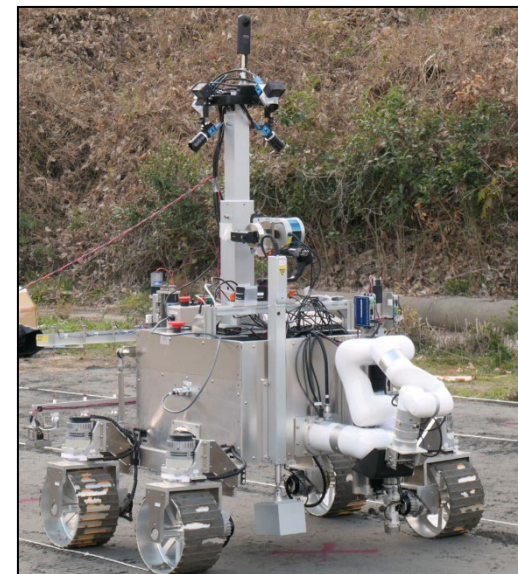
UAV (橋梁点検)



船舶 (水上MaaS)



月面ローバ (測量)



Technical issues

Real-time

Availability

Robustness

Global positioning

RTK-GNSS

CLAS

not yet decided

Odometry

IMU-Stereo

LiDAR

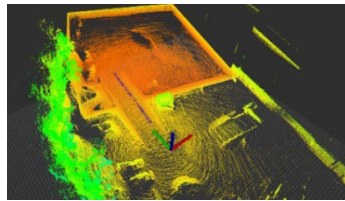
Camera ?
LiDAR ?

月面基地建設で議論されている3D計測方法の比較

自律建機・ローバーの移動のための測位方法に違いがある

2023.10宇科連の発表資料より

LiDAR-SLAM
(鹿島建設)



建機搭載LiDARでSLAM

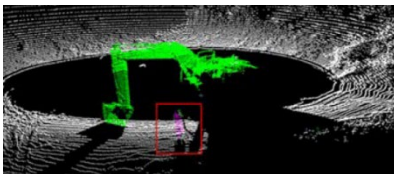
フェンスでSLAMしてる?

逆に言うと、フェンス設置するのは有効そう

LiDAR物体認識
(清水建設)

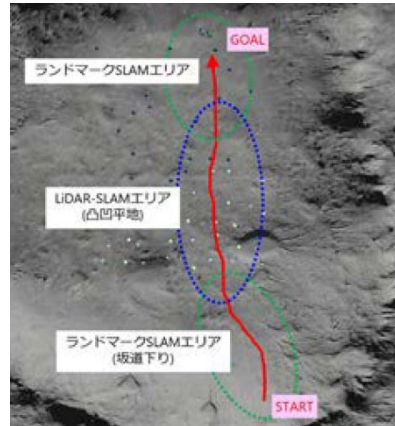


シミュレーション



点群のセグメンテーション

AR marker-based SLAM (大成建設)

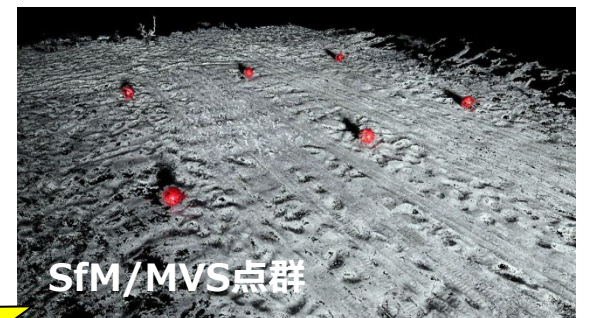


ARマーカ一面との相対方向に課題?

Sphere marker-based LiDAR-SfM/MVS
(芝浦工大)



2022年度の仕様



SfM/MVS点群

LiDARで基準点測量し、SfM/MVSで点群取得

将来的に衛星データと連携するため球形標識を採用

研究概要

SLAM関連の技術課題

SLAM自体の課題

- 逐次SLAMにおける誤差蓄積
- 完全SLAMでの計測効率低下
- SLAM退化 形状特徴のない計測領域においてSLAM処理が位置姿勢推定に失敗する課題

LiDAR-SLAMの課題

- 複雑な起伏を多く含む地形や岩石が散在する環境に限定される

Visual SLAMの課題

- 大きな照度変化に弱い

本研究の目的

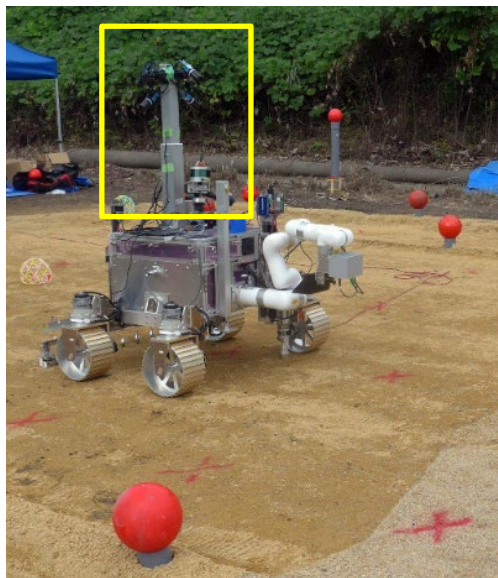
ランダム配置した未知点としての標識群を利用したSLAMに関する課題を回避する手法を提案

- 1) 無人探査フェーズにおける月面地上測量を想定し、下記手法を提案
 - 未知点としての標識配置
 - SfM/MVSでの高密度点群取得
 - LiDARで取得した標識間のスケール情報を組み合わせる微地形の点群取得手法 (LiDAR-SfM/MVS, 要求精度0.10[m])
- 2) センサシステムの宇宙仕様化に向けた概略設計のために、月面模擬環境において自律移動ロボットを用いた検証実験を実施
 - # 宇宙仕様化 (システムの耐候性やロケット打ち上げへの耐久性を向上させること)

