

特集「衝突現象・衝突地形」

小惑星形状モデリングと衝突地形 ～はやぶさが教えてくれるもの～

小林 慎悟¹, 出村 裕英¹, 橋本 樹明², 斎藤 潤³

1. 小惑星形状と引き出せる情報

衝突地形と聞くと普通は円いクレーター地形を思い浮かべるが、実は小惑星形状自身も衝突で割られ削られ侵食された衝突地形である。そして、その小惑星全体形状を厳密に調べることで、母天体の大きさやその破壊と進化の過程を復元でき、興味深い結論を引き出せる可能性があるのだ。

小惑星は衝突によってかなり砕かれ、亀裂長と亀裂間隔がほぼ等しい Fully Cracked Condition [1] と呼ばれる限界までひびが入っているか、もしくは幾つかのブロックが重力で弱く結びついていると考えられている (rubble pile)。ある程度以上小さければ、衝突破壊の過程で飛び散った一枚岩のカケラ (monolithic asteroid) として存在するかもしれない。破壊された当時の形状を保持していれば、Facets (図1) と呼ばれる、母天体上のクレーター壁の一部と見られる凹地形 [2] などから、衝突破壊される前の母天体の大きさが推定できる。衝突実験からクレーターの直径・深度比は小天体の曲率によって変わることが確かめられているからだ [3]。また、小惑星形状の三軸比から、衝突破壊過程がコア型 [4] であったか否かも押さえられる (図2)。探査機の軌道や慣性運動から小惑星質量が求められれば、小惑星形状に基づく体積から密度が求められる。密度は小惑星の組成と進化履歴を知るうえで、最も基本的な物理量である。組成成分の密度と比べることで、どれだけ衝突で密に締まっているのか、逆に破碎されて見かけの密度が小さくなっているのか、などの考察の基礎である。



図1：Facet 概念図。語義は宝石のカット面。

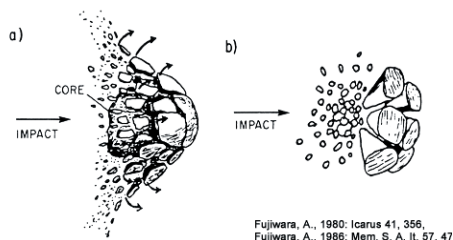


図2：母天体の破壊過程2種 [3,4]。

2005年6月に到着予定の小惑星探査機はやぶさのターゲットは、日本版ロケットの父、故糸川博士にちなんで25143 Itokawa と名付けられた [5]。おおまかな大きさはレーダー観測から $548 \times 312 \times 276 \text{ m}$ $\pm 10\%$ と見積もられている [6]。これくらい小さいと、いわゆる rubble pile ではなく単一岩体であっても不思議ではない。破局的衝突で放出されたカケラのひとつかもしれない。世界の探査計画の中で最も小さなターゲット小惑星である。きっと、これまでの大きめの小惑星とは違った知見をもたらしてくれるだろう。

形状認識成果である3D地図は、衝突地形のサイエンスに資するだけでなく、他観測機器成果をマッピングする白いキャンバスとしても重要である。隕石の母天体、小惑星における圧密/固化/続成/変成といっ

1. 福島県立会津大学コンピュータ理工学部
2. ISAS/JAXA
3. 西松建設

た作用を知るためには、地球で手に入る隕石サイズ以上の大きな構造を知る必要がある。しかし、その手がかりは非常に少ない。たとえば圧密時の脱水構造が破断面での「組成/粒径/風化度」の分布特徴として見えてきたら、機械的強度の弱線としての議論が可能となり、そのインパクトは計り知れない。また、破壊前の構造を組み上げるパズルピースとしての模様としても有用であり、衝突破壊過程を制約する大切な鍵になると考えている。

