

様式 C-19

## 科学研究費補助金研究成果報告書

2010年5月17日現在

研究種目: 若手研究 (B)

研究期間: 2007年度～2009年度

課題番号: 19760284

研究課題名 (和文): 小天体表面における電波を用いた自己位置同定の研究

研究課題名 (英文): Radio-based localization over the surface of small solar system bodies

研究代表者:

吉光 徹雄 (YOSHIMITSU TETSUO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号: 60332152

研究成果の概要 (和文) 大きさ数 km 以下の太陽系小天体表面での絶対自己位置同定として, 小天体近傍に滞在する探査機からの電波を用いる手法の検討をシミュレーションと GPS による模擬実験により実施した。

研究成果の概要 (英文) The author has proposed a localization method on the surface of small solar system bodies with a diameter less than a few kilometers. The proposed method uses a radio from a spacecraft which stays at the vicinity of the body, which is evaluated by a numerical simulation and a simulated experiment on the ground using the GPS signal.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,400,000	420,000	2,820,000

研究分野 工学

科研費の分科・細目 電気電子工学・計測工学

キーワード (1) 小天体 (2) 移動ロボット (3) 自己位置同定

## 1 研究開始当初の背景

大きさ数 100m クラスの小天体の大半は、太陽系の誕生以来、熱的な変性を受けていない。このため、はやぶさがイトカワに到着する以前は、イトカワの表面は一様であり、どこを調べても同じであると考えられていた。

しかし、はやぶさ探査機による観測により、小惑星“イトカワ”の表面は多様性を持っていることがわかった。大きく分けて、レゴリスと呼ばれる細かい砂礫層が堆積してスムーズに見える領域と、岩が剥き出しになって散在する領域の 2 つの異なる領域に分けられる。さらに、表面特性が他と異なる場所や、生成学上興味深い地形が点在する。

このような非一様性は、惑星科学史上大きな発見であり、今後の小天体探査ミッションでは、天体内に複数の特徴が存在することを前提として、それらなるべくたくさん調べる必要があるという新たな課題を提示した。

天体の複数の地点を調べるためには、移動ロボットによる表面探査が有効である。ロボットが小天体表面の特定の地形を観測するためには、ロボットの自己位置を地球から指定した目標位置に収束させるナビゲーションが必要となる。はやぶさに搭載されたミネルバロボットには、ホッピング移動メカニズムによって完全自律的に多地点に移動し続ける機能が備わっているのみで、特定の地点にロボット本体を誘導させる機能はなかった。このような高度なナビゲーションを実現するためには、ロボットの小天体表面での位置をリアルタイムに求める自己位置同定技術の開発が必須である。

本研究では、このような将来の高度な小天体表面探査ロボットに必須な小天体表面における自己位置同定技術に関する基礎的な検討を実施する。

## 2 研究の目的

小天体はその多くが、いびつな形状をしている。また、1 つの天体がラブルパイルと呼ばれる複数の岩盤の集合体である場合、その内部に

は多くの空隙層を含むため、密度が一様でない。このため、天体の重心を基準とした地心経緯度とローカルな重力加速度方向を基準とした測地経緯度では、その値が大きく異なる。

小天体表面の興味深い地形は、小天体に接近した探査機 (例えば、日本のはやぶさ探査機) がその外部から撮影した画像をもとに選択される。このため、その地点を座標として与える場合、地心経緯度が使われる。

一方、小天体表面のロボット単独で、カメラや重力計、太陽センサを用いてその座標を求めることが原理上可能である。しかし、そこで求めた座標は測地経緯度で表現される。

以上の理由から、興味のある目的地を地球から指示した場合、地心経緯度と測地経緯度が大きく異なるため、ロボットを意図した目的地に収束させることができない。

そこで、本研究では、ロボットを小天体表面まで運搬した母船が電波による支援を行なって、ロボットの小天体表面における地心経緯度を準リアルタイムに求めるシステムの検討を行なう。

## 3 研究の方法

本研究では、提案するシステムの具体的な実現性を明らかにするため、位置同定誤差と位置同定にかかる時間の評価を行なう。この評価は、シミュレーションによる数値解析と、地球上での GPS 衛星からの電波を使用した模擬実験の 2 つの観点から実施する。

シミュレーションでは、母船が小天体を周回している場合と母船と小天体が太陽の回りをほぼ同じ公転運動をしている場合 (はやぶさ探査機は後者の手法を採用した) において、母船の運動に誤差を付加して検討を行なう。

