

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2013

課題番号：21700231

研究課題名（和文） 天体上空 3 次元探査を可能とする宇宙機の自律航法誘導制御手法の検討

研究課題名（英文） Study on Autonomous Guidance and Navigation of Spacecraft for Three-Dimensional Exploration of Celestial Bodies

研究代表者

尾川 順子（OGAWA NAOKO）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・月・惑星探査プログラムグループ・開発員

研究者番号：10523813

研究成果の概要（和文）：

未知天体上空において多様な地形、高度に対応した探査機の 3 次元自律航行に必要な基礎技術を検討した。複数マーカによるピンポイント誘導手法の提案や地形モデル検証ツールの作成などを行い、実ミッションを想定したシミュレーションにより従来の探査では実現できなかった自在な探査の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

We studied several basic methods for three-dimensional autonomous navigation of spacecraft at variety of altitude and terrain in an unknown celestial body. We have proposed several novel exploration architectures such as pinpoint navigation by multiple markers or the validation tool of terrain models. Results of simulation assuming actual missions showed a new possibility for desired exploration.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,460,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：惑星探査，自律航法

## 1. 研究開始当初の背景

近年の国内外の惑星探査機による成果は、人類の太陽系像を大きく塗り変えつつある。初期の探査技術はフライバイにはじまり、周回探査，着陸探査，ローバ探査と進化を遂げて来たが、極めて限られた領域の探査しかできなかった。次世代の無人探査では、天体上空

を自在に飛翔して未知環境を 3 次元的に理解することが求められる。点・線・面から空間の探査へという階段を昇ることはじめて、探査可能領域が飛躍的に増大し、探査天体を真の意味で地球と比較し理解できるといえる。

しかしこれまでの自律移動はほとんどが天体への単純な接近や着陸，あるいは地表面上

での移動であり、より広い意味での自由な 3 次元航行はまだ実現できていない。NASA の Deep Impact のインパクトは自律的に彗星に衝突したが、自在な航行には至っていない。JAXA の「はやぶさ」は小惑星上空でのホバリングや自律離着陸を成功させたが、実際には地上の運用スタッフに多大な負担が掛かっており、自律機能のメリットが十分に引き出されたとはいいがたい。また特に小天体探査においては従来の予想とかけ離れた岩だらけの地表が近年明らかになり、クレータを前提とした従来の多くの環境認識アルゴリズムでは対応が難しい。さらに今後、火星等の重力天体での飛行体による 3 次元探査を考えるならば、崖や砂地、峡谷といった多様な地形において環境を立体的に理解し実時間で反応する能力が必要であり、従来の火星ローバの半自律機能等とは質的に異なる手法が要求される。

## 2. 研究の目的

本研究では、将来的な天体上空の自在な 3 次元探査に向けて、多様な地形、高度に対応した探査機の 3 次元自律航行に必要な基礎技術を検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

探査機の運用や内外の惑星探査研究者との議論を通じて自律探査におけるいくつかの問題点やトピックを洗い出し、それぞれの要素技術について並列的に検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 複数マーカーを用いたピンポイント着陸航法誘導

天体上空 3 次元探査においては、上空を自在に探査し狙った地点に精密に誘導する技術が不可欠である。これまで、「はやぶさ」などにおいてターゲットマーカーを用いた自律着陸航法誘導が行われてきたが、マーカーによる誘導の精度はマーカーの投下精度に大きく依存するため、精密な誘導が難しいという問題点があった。そこで、複数のマーカーを順次投下していき、地上とオンボード処理の協同作業により誘導精度を高める手法を提案した。モンテカルロシミュレーションなどの数値実験による検証の結果、従来手法と比べて数倍～10 倍程度の誘導精度を実現することができ、狙った地点へのピンポイント誘導が可能となることが示された。