会津大の月惑星グループでは、はやぶさ搭載の望遠カメラ AMICA[7]を用いて小惑星形状モデルを作成する予定である。2003年度、AMICAのプロトモデルを用いてテストデータを取得し、高度分解能1m級の形状認識の基礎を固めた。以下、その原理・手順ならびに現状と課題を報告する。到着まで残されたあと1年余りで手順を確立し、運用計画支援ツールとしても使えるような、マッピングに資する可視化ツールの構築も考えているので、御意見頂ければ、できる限り取り入れさせて頂きたい。

2. 小惑星形状認識の手法

画像を用いた不規則形状小天体の形状認識は、画像に楕円体をフィッティングさせていく方法に始まり、現在では2つに大別できる。ひとつは、低解像度のためにステレオを構築できない場合で、リムやターミネータ(明暗境界線)から、球面に格子状に配置されたコントロールポイントによって、3次元形状モデルを構築していく方法である。もうひとつは、フォボスなど広範囲に渡って十分な高解像度の画像が得られた場合で、ステレオ観測によって、形状だけでなく、詳細な地形まで復元できる場合である[8]。はやぶさの、小惑星近傍でのデフォルト運用である Home Position(HP)保持運用とは、電力確保のため探査機は常に太陽に背を向け、保持BOXと呼ばれる一定範囲を遊弋することである。そのためターミネータを観測することは困難である。また、はやぶさに搭載されている AMICA

(Asteroid Multi-band Imaging Camera)は、視野角 $5.7 \times 5.7 \text{deg}$ 、画素数 $1024 \times 1024 \text{pixel}$ 、空間分解能 1m/pixel (高度 10km)という高解像度での撮像が可能となっている。我々のグループは、上記の制約と合わせて、単一カメラのため、2枚の画像を同時刻に撮像できないこと(非同期撮像)、さらに、自転走査による多視点からの高解像度画像が得られる点から、2枚の画像からステレオを構築し、エピポーラ幾何と呼ばれる幾何拘束を利用した形状復元手法を提案する。エピポーラ幾何を利用した本手法は、探査機の動きと小惑星の自転を相対運動としてひとまとめにして考えることができるという利点がある。以下、その原理と手法を述べる。

3. カメラモデル

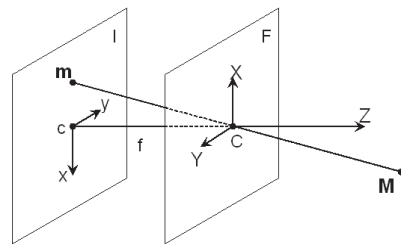


図3：ピンホールカメラモデル

ピンホールカメラモデル(図3)[10]は、被写体の投影面である画像平面Iを含む画像座標系 (c, x, y) と、焦点面Fを含むカメラ座標系 (C, X, Y, Z) から構成される。ここで、画像平面と焦点面は並行であり、レンズ中心Cを通る両平面に垂直な線を光軸といい、また、画像平面から焦点面までの距離を焦点距離という。空間中の物体Mは、レンズ中心Cを通り、画像平面上のmとして射影される。ここで、実際のデジタル画像の座標系においては、原点は画像左上に位置し、通常、水平右方向にx軸、垂直下方向にy軸をとることから、このモデルとは座標系が異なる。さらに、レンズ歪や焦点距離などのカメラが持つ固有のパラメータも考慮する必要がある。そこで、正規化カメラの概念を導入する。デジタル画像座標mから正

規化画像座標 x への変換 $\tilde{x} = A^{-1}m$ (ここで, A は, カメラの固有パラメータを含む 3×3 行列) によって, どのカメラを用いても, 同じようにビジョンの問題を考慮することが出来る. なお " $\tilde{\cdot}$ " は拡張ベクトルを表す. また, 実際には A は, 次式 A_0 を初期値として5章で述べる最小二乗フィッティングによって求めた.

$$A_0 = \begin{pmatrix} (W+H)/2 & 0 & W/2 \\ 0 & (W+H)/2 & H/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ここで H と W は画像の横サイズと縦サイズ.

