

小惑星撮影画像からの光源方向，表面反射率，Minnaert 係数の推定

小泉 信幸^{†1} 望月 義彦^{†1} 石川 博^{†1}

概要：小惑星探査機が姿勢制御しつつ，小惑星に接近する航法誘導には，一般的に三次元モデルを使用し，着陸地点を判断する．三次元モデルは，探査機に搭載された望遠カメラで撮影した小惑星画像を，地球に送信して処理することによって得られる．しかし，小惑星画像を通常の三次元復元手法を適用しても，小惑星の正確な形状とはならない．正確な形状を得るには，小惑星への太陽光の照射角度，小惑星表面の粗さ，表面反射率を考慮する必要がある．本稿では，探査機の望遠カメラで撮影した小惑星画像を入力として，通常の三次元復元手法を行った後，その得られた三次元点群から小惑星への太陽光の照射角度，小惑星表面の粗さ，表面反射率を推定した．

1. はじめに

1.1 研究背景

1.1.1 はやぶさ 2

「はやぶさ 2」は，宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が現在運用している小惑星探査機の名称であり，地球近傍小惑星の「(162173) Ryugu」への着陸とサンプルリターンを主な目的として 2014 年 12 月 3 日に打ち上げられた [1]．

はやぶさ 2 は，同じく地球近傍小惑星の「(25143) Itokawa」からのサンプルリターンに成功した「はやぶさ」の後継機である．はやぶさのミッションでは，2003 年の打ち上げから，姿勢制御に使用するリアクション・ホイールの故障，着陸可能地域への困難な誘導，一ヶ月半の通信途絶など多くのトラブルに見舞われつつも，2010 年には地球に帰還し，サンプルを投下，無事ミッションを成功させた．

はやぶさのミッションの経験を生かし，はやぶさ 2 のミッションでは，よりトラブルの少ない確実なミッションを目指している．はやぶさ 2 の目指している Ryugu は，はやぶさの探査した小惑星 (S 型) とは別の種類の小惑星 (C 型) で．この Ryugu には太陽系が生まれた頃の水や有機物が現存している可能性があり，このミッションでサンプルを持ち帰ることにより，太陽系の誕生と生命の起源を解明できるのではないかと期待されている．

はやぶさ 2 は基本的にははやぶさのサンプルリターン方式を踏襲するが，目的である生命起源の解明を確実なものとするため，新たな技術を使った試料採取や，はやぶさに比

べて多くのサブミッションが追加されている．目的地である Ryugu への到着は 2018 年を予定しており，到着後の計画は次の通りとなっている．

- (1) 小惑星を周回しつつ，多バンド可視カメラ，レーザ高度計，近赤外分光計，中間赤外カメラを使用しての Ryugu の観測
- (2) 小型ローバ (MINERVA-II)・着陸機 (MASCOT) の投下，およびそれらによる Ryugu 表面の直接観測
- (3) タッチダウン，および人工クレーターの候補地決定
- (4) Ryugu 表面へのタッチダウン，表面物質の採取
- (5) 衝突装置による人工クレーターの作成，タッチダウン，地下物質の採取

はやぶさ 2 は，これらの計画のあと，2020 年末に地球に帰還する予定である．

はやぶさ 2 の運用時，小型ローバや着陸機の投下点，またタッチダウンや人工クレーターの候補地を決定する必要がある．このとき，Ryugu の三次元形状モデルを用いて候補地を選定することで正確な判断を行うことができ，ミッションを成功に持ち込めると期待ができる．しかし，Ryugu の表面反射率，自転の方向や速度は現在観測されている限りでは分かっておらず，はやぶさ 2 の撮影した Ryugu の複数枚の画像のみを用いて高精度な復元を行うことが求められる．

1.2 小惑星の三次元復元

1.1.1 節で述べた通り，小惑星へのタッチダウン地点決定や，小惑星の成り立ちを推測したり，内部構造を考察する

^{†1} 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 情報理工・情報通信専攻

ためにも三次元形状モデルが必要となる。

先のはやぶさミッションでは、はやぶさに搭載された望遠カメラが撮影した画像に基づき、対象小惑星 Itokawa の三次元形状モデルが2つ作られた。ひとつははやぶさが Itokawa に接近した時に暫定的に作成・使用された GNC 版 (Guide and Navigation Control) で、もうひとつは Itokawa でのサンプル採取後に作成された会津版である [2]。

GNC 版は、一般的な三次元復元手法である Multi-view Stereo を使用して得られたモデルであり、おおよその形状は推定できたものの、小惑星の正確な形状を再現はできていないという問題点があった。会津版は GNC 版で挙げられた問題点を解消するため、以下の2手法を組み合わせて作成された [3]。

- Limb Profiling
- Shape from Shading

Limb Profiling とは、対象の物体の周りを回転しつつ撮影した画像の輪郭を抽出し、輪郭とカメラの光学中心によって形成される錐体の積集合空間を三次元モデルとして出力する手法である。Shape from Shading とは、画像の陰影情報をもとに物体の立体形状を推測する手法である。この手法で復元された三次元形状モデルは、GNC 版の問題点である不正確さは補えたものの、画像ごとに小惑星に対する光源方向が既知であることと、画像における暗い部分が陰影であるか表面物質自体の色であるかを判断するため、物体上の点ごとに表面反射率が既知である必要があり、このモデルの作成は Itokawa の調査を十分に必要があり、完成には時間がかかってしまうという欠点が存在した。

