

# 観測画像列からの小惑星形状と相対運動の同時推定

## Simultaneous Estimation of Asteroid Shape and Motion

谷本 啓<sup>\*1</sup>  
Akira Tanimoto

武石 直也<sup>\*1</sup>  
Naoya Takeishi

矢入 健久<sup>\*2</sup>  
Takehisa Yairi

津田 雄一<sup>\*3</sup>  
Yuichi Tsuda

照井 冬人<sup>\*3</sup>  
Fuyuto Terui

尾川 順子<sup>\*3</sup>  
Naoko Ogawa

三桝 裕也<sup>\*3</sup>  
Yuya Mimasu

<sup>\*1</sup> 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻  
Department of Aeronautics and Astronautics, University Of Tokyo

<sup>\*2</sup> 東京大学先端科学技術研究センター  
RCAST, University of Tokyo

<sup>\*3</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所  
Japan Aerospace Exploration Agency

In this paper, we consider the simultaneous estimation problem of asteroid shape and motion. In asteroid exploration missions, the information of asteroid shape and motion is very important to find suitable landing sites and navigate the spacecraft safely. In the previous Hayabusa mission, large part of the estimation was performed manually by ground operators. We propose an efficient automatic estimation method using the image feature matching and point-based 3D reconstruction techniques. Preliminary experiment results are also shown.

## 1. はじめに

2010 年, JAXA の小惑星探査機はやぶさが小惑星イトカワのサンプルを持って地球へ帰還したことは記憶に新しい。

サンプル取得のための小惑星タッチダウンの際には, 小惑星の形状と運動状態の情報が必要となる。これを取得するのがグローバルマッピングと呼ばれる作業であり, はやぶさプロジェクトでは手作業で小惑星上の特徴点の配置と対応付け及び画像間でのカメラ位置遷移を入力することでこれを行った。

しかしながら, 人力による作業では多大な時間と費用がかかる。そこで本研究では, 近年著しい発展を見せている画像処理および機械学習の手法を用いてこれを自動化することを提案する。

## 2. 手法

### 2.1 既存手法

同じ対象を複数枚の画像で捉え, 3次元形状及びカメラ位置を推定するという一連の問題は一般に **Structure from Motion (SfM)** 問題と呼ばれる。SfM の解法には, 因子分解法 (2) などの理論を基礎とし, Bundler [bundler] などフリーソフトウェアとして公開されているものも存在する。これらの手法は一般に正確な形状推定のための手法であり, バッチ処理と繰り返しによる最適探索を基本としている。

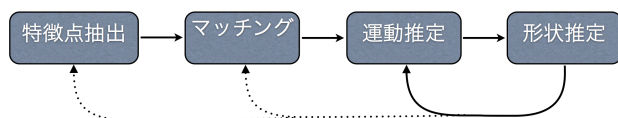


図 1. 既存手法概念

一方で今回の課題は宇宙機の制御のための推定であり, 処理

速度が求められる。そこで, 今回は非線形多様体学習の手法を応用することにより, 上図の繰り返しを行わずに運動状態と形状推定を同時に行うことを考える。

### 2.2 画像解析と対応点探索

画像間での特徴点マッチングには, SIFT 特徴量(1)を用いた。ノーマルな SIFT はアフィン変換には不偏性をもたないが, 後述する理由により視差の大きい画像間では特徴量レベルでのマッチングを行わないことを前提としたため, 強いアフィン変換がかかる画像間でのマッチングはなく, SIFT で十分である。

また, 特徴点のマッチングは特徴量同士のユークリッド距離が最も近いもの同士を対応点とした。点同士の対応が必ずしも 1:1 にならない可能性があるが, 後述の方法を用いて尤もらしくない対応を除外できるためここでは問題ない。

### 2.3 初期運動推定

このような最適化問題ではしばしば初期値の妥当性が問題となる。今回の手法においても, 外れ値の存在が問題となるため, 最初に大まかな推定を行うことにより外れ値除去を行う。また, この運動推定結果を用いて部分的な距離画像を生成し, それらの結合により最終的な推定を行う。ここで, 初期推定に際し以下の近似を行う。

1. 対象天体は球形
2. カメラは無限遠方より撮影
3. 自転軸はカメラの視線方向と垂直

これらの仮定をおくことで以下に示すように線形化され, 最小自乗法の枠組みで陽に解くことが可能となる。

球体の半径  $r$ , 中心座標  $(x_0, y_0)$  及びその回転角度  $\Delta\theta$  が決まっているとき, 次のようにしてその移動距離が決まる。

$$\delta = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} \Delta\theta \quad (1)$$

これを変形し, 次のような従属変数と説明変数の組に関する線形関係式を得る。

連絡先: tanimoto@space.rcast.u-tokyo.ac.jp

$$\begin{pmatrix} \delta_1^2 \\ \vdots \\ \delta_n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -(\Delta\theta)^2 \\ 2x_0(\Delta\theta)^2 \\ 2y_0(\Delta\theta)^2 \\ x_0^2 + y_0^2 + r^2(\Delta\theta)^2 \end{pmatrix}$$

