

# Plane sweep法を用いた カメラ画像からの 天体表面形状推定

岡田尚基、巴谷真司、竹尾洋介、松本祐樹

宇宙航空研究開発機構(JAXA)  
研究開発部門第一研究ユニット

# 概要

- 背景
- 目的
- 形状復元概要
- Plane sweep法による形状復元
- Structure from Motion (SfM)によるカメラ位置・姿勢推定
- まとめ

# はじめに

- 探査機により衛星等への降下着陸を行う際、事前に着陸目標地点付近の詳細な形状を把握しておくことが、安全性の確認や着陸航法において求められる。
- 本研究では、現在開発が進められている火星衛星探査計画MMXで想定されている、フォボスへの着陸のための表面形状復元手法を模擬画像を用いて検証した結果を示す。

# MMXミッションと形状復元の目的

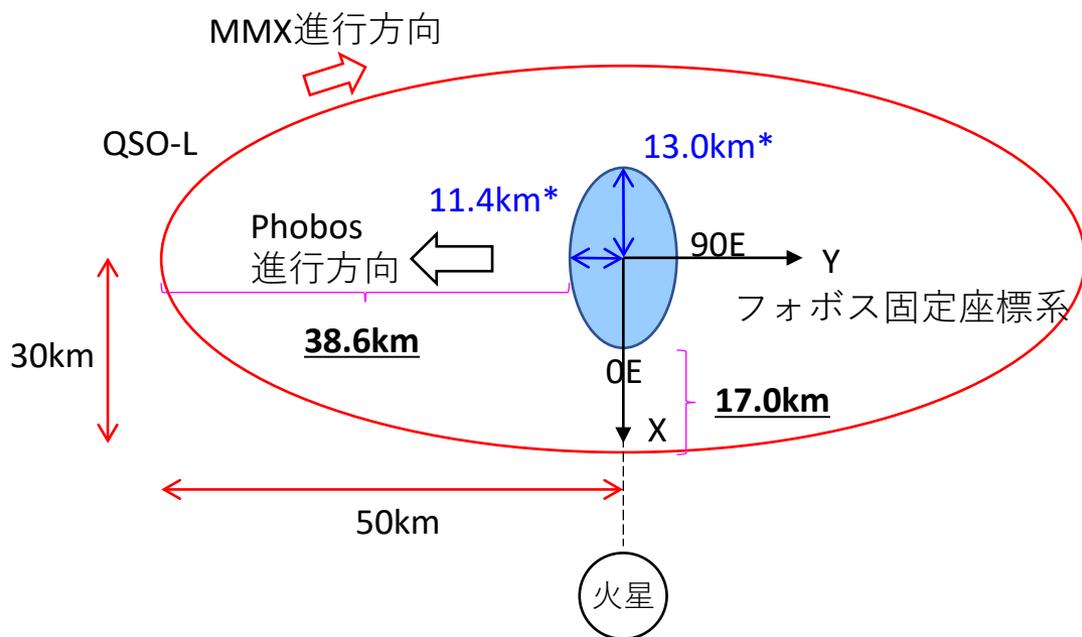
- MMXは火星衛星からの世界初のサンプルリターンミッション
- フォボスへの着陸において20m×20m程度の範囲の安全領域を降下運用本番前に識別できることが求められる。
  - 安全領域：着陸地点傾斜角が10度以下、かつ高さ30cmp-pよりも大きなボルダおよびクレータによる段差がない領域のこと。
- 安全領域の傾斜角を算定するためにフォボス表面の形状復元を行う。



- 打ち上げ目標：2024年度
- 質量：約4000kg
- ミッション期間：約5年
- ミッション機器
  - サンプルング装置
  - ガンマ線・中性子分光計
  - 広角分光カメラ
  - 近赤外分光計
  - 望遠カメラ など

# 着陸安全領域の観測

- 着陸安全領域はQSO-Lと呼ばれる軌道から実施
- 画像航法用には広角カメラCAM-Wと狭角カメラCAM-Tを搭載
- 安全領域抽出にはCAM-Tを使用



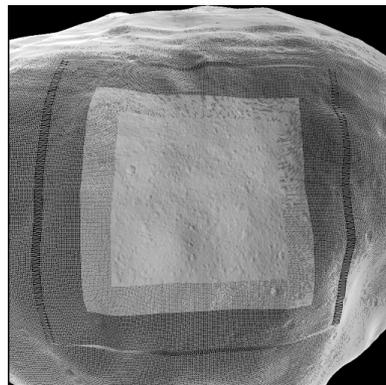
CAM-T 仕様値

項目	仕様値
画素数	3296x2472
水平画角[deg]	1.12
SNR	>30
MTF	$\geq 0.3@Nyquist$

\*Willner et al., Phobos shape and topography models, 2014

# 模擬画像生成のモデル

- 想定する分解能でのフォボスの実際の写真や形状モデルは存在しないため、CGによる模擬画像を入力とする。
  - 模擬画像の作成には、STAR-Dundee社のPANGU(Planet and Asteroid Natural scene Generation Utility)を使用
- フォボスモデル
  - Gaskellのフォボス全球モデル(ICQ q=512, 分解能約44m)をベースに、クレータ・ボルダ分布を与え、フラクタルを付加して局所的に8.6cm程度の分解能を持つ詳細モデルを作成
  - Hapke反射モデルを使用