小惑星のタッチダウン地点決定や、航路誘導などに三次元形状モデルを使用するためにも、三次元形状モデルは会津版のように実物に近く正確で、なおかつ GNC 版のように、ランデブー開始時に撮影した小惑星画像のみを入力として、三次元形状モデルを復元する必要がある。

1.3 研究目的

小惑星を撮影した複数枚の画像だけを入力として、小惑星の三次元形状を正確に復元する。しかし、Ryugu の画像をはやぶさ2が撮影する環境や、Ryugu 自体の反射モデルは一般的な三次元復元手法とは異なるものであり、これに則った三次元復元を行う必要がある。本研究の目的は、小惑星の画像を入力として、三次元復元を行う仮定で必要となる、小惑星に対する光源方向、表面反射率、Minnaert 係数を推定することである。

入力として使用する画像の例を図1に示す。

探査機はこれらの画像の撮影時、小惑星にカメラを向けて固定する。小惑星が回転しているところを時々刻々と撮影することで、小惑星の表面全てを捉えることができる。このとき光源である太陽は動かない。したがって、撮影される画像は、画像ごとに小惑星に対する探査機の位置・方

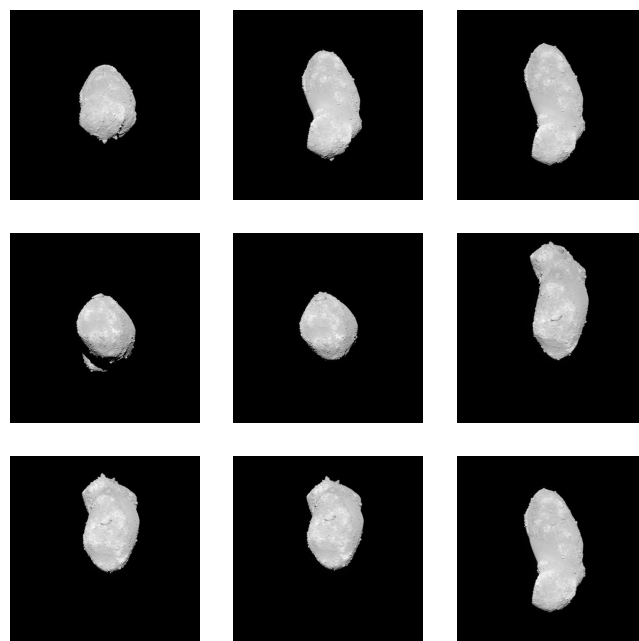


図1 はやぶさが撮影した小惑星画像の一部。
画像には対象となる小惑星 Itokawa のみが投影されており、背景となる領域は画素値が0、つまり黒で塗りつぶされている。

向・光源方向が変化したものとなる。一般的な三次元復元手法の Multi-view Stereo では、対象物体を複数の視点から撮影することで対象の物体の三次元復元をすることが出来るが、物体上の陰影が全ての画像で変化しないという制約が存在する。しかし、本研究の対象シーンでは、画像ごとに物体に対する光源の方向が変化してしまうため、物体の陰影が変化してしまい、Multi-View Stereo の制約を満たさない。そのため、高精度な三次元形状モデルを得るには、反射モデルの輝度算出式を用いて、画像ごとに光源方向を推定し、撮影環境を推定する必要がある。

ここで輝度算出式は、一般的な反射モデルである Lambert モデルではなく、天体表面などを観測する際に使用される経験的なモデルである Minnaert モデルを使用する。このモデルは、視点の位置に対する重み付けを行う Minnaert 係数を導入することで、天体表面の反射特性を再現している [4]。

提案手法では、小惑星を撮影した複数枚の画像を入力として、Multi-view Stereo で対象小惑星の三次元点群を得て、Minnaert モデルの輝度算出式で使用する、光源方向・表面反射率・Minnaert 係数を推定する。

2. 関連研究

2.1 Patch-based Multi-View Stereo

Multi-View Stereo(MVS) は、異なる視点から撮影した複数枚の画像から被写体の三次元形状を求める手法である。一般的な MVS の処理は以下の手順で行われる [5]。

- (1) 複数枚の画像を選択
- (2) Structure-from-Motion(SfM) により、各画像のカメラ

パラメータを推定

(3) 画像群と対応するカメラパラメータから被写体の三次元形状を復元

本研究では MVS の一手法である Patch-based MVS(PMVS) を使用する [6]。PMVS は、入力画像で観測できる被写体の表面を覆う矩形パッチの集合を出力する。この矩形パッチの集合は、矩形パッチの中心の三次元座標 $\mathbf{x}$ と法線ベクトル $\mathbf{n}$ を持つため、本研究ではこの出力を三次元点群と称する。PMVS の三次元形状の復元処理は、SfM でカメラパラメータを推定後、初期特徴マッチング、パッチ拡張、パッチフィルタリングの順で行う。

