

「はやぶさ」の軌跡の可視化

- タッチダウン時の位置推定 -

三浦 昭*¹, 山本 幸生*¹, 吉川 真*²

Visualization of Trajectories of 'HAYABUSA'

- Positioning of 'HAYABUSA' during Touchdown Phase -

Akira MIURA*¹, Yukio YAMAMOTO*¹, Makoto YOSHIKAWA*¹

Abstract

In this paper, we propose methods to estimate positions of 'HAYABUSA' during the period of the first touchdown on Itokawa in order to visualize the trajectories of 'HAYABUSA'. In this period, there are no reliable ephemeris data of 'HAYABUSA'. We used a variety of telemetry data and a shape model of Itokawa to estimate the trajectories. The period is divided into several sub-periods according to the availability of the data. In each sub-period, we propose suitable methods to estimate the positions. The methods are based on the policy that the trajectory should be smooth and continuous in each sub-period.

概要

本稿では、「はやぶさ」が小惑星イトカワへタッチダウンする様子を可視化するにあたって、「はやぶさ」の位置推定手法を示した。この期間は、信頼のおける位置データが残されておらず、本稿では、「はやぶさ」の軌道情報や各種テレメトリデータを、イトカワ形状モデルと組み合わせることによって軌道推定を行った。一部のデータは利用可能な期間が限られているため、利用可能なデータの種別に応じた期間分けをした上で、各期間の推定手法を示す。本稿では、期間毎に、可視化に必要な一筋のなめらかな軌道を計算することに主眼を置いている。

1. はじめに

本稿では、「はやぶさ」が小惑星イトカワへタッチダウンする様子を可視化するために、その基本データとなる、「はやぶさ」の位置を推定する手法について述べる。

筆者らは従来から「はやぶさ」の軌跡の可視化を行って来た。小惑星イトカワ近傍での「はやぶさ」の位置は公開データから知ることができ、その一部については、各種観測機器のデータを用いて補正された、精度の高い位置情報として利用可能となっている。その一方で、小惑星イトカワへのタッチダウンの過程については、正確な位置データが残っておらず、他の手段で推測するしか

無い状況にある。

これまでに行われた位置推定^[1]によって、「はやぶさ」はイトカワへの降下途中、極方向に向きを変えたことが知られている。しかしながら、その推定に用いられた形状モデルは筆者らが採用したモデルとは異なるものである。推定された「はやぶさ」の位置もイトカワ上の緯度経度にマッピングされた2次元情報であり、筆者らが目的としている3次元の可視化には適さない。また学術研究の常として、位置推定としては誤差範囲を含めた結果が掲載されている。

筆者らが求める位置情報は、可視化のために使用するものであり、各時点の位置情報は一意に定まっており、かつ滑らかに繋がっている必要がある。また従来から可視化に用いている形状モデルとの整合が取れた位置情報が望まれる。そのため、現存する各種テレメトリデータ等を用いて、タッチダウン時における「はやぶさ」の3次元位置情報を再現することとした。

本稿ではまず、利用可能なデータや推定対象期間等を

*¹ 宇宙科学研究所 学際科学研究系
(Department of Interdisciplinary Space Science, Institute of Space and Astronautical Science)

*² 宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系
(Department of Spacecraft Engineering)

含めた、位置推定の概要について述べる。続いて、期間毎の推定手法と推定結果について述べる。最後に今後の課題について述べる。

2. 位置推定の概要

本稿において可視化の対象とする期間は、「はやぶさ」がイトカワに最初にタッチダウンを試みた 2005 年 11 月 19 日 20:30 [UTC] 頃から 21:30 [UTC] 頃迄とする。以後、時刻は UTC で表記するものとする。

「はやぶさ」のイトカワへのタッチダウンを可視化するにあたっては、描画するフレーム毎の「はやぶさ」の位置を推定する必要がある。このためには、位置推定に利用可能なデータの種別と、それらが利用可能な期間を分別し、それぞれの期間毎に必要な手順を整理する必要がある。以下に、その概要を示す。

2.1. 位置推定に使用するデータ

本稿で位置推定に使用するデータやパラメータ類を記す。公開された位置・姿勢データ等は、NAIF (Navigation and Ancillary Information Facility, NASA)²が提供する SPICE カーネルの中から選択する。

2.1.1. 利用可能な期間が限られるデータ

これらのデータは、それぞれに取得時期が異なっており、「はやぶさ」の位置推定等に利用できる期間には相違がある。「はやぶさ」が最初にイトカワへのタッチダウンを試みた時期 (2005 年 11 月 19 日 20 時台 [UTC]) に利用できるデータの期間を表 1 に示す。

(a) 「はやぶさ」の位置・姿勢

SPICE カーネルから、「はやぶさ」の位置データは hayabusa_itokawarendezvous_v01.bsp を用い、姿勢データは hayabusa_itokawarendezvous_v02n.bc を用いる。

(b) ONC-W1 (画像データ)

「はやぶさ」搭載のカメラの内、広角光学航法カメラ 1 (Optical Navigation Camera-Wide; ONC-W1) は「はやぶさ」の底面 (-Z 方向) に取り付けられており、タッチダウンの手前までイトカワを撮像していた。以後、ここで得られる画像データを ONC-W1 画像と記す。

(c) ONC-W1 (ターゲットマーカの方位データ)

「はやぶさ」がイトカワにタッチダウンする際には、ONC-W1 はターゲットマーカの方位を計算するために用いられた。以後、ここで得られるデータを ONC-W1 (方位) データと記す。

(d) LRF-S1 (測距データ)

「はやぶさ」とイトカワとの距離を記録したデータとして、LRF-S1 というレーザ測距計のデータがある。LRF-S1 は「はやぶさ」の-Z 方向に対して 30 度の傾きをもって 4 方向でイトカワとの距離を測定しており、「はやぶさ」に対するイトカワ表面のおおまかな形状を推測可能である。

(e) RCS (噴射時間データ)

「はやぶさ」に搭載されたスラスタ (Reaction Control System; RCS) については、その噴射時間の累積値が記録されている。

表 1 各データの利用可能期間

「はやぶさ」位置	20:33 頃迄、ONC-W1 画像での補正があれば利用可能
「はやぶさ」姿勢	22:11 頃迄
ONC-W1 画像	20:33 頃迄
ONC-W1 (方位)	20:34 頃から 20:43 頃迄
LRF-S1	20:34 頃から 22:14 頃迄
RCS	20:34 頃から 20:43 頃迄は 16 秒間隔。その他は 128 秒間隔