手法

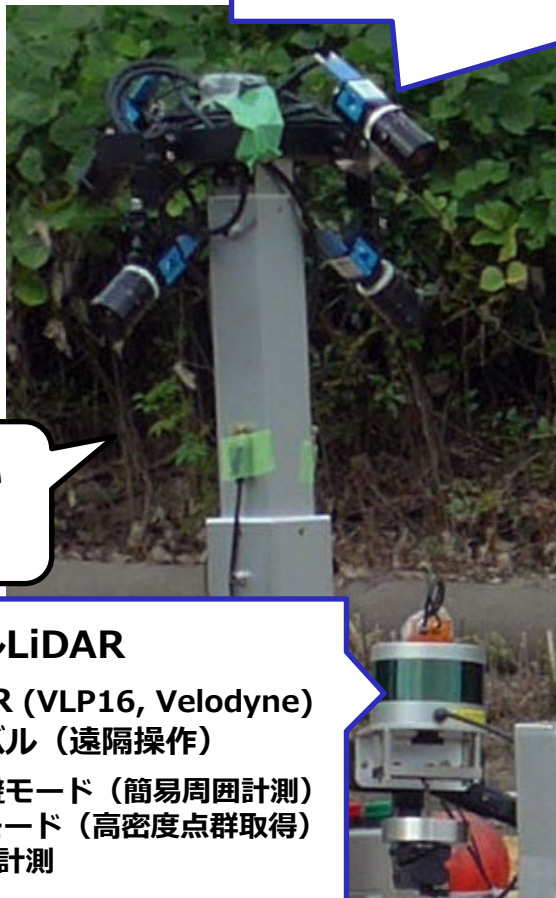
測位・3D計測ツール

LiDARで基準点測量し、SfM/MVSで点群取得



4方向カメラ

- 産業用カメラ(DFK33UX264, The Imaging Source)
- カラー1.0型CMOS, 510万画素



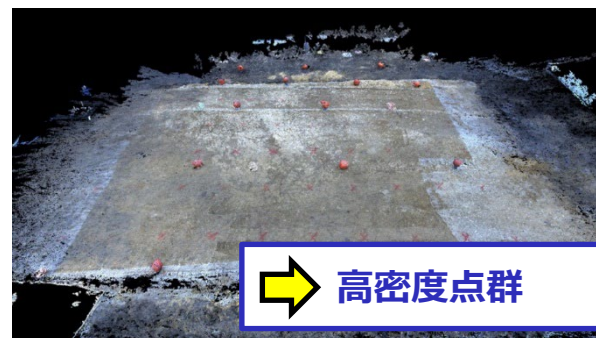
壊れても泣かない
センサ群で構成

性能不足を
ソフトウェア
でカバー

ジンバルLiDAR

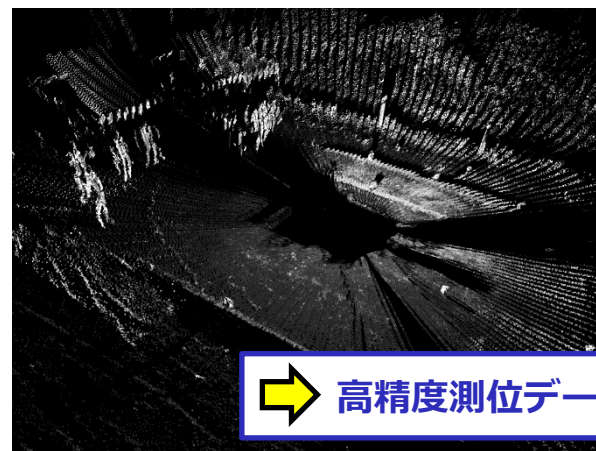
- LiDAR (VLP16, Velodyne)
 - ジンバル (遠隔操作)
- 衝突回避モード (簡易周囲計測)
とTLSモード (高密度点群取得)
の2種で計測

SfM/MVS点群



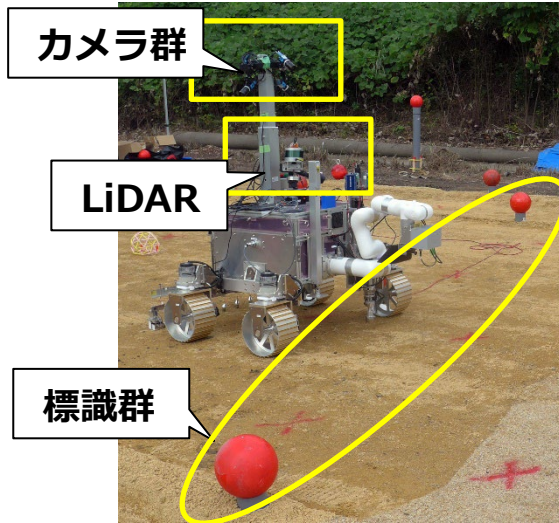
高密度点群

LiDAR-SLAMでのGCP計測

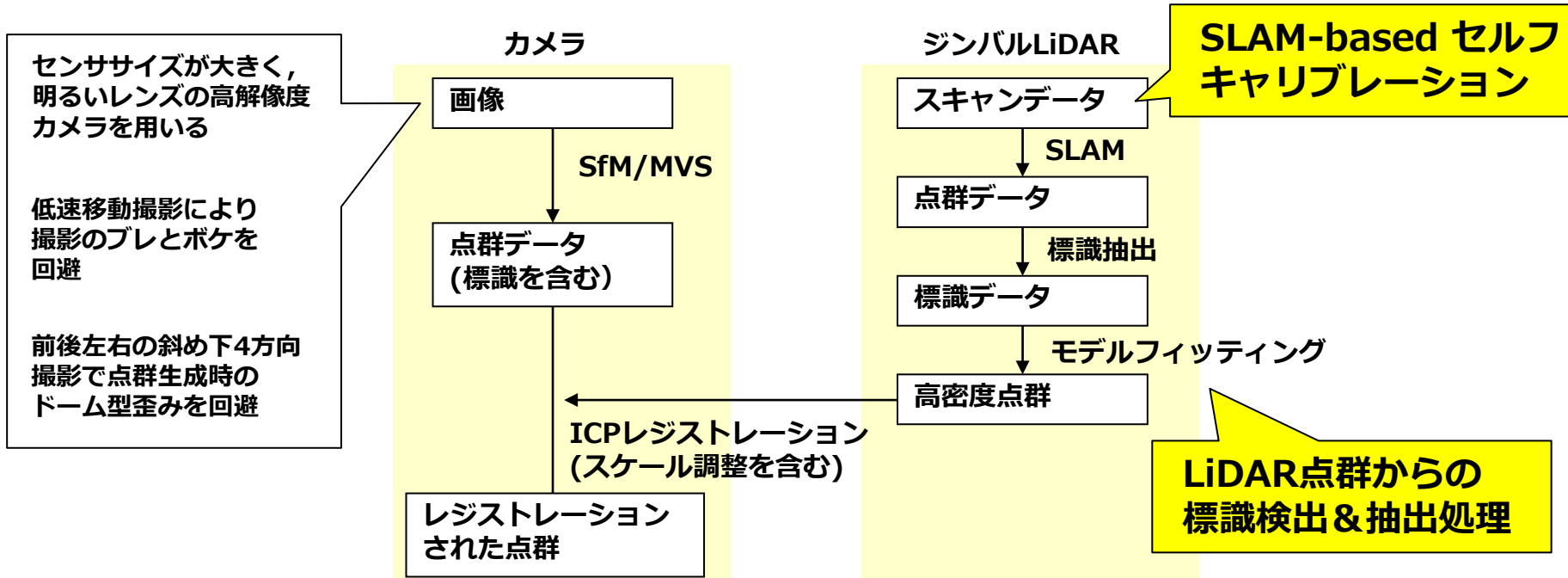


高精度測位データ

手法



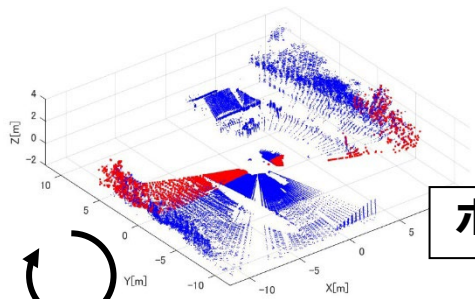
- 1) 標識群を未知点として配置
- 2) カメラ群でSfM/MVS点群を生成
- 3) LiDAR点群から全標識位置を探す
- 4) LiDAR点群から全標識位置を精密推定
- 5) LiDAR点群標識位置でSfM/MVS点群を標定 (モデルフィッティング)