局所的に分解能を上げた形状モデル  
(ワイヤフレーム表示)

# 画像からの形状復元

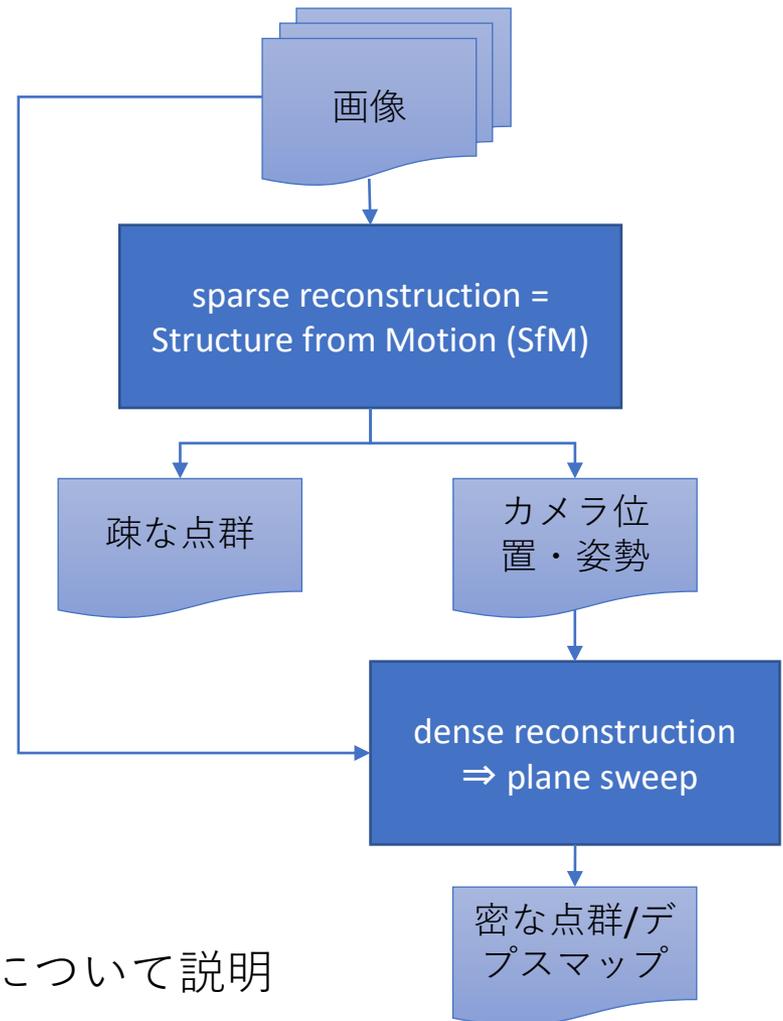
- 画像からの形状復元には以下のようなものがある。
  - ステレオ法 (Structure from motion, Visual SLAM等)
  - Shape from shading : 陰影情報から面の法線方向を推定
  - Shape from silhouette : 輪郭情報からロバストな形状推定
- 小惑星・衛星の形状復元においては従来、**SPC (stereo-photoclinometry)[1]**, **SPG (stereo-photogrammetry)[2]**と呼ばれる手法が主に使われている。
  - SPCは、画像上の小領域をステレオ法で推定し、画素ごとに陰影情報を使った法線方向の推定を行うことで全体的な誤差を低減しつつ精細な形状復元を行う手法
  - SPGはステレオ法であり、領域ベースのマッチングを行うことでサブピクセル単位でのマッチングを行い形状モデルやDTM(digital terrain model)を作成
- 本研究では、反射モデルの仮定が不要であること、精度の高さを理由として**MMX**の安全領域抽出に使用する予定のステレオ法について検討を行った。

[1] Gaskell et al., Characterizing and navigating small bodies with imaging data, Meteoritics & Planetary Science 43, No 6, 1049–1061 (2008)

[2] Preusker, F. et al., Shape model, reference system definition, and cartographic mapping standards for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko - Stereo-photogrammetric analysis of Rosetta/OSIRIS image data, Astronomy & Astrophysics, 2015.

