

小惑星探査における近接運用時の撮像模擬手法

Methods for Simulation of Imaging during Close Proximity Operations on Asteroids

三浦 昭[†], 坂谷 尚哉[†], 横田 康弘[†], 本田 理恵[‡]Akira Miura[†], Naoya Sakatani[†], Yasuhiro Yokota[†], Rie Honda[‡]

1. まえがき

小惑星探査において、タッチダウン等の近接運用にあたっては事前の計画・評価や得られたデータの解析等の場面で、リアリティの高い撮像機器の模擬が有用な手段の一つとなる。一方でこれらの解析や評価は、往往にして限られた時間内に実施する必要に迫られるため、高速で再現性の高い模擬手法が必要となる。このような状況に鑑み、筆者らは、小惑星のモデリング手法を含めた、撮像模擬手法を研究してきた [1][2]。本稿においては、搭載カメラの撮像模擬手法として、基本的な画素値の計算手法、フラッシュランプ光源の模擬手法、間接光計算手法について述べる。

2. 画素値計算

基本的な画素値計算手法を図 1 に示す。本手法においては、放射照度、表面材質（反射率）、撮像系（光学特性、CCD 特性）について、それぞれスペクトル分布に基づいた計算を行う。反射モデルは、Lambert 反射や Phong シェーディング等の他、Hapke のモデルや LSL 等 [3]、必要に応じて使い分ける。これらの設定に基づいて計算されたスペクトルを時間・波長方向に積算したものが、それぞれの画素の値となる。（図 2）

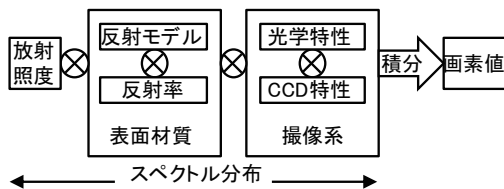


図 1: 画素値計算

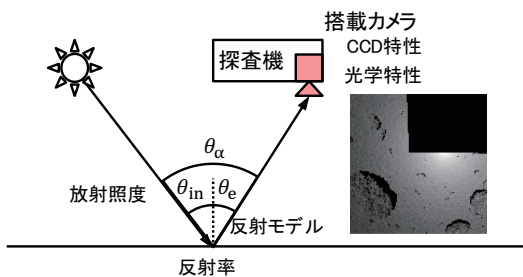


図 2: 直接光

3. フラッシュランプ模擬

「はやぶさ 2」搭載カメラの模擬にあたっては、太陽光の他に、「はやぶさ 2」搭載フラッシュランプ (FLA) を考慮する必要がある。FLA の配光特性を模擬するために、FLA の設計値を画

素値計算可能な単位に変換する。FLA の光軸中心における光度を、時間積分値として Q [cd · sec] とすると、FLA の放射強度は以下のように求まる。（図 3）

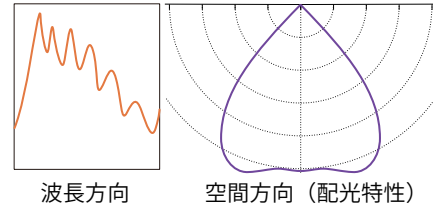


図 3: フラッシュランプのパラメータ計算 (概念図)

波長 λ [μm] における分光視感効率を V_λ 、FLA の分光放射強度を $F_0 f_\lambda$ [W/sr/μm] とする。 f_λ は式 1 を満たすとする。

$$\sum_{\lambda} f_{\lambda} \Delta_{\lambda} = 1 \quad (1)$$

このとき、波長 λ における FLA の波長あたりの光度を $F_0 I_\lambda$ [cd/μm] とすると、 I_λ は式 2 で表される。

$$I_{\lambda} = 683 V_{\lambda} f_{\lambda} \quad (2)$$

簡単のため、 F_0 、 f_λ は発光の過程で一定であると仮定すると、発光時間 T_e に対する光量の時間積分値は

$$T_e \sum_{\lambda} F_0 I_{\lambda} \Delta_{\lambda} = Q \quad (3)$$

で表され、 F_0 は式 4 で求まる。 $T_e = 15$ [μsec] のとき、本稿における環境では、放射強度 $F_0 = 7.9 \times 10^4$ [W/sr] となった。

$$F_0 = \frac{Q}{T_e \sum_{\lambda} I_{\lambda} \Delta_{\lambda}} \quad (4)$$

4. 間接光の計算

小惑星探査で用いられる Hapke のモデル等は反射率が入射角 θ_{in} のみならず観測角 θ_e 等にも依存するため、ラジオンシティ等のような簡便な手法を高次反射の計算に適用することが困難である。本稿においては、各サンプリング点からの可視範囲（半球の範囲）を全周魚眼画像（正距方位図法）として画素値計算する（図 4）。係る全周魚眼画像は後続の各計算に用いる。

4.1 2次反射の計算

カメラの各画素に対応するサンプリング点において全周魚眼画像を作成する。計算対象は他の物体からの一次反射光とする。続いて全周魚眼画像の各画素についてカメラに至る放射照度の要素を計算し、立体角で重み付けして積分する。（図 5）

4.2 3次反射の計算

3次反射は、探査機からの反射のみ考慮する。探査機の反射特性はランバート反射と仮定する。

まず探査機の各ポリゴンにおいて、その中心をサンプリング点として全周魚眼画像の輝度計算を行う。輝度計算の光源は、他の物体からの一次反射光とする。全周魚眼画像の画素値を積