4. 画像の対応付け

ステレオを考えると, 2枚の画像間の対応関係が必要となってくる. もし, 対応点の集合のなかに, 数ピクセルのずれや, 間違っただ対応が混じっていると, 形状の復元結果に大きく影響してしまう. そこで, 少しでも偽マッチを避け, マッチングの精度を上げるために, 以下のようなステップを踏んで, 特徴点対応を求めた.

- Step 1: スーザンオペレータを用いた特徴点抽出
- Step 2: 正規化相関関数によって対応点を仮決定
- Step 3: ミスマッチの除外
- Step 4: サブピクセルマッチングで対応点を修正

4.1 特徴点抽出

画像は膨大なデータを持っているため, 特徴的なコーナーやエッジのみを抽出して処理を行う. 特徴点抽出にはスーザンオペレータを用いた. スーザンオペレータはフィルタリング処理の一種で, 以下の式で定義される.

$$N(r_0) = \sum_{r \in M} \{1 - \delta(\|I(r) - I(r_0)\| - t)\}$$

ここで,

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x \leq 0) \end{cases}$$

r : ピクセル座標

- r_0 : フィルタの中心座標
- M : フィルタのサイズ
- I : 濃淡値
- t : 閾値

フィルタの中心座標の濃淡値 $I(r_0)$ と, その近傍の濃淡値との差の絶対値が, 閾値 t より小さければ $N(r_0)$ に 1 を加える. $N(r_0)$ は, r_0 における特徴の強さを決定する.

4.2 正規化相関関数によるマッチング

マッチングとは, 2枚の画像間で対応するピクセルを検出する処理である. 画像間の類似度は正規化相関関数によって求める. まず, 1番目の画像の特徴点近傍の矩形領域をテンプレートイメージとして切り出す. 次に, 2番目の画像を探索し, テンプレートと一致する部分を見つける. ここで, 一致する部分の中心点に対応点となる. 正規化相関係数 R は次の式によって決定される. この相関係数は-1.0から1.0までの値をとり, 値が高いほど相関が高いことを示す.

$$R(x,y) = \frac{A}{BC}$$

ここで,

$$A = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (W(x+i,y+j) - \bar{W})(T(i,j) - \bar{T})$$

$$B = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (W(x+i,y+j) - \bar{W})^2}$$

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (T(i,j) - \bar{T})^2}$$

- R : 正規化相関係数
- W : 画像の濃淡値
- T : テンプレートイメージ. サイズは $M \times N$
- \bar{W} : 2番目の画像の探索窓内の濃淡値の平均
- \bar{T} : テンプレートイメージの探索窓内の濃淡値の平均

4.3 サブピクセルマッチング

サブピクセルマッチングとは, 画像の最小単位であるピクセルよりも, さらに細かい精度(サブピクセル)で対応点を検出する処理である. 相関係数は2次式なので, 相関が高いところに現れるピークを対象画素の8近傍の放物線近似に基づいて, サブピクセル単位で求めることができる(図4).

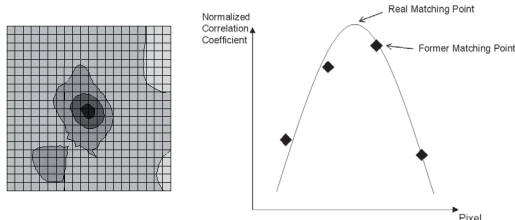


図4：相関係数分布とサブピクセルマッチングの概念図

4.4 階層的かつ再帰的な探索

偽マッチを避けるために導入した手法である。探索窓を縮小しながら、同じ特徴点に対して3度のマッチングを行う。まず21x21の探索窓を使ってマッチングを行い、次に1回目の探索で発見された対応点を中心として19x19の窓を使って探索する。最後に、2回目に発見された対応点を中心として、9x9の窓を使って探索する。探索窓の範囲を変えた3度の探索で、いずれの探索でも対応点が発見されたとき、その点は保存される。1回目の探索で対応点が発見されても、2回目、3回目で検出されなければ、その点は偽マッチとみなして破棄される。また、探索窓を大きくすると、広い範囲でマッチングできるという利点があるが、まれに、探索窓内で相関値のピークが2つ以上存在する場合がある。この場合、探索窓を狭めた2回目、3回目の探索により、間違っただけのピークをほうを選択してしまう可能性があるが、相関値に閾値を設け、それを下回った場合、1回目の探索で検出された点を対応点とした。

