

惑星画像からの探査機の 自己位置同定と表面形状の推定

佐藤 健史[†] 中谷 一郎[‡] 久保田 孝[‡]

[†]東京大学工学部 [‡]文部省宇宙科学研究所

1 はじめに

宇宙探査機から得られる、異なる時刻に撮影された複数の画像を用いて探査機(カメラ)の位置・姿勢を推定し、惑星表面形状の推定を行なう。探査機にとり付けられたカメラの焦点距離は大きく、また惑星表面はほぼ平坦なので従来の計算法では数値的に不安定になりやすい。本手法では projective reconstruction という概念を用いて画像のマッチングやカメラの位置・姿勢の推定を行なう。

2 カメラの幾何学系とファンダメンタルマトリックス

3次元空間中の点を X とし、それが画像中に映った点を u とする。 u の同次座標を u' 、 X の同次座標を X' で表すとする。カメラの光学系を 3×4 の行列 P を用いて表現する。これは3次元射影空間を2次元射影空間へと変換するもので以下のような式が成立する*。

$$u' = PX' \quad (1)$$

P はカメラの位置・姿勢、焦点距離、画像の中心の座標などをモデル化できる。

同じ対象を異なる視点から撮った2つの画像がある時、 u_1 を第1の画像上の点とし、 u_2 を第2の画像上で対応する点とすると $u_2^T F u_1' = 0$ なる 3×3 のランク2の行列 F が存在する。この F をファンダメンタルマトリックスとよぶ。カメラの焦点距離や画像の中心の座標などのカメラパラメータが既知の場合は、ファンダメンタルマトリク

Estimation of Positon of Space Probe and Shape of Planet from Multiple Images

Takeshi Sato [†], Ichiro Nakatani [‡], Takashi Kubota [‡]

[†] Faculty of Engineering, University of Tokyo

[‡] Institute of Space and Astronautical Science

*以下、本文中で $A = B$ は A と B の各成分が定数倍を除いて等しことを表すものとする。

スを用いて、カメラの運動パラメータを算出することができる [1]。

3 projective reconstruction と運動パラメータ

校正されていないカメラによる2枚のステレオ画像に対し、その対応点の情報から、それらの点を3次元射影変換の不定性を除いて復元できることが知られている [2][3]。これをカメラマトリックスを用いて解釈すると、以下ようになる [3]。ここで $\{P_1, P_2\}$ 、 $\{Q_1, Q_2\}$ を2つのカメラマトリックスの組とする。

Theorem 1 $P_1 H = Q_1$ かつ $P_2 H = Q_2$ をみたす 4×4 の正則行列 H が存在することと、2つのカメラマトリックスの組に対するファンダメンタルマトリックスが定数倍を除いて等しくなることは同値である。

画像から projective reconstruction をする方法は様々なものが報告されている [2][3]。なんらかの方法により初期解を算出後、推定の精度を高めるため最適化計算を行なう。カメラから得られる画像には、量子化誤差が加わっており、これを考慮した計算を行う。点 j がカメラ i に映った点の座標を u_{ij} 、式 (1) から計算される画像座標を \hat{u}_{ij} とし、 $\sum_{ij} \|u_{ij} - \hat{u}_{ij}\|^2$ を最小化する。非線形な式になるので適当な繰り返し計算で収束させる。求めるパラメータは P_i と X_j である。

カメラマトリックス P_i が算出できれば、対応するファンダメンタルマトリックスを算出できる。2つのカメラマトリックスに適当な正則行列 H を右からかけ、 $P_1 H = (I|0)$ 、 $P_2 H = (R|s)$ とする[†]。ただし I 、 R は 3×3 の行列で、 I は単位行列とする。ファンダメンタルマトリックスはベクトル s に対応する交代行列と R の積として算出できる。

[†]行列 P_1 に対し、掃きだし方などを適用すれば可能である。

ところで、正しい対応は式(1)を満たすはずである。カメラ位置が分からなくとも、projective reconstructionができれば対応点に対し幾何学的な拘束を加えることができる。カメラ2台に対し式(1)において、 X を消去するとファダメンタルマトリックス、カメラ3台に対して同様に trifocal tensorが導かれる。これらは画像の対応づけに利用できる。誤りを含む対応から式(1)を満たすものを抽出するのに LMedS法 [4]を用いることができる。

4 実験

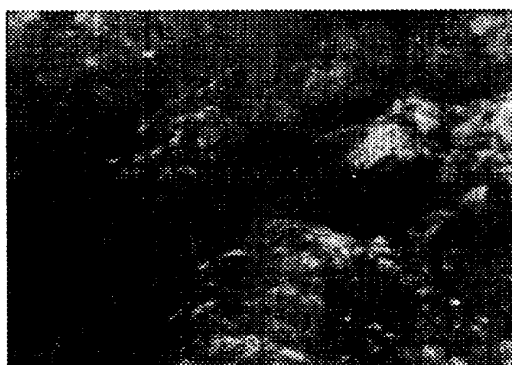


図 1: 入力画像

以下、月探査衛星から送られてきた画像[†](図1)をもとに述べる。用いた画像は 384×288 pixel の3枚の濃淡画像で、撮影時のカメラの焦点距離は 3920pixel、位置・姿勢は未知である。

これから特徴点を抽出し対応づけを行なった [5]。3枚の画像共通に 123 個の対応が得られた。これから trifocal tensor を算出し projective reconstruction をした。各ステップでは Levenberg-Marquardt 法を用いて最適なパラメータを求めた。

復元された特徴点からドロネー図を構成し各面に texture をはりつけた。それを座標変換し、仮想視点から見える画像を合成した (図2)。

5 まとめ

探査機にとり付けられたカメラの焦点距離は大きく、また惑星表面は凹凸に乏しいので従来の計算法では安定に結果を出せないといった問題がある。本手法では誤りを含み得る対応点から運動パラメータを求める前に projective reconstruction という概念を用いた方法を提案した。正しい対応



図 2: 仮想視点から見える画像を合成

を絞りこみ、またカメラの位置・姿勢を求めるのに projective reconstruction を用いた。

参考文献

- [1] H.C. Longuet-Higgins. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, Vol. 293, pp. 133-135, 1981.
- [2] O.D. Faugeras. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In *Proc. ECCV92*, pp. 563-578, 1992.
- [3] R. Hartley, R. Gupta, and T. Chang. Stereo from uncalibrated cameras. In *Proc. CVPR92*, pp. 761-764, 1992.
- [4] P.J. Rousseeuw and A.M. Leroy. *Robust Regression and Outlier Detection*. John Wiley and Sons, New York, 1987.
- [5] Z.Y. Zhang, R. Deriche, O. Faugeras, and Q.T. Luong. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry. Technical Report 2273, INRIA, 1994.

[†]米航空宇宙局、米国防総省提供