2.1.2. 利用期間の制約が無いデータ等

本稿で可視化の対象とする時期において、利用可能期間の制約が無いデータ等は、以下の通りである。

(a) イトカワの形状データ

イトカワの形状データとして、Gaskell 形状モデル³より、3,145,728 面モデル (itokawa_f3145728.tri) を使用する。そのため、本稿におけるイトカワの座標系は、Gaskell 形状モデルにおける座標系を使用する。

(b) イトカワの位置・姿勢

イトカワの位置データは SPICE カーネルから itokawa_1989_2010.bsp を使用する。イトカワの自転に関するパラメータは、itokawa_gaskell_n3.tpc を使用して Gaskell 形状モデルとの整合がとれた姿勢を計算する。

(c) イトカワの密度

イトカワの密度は、 1.9 ± 0.13 [g/cm³]^[2]もしくは 1.95 ± 0.14 [g/cm³]^[3]等と見積もられている。

(d) 太陽の輻射圧

太陽の輻射圧は、 -1.261×10^{-7} [m/s²]^[1]と見積もられている。ただし本稿で取り扱う「はやぶさ」の速

² <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>

³ http://darts.jaxa.jp/planet/project/hayabusa/shape_ja.pl

度は 0.1 [m/s] のオーダーであるため、太陽の輻射圧は位置推定に本質的な影響を与えるものでは無いと考えられる。

- (e) AMICA もしくは ONC-T
用途によって呼称が変わるが、「はやぶさ」に搭載されていた望遠光学航法カメラ (Asteroid Multi-band Imaging CAmera もしくは Optical Navigation Camera-Tele) の画像が公開されている。ここで得られる画像データを AMICA 画像と記す。位置推定に係る時期に撮影された、利用可能なデータは無いが、イトカワの詳細な形状を照合するために、他の時期に撮影された画像を利用する。

2.2. 位置推定の区分と推定方法

表 1 の制約及び「はやぶさ」の挙動に基づいて、「はやぶさ」の位置推定に係る期間等を以下のように区分し、次節以降に各々の推定方法を記す。

- (a) ONC-W1 画像データが利用可能な期間
この期間は 20:33 頃迄が該当し、これを第 1 期間とする。第 1 期間においては、SPICE カーネルの「はやぶさ」位置データを ONC-W1 画像データを用いて補正することにより、「はやぶさ」の位置推定を行う。
また第 1 期間終末における「はやぶさ」の推定位置と ONC-W1 画像上のターゲットマーカの輝点、イトカワ形状モデルから、イトカワ上のターゲットマーカの位置を推定する。
- (b) ONC-W1 (方位) データが利用可能な期間
この期間は 20:34 頃から 20:43 頃迄が該当し、これを第 2 期間とする。第 2 期間においては、ONC-W1 (方位) データとターゲットマーカの推定位置、LRF-S1 データ、イトカワ形状モデルから、「はやぶさ」の位置を推定する。
これと共に、RCS データから推測される各時刻の「はやぶさ」の位置を計算し、ONC-W1 (方位) データを用いた推定方法の妥当性を検証する。
- (c) 1 回目のタッチダウン迄
この期間は 20:43 頃から 21:09 頃迄が該当し、これを第 3 期間とする。第 3 期間においては、LRF-S1 データ、イトカワの形状モデル及び密度データ等を用いて「はやぶさ」の位置を推定する。
- (d) 1 回目のタッチダウン
この期間は 21:09 頃から 21:12 頃迄が該当し、これを第 4 期間とする。第 4 期間は、小さな 2 回のバウンドで構成されると推測されるが、その位置を精度よく推定するに足るだけのデータが無いため、第 3

期間の終末の位置・速度や LRF-S1 データの近似等から「はやぶさ」の位置を仮定する。

- (e) 2 回目のタッチダウン迄
この期間は 21:12 頃から 21:30 頃迄が該当し、これを第 5 期間とする。第 5 期間においては、第 3 期間と同様の手法により、「はやぶさ」の位置を推定し、その推定位置と、AMICA 画像から確認できるイトカワの地形との整合性を検証する。
- (f) 2 回目のタッチダウン以後
この期間は 21:30 頃以降が該当し、これを第 6 期間とする。第 6 期間においては、位置変化を推定するに足るだけのデータが無いため、2 回目のタッチダウン位置を着地点と仮定した場合の「はやぶさ」とイトカワの地形との整合性等について検証するにとどめる。

3. 「はやぶさ」の位置推定 1

本節では、第 1 期間における「はやぶさ」の位置推定について記す。

3.1. ONC-W1 画像の歪み推定

3.1.1. 歪み推定の必要性

本稿で可視化の対象としている時期において、SPICE カーネルから得られる「はやぶさ」の位置データは、無視できない誤差を含んでいる。この時期の「はやぶさ」の位置を推定するためには、何らかの手段で SPICE カーネルの位置データを補正する必要がある。本稿では、この補正に ONC-W1 画像データを用いる。

しかしながら「M-V-5/MUSES-C 飛翔実験計画書 (衛星編)」^[4] (以下、計画書と記す) によると、ONC-W1 の歪みは 10% となっており、その歪みを考慮して位置補正する必要がある。

3.1.2. 推定すべき歪み等

歪み推定にあたって考慮すべきパラメータは以下の通りである。ここでイトカワの姿勢 (自転に係るパラメータ) と「はやぶさ」の姿勢は既知とする。

「はやぶさ」の位置の他に、未知のパラメータとして、ONC-W1 の「はやぶさ」に対するアライメントや ONC-W1 の光学的な歪みが挙げられる。以後は、これらをまとめて歪み等と記す。

本稿ではこれらの歪み等を、ImageMagick という画像処理用ソフトウェアを用いて推定する。

- (a) 樽型歪み

樽型歪みについては、歪みの中心点を原点として、以下の式で各画素の原点からの距離を推定する。

$$R_{src} = r(Br^2 + Cr + D) \quad \text{式 1}$$

ここで、 r は変換後の画素の原点からの距離、 R_{src} は歪みの無い画像における当該画素の原点からの距離を表す。いずれの距離も、画像の幅もしくは高さの半値を1とした時の相対値で表す。

ONC-W1の画素数は、幅・高さ共に同一値であるので、以下、幅・高さ共に w [pixels]と記す。また樽型歪みの原点は、 (X, Y) [pixels]の位置に置く。

以上の変数を用いて、ImageMagickの引数は「-distort Barrel $A B C D X Y$ 」となる。

(b) あおり

撮像素子の傾きを推定する。補正するピクセル数を p 、幅・高さから p を差し引いた値を q として、ImageMagickの引数は「-distort Perspective $0,0,p,p p,q,0,w,w,0,q,p,q,q,w,w$ 」となる。