5. エピポーラ幾何

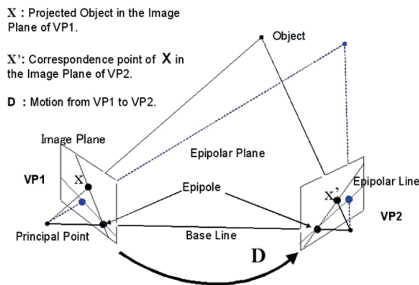


図5：エピポーラ幾何

エピポーラ幾何(図5)とは最初、両眼立体視の対応付けの問題から考えられたもので、ステレオビジョンを記述する上でよく用いられている。ただし、図5では、VP1とVP2は2つのカメラではなく、ひとつのカメラが2つの視点から非同期で撮像したものとする。2つの視点で3次元空間中の同じ点を見ているとすると、その点と2視点はひとつの平面にある。この平面をエピポーラ平面といい、エピポーラ平面と画像平面との交線をエピポーラ線という。さらに、各画像においてエピポーラ線が交わる点をエピポールという。2視点間の幾何関係が既知の場合、一方の画像で1点を与えられると、エピポーラ平面と各画像上のエピポーラ線が決まる。他方の画像上では、対応点がエピポーラ線上に限定される。したがって、対応点を探すには2次元の探索でなく、エピポーラ線に沿ってのほぼ1次元探索で済む。

5.1 エピポーラ方程式

画像1の点の座標を x 、画像2の点の座標を x' とする。また、視点1から視点2への運動は回転運動 R と並進運動 t によって表現することができる。つまり、視点1から視点2への運動は $\hat{x} = R\hat{x}' + t$ によって表される。ここで、ベクトル \hat{x} 、 t 、 $R\hat{x}' + t$ は共平面であるのでスカラー3重積は0となる。つまり $\hat{x}(t \times (R\hat{x}' + t)) = 0$ 。

この式をエピポーラ方程式という。歪対称行列

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}_x = \begin{pmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_0 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}$$

を使って変形すると、

$$\hat{x}(t \times (R\hat{x}' + t)) = \hat{x}[t]_x (R\hat{x}' + t) = \hat{x}E\hat{x}'$$

($E = [t]_x R$)。さらに、デジタル画像座標が与えられた場合は、 $\hat{m}^T F \hat{m} = 0$ ($F = A^{-T} E A^{-1}$)、ここで、 E を基本行列 (Essential Matrix)、 F を基礎行列 (Fundamental Matrix) という。もし一方のデジタル画像座標が与えられた場合、エピポーラ線は $\ell = F\hat{m}'$ ($\ell = F^T \hat{m}$) として与えられる。

5.2 基礎行列の推定

基礎行列を求めることはエピポラ方程式を解く上で最も重要なステップだとされており、過去、いかに精度よく基礎行列を求めるか、という研究が数多くなされてきた。本手法では、8点の特徴点对応から基礎行列を推定する Eight-Point Algorithm[11]と、数百点の特徴点对応からランダムに点を選び出し、評価関数が閾値以下になるまで計算を繰り返すという RANSAC 法を組み合わせ、基礎行列を求めた。

(1) Eight-Point Algorithm (EPA)