初期特徴マッチングでは、Difference-of-Gaussians と Harris 演算子で特徴点を検出し、SIFT[7] や SURF[8] などを用いて複数の画像にわたりマッチングを行う。得られた点の対応から、三角測量を行い疎なパッチの集合を得る。パッチ拡張では、初期パッチを近くのピクセルに広げて、すべてのピクセルにおいて少なくともひとつのパッチが投影されるような、密なパッチの集合を得る。パッチフィルタリングでは、パッチ拡張で生成された誤ったパッチを削除する。PMVS では、このパッチ拡張、パッチフィルタリングを通常 3 回繰り返すことで密な三次元点群を得る。

MVS・PMVS は、入力として与えられた画像に含まれる物体の表面の復元が可能だが、これらの画像は光源方向が物体に対して固定されているという制約がある。これは、光源方向が物体に対して相対的に変化する本研究の対象シーンとは相反するものであり、本研究の対象シーンを使用して PMVS を行うと、三次元復元の精度が低くなってしまうという問題が発生する。

2.2 Minnaert モデル

図 2 のとき、入射光は物体表面で拡散反射し観測方向に依存せず、あらゆる方向で均一の輝度が観測できる。一般的に拡散反射は式 (1) の Lambert モデルが使用される。

$$b = \rho \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 b が輝度、 ρ は表面反射率、 θ が光源方向と法線方向のなす角である。なお、表面反射率は 0 から 1 とする。

本研究では、小惑星表面を撮影した画像を使用する。小惑星などの天体は物体表面が粗く、カメラと小惑星表面の距離が離れているため、図 3 の左図のように複数の面から反射した光がひとつのピクセルで観測され则认为される。そのため、本研究では右図のようにひとつのピクセルにひとつの仮想表面からの反射光が投影されていると仮定した、経験的なモデルである Minnaert モデルを導入する。この Minnaert モデルでは、仮想表面は視点の位置によって変化すると考えられるため、輝度 b の計算に視線方向によって重みを付ける Minnaert 係数 k を導入することで、Lambert モデルを式 (2) のように一般化したものとな

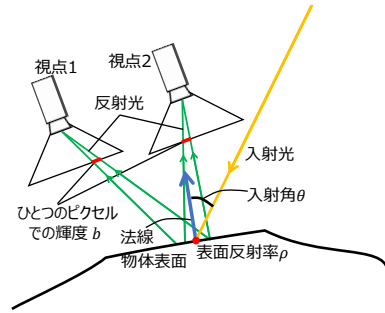


図 2 Lambert モデルでの概略図。Lambert モデルでは、ある物体表面の輝度 b の計算に表面反射率 ρ と光源方向と法線方向のなす角 θ が用いられる。このモデルでは、物体表面が滑らかならば、視点に依らず同じ輝度を得る。

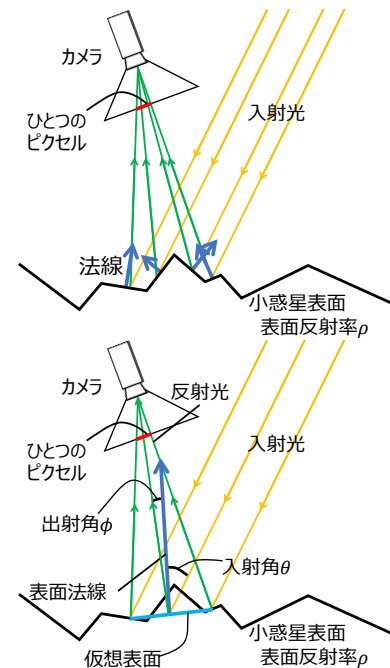


図 3 Minnaert モデルでの概略図。Minnaert モデルでは、物体表面が粗面で、視点と物体が離れた状況を考える。このような状況を考えると、ひとつのピクセルには左図のように複数の面の拡散反射光が入ると考えられる。そのため、Minnaert モデルでは右図のようにひとつのピクセルにひとつの仮想表面からの反射光が入っていると仮定する。この仮想表面は視点によって変わるため、輝度は視点の位置に依存する。輝度 b の計算は、表面反射率 ρ と光源方向と法線方向のなす角 θ 、視線方向と法線方向のなす角 ϕ が用いられる。

る [9]。

$$b = \rho \cos^k \theta \cos^{k-1} \phi \quad (2)$$

ここで、 ϕ は視線方向と法線方向のなす角である。なお、Minnaert 係数は 0 から 1 である。

本研究ではこの Minnaert モデルを仮定した小惑星の三次元復元を提案する。

2.3 Minnaert 則を考慮した惑星の 3 次元形状復元

本研究の先行研究として、岩野の Minnaert 則を考慮した惑星の 3 次元形状復元 [10] がある。この研究は、小惑星

を撮影した複数枚の画像を入力として、Minnaert モデルを使用して小惑星の三次元形状を復元して出力するもので、PMVS で初期的な三次元点群を推定した後、シーン中の光源方向と物体全体の表面反射率を推定、三次元点群を最適化するものである。