# ステレオ視による形状復元

- Structure from Motion (SfM)は対象を複数の位置から撮影した画像を入力し、対象の3次元点群及び撮影時のカメラ位置・姿勢を同時に推定する手法
- カメラ位置・姿勢が未知でも使用できるが、対象の3次元点群は特徴点ベースで行われるため、対象は疎な点群として表される。
- そのため、詳細な形状復元を行うために、SfMで得られたカメラ位置・姿勢を使い、密な形状復元を行う手順がとられる。
- 本研究ではこの密な形状復元にステレオ視の一種であるPlane sweep法を用いる。

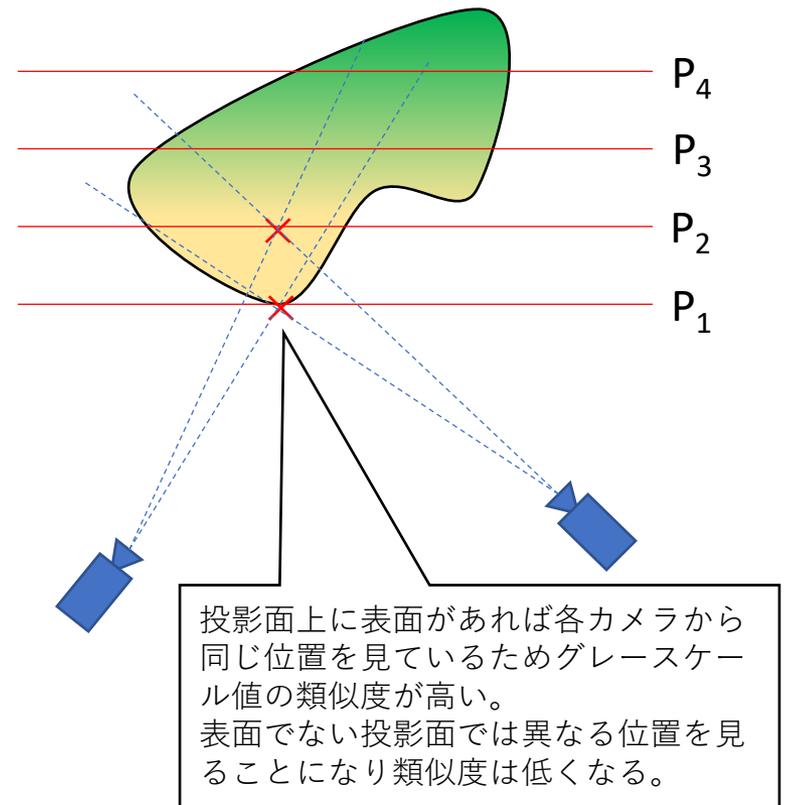


→前半でPlane sweep法、後半でSfMについて説明

# 1. Plane sweep形状復元

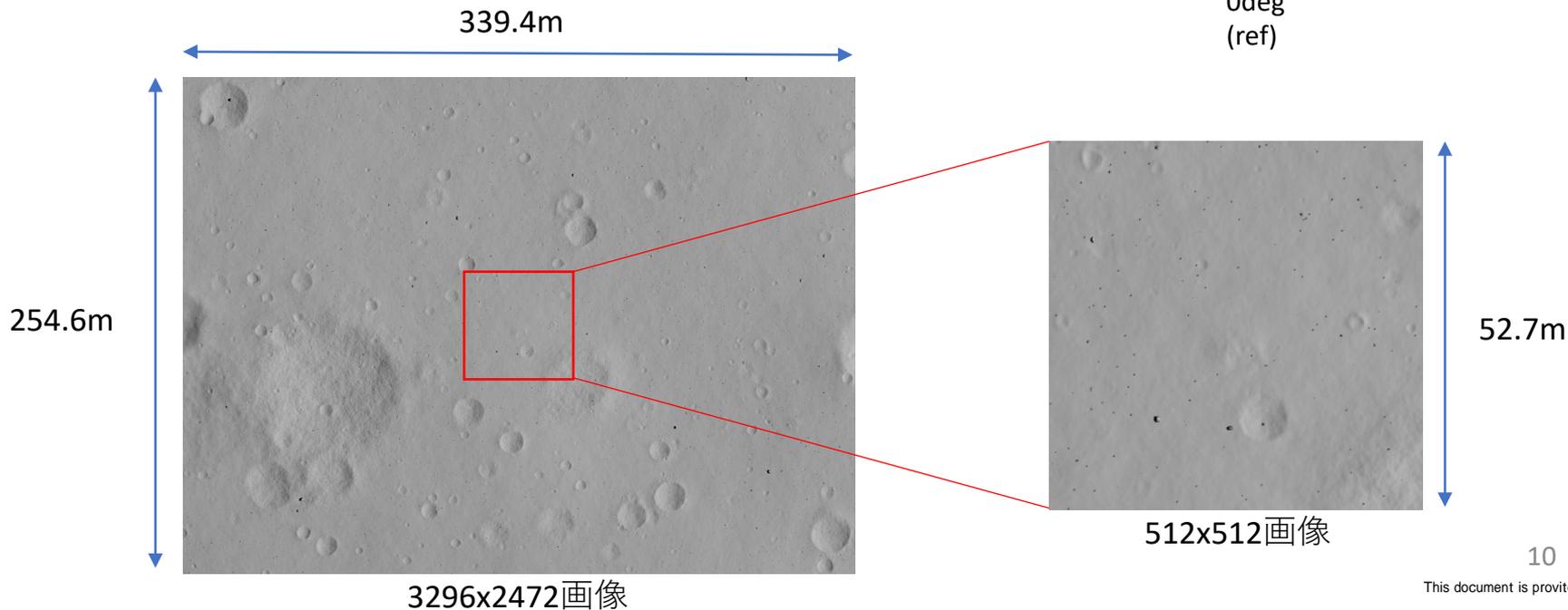
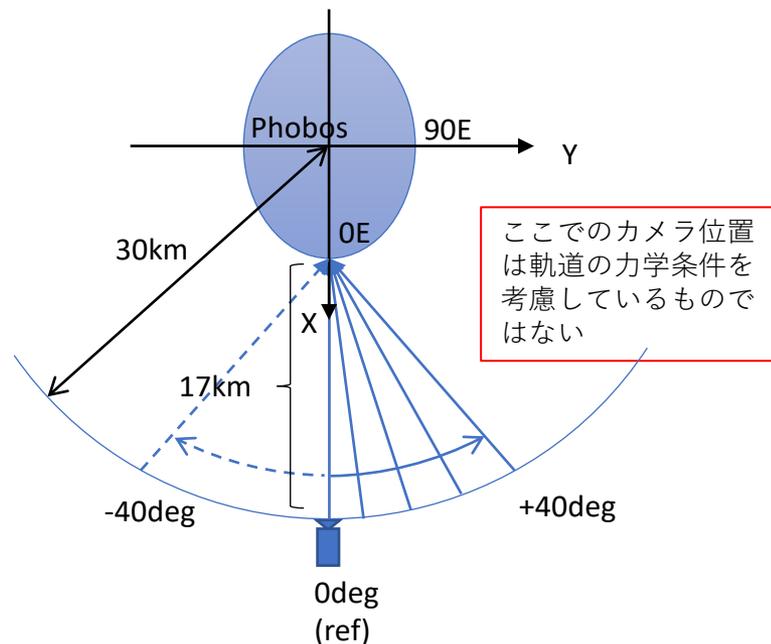
## Plane sweep法の考え方