画像 1 の i 番目の点 $\mathbf{m}_i(u_i, v_i)$ と画像における対応点 $\mathbf{m}_i'(u_i', v_i')$ はエピポラ方程式 $\hat{\mathbf{m}}_i^T \mathbf{F} \hat{\mathbf{m}}_i' = 0$ を満たす。ここで、最低8点以上が与えられれば、線形解法が存在する。基礎行列の要素をベクトルとして並べると、次式が成り立つ。

$$\mathbf{u}_i^T \mathbf{f} = 0$$

$$\mathbf{u}_i = (u_i u_i', u_i v_i', u_i v_i', v_i u_i', v_i v_i', v_i, u_i', v_i', 1)^T$$

$$\mathbf{f} = (f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}, f_{31}, f_{32}, f_{33})^T$$

ここで、 f_{ij} は、 \mathbf{F} の各要素。

さらに、 n 点の対応が与えられたとき、

$$\mathbf{U}\mathbf{F} = \mathbf{0}, \quad \text{ここで、} \mathbf{U} = (\mathbf{u}_1^T \cdots \mathbf{u}_n^T)^T.$$

最小二乗法に基づき \mathbf{F} は、 $\mathbf{U}^T \mathbf{U}$ の最小固有値に対応する固有ベクトルとして求められる。

(2) RANSAC 法

Step 1: 特徴点集合から無作為に8点を抽出

Step 2: EPA により基礎行列を計算

Step 3: もし、評価関数が閾値以下なら終了。それ以外なら Step 1に戻る。

上記の手法で求めた数百点の特徴点对応からランダムに8点を抽出し、特徴点とエピポラ線とのユークリッド距離が0となることを利用した評価関数を立て、これが閾値以下の値になれば、その基礎行列を採用する。評価関数は以下の式で表される。

$$C = \sum_i \left(\frac{(\hat{\mathbf{m}}_i^T \mathbf{F} \hat{\mathbf{m}}_i')^2}{l_{1i}^2 + l_{2i}^2} + \frac{(\hat{\mathbf{m}}_i^T \mathbf{F} \hat{\mathbf{m}}_i')^2}{l_{1i}^2 + l_{2i}^2} \right)$$

$$\text{ここで、} \mathbf{F} \hat{\mathbf{m}}_i' = (l_{1i} \ l_{2i} \ l_{3i})^T, \quad \mathbf{F}^T \hat{\mathbf{m}}_i = (l_{1i}' \ l_{2i}' \ l_{3i}')^T.$$

本来ならばすべての組み合わせについて計算すれば最も精度良く基礎行列が求まるような点の組み合わせが分かるが、計算コストがかかりすぎるため、上記の方法を採用した。

5.3 評価関数の最小化による3次元形状復元

復元された3次元点をもう1度画像面に投影してやれば、元の特徴点と一致するはずである。そこで、次の評価関数を立て、これを最小化することによって、カメラの運動と、物体の3次元点を復元することができる(図11参照)。

$$C = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \| \mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{X}_j) \|^2$$

M : 画像枚数

N : 特徴点对応数

\mathbf{m}_{ij} : i 番目の画像の j 番目の特徴点对応ベクトル

$\hat{\mathbf{m}}$: 復元された3次元点を逆投影した点

\mathbf{A} : カメラ固有パラメータ

\mathbf{R} : 回転行列

\mathbf{t} : 並進ベクトル

\mathbf{X} : 3次元点

この関数是非線形であるため、最小化には最急降下法を用いた。

6. 三角形パッチによる3次元点集合からの面構成

求まった3次元点の集合に面を張る必要がある。また、張られた面にテクスチャをマッピングすることで、表面の粗さなどの情報を併せて表現できるようにする。本手法では、面の要素としては最も簡単な三角形を、ドロネー分割法によって3次元点の集合に自動的に張っていく。

6.1 ドロネー分割

最初にボロノイ分割(図6)について考える。これは、ユークリッド距離に基づき、平面をそれぞれの点の勢力圏に分割したものである。この分割の境界線は両側の点を結ぶ線分の垂直二等分線となり、一般に3つの境界線が1点で交わる[12]。ここで、この辺を共有する2