2.3.1 光源方向と表面反射率の推定

PMVS で推定された三次元点を $C_p, p \in 1, \dots, N$ 、三次元点の集合を $\mathcal{P}$ とする。入力画像を $I_i, i \in 1, \dots, M$ 、入力画像の集合を $\mathcal{I}$ とする。また、入力画像群 $\mathcal{I}$ のうち三次元点 $C_p \in \mathcal{P}$ が観測される画像群を $\mathcal{V}_p$ とおく。岩野の手法では、PMVS で推定した物体上の点 C_p の三次元位置 $\mathbf{x}_p$ 、法線方向単位ベクトル $\mathbf{n}_p$ 、画像 $I_i \in \mathcal{V}_p$ 上での三次元点 C_p の視線方向単位ベクトル $\mathbf{v}_{p,i}$ 、またその三次元点の観測輝度値 $b_{p,i}$ を用いて、Minnaert モデルを元に光源方向単位ベクトル $\mathbf{l}$ と表面反射率 ρ を推定する。まず、Minnaert モデルの輝度の式 (2) は上述の変数を用いて、

$$b_{p,i} = \rho (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l})^k (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{v}_{p,i})^{k-1} \quad (3)$$

となる。なお、この手法ではカメラに対する光源方向は一定であるため、光源方向は各画像で同じであり、表面反射率はすべての三次元点で同じであるという仮定と、Minnaert 係数 k は既知であるという仮定をおいている。

ここで、 $\mathbf{s} = \rho^{\frac{1}{k}} \mathbf{l}$ と置き、変形を行い、次の最小二乗問題の解として $\mathbf{s}^*$ を推定する。

$$\mathbf{s}^* = \arg \min_{\mathbf{s}} \sum_{C_p \in \mathcal{P}} \sum_{I_i \in \mathcal{V}_p} \left\| \mathbf{n}_p^\top \mathbf{s} - \left(\frac{b_{p,i}}{\mathbf{n}_p^\top \mathbf{v}_{p,i}} \right)^{\frac{1}{k}} \right\|^2 \quad (4)$$

最小二乗問題の解として推定した $\mathbf{s}^*$ から、光源方向単位ベクトル $\mathbf{l}^*$ と表面反射率 ρ^* は、

$$\mathbf{l}^* = \frac{\mathbf{s}^*}{\|\mathbf{s}^*\|} \quad (5)$$

$$\rho^* = \|\mathbf{s}^*\|^k \quad (6)$$

と推定できる。

2.3.2 光源方向を考慮した最適化

光源方向を推定した後、PMVS で推定した初期的な三次元点群 $\mathcal{P}$ に対し、三次元点ごとに輝度の再投影誤差によるエネルギー関数 E を最小化することで、光源方向を考慮した三次元点群 $\mathcal{P}$ の最適化を行う。

$$E(\mathbf{x}_p, \mathbf{n}_p) = \sum_{I_i \in \mathcal{V}_p} \left\| b_{p,i}^{geo} - b_{p,i}^{photo} \right\| \quad (7)$$

ここで、 $b_{p,i}^{geo}$ は画像 I_i 上で観測される三次元点 C_p の輝度、 $b_{p,i}^{photo}$ は推定したパラメータである法線、光源方向、表面反射率などから計算される三次元点 C_p の輝度である。

$$b_{p,i}^{geo} = I_i(\mathbf{K}[\mathbf{R}_i | \mathbf{t}_i] \mathbf{x}_p) \quad (8)$$

$$b_{p,i}^{photo} = \rho (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l})^k (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{v}_{p,i})^{k-1} \quad (9)$$

ここで $\mathbf{K}[\mathbf{R}_i | \mathbf{t}_i]$ は、画像ごとのカメラパラメータである。

このエネルギー関数を最小化する、三次元点の座標 $\mathbf{x}_p$ と法線ベクトル $\mathbf{n}_p$ の推定には、非線形最小二乗問題を解く手法の一つであるレーベンバーグマーカート法を用いて行い、三次元点群を最適化している。

以上の処理で高精度な三次元点群を得ようとしているが、岩野の研究では、表面反射率が物体全体で一定であること、Minnaert 係数が既知かつ物体全体で一定であることにより復元結果の精度が低くなってしまうことが問題点として挙げられている。本研究では、表面反射率、Minnaert 係数を物体上の点ごとに推定し、撮影シーン全体での光源方向を推定する。

3. 提案手法

3.1 はやぶさ 2 が撮影する画像

まず、本研究で扱う画像について述べる。

はやぶさ及びはやぶさ 2 のミッションでは、対象小惑星の観測と撮影を行いつつ遊弋する地点をホームポジションと呼び、このホームポジションでの周辺天体と探査機の位置関係は図 4 のようになるようプログラムされている。探査機は小惑星に対し一定の距離を保ちつつ航行し、小惑星が画像の中心に来るようにカメラを向けて撮影を行う。この時、小惑星が回転しているところを時々刻々と撮影することで、小惑星の表面全てを捉えることができる。したがって、撮影される画像は、画像ごとに小惑星に対する探査機の位置・方向・光源方向が変化したものとなる。このとき小惑星を撮影するときの光源は遥か彼方 1.5 億 km に存在する太陽のみであるため、入射する光は平行光線とみなすことができる。