ジンバルLiDAR (TLSモード) での標識中心抽出

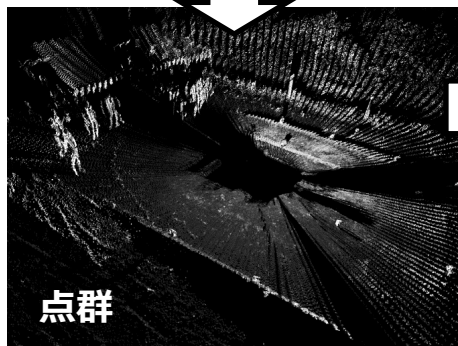
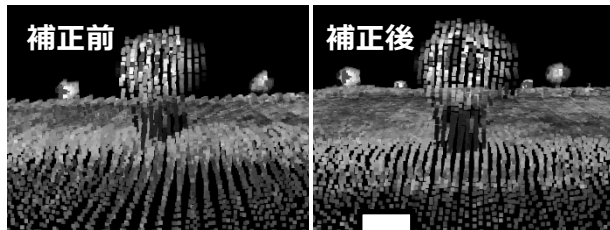
簡易的な装置の組み合わせで、標識位置の基準点測量

全周囲レーザースキャニング

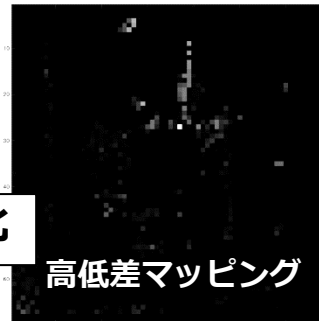


ボクセル化

SLAM-based セルフ
キャリブレーション



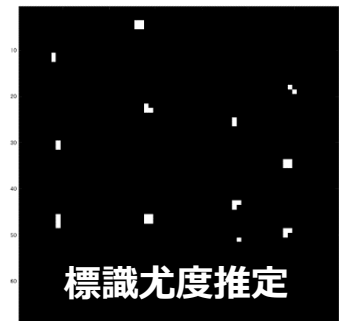
Voxel-based 標識検出



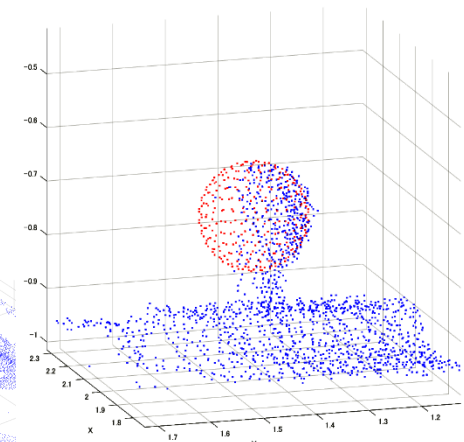
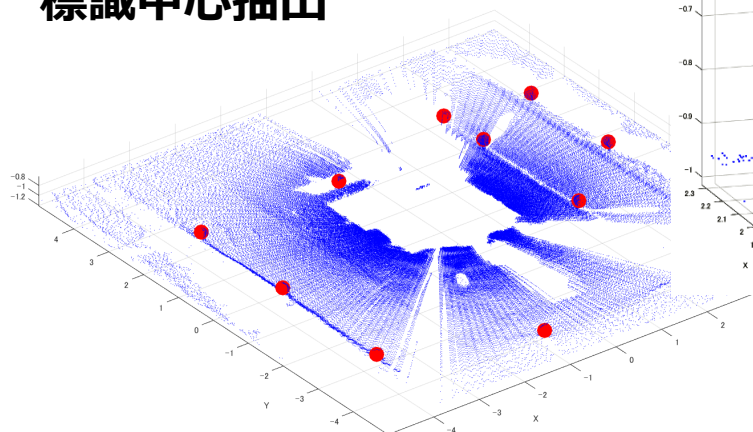
×