- 空間に仮想的に等間隔で配置した複数の仮想投影面を想定
- 各投影面に対して複数視点からの画像を投影し、投影面におけるグレースケール値の類似度が高い点を表面とする。
  - 画像の投影にはホモグラフィ変換を使用
  - 類似度にはZNCC（正規化相互相関）を用いた。



# 1. Plane sweep形状復元 模擬画像撮影条件

- CAM-TによりOEの上空、フォボス中心から30kmの距離からの撮像を模擬（分解能約10cm）
- 処理負荷軽減のため中心512x512を切り出して使用。（約52.7m四方）
- これをリファレンス画像とし、同地点を同距離で角度をつけて撮影した画像を複数パターン組み合わせることで精度を評価した。
- 目標精度は $1\sigma=3$ ピクセル=30cmとする。



# 1. Plane sweep形状復元 形状復元結果

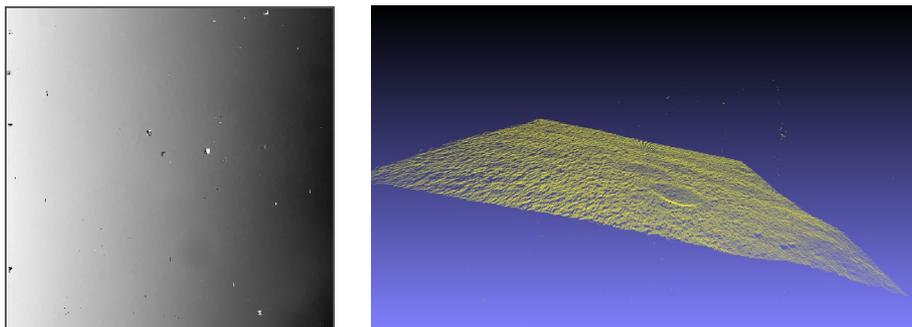
- カメラ位置・姿勢は真値を与え、Plane sweep法による形状復元を実施（カメラ内部パラメータも既知とする）。入力画像は正面及び東西方向10degから撮影した3枚とした。
- ノイズのない理想的な画像では $1\sigma=50\text{cm}$ 程度の精度が得られたが、SNR30相当のノイズ（ショットノイズ・リードノイズ・ダークノイズ）を加えた場合には精度の大きな低下がみられた。