探査機に搭載されているカメラは、光学航法カメラ (ONC; Optical Navigation Camera) と呼ばれ、はやぶさで搭載されたものと同じ装置である。ONC は小惑星の写真を撮影して科学的観測に使用するだけでなく、レーザ高度計 (LIDAR; Light-Detection And Ranging) と共に小惑星に対する位置を自律的に得ることができるようになっている [11]。ONC には、望遠直下視の ONC-T、広角直下視の ONC-W1、広角側方視の ONC-W2 があり [12]、ホームポジションで撮影する際に使用されるカメラは、多バンド可視カメラ (AMICA; Asteroid Multiband Imaging Camera) と呼ばれる ONC-T である。はやぶさ運用時に AMICA で撮影された小惑星 Itokawa の画像は図 1 に示したようなものであり、はやぶさ 2 で撮影される小惑星 Ryugu の画像も同様のものになると考えられる。

3.2 手法概要

本研究では、前節で述べたような小惑星を撮影した複数枚の画像より、光源方向と対象物体の表面反射率、Minnaert 係数を推定する手法を提案する。本研究での入力、固定された視点と固定された光源環境下にある回転する物

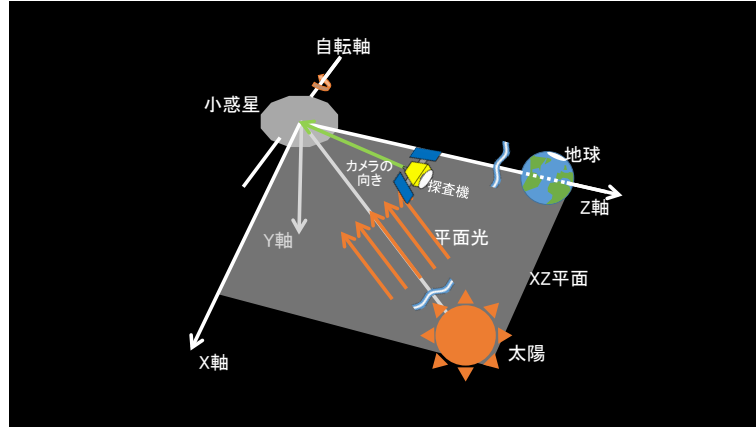


図 4 探査機とその周辺天体の位置関係の模式図。小惑星と地球を通る直線を Z 軸, X 軸を XZ 平面上に太陽, 地球, 小惑星が乗るように置く。また, 各軸に直交する軸を Y 軸と置く。探査機は小惑星と地球の間, つまり Z 軸上を遊弋して小惑星にカメラを向けて撮影を行う。探査機は Z 軸上を大きく外れることなく, 小惑星の自転と公転を利用して小惑星の表面全体を撮影する [3]。なお, 太陽は十分に離れた距離にあるため入射する光は平行光線であるとみなすことができる。

体を撮影した複数枚の画像である。また, 反射モデルは Minnaert 反射モデルとし, 物体表面の粗さを表すパラメータである Minnaert 係数 k と対象物体表面の表面反射率は三次元点ごとに異なると仮定する。

本来ならば, 三次元形状を推定する時点で, Minnaert 反射モデルと小惑星の撮影環境を考慮することが望ましい。しかし, 既存手法である PMVS ではそれらを考慮して三次元点群を推定することができないため, 本研究では PMVS で初期的な三次元点群を推定したのち, 光源方向・表面反射率・Minnaert 係数の推定の三つのパラメータを推定する。

提案手法の流れは以下のとおりである。

- (1) Patch-based Multi-View Stereo で初期的な三次元点群を推定
- (2) 光源方向・三次元点ごとの表面反射率・三次元点ごとの Minnaert 係数を推定

この提案手法全体の流れと, 提案手法による入力, 出力, および途中で得られるパラメータ等を含め図 5 に示す。

本論文では, 入力画像の集合を $\mathcal{I}$, 入力画像を $I_i \in \mathcal{I}$, $i \in \{1, \dots, M\}$ と表す。また, 三次元点の集合を $\mathcal{P}$, 三次元点は $C_p \in \mathcal{P}$, $p \in \{1, \dots, N\}$ で表し, 最適化後は, 三次元点の集合を $\mathcal{P}^*$ というように $*$ をつけて表すこととする。入力画像群 $\mathcal{I}$ のうち, 三次元点 C_p が観測できる画像 I_i の集合が PMVS で与えられる。この観測できる画像の集合を $\mathcal{V}_p \subset \mathcal{I}$ とおく。

3.3 光源方向, 表面反射率, Minnaert 係数の推定

PMVS の後, 輝度の再投影誤差から光源方向, 表面反射率, Minnaert 係数を各点で推定する。推定手法は, Photometric Stereo で用いられる処理をベースにしており, ある三次元点 C_p を観測できる集合 $\mathcal{V}_p$ 内の各画像での計算輝