=



Model fitting-based
標識中心抽出

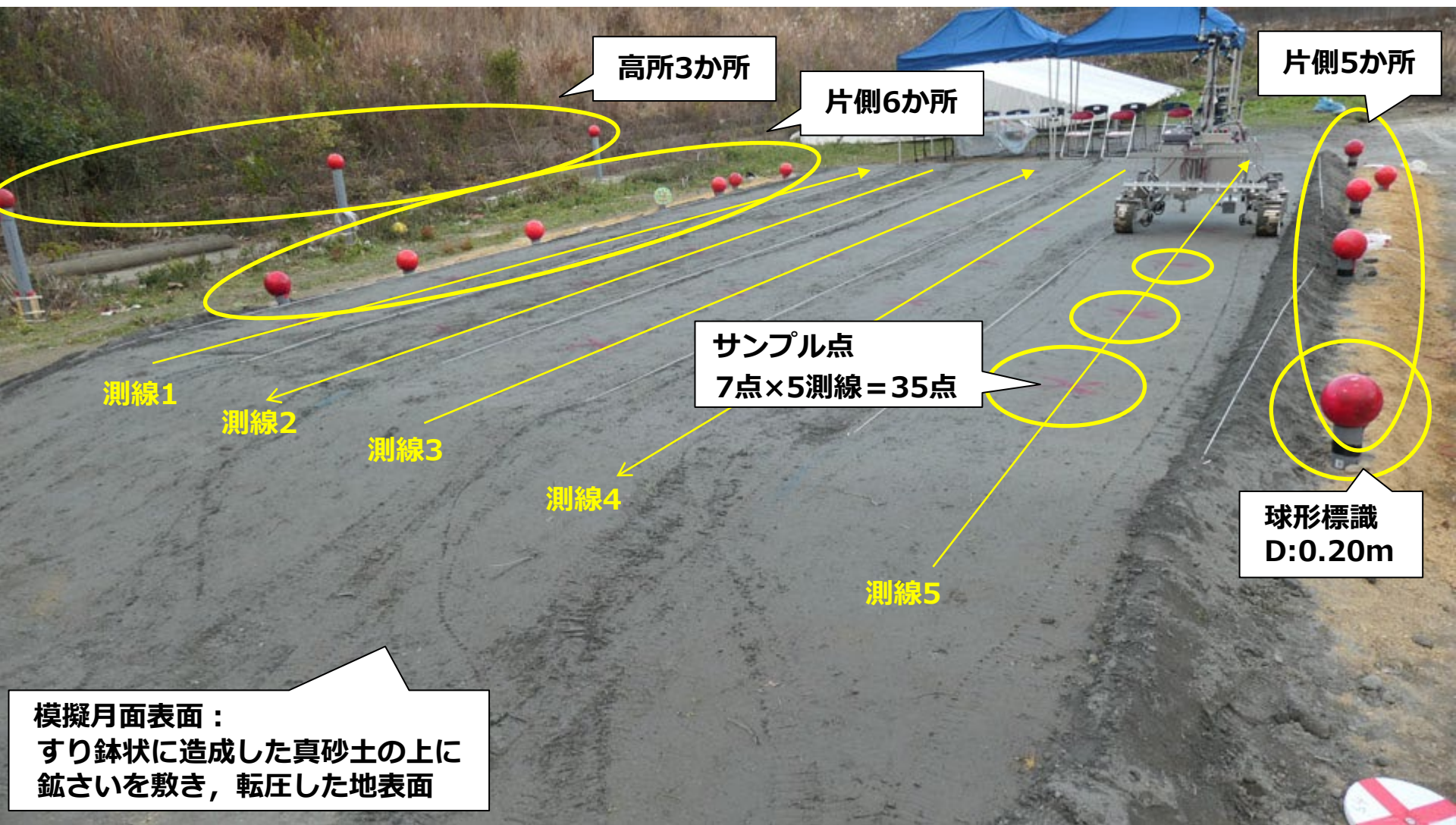


球モデルをあてはめ、
中心位置を標識位置
として推定

実験

計測概要 (2023/12/20)

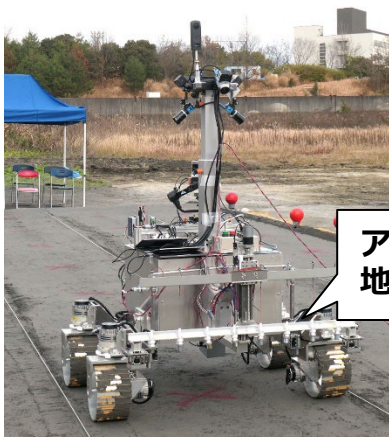
測線上で移動撮影+測線上のサンプル点位置に停止しLiDAR計測



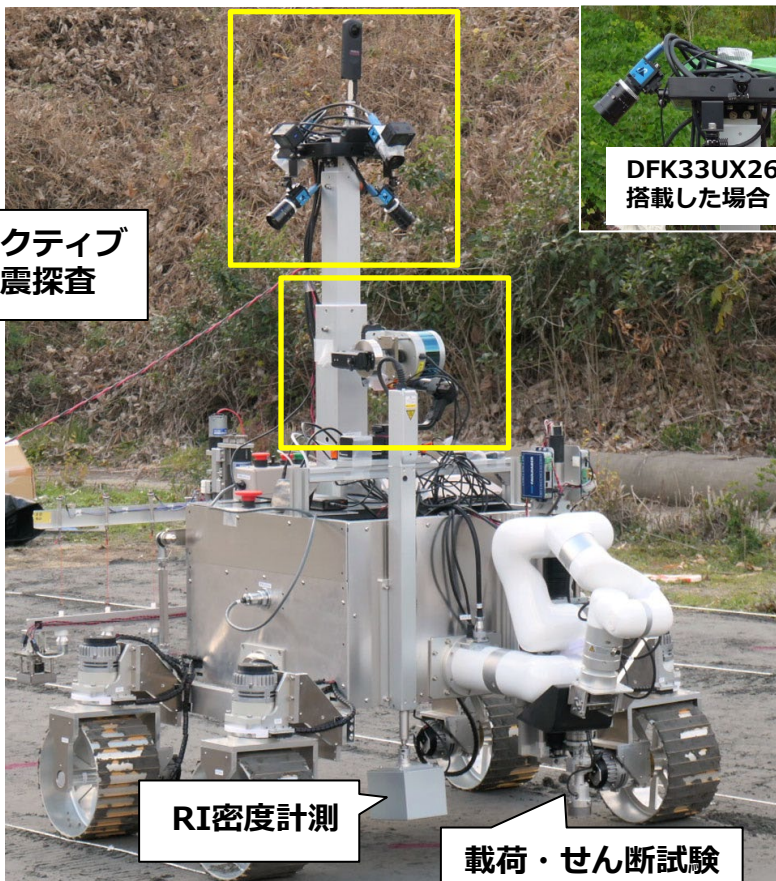
模擬月面表面：
すり鉢状に造成した真砂土の上に
鋳さいを敷き，転圧した地表面

ローバー搭載3D計測システムなど

地形測量だけでなく、多種属性データを位置情報つきで取得



アクティブ
地震探査

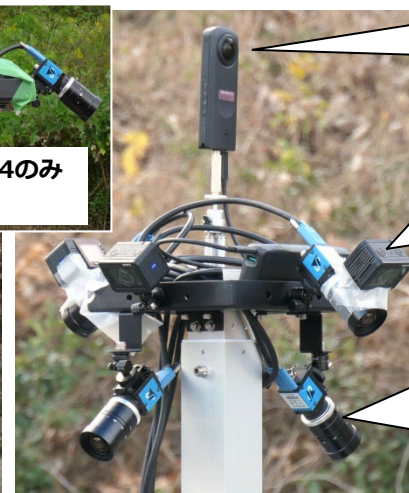


RI密度計測

载荷・せん断試験



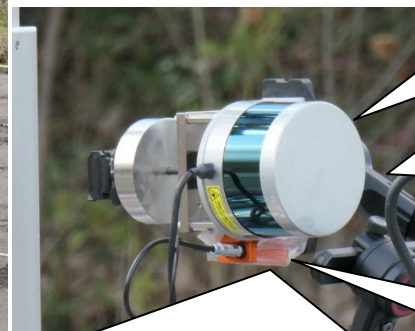
DFK33UX264のみ
搭載した場合



(option)
パノラマカメラ
(Theta Z1, Ricoh)

(option)
4方向カメラ
(RX0M2, Sony)

4方向カメラ
(DFK33UX264, The
Imaging Source)
カラー1.0型CMOS,
510万画素



LiDAR
(VLP16, Velodyne)