点を線で結んだものをドロネー図という(図7)．退化の場合を除いて，この分割は三角形となる．3点を選んで三角形を作る時に線の結び方に様々な組み合わせが考えられるが，ドロネー分割は，3辺の比が最小となるようなバランスのよい三角形が選択されていくので，結果として最良の面が選択されていると言える．

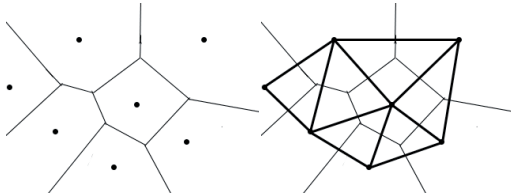


図6：ポロノイ図

図7：ドロネー図

6.2 3次元点集合への適用

ドロネー分割は，必ず点集合を凸面で囲む(凸包)という性質がある．よって，単純にドロネー分割を2次元から3次元に拡張すると，できあがった形状が凸面体になってしまうという問題が出てくる．そこで，最初に，Z座標を0とすることで，一旦平面化してから，2次元のドロネー分割を適用し，その後，Z座標を元に戻すことで，立体的に面を張るようにした．ここで，Z軸は視線方向であり，半透明な物質でない限り，原理的に視線方向で重なった面が見えることはない．また，極端に鋭い面や，輪郭付近にみられる意味のない面は，閾値を設けて削除するようにした．

7. 実験

本手法の有用性を確かめるため，宇宙科学研究所から AMICA のプロトモデル(PM)をお借りして，はやぶさの撮像シミュレーションを行った．実験では，被写体として Design Cast Studios 社製の小惑星模型"47 69 CASTALIA"と，"2063 BACCHUS"の2種類を採用したが，本解説では前者の結果についてのみ示す．また光源には SHIMADZU 社製の平行光源を使用した．PM と小惑星の間に焦点の合う位置を調整するための

レンズを挟み，光源はできるだけ光軸と平行になるように配置した(図8)．小惑星を設置するためのターンテーブルは太陽位相角，俯角，自転の3軸について自由に振ることができる．

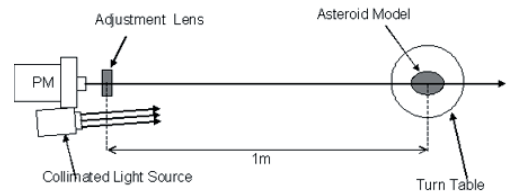


図8：コンフィギュレーション．

我々は，HP 保持運用時には，はやぶさが遊弋する箱状の領域(保持ボックス)内の各頂点など，重要と思われる12種類の視点からの撮像を行った．なお探査機の視点の位置は，太陽位相角と俯角によって決定した．また，各視点につき，自転1周分，3度刻みでの撮像を行った．図9に撮像結果を示す．

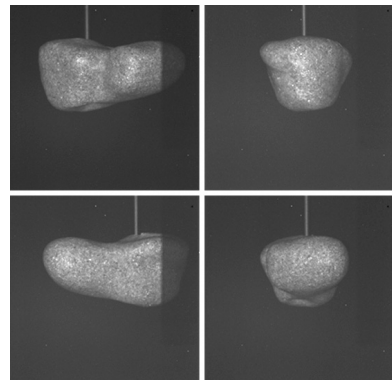


図9：撮像結果．自転軸まわりに3度刻みで撮像した．小惑星模型のスケールは1:2,000，サイズは8x5x4[cm]．

7.1 復元結果

以下に実験により取得した画像を使って，復元した結果を示す．図10は，2枚のステレオ画像にエピポーラ線を重ねた図である．2枚の画像間の運動に回転成分が入っていない場合，すなわち平行ステレオの場合は，エピポーラ線は完全に平行になる．本実験では，3度という極小さな回転運動が加わっているため，エ