度値と観測輝度の残差の最小化問題を解くことで, 光源方向・表面反射率・Minnaert 係数を推定する。三次元点 C_p の法線方向単位ベクトルを $\mathbf{n}_p$, 推定対象の表面反射率を ρ_p , Minnaert 係数を k_p , 光源方向単位ベクトルを $\mathbf{l}$ とおく。三次元点 C_p を観測できる画像 I_i での視線方向単位ベクトルを $\mathbf{v}_{p,i}$, 観測輝度を $b_{p,i}$ とおく。

このとき, Minnaert モデルの式 (2) は,

$$b_{p,i} = \rho (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l})^{k_p} (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{v}_{p,i})^{k_p-1} \quad (10)$$

とおける。ここで式 (10) を変形して残差をとり,

$$b_{p,i} - \rho (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l})^{k_p} (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{v}_{p,i})^{k_p-1}. \quad (11)$$

式 (12) より, レーベンバーグ・マーカート法を使用し, 非線形最小二乗問題の解として, 光源方向・表面反射率・Minnaert 係数の推定を行う。

$$\mathbf{l}^*, \rho_p^*, k_p^* = \arg \min_{\mathbf{l}, \rho_p, k_p} \sum_{I_i \in \mathcal{V}_p} \left\| b_{p,i} - \rho (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{l})^{k_p} (\mathbf{n}_p^\top \mathbf{v}_{p,i})^{k_p-1} \right\|^2 \quad (12)$$

4. 実験

4.1 実装

本手法では, 対象物体の初期的な三次元点群を得るため PMVS を使用する。既存ツールの Bundler[13] と PMVS2[14] で, SfM によりカメラの内部・外部パラメータを推定し, 三次元形状の復元処理を行う。非線形最小二乗問題の解法としては, レーベンバーグ・マーカート法を用いた。

4.2 正解三次元点群を使用した光源方向, 表面反射率, Minnaert 係数の推定実験

4.2.1 実験目的

小惑星 Itokawa の三次元モデル [15] を使用して, 光源方

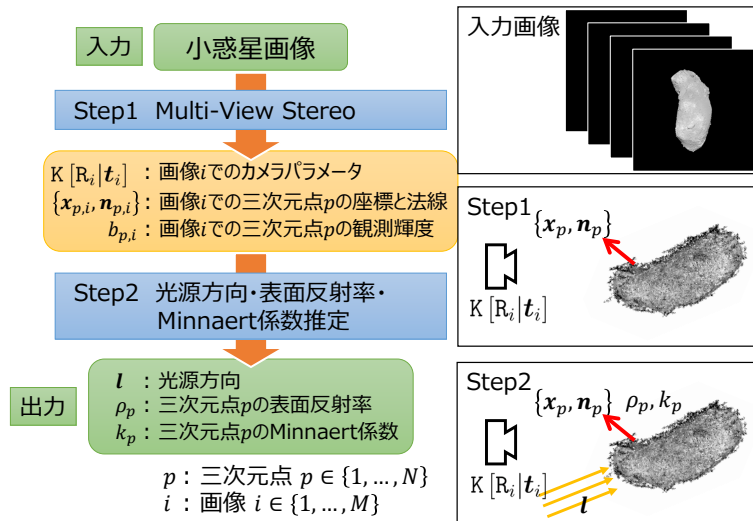


図 5 提案手法の流れ。Step1 では、入力画像よりカメラパラメータと初期的な三次元点群を推定。Step2 では得られた三次元点群とカメラパラメータより光源方向・三次元点ごとの表面反射率・三次元点ごとの Minnaert 係数を推定。

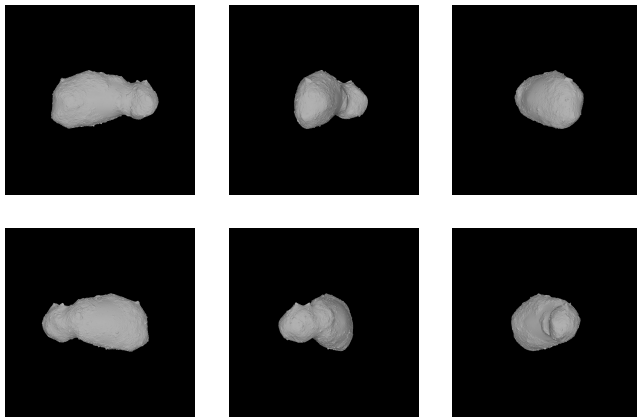


図 6 実験用入力画像の例。小惑星が回転しているところを、固定されたカメラが撮影したものとなる。

向、表面反射率、Minnaert 係数が既知の、小惑星 Itokawa の実験用入力画像群を作成した。この実験用入力画像群に対し、光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の各パラメータの推定を行う提案手法が Ground Truth にどれだけ近い値が出るかを評価する。

4.2.2 実験方法

実験用入力画像群は、小惑星 Itokawa の三次元モデル [15] をレンダリングしたもので、小惑星 Itokawa が自身の中心を軸に回転するところを探索機が時々刻々と撮影したような、図 6 のような画像になっている。なお、表面反射率と Minnaert 係数は物体全体で一様であるという仮定を用いてレンダリングを行った。