GPS 衛星を用いた模擬実験では、小天体での状況と地球上での状況の相違があるため、スケールファクタを用いて、実験で得られた測定誤差を小天体での誤差に変換する。

## 4 研究成果

2007年度は以下の作業を実施した。

- 母船が周回軌道運動している場合の定式化  
簡単なケースとして、母船が小天体を周回している場合における定式化を行なった。システムの状態方程式と観測方程式を導出し、カルマンフィルタとバッチフィルタから位置同定を行なうための定式化を行なった。
- シミュレーションによる数値解析  
定式化をもとに、イトカワ級の大きさの小惑星や、火星の衛星フォボスなど実際に探査ミッションが検討されている小天体パラメータにおける数値シミュレーションを実施した。母船の軌道と測定距離に白色雑音があると仮定して、距離測定時間と得られる自己位置同定誤差の関係を求めた。
- 次年度以降の実験の準備  
次年度の実験のため、納期が長期間かかる高精度のGPS受信機の手配を行なった。

2008年度は以下の作業を実施した。

- シミュレーション実験装置の製作  
実験システムとして、GPS受信機からの生情報を継続的に記録する装置を製作した。製作した装置の構成は、GPS受信機をインタフェースボードを介してパソコンにつないだものであり、パソコン搭載のソフトウェアでGPS受信機からの出力データを定期的に記録させる。インタフェースボードは専用品を製作した。
- GPS衛星を用いた実験  
製作した装置を用いてGPS衛星からデータを取得し、地球上で位置同定を行なう実験を実施した。
- 小天体表面での期待できる位置誤差の導出  
以下の2点により、小天体表面で期待できる位置誤差を導出した。

1. 地球上の位置誤差を、小天体と地球のスケールファクタを用いて変換する。
2. 測定システムで得られた生データから、GPS衛星システムにおける測定距離の誤差分布を求める。

2009年度は以下の作業を実施した。

- シミュレーションによる数値解析 (2)  
母船と小天体が太陽の回りをほぼ同じ公転運動をしている場合や、母船が小天体回りをガスジェットを用いて軌道変換している場合におけるシミュレーションを行なった。
- 実験 (2)  
2008年度に製作した装置による実験を再び行ない、ターゲットとしている大きさ1kmの小天体表面での期待できる位置誤差の導出を行なった。

## 5 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

1. 吉光徹雄 “宇宙ロボットを作るための心得”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, pp.514-517, 2009.
2. 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫, 吉光徹雄, 中谷一郎, “電波の伝搬遅延時間測定による小天体探査ローバの位置同定法”, 日本ロボット学会誌, Vol.27, pp.1007-1015, 2009.

[学会発表](計10件)

1. Tetsuo YOSHIMITSU, “Orbital Geometry of Localization System around Small Planetary Bodies,” Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2007.
2. 金田さやか, 吉光徹雄, “電波を用いた小天体探査ローバの位置同定”, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 2007.

3. Tetsuo YOSHIMITSU, "Proposal of Micro Rovers on Small Solar System Bodies," The First Meeting of the International Primitive body Exploration Working Group, 2008.
4. Tetsuo YOSHIMITSU, "MINERVA Rover in Hayabusa Mission," The First Meeting of the International Primitive body Exploration Working Group, 2008.
5. Tetsuo YOSHIMITSU, "Onboard Image Selection and Compression Strategy of the Asteroid Rover," On-Board Payload Data Compression Workshop, 2008.
6. 金田さやか, 吉光徹雄, "自転運動の不確かさを考慮した伝搬遅延時間測定による位置同定", 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008.
7. Edmond So, Tetsuo Yoshimitsu, "Relative Localization of a Hopping Rover on an Asteroid Surface using Optical Flow," SICE Annual Conference 2008.
8. Edmond So, Tetsuo Yoshimitsu, "Relative Localization of a Hopping Rover on an Asteroid Surface: Motion Estimation using Optical Flow," 18th JAXA Workshop on Astrodynamics and FlightMechanics, 2008.
9. 吉光徹雄, "小天体探査ローバにおける自律データ圧縮", 第 52 回 宇宙科学技術連合講演会, 2008.
10. 吉光徹雄, "はやぶさ 2 に向けた小型ローバの提案", 第 10 回 宇宙科学シンポジウム, 2010.

## 6 研究組織

- (1) 研究代表者 吉光徹雄 (研究者番号:60332152)
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者 なし