エピポーラ線はほぼ平行に見えている。

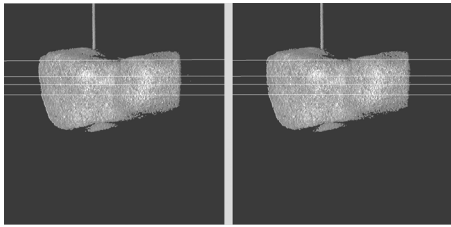


図10：エピポーラ線の復元結果。自転軸まわりに3度という小さな回転運動のため、エピポーラ線はほぼ平行に見えている。また、前処理として、画像に対して特徴を強調するためのシャープ化と、背景のマスキング処理を施している。

図11は異なる4つの視点を使って復元した3次元形状モデルである。VRML1.0形式で出力した後、AC3D[13]という商業用ソフトウェアを用いて表示した。

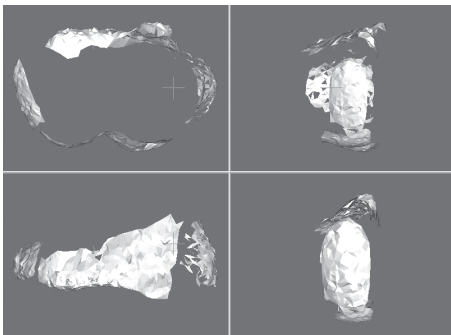


図11：復元された形状。4つの視点について、それぞれ形状を復元したもの。CASTALIA の特徴的な2つのこぶのような形状が復元されている。

8. 現状と今後の課題

自転軸まわりに3度回転分の視差をもつ2画像から形状を復元することに成功し、自転走査による単一カメラ画像に基づく形状認識の基礎を固めた。今後は、2視点から復元された面パーツ群について、どう結合し精度を上げてゆくか、その手順を確立する。面の重複域を自動抽出し、自転一周分に結合誤差を平均で押し付ける(最小二乗フィッティング)ことから始め、さらに、得られた形状モデルと画像から探査機の位置を逆

算し、慣性運動の制約から形状モデルの更新を繰り返してゆくことを考えている。また、2視点間の幾何拘束に更に複数の視点を追加し解の収束を安定させること、エピポーラ線を平行にする投影変換を噛ませることで撮像枚数をどれだけ間引けるか検討すること、なども考えている。

9. 謝辞

実験を支援して下さった宇宙科学研究所の藤原顕先生、安部正真先生、神戸大の平田成先生には大変お世話になりました。同僚の西山耕太郎・村井靖彦両氏にも御協力頂きました。最後に、本稿を丁寧に査読して下さいました匿名査読者の方に感謝申し上げます。

10. 参考文献

- [1] Demura, H., 2001, Earth Planets and Space 53, 1065
- [2] Chapman, C.R. et al., 1996, Icarus 120, 231
- [3] Fujiwara, A. et al., 1993, Icarus 105, 105
- [4] Fujiwara, A., 1980, Icarus 41, 356, Fujiwara, A., 1986, Mem. S. A. It. 57, 47]
- [5] JAXA, SPACE NEWS, http://www.isas.jaxa.jp/j/snews/2003/1007_2.shtml
- [6] Ostro, S. J. et al., 2004, Meteoritics and Planetary Science, 39, 407
- [7] Nakamura, T. et al., 2001, Earth Planets and Space 53, 1047
- [8] Simonelli, D. P. et al., 1993, ICARUS 103, 49
- [9] 宇宙科学研究所, 2003, M-V-5/MUSES-C 飛翔実験計画書, 582
- [10] 徐 剛, 2001, 写真から作る3次元CG, 7
- [11] Hartley, R. I., 1997, IEEE 19, 6
- [12] Berg et al, M. D., 1997, Computational Geometry, 179
- [13] AC3D, <http://www.ac3d.org/>