→目標精度達成のためには画像ノイズの対策が必要

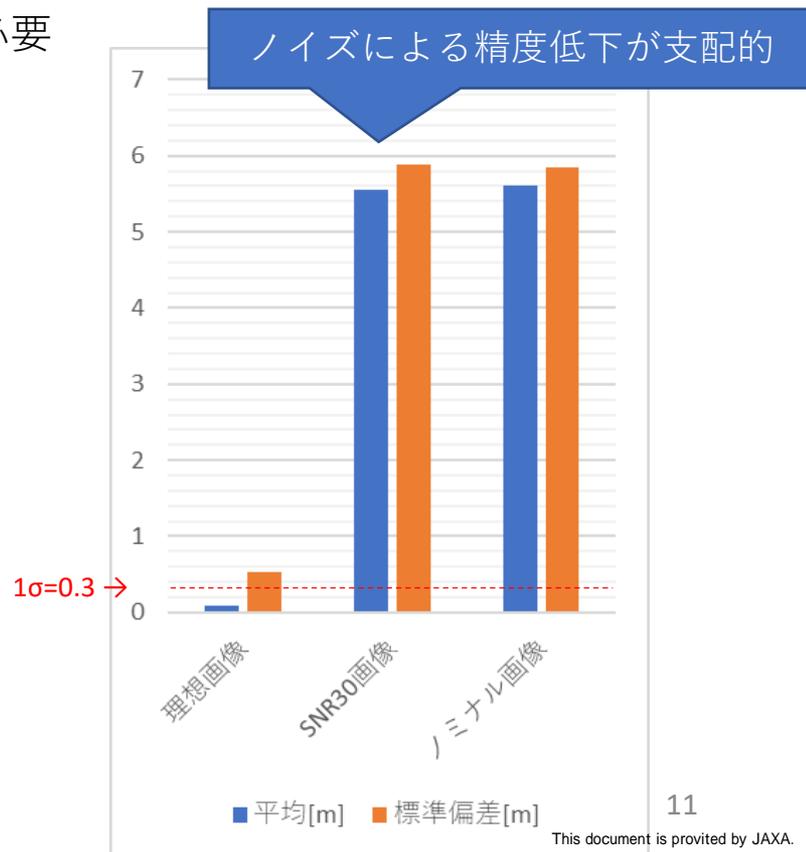
形状復元精度

No.	入力画像	平均[m]	標準偏差[m]
1	ノイズなし	0.094062	0.523150
2	SNR30画像	5.546168	5.889125
3	ノミナル画像*	5.609272	5.852799

\*ノイズに加え、MTFを模擬したボケや周辺減光を加えた画像

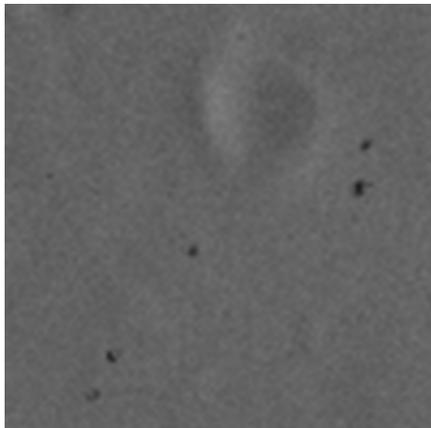


復元結果(No.1) 左：デプスマップ、右：点群表示

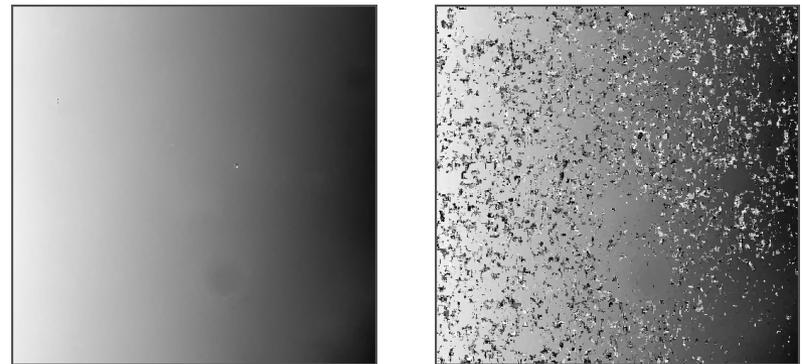


# 1. Plane sweep形状復元 ノイズ画像からの復元結果

- ノイズはフォトンショットノイズ、リードノイズ、ダークノイズ、放射線ノイズを付加
- $SNR = m/\sigma$ 
  - $m$ : ノイズなし画像の平均画素値
  - $\sigma$ : ノイズあり・なし画像間の画素値の標準偏差
- 復元したデプスマップを見ると、 $SNR=30$ の画像では奥行の推定に失敗した画素が非常に多い。
  - 画像は明るいほうが近い距離
  - 白または黒の画素は推定に失敗している（推定結果が探索範囲の端に飛んでいる）