(c) アラインメント

ONC-W1の取り付け角度を推定する。この値は微小であるため、画像の平行移動で代用する。

3.1.3. 歪み等の推定手順

可視化手順は、「『はやぶさ』の小惑星イトカワ探査軌道・姿勢の可視化」⁵⁾における「ONC-Wを用いた位置補正」に準じる。

まずONC-W1の実画像から、イトカワが適当な大きさに映っており、かつ「はやぶさ」の影がイトカワ上に視認できる画像を数枚選ぶ。本稿においては次の時刻の画像を選択した。これらの画像は、ONC-W1の歪み等の推定に用いる。また推定結果として同時に得られる、各時刻における「はやぶさ」の位置情報を、係る時刻範囲の「はやぶさ」の位置補正にも用いる。

表 2 推定に用いる ONC-W1 画像の時刻情報

2005/11/19 19:04:37
 2005/11/19 19:15:16
 2005/11/19 19:43:01
 2005/11/19 19:58:01
 2005/11/19 20:31:16
 2005/11/19 20:32:55
 2005/11/19 20:33:13

画像は複数の解像度のものがあるが、照合作業を簡易にするために、縦 1024 [pixels]・横 1024 [pixels]に統一する。

続いて以下の手順を繰り返すことで、「はやぶさ」の位置とONC-W1の歪み等の推定を同時に行う。1時点の画像のみでは推定が困難であるため、複数時点の画像で同様の推定を繰り返し、全画像において妥当と思われるパラメータを推定する。

(a) 各時刻において、「はやぶさ」の推定位置に基づい

て、歪み等の無い模擬画像 (CG) を合成する。この基本手順は文献 [5]に同じである。ONC-W1の公称の視野角は60度であるが、10%の誤差を見込んで、歪み等の無い模擬画像の視野角は66度とし、画像サイズは縦横共に1152 [pixels]とする。

(b) この画像に対して、推定される歪み等をImageMagickで付加した後、中央の縦横1024 [pixels]を実画像と照合する。

(c) 照合の結果として両者の主要な特徴の位置が一致するよう、「はやぶさ」の推定位置及び、歪み等の推定パラメータを修正する。

イトカワの形状モデルは、起伏が目立たない場所は比較的良くイトカワの形状を再現していると考えられるが、起伏の多い場所は、必ずしもイトカワの形状を忠実に再現しているとは限らない。例えば、イトカワ表面の岩石等は、形状モデルでは比較的なだらかな突起として表現されている。突起の裾野は広がっており、元の岩石の形状は維持されていない。複数の岩石が散在する領域は、形状モデルでは、それらの岩石が連なった丘陵のように表現されている。そのため、マッチングの対象は、画面上で1~数ピクセルで視認されるような、比較的小さな岩石等や、なだらかな輪郭線等が中心となる。

なお現状ではマッチングは手作業となっている。マッチングの自動化は今後の課題である。

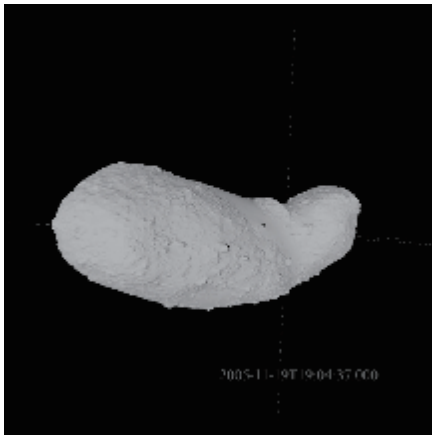
3.1.4. 推定結果

以上の繰り返しにより得られた各パラメータの推定値を表3に記す。これらの値は、画像を照合する上で妥当と思われる値を示したものである。互いに類似の効果をもたらすようなパラメータもあり、現実のONC-W1がこのようなパラメータで定義される歪みを有していたことを示すものではない。

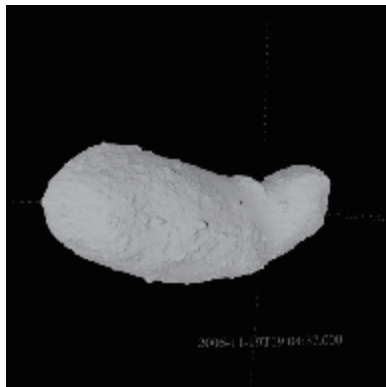
表 3 歪み等のパラメータ推定値

パラメータ	推定値	備考
A	0	単位は[pixels]
B	0.028	
C	0.067	
D	1.01	
X	576	
Y	616	
あおり	8	
平行移動 (横)	0	
平行移動 (縦)	-2	

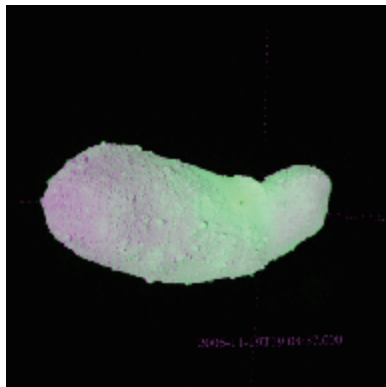
これらのパラメータに基づいて歪み等を与えた模擬画像と実画像の照合結果例を図1に示す。輪郭や主要な特徴は、ほぼ一致している。



(図 1a 歪みの無い模擬画像)



(図 1b 歪みを与えた模擬画像)



(図 1c 歪みを与えた画像 (紫) と実画像 (緑) の比較)

**図 1 ONC-W1 の歪み推定例
(2005/11/19 19:04:37[UTC])**

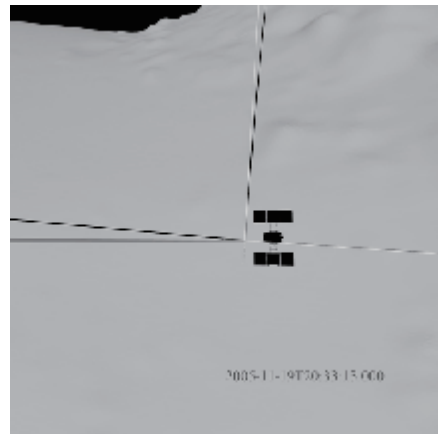
3.2. ターゲットマーカの位置推定

ONC-W1 (方位) データを利用するためには、予めイトカワにおけるターゲットマーカの位置を推定する必要がある。ONC-W1 画像の中から、ターゲットマーカが映っている画像を抽出し、その画像と、同時刻の ONC-W1 画像を模擬した CG 画像を照合することにより、イトカワ上のターゲットマーカの位置を推定することができる。