ひとつの入力画像群として、小惑星が 10° ずつ回転する画像を 36 枚作成した。実験用の入力画像群は、図 7 のように小惑星を角にカメラの方向と光源方向が、 0° 、 10° の角度を為すものを作成した。そして、表面反射率を 0.5, 0.7 の 2 種類、Minnaert 係数を 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 の 4 種類に

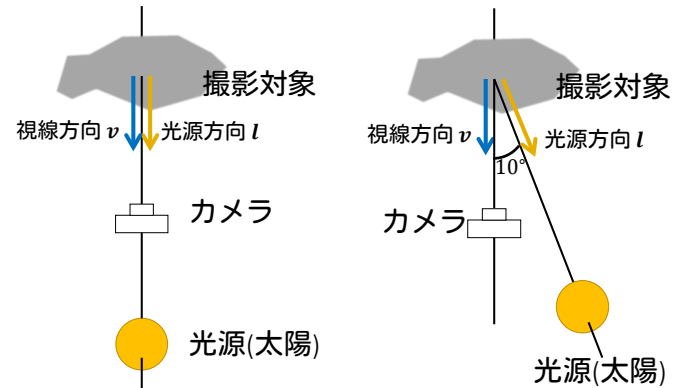


図 7 実験用入力画像群の光源方向を示す模式図。光源方向と光軸のなす角度を、 0° (左)と 10° (右)の二種類を想定し、実験用入力画像群を作成した。

設定した。総じて実験用の入力画像群は計 16 種類を作成した。

提案手法では、各パラメータを推定する前に PMVS で初期的な三次元点群を推定するが、本実験では推定に必要な初期的な三次元点群として、小惑星 Itokawa の三次元モデル [15] から作成した三次元点群を与える。Ground Truth の光源方向と推定した光源方向のなす角度を誤差として、また Ground Truth と推定した各三次元点での表面反射率・Minnaert 係数の誤差を計測する。

4.2.3 結果と考察

光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の各パラメータの推定を行った実験結果を表 1 に示す。なお、表面反射率と Minnaert 係数は三次元点ごとに推定し、表 1 の推定結果は全ての三次元点に対する推定結果の平均である。

表を見ると、光源方向、表面反射率、Minnaert 係数のすべてにおいて誤差が極めて小さく、正解三次元点群を使用した光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の推定はよい結

表 1 正解三次元点群を使用したときの推定結果

光源方向 [deg] (カメラの光軸と入射光の角度)			表面 反射率			Minnaert 係数		
正解値	推定結果	誤差	正解値	推定結果	誤差	正解値	推定結果	誤差
0	0.0073	+0.0073	0.5	0.503	+0.003	0.7	0.699	-0.001
0	0.0074	+0.0074	0.7	0.703	+0.003	0.7	0.699	-0.001
0	0.0107	+0.0107	0.5	0.505	+0.005	0.8	0.798	-0.002
0	0.0109	+0.0109	0.7	0.705	+0.005	0.8	0.798	-0.002
0	0.0143	+0.0143	0.5	0.508	+0.008	0.9	0.897	-0.003
0	0.0151	+0.0151	0.7	0.707	+0.007	0.9	0.896	-0.004
0	0.0173	+0.0173	0.5	0.510	+0.010	1.0	0.996	-0.004
0	0.0187	+0.0187	0.7	0.707	+0.007	1.0	0.995	-0.005
10	10.0294	+0.0294	0.5	0.500	+0.000	0.7	0.700	+0.000
10	10.0243	+0.0243	0.7	0.699	-0.001	0.7	0.700	+0.000
10	9.9987	-0.0013	0.5	0.500	+0.000	0.8	0.799	-0.001
10	9.9980	-0.0020	0.7	0.700	+0.000	0.8	0.799	-0.001
10	9.9875	-0.0125	0.5	0.500	+0.000	0.9	0.899	-0.001
10	9.9874	-0.0126	0.7	0.701	+0.001	0.9	0.899	-0.001
10	9.9830	-0.0170	0.5	0.501	+0.001	1.0	0.999	-0.001
10	9.9832	-0.0168	0.7	0.701	+0.001	1.0	0.999	-0.001

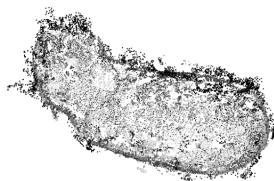


図 8 Bundler と PMVS2 で三次元復元をした Itokawa

表 2 実画像を使用したときの推定結果

	光源方向 [deg] (カメラの光軸と 入射光の角度)	表面 反射率	Minnaert 係数
提案手法での推定値	4.2106	0.5779	0.7709
Itokawa の参考値	約 0	0.53±0.04	約 0.7

果を出していることが分かる。

4.3 はやぶさが撮影した実画像群を使用した光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の推定実験

4.3.1 実験目的

図 1 に一部を示した、はやぶさが撮影した小惑星 Itokawa の画像群を用いて、光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の各パラメータの推定を行う提案手法の評価実験を行った。