ジンバル
(MVG300XM,
MANFROTTO)

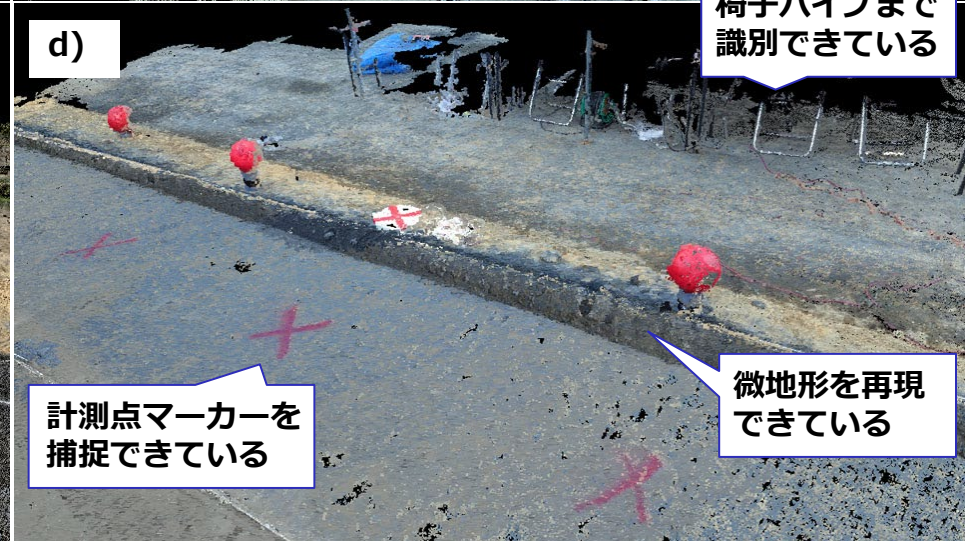
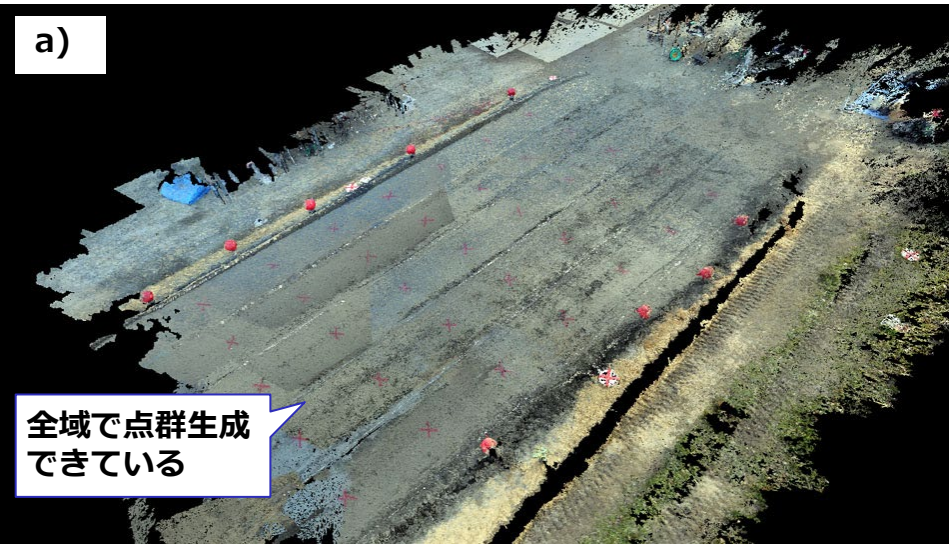
AHRS
(Mti-710G, Xsens)

ジンバル利用で
360度回転



SfM/MVS点群出力結果

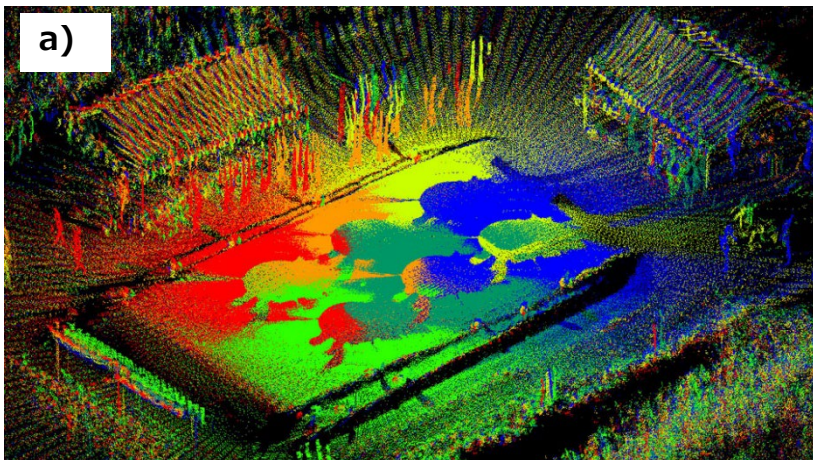
入力画像サイズ : 2400×1600px (画像サイズ50%)