SNR=30の画像（部分拡大）



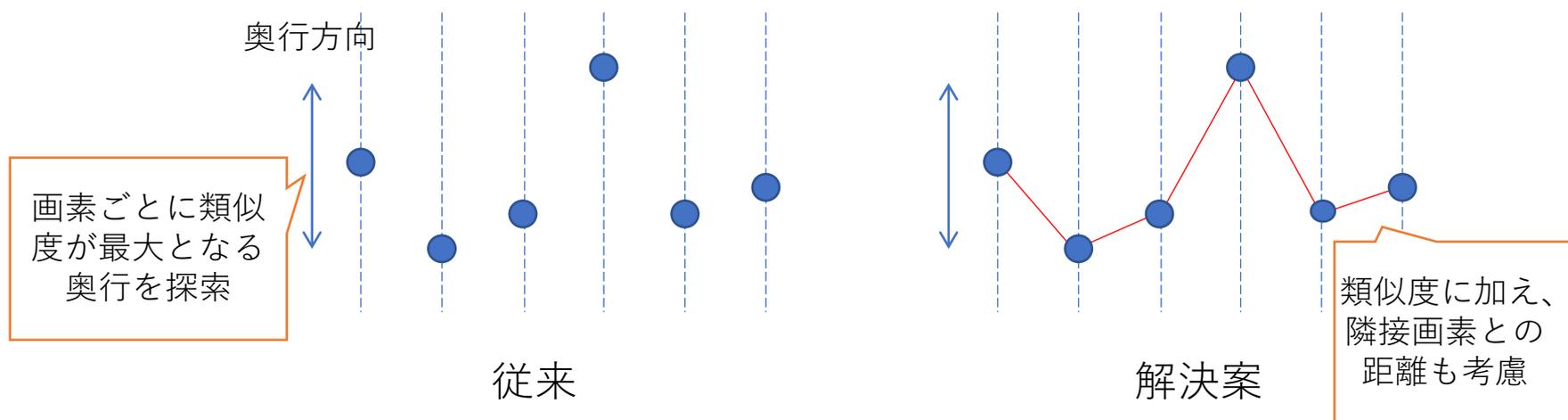
復元したデプスマップ

左：ノイズなし 右：SNR=30

# 1. Plane sweep形状復元

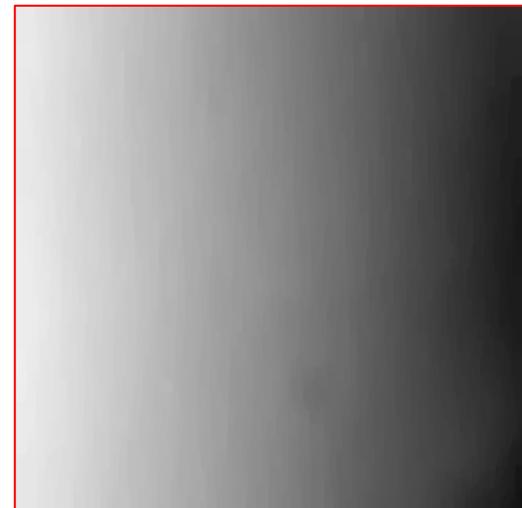
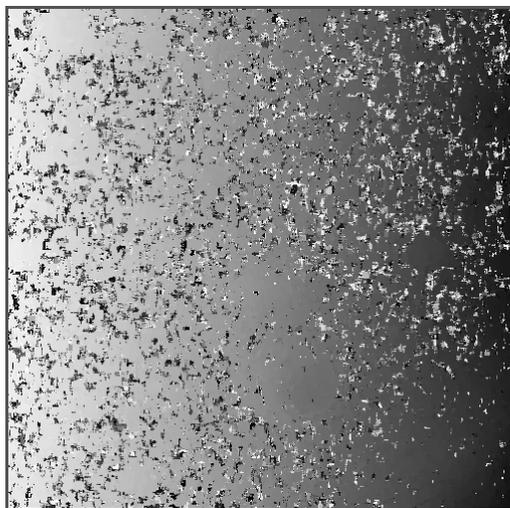
## 隣接画素間の距離を加味した最適化

- 本来の地形特徴がノイズに埋もれてしまうと、その画素のマッチングに失敗し、外れ値となり復元精度の低下を及ぼす。
- 従来方式では、リファレンス画像の各画素について、その微小周辺領域の他画像との類似度の和が最大となる奥行を推定結果としていた。
- ステレオ法による形状復元をロバストに行う手法として、対象物体の滑らかさを仮定し、「隣接画素との奥行方向の差が小さいこと」を評価関数に加えた最適化を行う。