4.3.2 実験方法

はやぶさが撮影した小惑星画像 215 枚を使用して、既存ツールの Bundler[13] と PMVS2[14] で、SfM によりカメラの内部・外部パラメータを推定し、三次元形状の初期復元処理を行った。その出力結果が図 8 である。この出力ファイルの三次元点の情報(座標、法線、輝度)から光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の各パラメータの推定を

行った。

4.3.3 結果と考察

実験をした結果は表 2 のようになった。なお参考として、Itokawa の実際の値、またははやぶさ運用時に予測された値を表記する。

どのパラメータの推定値も Itokawa の参考値との差が大きく、推定が完全でないことが分かる。この原因として考えられるのが、初期復元した結果に多くのノイズが含まれたことである。図 8 の出力結果には、小惑星形状から離れた点が多く存在しており、また、小惑星形状も穴ぼこが多数見られる。これらノイズがパラメータ推定の誤差を大きくしている原因ではないかと考えられるため、これらのノイズを除去することを今後の課題としていく必要がある。

5. おわりに

本論文では、Multi-View Stereo で推定された低精度な三次元点群から、光源方向、表面反射率、Minnaert 係数の各パラメータの推定を行った。

しかし、Minnaert 係数の推定を標榜したにもかかわらず、推定の精度が低いという問題点が本研究の課題として挙げられた。今後は、Minnaert 係数だけにかかわらず、光源方向・表面反射率の推定精度の向上はもちろんのこと、推定したパラメータを使用しての三次元形状の最適化を目指していくことを考えている

謝辞 本研究は部分的に JST CREST (No.JPMJCR14D1) の援助を受けた。また、小惑星 Itokawa のデータを一部提供頂いた会津大学の平田成准教授の提供を感謝する。

参考文献

- [1] JAXA. JAXA Hayabusa2 Project, (2013).
- [2] H. Demura, S. Kobayashi, E. Nemoto, N. Matsumoto, M. Furuya, A. Yukishita, N. Muranaka, H. Morita, K. Shirakawa, M. Maruya, H. Ohyama, M. Uo, T. Kubota, T. Hashimoto, J. Kawaguchi, A. Fujiwara, and J. Saito. Stereogrammetric Shape Modeling for (25143) Itokawa, Hayabusa Mission. In *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, volume 37, page 1716, (2006).
- [3] A. Fujiwara, J. Kawaguchi, D. K. Yeomans, M. Abe, T. Mukai, T. Okada, J. Saito, H. Yano, M. Yoshikawa, D. J. Scheeres, O. Barnouin-Jha, a. F. Cheng, H. Demura, R. W. Gaskell, N. Hirata, H. Ikeda, T. Kominato, H. Miyamoto, a. M. Nakamura, R. Nakamura, S. Sasaki, and K. Uesugi. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 312(5778):1330-4, (2006).
- [4] J. M. Soderblom, J. F. Bell, M. Y. H. Hubbard, and M. J. Wolff. Martian phase function: Modeling the visible to near-infrared surface photometric function using HST-WFPC2 data. *Icarus*, 184(2):401-423, (2006).
- [5] Y. Furukawa and C. Hernandez. *Multi-View Stereo: A Tutorial*, volume 9. (2015).
- [6] Y. Furukawa and J. Ponce. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8):1362-1376, (2010).
- [7] D. G. Lowe. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 2(8):1150-1157, (1999).
- [8] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. SURF: Speeded up robust features. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3951 LNCS:404-417, (2006).
- [9] M. Minnaert. The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophysical Journal*, 93:403, (1941).
- [10] 岩野俊介. Minnaert 則を考慮した小惑星の 3 次元形状復元. 早稲田大学基幹理工学部情報理工学科修士論文, (2015).
- [11] M. Ishiguro, R. Nakamura, D. J. Tholen, N. Hirata, H. Demura, E. Nemoto, A. M. Nakamura, Y. Higuchi, A. Sogame, A. Yamamoto, K. Kitazato, Y. Yokota, T. Kubota, T. Hashimoto, and J. Saito. The Hayabusa Spacecraft Asteroid Multi-band Imaging Camera (AMICA). *Icarus*, 207(2):714-731, (2010).
- [12] 諸田智克, 杉田精司, 澤田弘崇, 本田理恵, 亀田真吾, 山田学, 本田親寿, 鈴木秀彦, 安藤滉祐, and はやぶさ 2 ONC チーム. 火の鳥「はやぶさ」未来編その 8 : ONC 地形観測から探る小惑星の力学進化. 遊・星・人: 日本惑星科学会誌, 24(1):48-53, (2015).
- [13] N. Snavely. Bundler-structure from motion software.
- [14] Y. Furukawa, B. Curless, S. M. Seitz, and R. Szeliski. Towards internet-scale multi-view stereo. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1434-1441, (2010).
- [15] R. Gaskell, O. Barnouin-Jha, D. Scheeres, T. Mukai, N. Hirata, S. Abe, J. Saito, M. Ishiguro, T. Kubota, T. Hashimoto, J. Kawaguchi, M. Yoshikawa, K. Shirakawa, and T. Kominato. Pole and Global Shape of 25143 Itokawa. *Science*, 312(5778):1330-4, (2006).