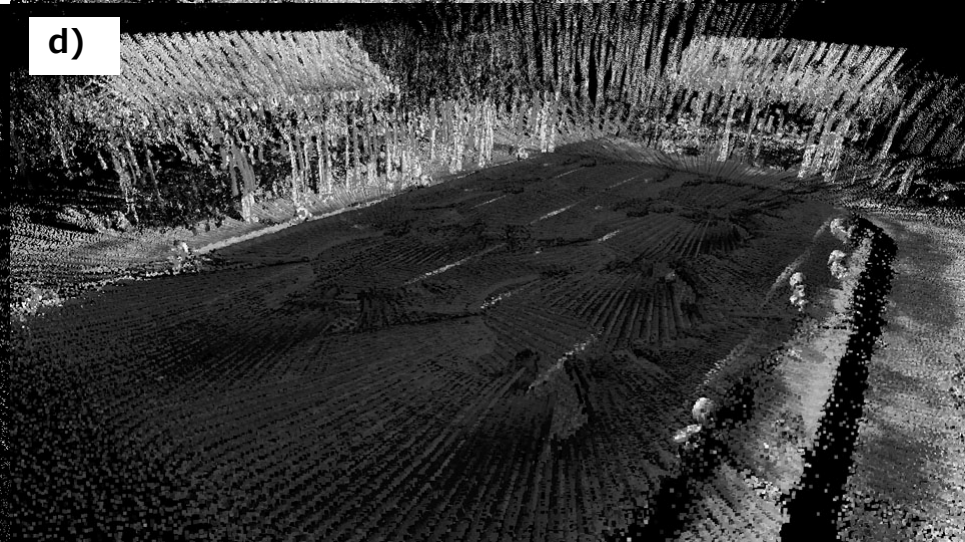
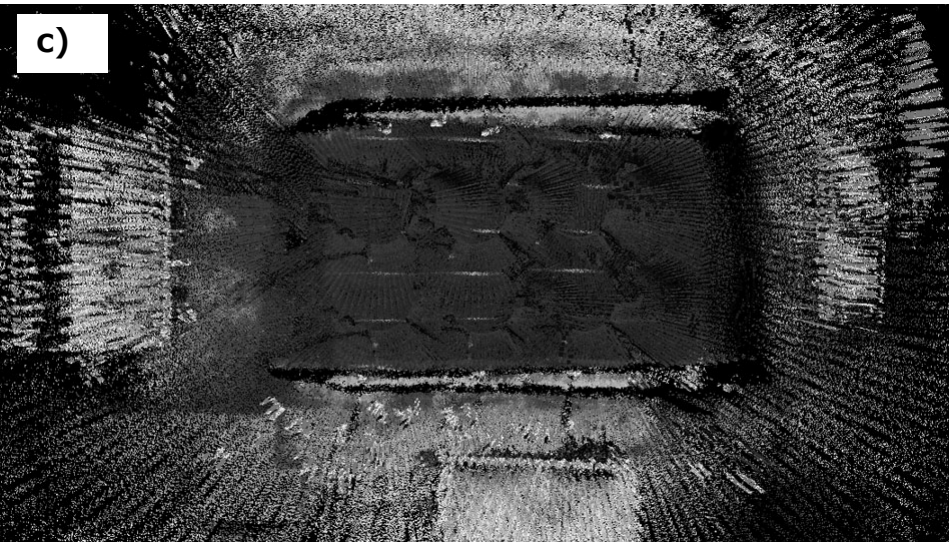
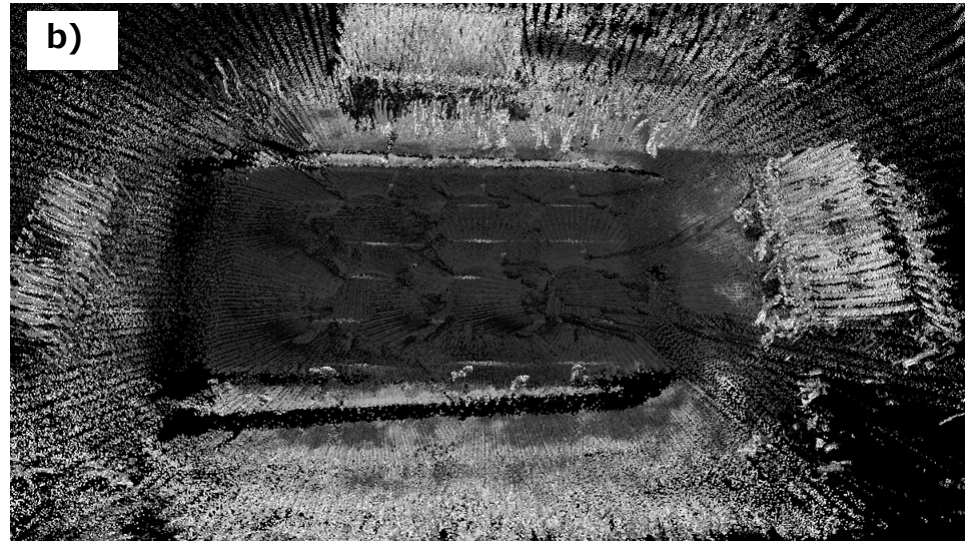
496 images, 25,916,269pts, 474 min. (CPU: Intel Core i7 11375H 3.3GHz, RAM: 32GB)

複数LiDAR点群（6データ）の統合テスト

LiDAR点群計測結果がローバー位置の測位結果として利用できることを確認



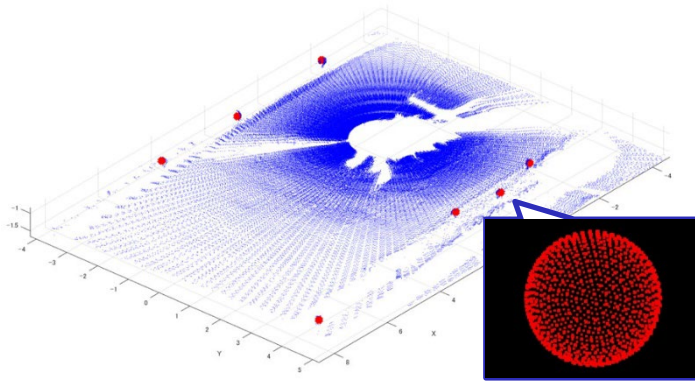
path2(pos1,3,5)+path4(pos1,3,5)