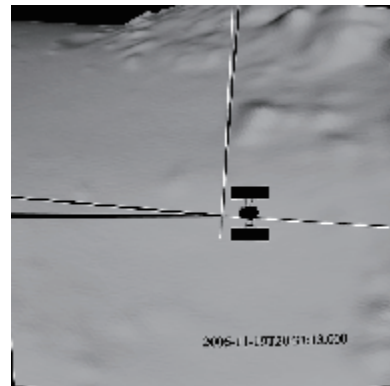
本稿において位置推定に用いた画像は、2005/11/19 20:33:13 の画像である。

ターゲットマーカの位置はイトカワ表面上にあると仮定し、歪み等を付加した模擬画像上に描かれたターゲットマーカが実画像のターゲットマーカと一致する場所を求める。具体的には以下の手順を繰り返すことで、ターゲットマーカの座標値を得る。

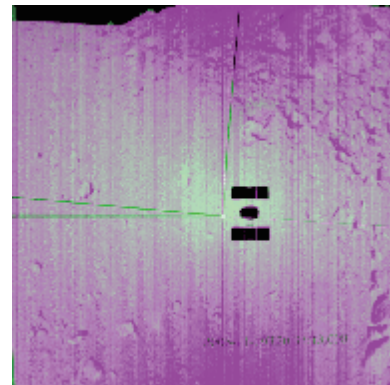
- (a) イトカワ形状モデルに、推定位置に基づいて、ターゲットマーカのオブジェクトを追加する。
- (b) 描画された模擬画像に歪み等を付加する。
- (c) 実画像と比較し、条件に合致するよう、ターゲットマーカの座標値を修正する。



(図 2a 歪みの無い模擬画像)



(図 2b 歪みを与えた模擬画像 (高コントラスト))



(図 2d 模擬画像 (紫) と実画像 (緑) の比較)

**図 2 ターゲットマーカの位置推定
(2005/11/19 20:33:13[UTC])**

図 2 にターゲットマーカの推定に用いた照合画像と推定位置を示す。図中の交差する線は、その線の交点がターゲットマーカの推定位置であることを表している。図 2d の中央の白丸は、実画像におけるターゲットマーカの位置を表している。なお、この時点の模擬画像、実画像共にコントラストが低くなっているため、印刷用にコントラストを調整した。

3.3. 「はやぶさ」の位置推定

ONC-W1 画像の歪み推定時に得られた「はやぶさ」の推定位置に基づいて、この期間の軌道を補正した結果を図 3 に示す。画像データによる照合を行わなかった時刻の位置補正量は、照合を行った時刻の位置補正量から線形補間で求めた。図中の赤色が、SPICE カーネルから得られた「はやぶさ」の軌道、水色が位置補正後の軌道を表している。中央付近の赤丸は、ターゲットマーカの推定位置を表している。

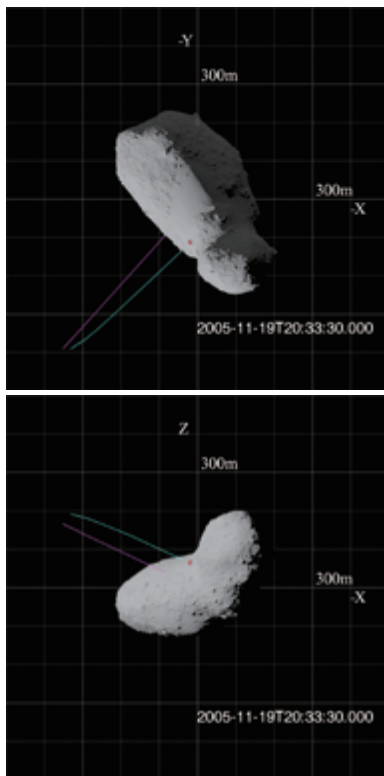


図 3 「はやぶさ」の位置データ補正結果
赤色：補正前の軌道，水色：補正後の軌道

4. 「はやぶさ」の位置推定 2

本節では、第 2 期間（20:34 頃から 20:43 頃迄）における「はやぶさ」の位置推定について記す。

4.1. ONC-W1(方位)データと LRF データを併用した位置推定

ターゲットマーカの座標値が求まったことにより、

ONC-W1 (方位) データが得られている期間においては、「はやぶさ」のターゲットマーカに対する相対方位を求めることが可能となる。方位データが取得できなかった時刻については、本稿では前後直近の取得データから線形補間で値を求めた。図 4 に補間後の ONC-W1 (方位) データを示す。

しかしながら、ここで求まるのは方位のみであり、「はやぶさ」とイトカワの距離は別の手段により求める必要がある。

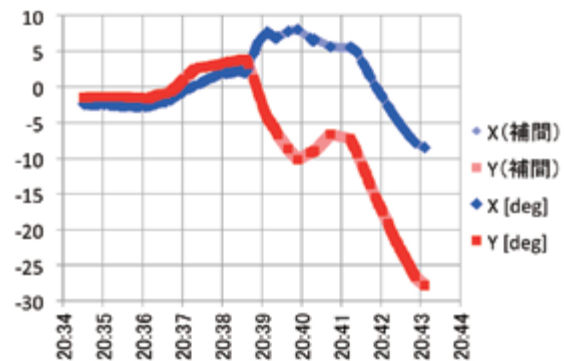


図 4 ONC-W1 (方位) データ (データ補間済)

本稿では距離情報を得る手段として LRF-S1 の測距データを用いる。LRF-S1 を構成する 4 つの LRF は「はやぶさ」の-Z 方向に対して、それぞれ 30 度の角度をもって 4 方向を測距するように取り付けられている。本稿では、これら 4 つの LRF を LRF1 (+Y 側), LRF2 (-X 側), LRF3 (-Y 側), LRF4 (+X 側) と番号付ける。各 LRF の測距データを図 5 に示す。

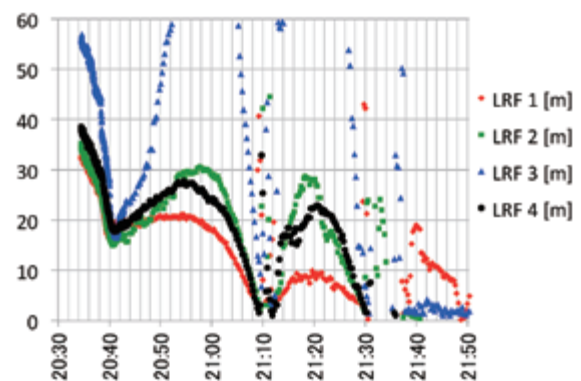


図 5 LRF-S1 の測距データ

これらの LRF データと ONC-W1 (方位) データ、ターゲットマーカの座標値及びイトカワの形状モデルを用いて、20:34 頃から 20:43 頃迄の、「はやぶさ」のイトカワに対する相対位置を求めることが可能となる。以下に手順を記す。