# 1. Plane sweep形状復元 改善手法結果

- 改善手法では奥行方向にとび（外れ値）のない推定結果となっており、精度が向上



復元したデプスマップ（画像はすべて33枚分）

左：ノイズなし従来手法 中：SNR=30従来手法 右：SNR=30改善手法

# 1. Plane sweep形状復元 改善手法数値評価

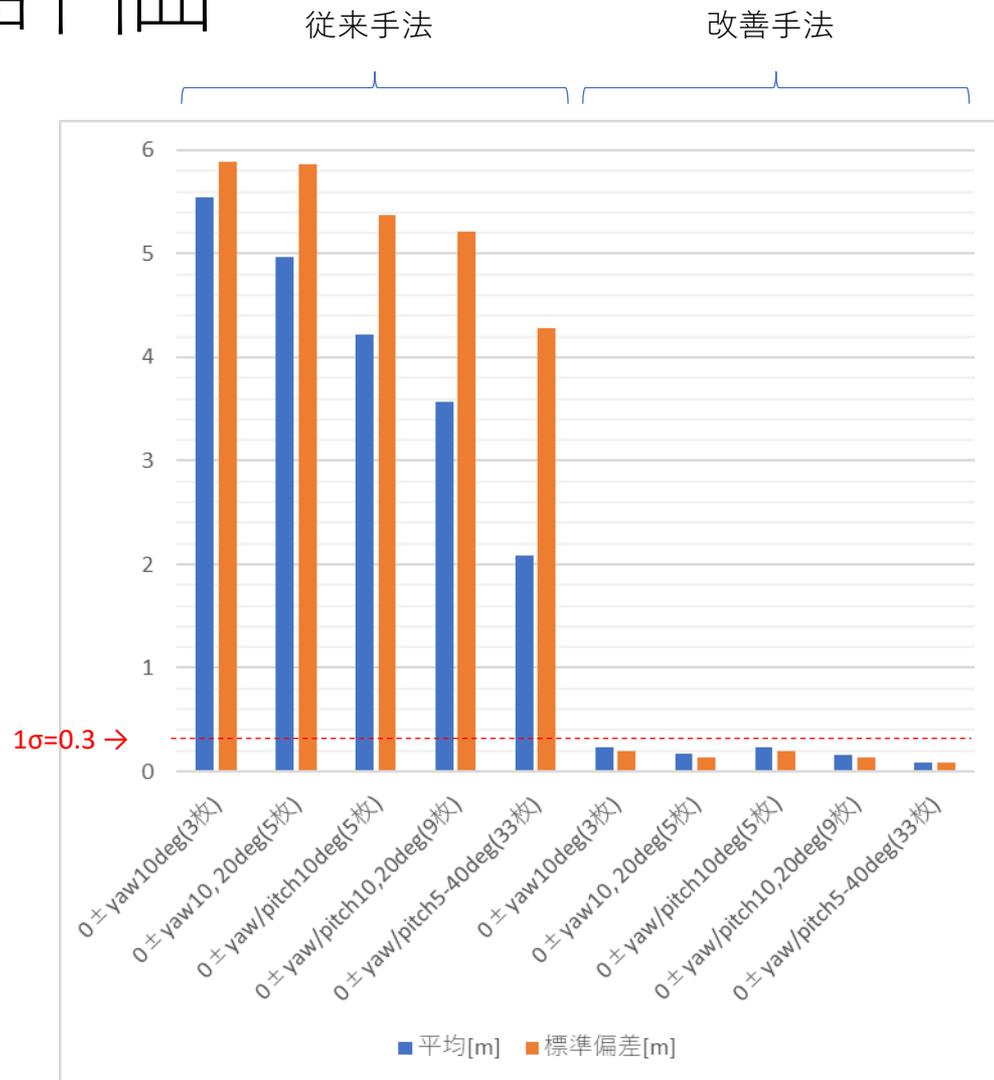
- 従来手法と今回の手法で推定結果を数値比較（右図）
- 改善手法では画像3枚で $1\sigma < 0.3m$ を達成

## A.従来手法

ケース	入力画像（枚数）	平均[m]	標準偏差[m]
A-1	0±yaw10deg(3枚)	5.546168	5.889125
A-2	0±yaw10, 20deg(5枚)	4.966413	5.865371
A-3	0±yaw/pitch10deg(5枚)	4.221481	5.377792
A-4	0±yaw/pitch10,20deg(9枚)	3.565958	5.214733
A-5	0±yaw/pitch5-40deg(33枚)	2.082691	4.278113

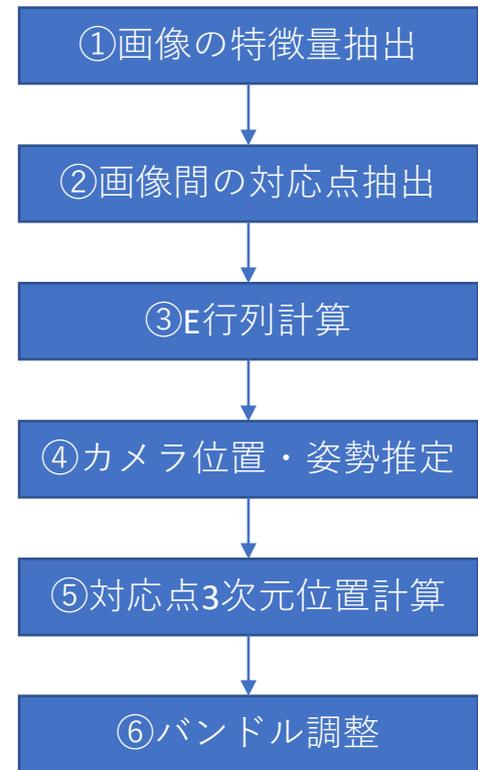
## B.改善手法

ケース	入力画像（枚数）	平均[m]	標準偏差[m]
B-1	0±yaw10deg(3枚)	0.238538	0.199316
B-2	0±yaw10, 20deg(5枚)	0.166025	0.138530
B-3	0±yaw/pitch10deg(5枚)	0.232327	0.201342
B-4	0±yaw/pitch10,20deg(9枚)	0.161619	0.140863
B-5	0±yaw/pitch5-40deg(33枚)	0.091817	0.086087