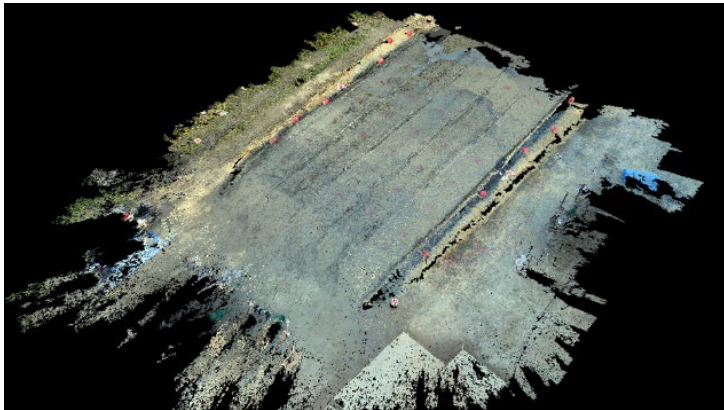
SfM/MVS点群のレジストレーション

Sample: path3_pos2

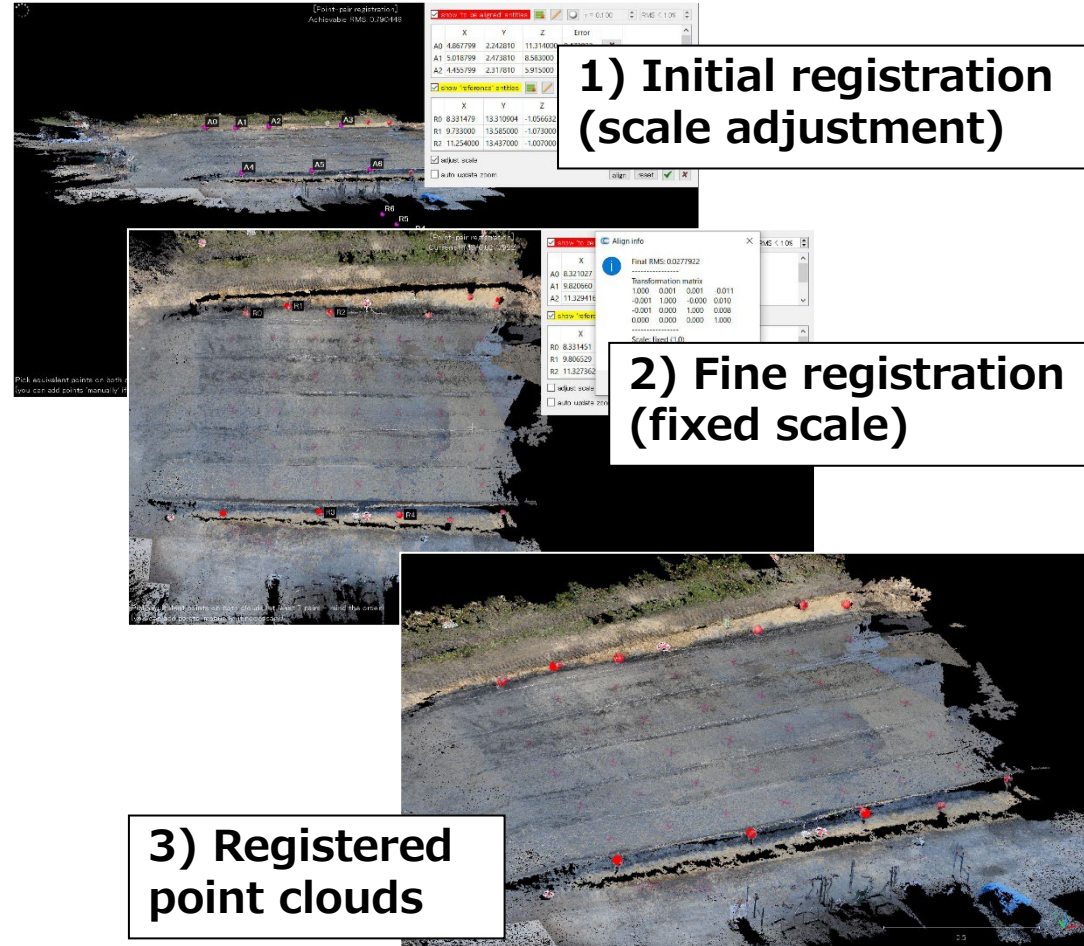
a) Markers extracted from LiDAR point clouds



b) SfM/MVS point clouds



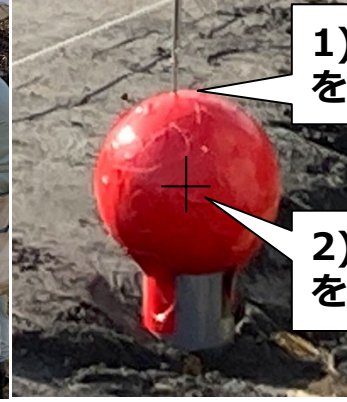
c) SfM/MVS point cloud registration



Registration accuracy: 0.0278 [m] (RMSE)

精度検証 (TS計測)

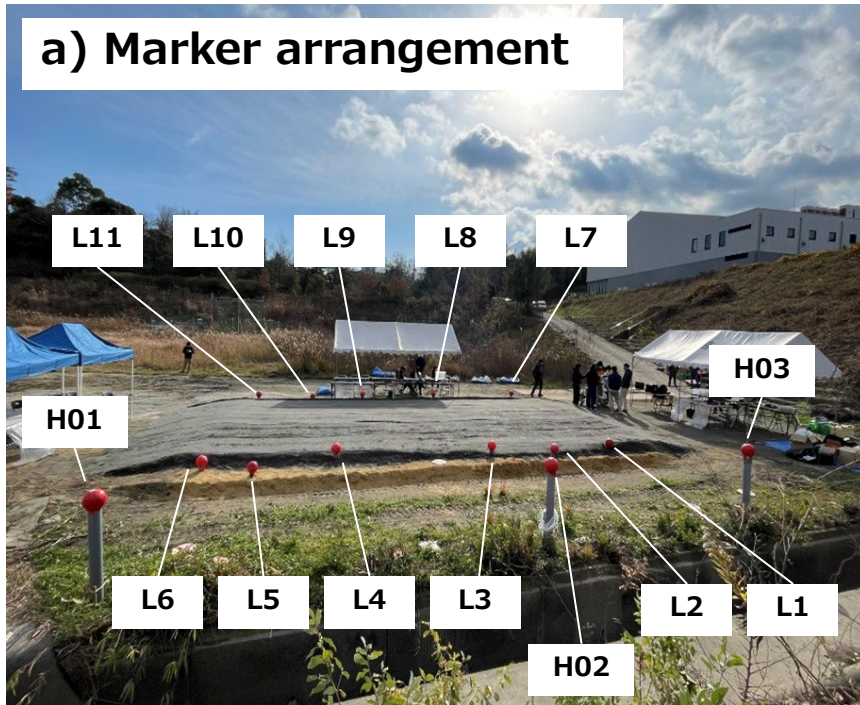
トータルステーションで標識位置およびローバー計測点を計測



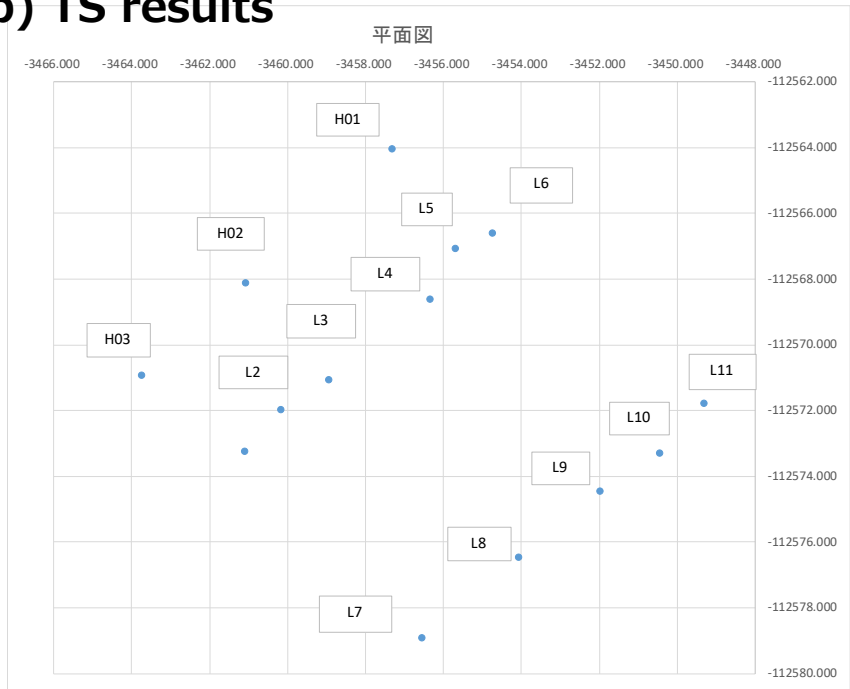
1) 標識頂点座標値をTS計測

2) 標識中心座標値を推定(D:0.20m)