(a) ONC-W1 (方位) データと「はやぶさ」の姿勢デー

タの組み合わせにより、ONC-W1 とターゲットマーカーを結ぶ直線が定義される。

- (b) この直線上において、LRF1 から LRF4 の測距データで求まるイトカワの仮想表面上の点（以下、測距位置と記す）4 点とイトカワ形状モデルの表面とが合致する箇所を求める。具体的には、LRF1 から LRF4 の各方向の測距位置 4 点からイトカワ表面までの距離の自乗和が最も小さくなる位置を、「はやぶさ」の推定位置とする。

4.2. RCS データを用いた位置推定

4.1 で示した手法の妥当性を確認するために、本節では RCS (Reaction Control Subsystem; RCS) の推力を積算して「はやぶさ」の軌道を推定することを試みる。この手法は加速度を 2 回積分するため、誤差要因が大きく、そのまま位置推定に用いることは困難であるが、傾向を把握するために用いることは可能であると考えられる。そこで「はやぶさ」の加速度を、RCS に起因する加速度と、イトカワの重力に起因する加速度の和で表し、各時刻の位置を計算する。

「はやぶさ」には RCS として 12 の化学エンジンが搭載されており、それぞれについて、16 秒もしくは 128 秒の単位時間毎に噴射時間[秒]の積算値が記録されている。積算値の差分をとると、各単位時間あたりの噴射時間が求められる。このようにして求めた 20:34 頃から 20:43 頃迄の噴射時間を、図 6 に示す。図 6 を含めた以後の RCS に係る図においては、12 のスラスタを判別するため、縦軸を 1 刻みでずらしている。

RCS の推力は約 20N であるが、「M-V-5/はやぶさ 飛翔実験報告書 (衛星編)」^[6] (以下、報告書と記す) によると実運用での推力は、その数割減であった。個々の時刻において具体的な比率を求めることは困難であり、ここでは一律に計画書の値の 7 割の推力で計算することとする。また、第 2 期間においては 16 秒毎に噴射時間の積算が記録されており、その中のどのタイミングで噴射したかは不明である。したがって、16 秒の間は、平均して同じ頻度で噴射していたと仮定する。

「はやぶさ」・イトカワ間の引力を計算するにあたって、イトカワの質量分布は、質点の集合で表す。具体的には、Gaskell 形状モデルの座標上で、X, Y, Z 方向に各々 5 [m] 間隔の格子点を取り、形状内の各格子点に初期値としての質量 237,500 [kg] ($1.9 \text{ [g/cm}^3] \times 500 \text{ [cm]} \times 500 \text{ [cm]} \times 500 \text{ [cm]}$) を与える。また本稿においてはイトカワの密度分布は均一であると仮定して引力に基づく加速度を計算する。

なお RCS データのみでは、「はやぶさ」の位置・速度の初期値を知ることはできないため、本節では 4.1 で求めた 20:34 付近の位置・速度を基に、全体的な傾向が一

致するように初期値を微調整する

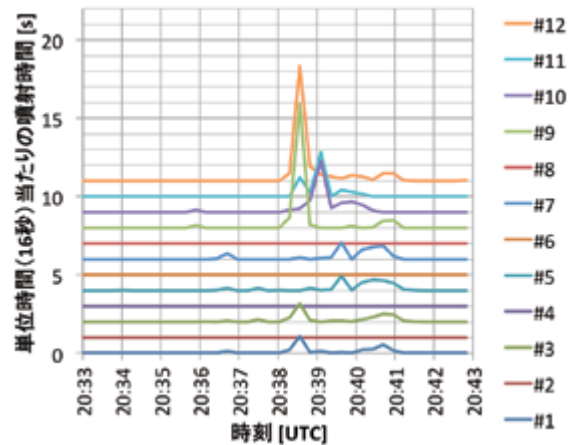


図 6 RCS の噴射時間 (20:34 頃から 20:43 頃迄)

4.3. 位置推定結果

両手法を用いた位置推定結果と速度推定結果を図 7、図 8 に示す。これらの図の各軸は、図を直感的に把握するために、20:34:34 時点における「はやぶさ」座標系の各軸方向とした。概ね Z 軸方向がイトカワからの「高さ」、X, Y 軸方向が、「横」方向の位置変化を表す。各々、「X (RCS)」, 「Y (RCS)」, 「Z (RCS)」が RCS データを用いた位置推定結果, 「X (ONC)」, 「Y (ONC)」, 「Z (ONC)」が ONC-W1 (方位) データを用いた位置推定結果を表している。

両者は位置推定としては概ね矛盾しない傾向となっている。以後の「はやぶさ」の位置推定においては、時間に伴う誤差蓄積の無い、ONCW1 (方位) データと LRF データを併用した位置推定を採用する。

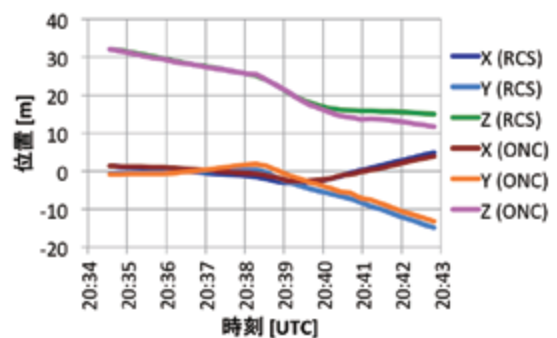
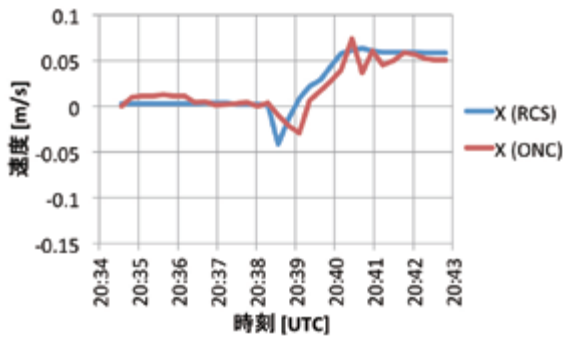
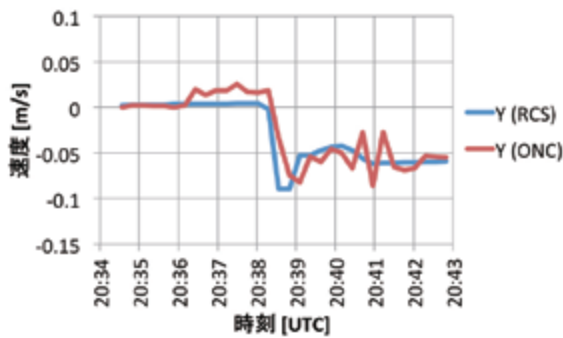