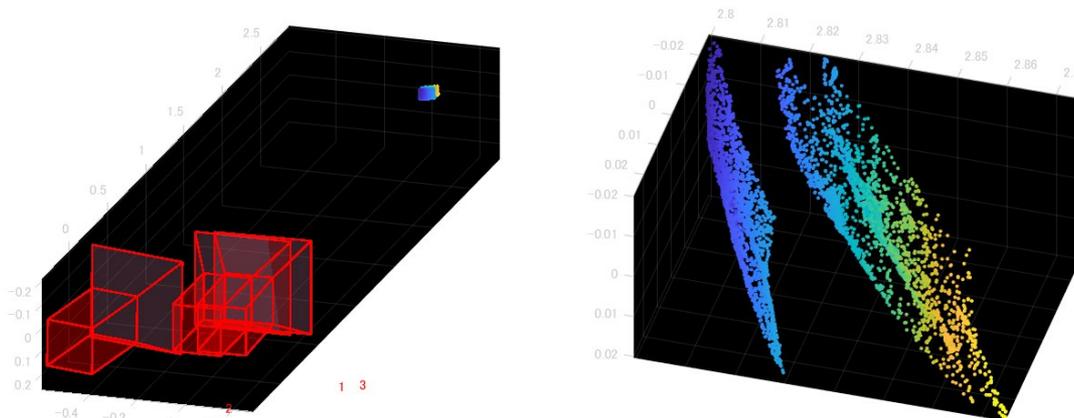


# 2.カメラ位置・姿勢推定

- Structure from Motion (SfM)では、推定した3次元点を各カメラの画像に再投影した際の誤差（再投影誤差）を最小化するカメラ位置・姿勢、3次元点群を推定する。
- CAM-T画像からのSfMは下図のように失敗することがある。
- CAM-Tは視野角が狭く、視野全体が平面に近い状態になるため、E行列計算で縮退に近い状態になり、④のずれが大きくなることが原因と考えられる。
- この状態で処理を進めると、⑥の最適化処理でも収束せずにSfMに失敗する。



SfMの流れ



SfMに失敗した際のカメラ位置・姿勢推定結果と3次元推定結果（入力画像は正面及び東西20度からの3枚）

## 2.カメラ位置・姿勢推定 改善手法

- バンドル調整ではカメラの台数×6、3次元点×3の膨大なパラメータの最適化が行われるため、局所解に陥ることが多い。  
→ 局所解を避けるため、最適化の工夫、初期値設定の改善を考える。
- 改善1) 今回はSfMで形状復元を行うことが目的ではなく、カメラ位置・姿勢のみの推定が目的であるため、最適化パラメータ数を減らすため、3次元点数を削減する。
  - ⑥バンドル調整の3次元点数をランダムサンプリングし、再投影誤差が小さくなるまで反復
- 改善2) 宇宙機の絶対姿勢はSTTにより高精度に決定可能なため、カメラ姿勢を固定した④E行列からのカメラ位置推定および⑥バンドル調整を実施。
  - E行列(Essential matrix)を特異値分解により並進・回転成分に分離するところ、回転成分を既知として並進成分を計算
    - $E \cong t \times R$

## 2. カメラ位置・姿勢推定 解析結果

- 改善1によりパラメータ数を減らすことでカメラ位置・姿勢の推定ができるようになったものの、ノミナル画像では精度の低下がみられた。
- 改善2ではカメラ姿勢を真値に固定したことでカメラ位置誤差が低下
  - カメラ位置については奥行方向の誤差が大きめとなっている。

No.	実施手法	カメラ位置誤差 (X,Y,Z) [m]*	姿勢誤差 (pitch,yaw,roll) [deg]	平均再投影 誤差[px]
1	改善前 (ノイズなし)	(2588.52, 525.62, 1569.63)	(0.908, 14.692, 0.768)	18.8123
2	改善1 (ノイズなし)	(10.88, 15.67, 17.77)	(0.057, 0.217, 0.066)	0.5629
3	改善1 (ノミナル画像)	(8.13, 32.59, 61.72)	(0.122, 0.680, 0.040)	0.5410
4	改善2 (ノミナル画像)	(5.25, 0.01, 16.80)	(0, 0, 0) (固定)	0.4278

\*SfMではスケールが未知パラメータとして残るため、カメラ1-2間の距離を既知として補正。  
基準カメラ座標系 (X: 水平、Y: 垂直、Z: 奥行)

# まとめ

- カメラ画像からの天体表面形状復元手法として、**Structure from Motion (SfM)**と**Plane sweep**法を組み合わせた手法について検討した。
- **Plane sweep**法における画像ノイズによる精度低下に対して、隣接画素間の距離を最適化関数に組み込むことで改善することを示した。
- 狭角カメラの位置・姿勢推定については、**SfM**を行う際の3次元点数を絞ることで改善でき、他センサから精度の良い姿勢情報が得られると更に精度が上がることを示した。
- 今後はより多くのケースで改善手法の有効性を検証すること、カメラ姿勢を固定値ではなくセンサ精度を考慮した可変値として**SfM**に組み込むことなどが考えられる。

※本研究の実施にあたりMMXプロジェクトチーム及び三菱電機株式会社の検討・設計結果を参考にさせていただきました。