a) Marker arrangement



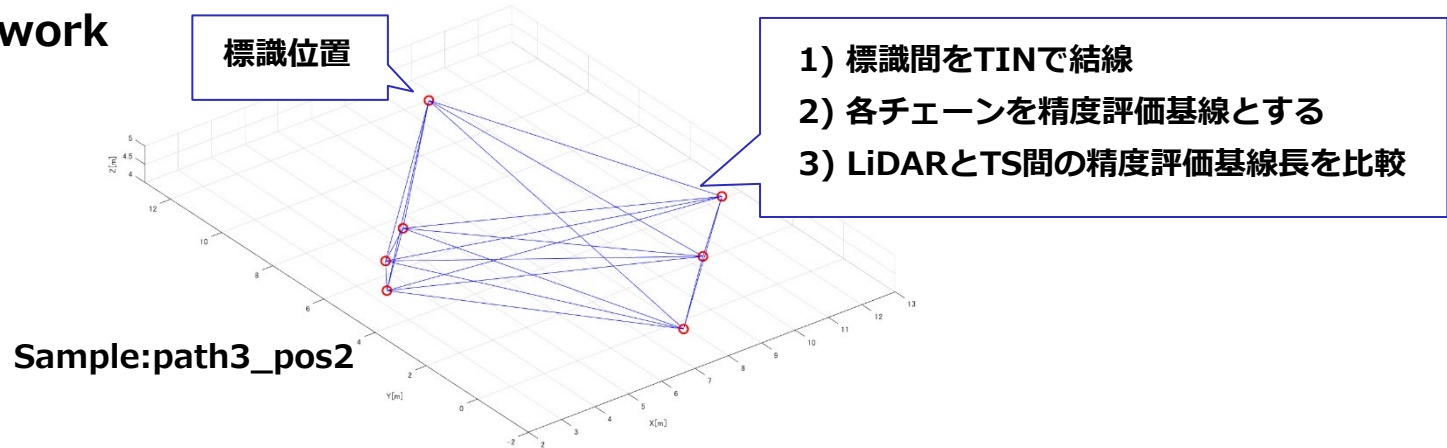
b) TS results



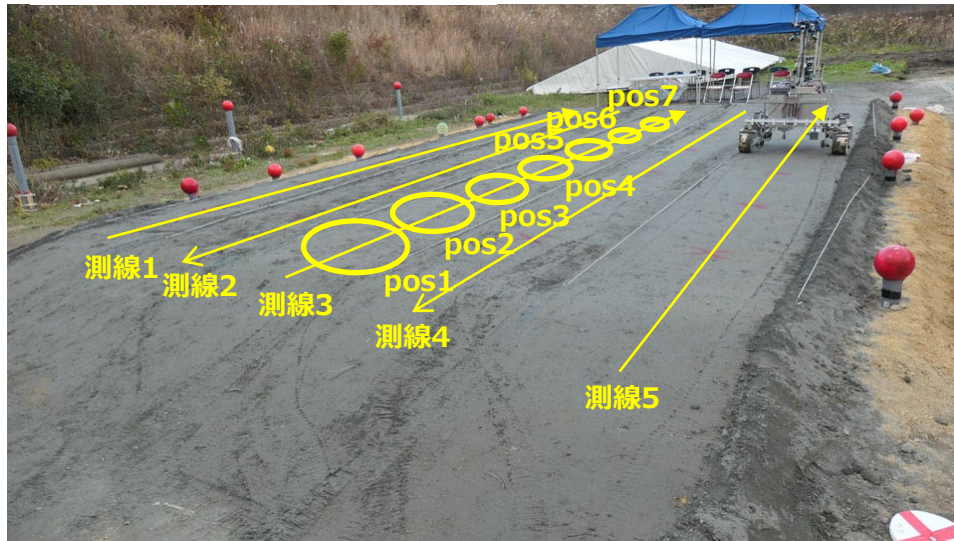
LiDAR点群からの球形標識抽出処理 精度検証

鳥観図 (処理自体は3Dデータ処理)

a) Marker network



b) Marker IDs



c) Error evaluation results

測線	pos	baselines errors (ave.)
3	1	0.041[m]
3	2	0.088[m]
3	3	0.098[m]
3	4	0.076[m]
3	5	0.057[m]
3	6	0.050[m]
3	7	0.134[m]

おおむね0.10m以内
の相対精度で標識位置
を推定できている

計測範囲のうち標識配置が
ローバ後方側に偏っている
計測位置のため精度が低い

まとめ

月面地上測量および土質・地盤調査向け測位のためのLiDAR-SfM/MVS

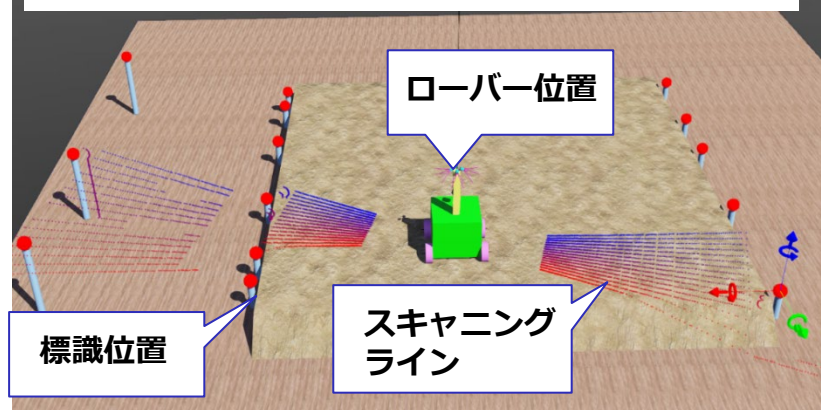
本研究の目的

ランダム配置した未知点としての標識群を利用したSLAMに関する課題を回避する手法を提案

- 1) 無人探査フェーズにおける月面地上測量を想定し、下記手法を提案
 - 未知点としての標識配置
 - SfM/MVSでの高密度点群取得
 - LiDARで取得した標識間のスケール情報を組み合わせる微地形の点群取得手法 (LiDAR-SfM/MVS, 要求精度0.10[m])
- 2) センサシステムの宇宙仕様化に向けた概略設計のために、月面模擬環境において自律移動ロボットを用いた検証実験を実施

次の課題

ロボットシミュレータでの標識配置最適化



そのほか

- 月面施工にあわせたシームレス空間モデル
- 赤色立体地図を利用した点群利用の効率化
- ローバ走行のための地形特性モデル化
- SLAM向け標識の自律ロボット化