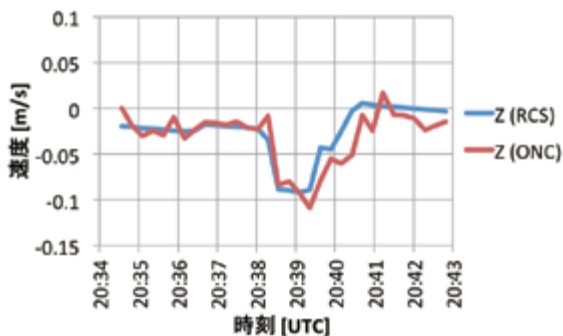
図 7 RCS データを併用した位置推定



(図 8a 速度推定: X 軸)



(図 8b 速度推定: Y 軸)



(図 8c 速度推定: Z 軸)

図 8 RCS データを併用した速度推定

5. 「はやぶさ」の位置推定 3

本節では、第 3 期間 (20:43 から 21:09 頃迄) の位置推定について記す。

5.1. 軌道計算に用いるデータ

20:30 頃から 22:10 頃までの噴射時間の推移を図 9 に示す。これによると、20:43 から 21:09 頃までの間は噴射が殆ど無く、この期間の軌道は自由落下に近い。そこで第 3 期間は、第 2 期間の終末時点の位置を始点として「はやぶさ」に何らかの初期速度を与え、「はやぶさ」が最初にタッチダウンを迎える時点 (21:09) までの軌道を計算する。

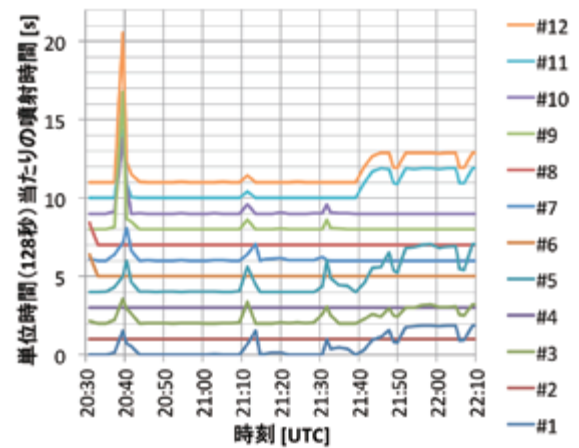


図 9 RCS 噴射時間 (20:30 頃から 22:10 頃迄)

「はやぶさ」の軌道計算に用いるデータは、以下の通りである。実質上は、RCS の噴射と太陽光の輻射圧の影響は微小であると考えられ、イトカワの質量分布による影響が支配的である。

(a) イトカワの質量分布

4.2 で定義した質量分布を基準とする。

(b) RCS データ

4.2 と同様の手法で RCS の噴射時間を「はやぶさ」の加速度に換算する。

(c) 太陽光の輻射圧

太陽光の輻射圧を -1.261×10^{-7} [m/s²] として加速度に加味する。

5.2. 軌道計算の手順

第 2 期間の終末時点 (20:43) で計算された「はやぶさ」の速度を基準速度として、その周囲で適宜初期速度を変更しながら最適な軌道を計算する。基準速度に対する初期速度の探索範囲は、x, y, z の各軸について ± 0.03 [m/s] とする。軌道推定の手順を以下に示す。探索の刻み幅や倍率は、試行錯誤に基づいたものであり、理論的な裏付けによるものではない。

- 各軸について探索範囲の 1/6 刻みで計算される初期速度に対して 5.1 に挙げた加速度成分を積算し、各時刻における「はやぶさ」の位置・速度を求める。
- 求めた各時刻の位置から LRF データによって定まるイトカワの仮想表面の位置 (最大 4 点) を計算する。
- 各時点における仮想表面の位置とイトカワ形状モデルにおけるイトカワ表面との距離の誤差を測距誤差として通算し、RMS 値を求める。ここで 20:52 迄は、LRF の一部が岩や凹凸の多い地域を測距する時期であり誤差が大きくなる懸念がある。本稿では誤差の通算は 20:53 から 21:09 の区間で計算する。

また明らかに測距に失敗していると考えられる LRF データも誤差の計算対象外とする。

- (d) 当該探索範囲において、誤差の通算が最も小さくなる初期速度を次の基準速度とする。探索範囲を 1/2 乃至 1/8 倍して上記手順を繰り返す。

この手順を繰り返すことで、誤差が最小となる初期速度を推定することができる。

イトカワの質量は初期値の 0.9 倍から 1.2 倍の範囲で、0.005 刻みで変更しながら上記推定を繰り返す。

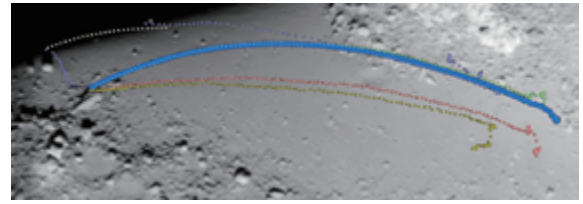
なお LRF データの中には、暗時（レーザ光がターゲットを外している時）を示すものが見受けられる。このようなデータは上記推定では考慮されない。この問題によるエラーを回避するために、計算結果を可視化して目視確認する。すなわち推定された軌道において、暗時にも関わらず LRF の測距位置が「はやぶさ」の近傍であることが明らかであると判断されるような、矛盾した内容が含まれるものは、推定結果として採用しない。

以上の手順の結果、イトカワの質量が初期値の 1.04 倍の時に誤差が最も小さくなる初期速度を得ることができた。「はやぶさ」の軌道は、この初期速度に基づいて計算する。

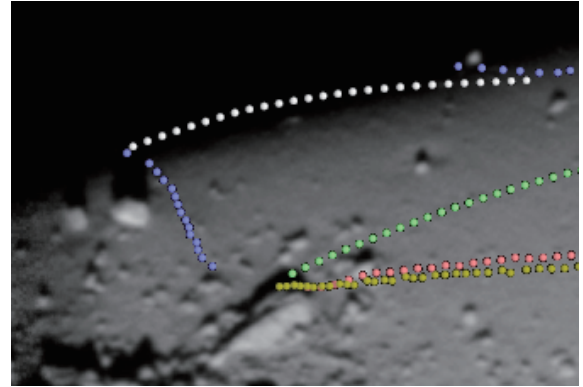
本節の手法による計算結果に基づいた、各 LRF のイトカワ座標系における測距位置（全体、拡大）を図 10 に示す。背景の画像は、同一視点から同一方向にイトカワを見た AMICA 画像である。図中の水色は「はやぶさ」の軌道を表している。赤丸、緑丸、紫丸、黄丸は、それぞれ LRF1 から LRF4 が測距した結果に基づくイトカワ表面の位置を表している。白丸は暗時のデータであるが、図中では仮に 60 [m] 程度の距離でプロットしている。