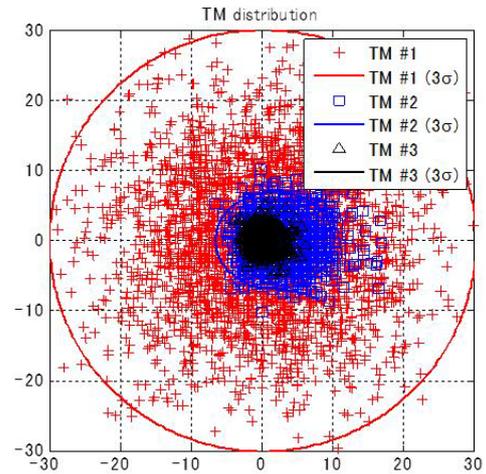


図1 複数マーカーを用いた場合の探査機の誘導分散

また実際のミッションや実在天体を想定した具体的なシミュレーションを行うとともに、マーカーの反発や重力中心推定の誤差などさまざまな環境変化に対するロバスト性を調査した。さらに、着陸時のアプローチに関して複数の戦略を考案し、様々な環境条件を仮定してトレードオフ検討を行い、最もロバストで成績の良いシナリオを選定するとともに、実ミッションへの応用に向けて詳細な運用シーケンスを検討した。

本研究で提案した手法の一部は「はやぶさ2」の着陸シーケンスに採用される予定である。

### (2) 画像を用いた自律航法誘導のための地形モデル検証ツールの作成

画像を用いた自律航法誘導においては、事前に天体の地形モデルを構築して保持していることが不可欠であるが、未知天体の場合には到着後に画像等から地形モデルを作成しなければならない。地形モデル作成手法としては様々な既存研究が提案されているが、その検証としては地形が既知の天体地表模型とその実写画像を用いることが有用と考えられる。本研究では天体地表模型を用いた地形モデル検証ツールの作成を行った。まず天体地表模型の計測撮像システムを構築し、レーザ変位計および工業用カメラを用いてさまざまな角度から計測撮像を行い、得られた点群から誤差の少ないポリゴンモデルを自動作成するアルゴリズムを開発した。また天体表面の地形モデルの再現性を Iterative Closest Point を用いて評価する手法、およびその結果を地形にマッピングする手法を開発し、実際のデータに適用した。さらに地形モデル構築においては、これまで天体上空の宇宙機の運動は赤道面上を主に

想定していたが、より自在な3次元運動の実現を目指し、高緯度地方や極上空など多様な航行パターンに対応できるように天体模型計測撮像システムの改良を行った。

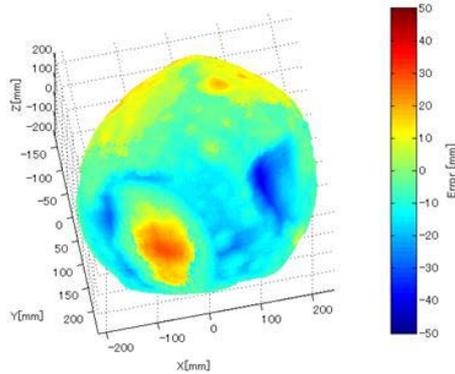


図2 地形モデルポリゴンを用いた誤差評価

### (3) 探査機の影情報の航法誘導への活用

未知地形における上空探査において、地表に映る探査機自身の影は形状が既知である、コントラストが高い、などの点で環境理解のための手がかりの一つとして利用しうる。本研究では、探査機の影による高度推定や3次元地形形状復元などについて検討を行った。



図3 探査機の影の検出による高度推定

### (4) 複数探査機による遠方観測と近傍観測の組み合わせの検討

多様な高度における自在な観測は本研究

の目的のひとつであるが、高重力天体場合には一機の探査機が高度を自在に変更することが難しい場合が多い。そこで、複数の探査機が異なる高度に滞在して遠方観測と近傍観測を行い、それらの結果を複合することでマルチスケールの環境理解を行うことを提案した。しかしこの枠組みにおいては力学的制約から、それぞれの高度の探査機が同一地域を観測することは一般的に困難である。そのため、天体重力の摂動を利用することで複数の探査機が同期して目的の地域を観測できるようなコンステレーションを提案した。例えば、低軌道探査機と長楕円軌道探査機の軌道を直交させ、天体のJ2摂動を利用して両者の回転角速度を同一にすることで、低軌道探査機のその場観測範囲を長楕円軌道探査機が遠方から同時に観測できるようなコンステレーションが可能であることを示した。