(2)

$(x_0, y_0)$  : 中心の座標

$r$  : 半径

$\Delta\theta$  : 回転角度

$(x_i, y_i)$  : 特徴点  $i$  の座標

$\delta_i$  : 特徴点  $i$  の横方向移動量

以上より優決定線形方程式を解いてパラメタが求まる。

この方法による球面推定は、自乗誤差最小化に基づいて最適化が行われる。ここで、最小自乗法は外れ値に対して敏感であるという欠点がある。そこで、RANSAC[Zuriani 05]アルゴリズムによって外れ値を除外し多くの点でエラーが小さくなるパラメータを探索する。

RANSAC は、ランダムに部分集合を取り替えては最小自乗法を適用し、適合度の高い点(inlier)が多くなるパラメータを探索するアルゴリズムである。これにより、特徴点のミスマッチや、小惑星上の大きな凹凸部の存在に対してロバストに大枠のパラメータを求めることができる。

## 2.4 共埋め込み法による形状・運動推定

本手法は、元々は非線形多様体の局所線形アライメントによる学習のための手法であり、[Verbeek 04]を参照されたい。さらに、[Yairi 12]ではこの手法を今回のような同時推定問題に応用し、シミュレーションにより SfM への応用可能性を示した。しかしながら、今回のように球面上に分布する対象点を一度に観測する場合、線形性の仮定が成り立たない。そのため、組の画像間における視差を利用した部分的 3D 再構成を行い、これを距離画像として一観測単位とし、上記手法を適用した。

## 3. 実験と結果

### 3.1 初期運動推定

初期推定の結果が以下である。

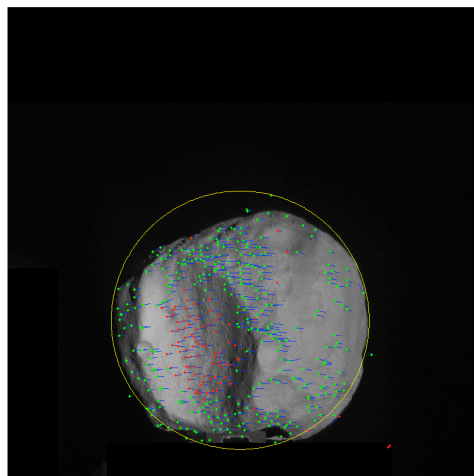


図2 初期推定結果

上図において、球面に近いと判断された点のみを用いて推定が行われていることがわかる。

### 3.2 共埋め込み法による形状推定

形状推定結果が以下である。

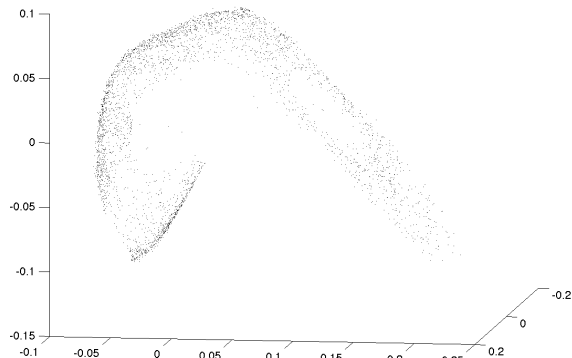


図3 共埋め込みによる形状推定結果

## 4. 考察

適切な仮定をおくことによる線形化でロバストかつ高速な初期推定と、その結果を用いた距離画像の構成、この距離画像を用いた3次元形状の再構成を行うことができた。現状では詳細形状において形状閉じておらず、さらに調整が必要であるが、局所的には正しい形状が復元されたと考えられる。

## 5. 謝辞

共同研究先である JAXA 様には実験素材及び多大なる助言を頂いたこと、ここにお礼申し上げます。

## 参考文献(論文誌と同じスタイルを推奨)

- [Lowe 99] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 1150-1157, 1999.
- [Okatani 07] 岡谷貴之, 出口光一郎, "非観測データを伴う行列の因子分解のための数値解法について", 情報処理学会 CVIM 研究会報告, 2005-CVIM-150, pp. 123- 1130, 2005
- [Snavely 08] N. Snavely, S. M. Seitz, R. Szeliski, "Modeling the World from Internet Photo Collections," International Journal of Computer Vision, Vol. 80, No. 2, 2008.
- [bundler] Available: <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>
- [Verbeek 04] Verbeek, J., S.T.Roweis, and N.Vlassis, "Non-linear cca and pca by alignment of local models," in Proc. of NIPS (2004)
- [Yairi 12] 局所線形アライメントによる欠損データ行列の共埋め込み法, The 26th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2012
- [Zuliani 05] M. Zuliani and C. S. Kenney and B. S. Manjunath, "The Multiransac Algorithm and its Application to Detect Planar Homographies", IEEE International Conference on Image Processing, Genova, Italy, Sep. 2005