図 10b の拡大図で特徴的なのは、LRF4（黄）がタッチダウン寸前に地形の盛り上がり記録していることである。また LRF3（紫）も緩やかな地形の変化を記録している。これらの特徴とタッチダウン地点の関係を確認するため、タッチダウン寸前（21:05 から 21:09）のみの誤差が最小となる軌道も求めた。結果を図 11 に示す。図 10b との相違は僅かであり、また他にこのような地形の候補となる地域も見受けられないため、この計算結果を以て、第 3 期間迄の軌道と見なすこととする。

細かな地形については、なお考慮の余地があるが、これを検証するためには、実画像と形状モデルとの整合性をさらに詳細に検討する必要がある、今後の課題となっている。



(図 10a 全体)



(図 10b ダッチダウン付近の拡大)

図 10 第 3 期間迄の軌道計算

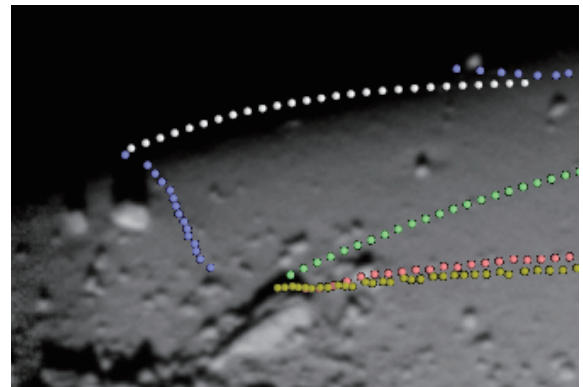


図 11 ダッチダウン付近の LRF 値を用いた推定結果

6. 「はやぶさ」の位置推定 4

本節では、第 4 期間（21:09 頃から 21:12 頃迄）の位置推定について記す。

この期間は最初のタッチダウンがあったと考えられる期間であるが、LRF データの乱れが大きく、また期間も短いため、5 節と同様の手法で位置推定するのは困難である。この期間の「はやぶさ」の軌道は、主観的解釈も入るが、第 3 期間の終末時点の速度を概ね維持しつつ LRF データに見られるような小規模のバウンドがあったと仮定する。

LRF データの中で、測距エラーと思われるデータを排除した結果を図 12 に示す。小バウンド前後の測距ができて LRF2、LRF4 については、データ間を 2 次曲線で補間した値を併せて記す。この LRF データを用いて、イトカワとの高さを推定し、横方向の位置変化は、

第 3 期間の終末と同様であったと仮定して「はやぶさ」の位置を計算する。

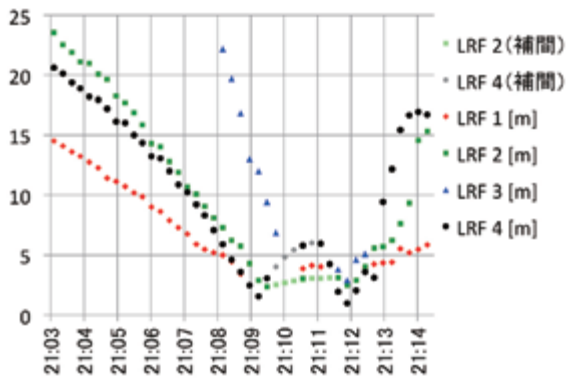


図 12 LRF データの選別・補間

7. 「はやぶさ」の位置推定 5

本節では、第 5 期間（21:12 頃から 21:30 頃迄）の位置推定について記す。

7.1. 計算に基づく推定

この期間は、第 4 期間の終末の「はやぶさ」の位置付近を起点として、次のタッチダウンを迎える 21:30 迄について、5 節と同様の手順で位置推定を行う。ただし測距誤差の通算は、当該期間全体を通して行うものとする。

数 m 程度の範囲で起点をずらしながら次のタッチダウン位置を推定した結果を図 13 に示す。図中、左下の水色の領域が、推定されたタッチダウン位置の分布する領域である。ここで起点が特定できれば第 4 期間の位置推定の精度を上げる事も可能であるが、現時点では、特別可能性の高い起点・タッチダウン位置の組み合わせを特定するには至っていない。

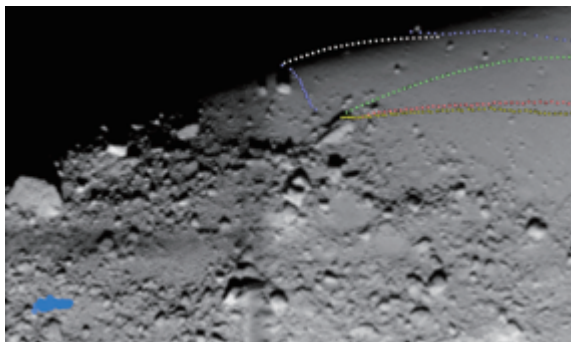


図 13 第 5 期間末の推定位置

7.2. 目視による位置確認

第 3 期間において「はやぶさ」は、イトカワの表面が比較的滑らかな領域を通過していたのに対して、第 5 期間においては、凹凸の多い領域を通過している。このよ

うな領域では 3.1.3 でも述べたように、形状モデルと実際のイトカワの地形が必ずしも一致しない。そのため、この期間においては、LRF データと形状モデルを用いた計算で大まかな軌道推定は可能であるが、細かい起伏の照合は困難である。

AMICA 画像の中には、第 5 期間に「はやぶさ」が通過した領域を比較的鮮明に写した画像が何枚か存在する。それらの画像と計算結果とを重ね合わせて、目視による位置確認を行う。図 14 は、LRF の測距位置と AMICA 画像上の起伏とが比較的良く一致した例である。大まかなイトカワ上の構造と LRF の測距位置とは一致しているように見えるが、なお細かな不一致が残っており、これがノイズに起因するものか本来の位置を外した結果なのかの判別は困難である。また、良く一致する軌道を見いだしたとしても、他に該当する軌道が無いことを解明する必要がある。

とは言え、LRF の値と AMICA 画像を信用するという前提に立つならば、イトカワの地形と LRF の測距位置が矛盾無く一致する場所が存在すると考えられる。今後は形状モデルを用いた位置推定の精度を上げつつ、イトカワの地形と合致する軌道を求めることが課題となる。