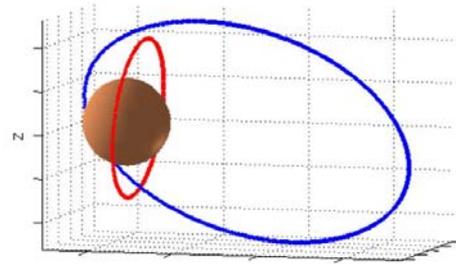


図4 2機の探査機による遠方・その場同時観測軌道の設計例

### (5) 自律航法誘導におけるマーカ視認性を予測するための回線計算手法の確立

天体上空3次元探査においては、上空から再帰反射性を有するマーカを画像認識して航法誘導を行う手法がきわめて有用である。しかし再帰反射性素材は通常の拡散面とは異なる光学的挙動を示すため、事前の視認性の評価が難しく、自律航法誘導における画像処理のロバスト性を定量的に事前評価することが困難であった。そこで、再帰反射特性を考慮した回線計算手法を確立し、視認性評価ツールの開発を行った。本ツールを用いて様々な条件の天体上空模擬画像を作成し、既存の画像認識アルゴリズムを適用することで、色々なケースにおける再帰反射性マーカの視認性を定量的に評価できるようになった。

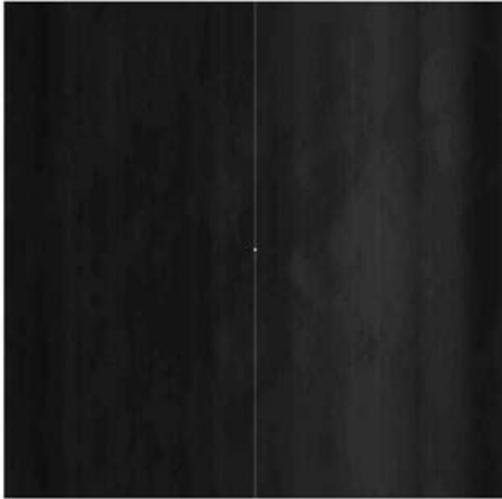


図5 再帰反射性マーカの視認性シミュレーション画像例

(6) 惑星間空間から大気突入して大気中を飛行する宇宙機の軌道姿勢制御の検討

大気を有する天体の上空3次元探査においては、大気中の軌道姿勢制御の成立性を検討することが重要である。惑星間空間から大気突入するケースを想定して、惑星間空間の軌道条件から大気内での飛行経路をダイレクトに計算するツールを開発するとともに、大気中の狙った高度を飛行させるために必要な突入条件や惑星間軌道条件を検討した。

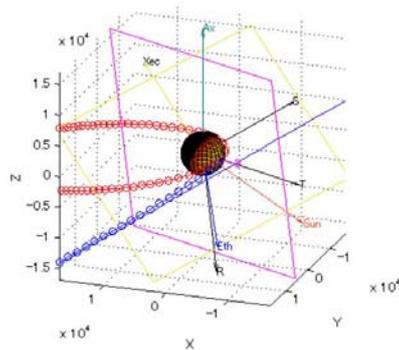


図6 惑星間空間から大気圏への突入軌道の設計例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Naoko Ogawa, Michihiro Matsumoto, Nobuaki Ishii, Yuichi Tsuda, Yasuhiro

Kawakatsu, Jun'ichiro Kawaguchi, Takeshi Imamura, Ayako Matsuoka, Takashi Kubota and Takehiko Satoh. Launch Opportunities and Preliminary Orbit Design for Next Mars Exploration Program. Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 10, No. ists28, 2012, Tk\_19-Tk\_25 DOI: 10.2322/tastj.10.Tk\_19

[学会発表] (計13件)