[†]宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

[‡]高知大学, Kochi University

分した値を、そのポリゴンにおける放射照度とする。

カメラの各画素に対応するサンプリング点において、全周魚眼画像による画素値計算を行う。計算対象の光源は、上記放射照度計算を行った各ポリゴンからの反射光とする。続いて、全周魚眼画像の各画素についてカメラに至る放射照度の要素を計算し、立体角で重み付けして積分する。(図 6)

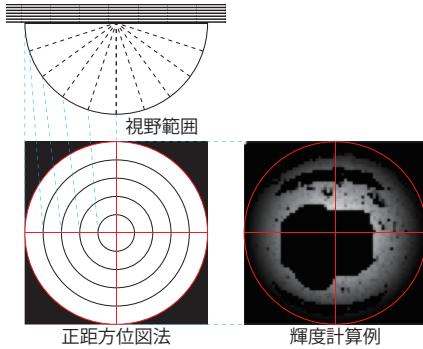


図 4: サンプリング点毎の計算: 探査機底面の例

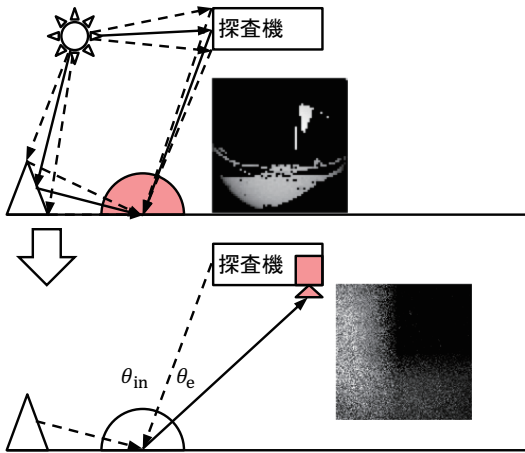


図 5: 間接光 (2 次反射)

5. 結果

例として、探査機と小惑星表面の距離が 3m の場合のレンダリング結果を示す。図 7 に、直接光のレンダリング例を示す。本稿の模擬環境では、FLA 光源の寄与は太陽光源に対して 5% 程度となった。図 8 に、間接光のレンダリング例を示す。これは実機の撮像において見られる影の部分のテクスチャを説明できる可能性がある。

しかしながらこれらレンダリング結果は、探査機や小惑星のモデルや位置関係に応じて様々に変化する。そのため、実機の撮像を適切に模擬するためには、反射率や反射モデルの選定等、尚一層検討の余地があると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたって、「はやぶさ 2」プロジェクトチーム関係各位に多大なご協力を賜りましたことを感謝いたします。

参考文献

[1] Akira Miura, Naoya Sakatani, Yasuhiro Yokota, Rie Honda et al., Simulation of proximity imaging of Ryugu's surface during Hayabusa2 touch-down se-

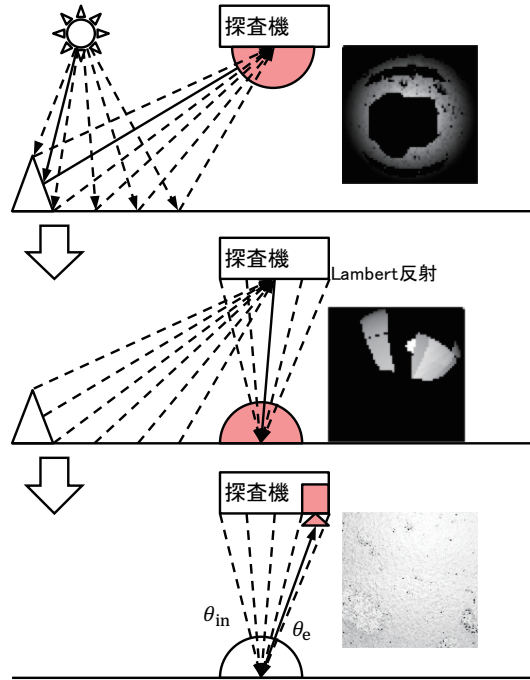


図 6: 間接光 (3 次反射)

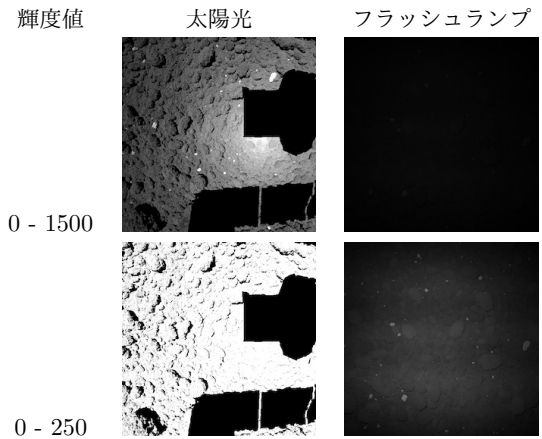


図 7: レンダリング例 (直接光)

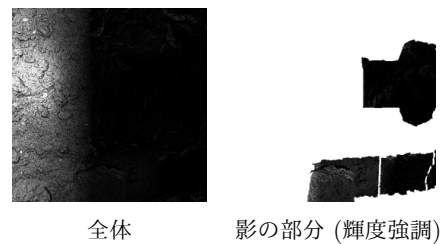


図 8: レンダリング例 (間接光)

quence, The 50th DPS meeting, 2018.10.12-26
 [2] 三浦昭, 坂谷尚哉, 横田康弘, 本田理恵, 小惑星モデルについての検討 - 局所的詳細化及び係るレンダリング手法, 平成 30 年度宇宙科学情報解析シンポジウム, 2019.2.15
 [3] Yasuhiro Yokota, Rie Honda, Naoya Sakatani et al., Photometric Correction of Ryugu Multiband Visible Image Data, The 50th DPS meeting, 2018.10.12-26