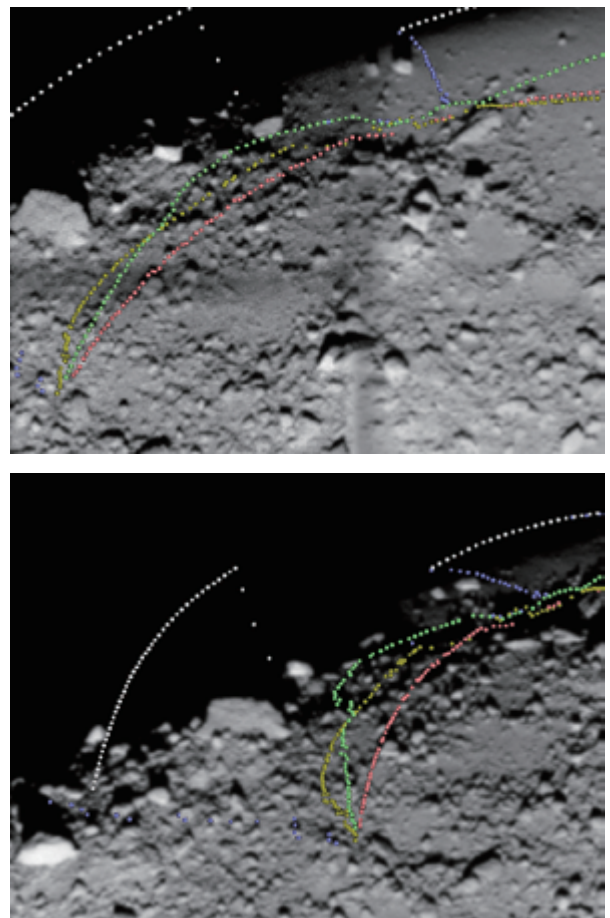


図 14 目視による位置推定 (LRF 測距位置)

8. 位置推定結果

第2期間から第5期間までの位置推定結果を図15に示す。第6期間における「はやぶさ」のイトカワに対する姿勢も、目視においては明確な矛盾は見いだせなかった。

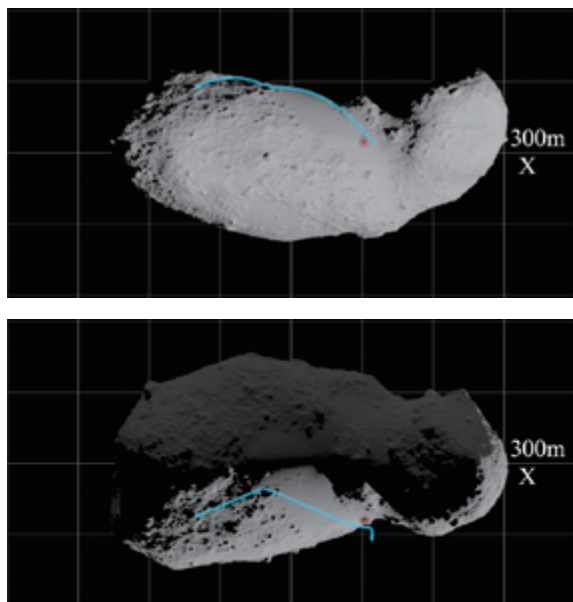


図15 第2期間から第5期間までの位置推定結果

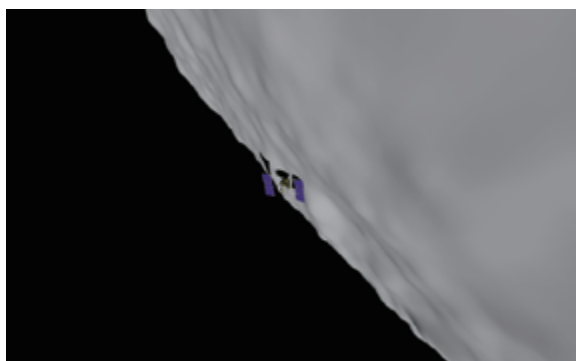


図16 第6期間における「はやぶさ」のイトカワに対する姿勢

9. まとめ

「はやぶさ」がイトカワにタッチダウンする時期における位置推定手法について述べた。本稿においては、「はやぶさ」がタッチダウンする際の軌道を映像化するために、なめらかな連続的軌道を得ることを主眼に置いて、繰り返し計算を用いる位置推定手法について述べた。

今後の課題は、下記の通りである。

本稿の手法で得られた軌道は極値に陥っている可能性もあり、軌道が大局的に見て適切であるかどうかについては、LRFデータと「はやぶさ」、イトカワの関係等を

イトカワ全域で調査し、妥当性を検証する必要がある。また、今回用いた姿勢データは、SPICEカーネルから得られたものであるが、他の姿勢に関連するデータ等と照合し、特に第6期間における「はやぶさ」の位置・姿勢の妥当性について、数値計算により検証する必要がある。

他方で局所的な位置推定精度を向上させるためには、形状モデルのみならず、AMICA等の画像とLRFデータの照合を行う等の改善点が挙げられる。

謝辞

「はやぶさ」の可視化にあたり、ONC-W1画像データをご提供頂きました宇宙航空研究開発機構の尾川順子氏、テレメトリデータをご提供頂きました同機構大槻真嗣氏および、位置推定に係るデータをご提供頂きましたドイツ航空宇宙センターの相田彩夏氏に感謝致します。また本稿の執筆にあたり、貴重な助言を頂きました「はやぶさ」関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] J. Kawaguchi, S. Aida, H. Morita, “Hayabusa, Detailed Guidance and Navigation Operations during Descents and Touchdowns,” *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, 2006.
- [2] A. Fujiwara, J. Kawaguchi, et al., “The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa,” *Science*, 第312巻, 第5778, pp. 1330-1334, 2006.
- [3] S. Abe, T. Mukai, et al., “Mass and Local Topography Measurements of Itokawa by Hayabusa,” *Science*, 第312巻, 第5778, pp. 1344-1347, 2006.
- [4] M-V-5/MUSES-C 飛翔実験計画書(衛星編), 宇宙科学研究所, 2003.
- [5] 三浦昭, 山本幸生, 吉川真, “「はやぶさ」の小惑星イトカワ探査軌道・姿勢の可視化,” *宇宙科学情報解析論文誌*, 第3, pp. 7-15, 3 2014.
- [6] M-V-5/はやぶさ 飛翔実験報告書(衛星編), 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部, 2005.
- [7] S. Aida, Y. Shibasaki, K. Shirakawa, H. Morita, J. Kawaguchi, “Trajectories and Attitudes of an Asteroid Sample Return Spacecraft “HAYABUSA” during Touchdowns on ITOKAWA,” *Proceedings of 16th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics*, 2007.