- ① Naoko Ogawa, Mutsuko Y. Morimoto, Yasuhiro Kawakatsu, Jun'ichiro Kawaguchi: "Constellation of Two Orbiters around Mars" 27th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS 2009). (20090710). 茨城県つくば市
- ② Naoko Ogawa: "Preliminary Study on Utilization of Spacecraft Shadow on the Celestial Body for Navigation Assistance" The 19th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics. (20090731). 神奈川県相模原市
- ③ Naoko Ogawa, Takashi Kubota, Yasuhiro Kawakatsu, Jun'ichiro Kawaguchi, Takehiko Satoh: "Preliminary Design of Mars Exploration Mission by Multiple Landers and Orbiters" 60th International Astronautical Congress 2009 (IAC 2009). (20091014). 韓国・大田
- ④ Naoko Ogawa, Fuyuto Terui, Jun'ichiro Kawaguchi: "Landing Strategy of Asteroid Probe Using Multiple Markers" The 20th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics. (20100726). 神奈川県相模原市
- ⑤ Naoko Ogawa, Yuichi Tsuda, Tomohiro Yamaguchi, Yasuhiro Kawakatsu, Jun'ichiro Kawaguchi: "How to Establish and Maintain Orthogonal Constellation with Two Orbiters under J2 Perturbation" AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference 2010 (ASC 2010). (20100802). カナダ・トロント
- ⑥ Naoko Ogawa: "Preliminary Study on Optical Utilization of Spacecraft Shadow Images for Navigation

- Assistance" The 10th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2010). (20100830). 北海道札幌市
- ⑦ Naoko Ogawa, Yuichi Tsuda, Yasuhiro Kawakatsu, Jun'ichiro Kawaguchi: "How to Establish and Keep Orthogonal Constellation by Two Orbiters Under Perturbation" 61st International Astronautical Congress 2010 (IAC 2010). (20100927). チェコ・プラハ
- ⑧ Naoko Ogawa, Fuyuto Terui and Jun'ichiro Kawaguchi. Utilization of Multiple Markers for Pinpoint Touch Down on Asteroid. The 21st Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, 2011年07月26日, JAXA 相模原キャンパス (神奈川県)
- ⑨ Naoko Ogawa, Fuyuto Terui and Jun'ichiro Kawaguchi. Precise Guidance and Landing Strategy of Space Probe by using Multiple Markers in Asteroid Exploration Mission. 2011 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference (ASC 2011), 2011年08月04日, Hotel Alyeska (アメリカ合衆国)
- ⑩ Naoko Ogawa, Yuya Mimasu, Keita Tanaka, Tomohiro Yamaguchi, Kazuhisa Fujita, Shinichiro Narita and Jun'ichiro Kawaguchi. Earth Revolution Synchronous Orbits and Aero-Gravity Assists to Enhance Capabilities for Interplanetary Missions by Sub-Payload Spacecraft. 13th International Space Conference of Pacific-basin Societies (ISCOPS), Advances in the Astronautical Sciences, 2012年05月16日, 京都市国際交流会館 (京都府)
- ⑪ Naoko Ogawa, Fuyuto Terui and Jun'ichiro Kawaguchi. Comparison of Two Scenarios for Pin-Point Landing of Asteroid Probe using Multiple Target Markers. The 22nd Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, 2012年07月31日, JAXA 相模原キャンパス (神奈川県)
- ⑫ Naoko Ogawa, Fuyuto Terui and

Jun'ichiro Kawaguchi. Trade-off Study in Possible Scenarios for Precise Landing of Asteroid Probe using Multiple Markers. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space 2012 (i-SAIRAS 2012), 2012年09月08日, Torino Incontra (イタリア)

- ⑬ 尾川 順子, 照井 冬人, 三榘 裕也, 保田 誠司, 松島 幸太, 松本 大志, 卯尾 匡史. はやぶさ2におけるターゲットマーカを用いた画像航法誘導の新しい試み. 第56回宇宙科学技術連合講演会, 2012年11月22日, 別府国際コンベンションセンター (大分県)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 出願年月日 :  
 国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 取得年月日 :  
 国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

尾川 順子 (OGAWA NAOKO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・月・惑星探査プログラムグループ・開発員

研究者番号 : 10523813

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：