

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820408

研究課題名(和文) 膜面の変形を考慮したソーラーセイルの姿勢・軌道の高精度誘導手法に関する研究

研究課題名(英文) Precise Guidance and Control of a Solar Sail Considering the Membrane Deformation

研究代表者

船瀬 龍 (Funase, Ryu)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：70509819

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、変形を有するスピン型ソーラーセイルのロバストな姿勢・軌道誘導制御を導出するとともに、セイルの精密な太陽輻射圧モデルの定式化と軌道上でのモデル同定手法の構築により、高精度なソーラーセイルの姿勢・軌道誘導を可能にした。これにより、加速(軌道制御)にも姿勢制御にも燃料が不要(完全燃料フリー)で、真に半永久的な深宇宙航行システムとしてのソーラーセイルの実用化への貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：This research derived (1) a robust attitude/orbit guidance and control method for a spinning solar sail with membrane deformation, (2) a precise solar radiation pressure model for the spinning solar sail and (3) its on-orbit estimation method. The results will contribute to the realization of future solar sailing spacecraft which is truly propellant-free in terms of both attitude and orbit control.

研究分野：宇宙機の航法・誘導・制御

キーワード：ソーラーセイル 可変反射率デバイス RCD 燃料フリー制御 高精度太陽輻射圧モデル 航法・誘導・制御

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間で数 10m 以上の大面積の薄膜鏡(帆、セイル)を展開・展張し、膜面に作用する太陽光圧を推進力として宇宙空間を航行するソーラーセイルは、燃料を使用せずに宇宙空間を航行できるため、長期間・長距離の深宇宙探査を可能にする次世代の宇宙推進方式として注目されている。その中でも、スピン型ソーラーセイルは軽量性(加速能力)に優れ、大面積化した場合等の将来の拡張性にも優れているが、帆を操舵(スピン軸方向を傾けて太陽光圧による加速度ベクトルを制御)する際に、その巨大な慣性モーメントと角運動量ゆえに大量の姿勢制御用の燃料が必要となる。すなわち、軌道制御・姿勢制御の両面において真に燃料フリーで、半永久的に深宇宙航行可能なシステムにはなっていないという問題点があった。

これまでの研究において、ガスジェット等の燃料を消費する従来の姿勢制御システムとは全く異なる姿勢制御システムとして、電気エネルギーで太陽光の反射特性を制御できる可変反射率デバイスを開発し、帆に複数配置した各デバイスの受ける光圧をアンバランスさせてトルクを発生させるという、燃料フリーの姿勢制御システムが提案されており、世界初のソーラーセイル IKAROS において提案システムの宇宙実証に成功し、加速(軌道制御)だけでなく帆の操舵(姿勢制御)においても燃料が不要な真に半永久的な深宇宙航行システムの実現にむけて大きな成果を上げることができた。

ところが、IKAROS のフライト結果では、構造力学的な要因によりセイルが想定以上に変形しており、精密な惑星スイングバイ等を行う実探査ミッションに使える程度の、高い誘導制御精度を実現するにあたって大きな課題となることが分かった。

2. 研究の目的

本研究は、高精度なソーラーセイルの姿勢・軌道誘導手法の確立を目的とする。誘導制御精度が悪くなる要因は、軌道上での姿勢・軌道運動モデルの推定誤差に起因する、誘導誤差(生成する姿勢・軌道の目標パス自体の誤り)と制御誤差(目標パスに沿うための制御の出力誤差)であり、さらにそのモデルの推定誤差の主たる要因は、定式化したモデル自体の表現能力(分解能)不足である。そこで、本研究では、モデル誤差に対してロバストな誘導制御則を検討すると同時に、モデルの高精度化と軌道上でモデルを高精度に推定する手法を検討することにより、高精度なソーラーセイルの軌道誘導手法の実現を目指す。

3. 研究の方法

ソーラーセイルの姿勢・軌道誘導の要となる姿勢・軌道運動モデルに対して、推定精度要求の低減と、推定精度の向上の2方面からア

プローチし、高精度な誘導制御手法を確立する。具体的には、(A)ロバストな誘導制御則を導出することによりモデル精度に対する要求を低減すると同時に、(B)変形を有するセイルの精密な姿勢・軌道運動モデルの定式化と軌道上でのモデル同定手法の構築により、高精度なソーラーセイルの姿勢・軌道誘導を可能にする。

4. 研究成果

(1) 誘導制御則の構築

可変反射率デバイスによって時間的に光学特性を制御できる一般化されたソーラーセイルの姿勢運動モデル((2)で導出した extended GSSM)を用いて、軌道制御の時定数に対して十分短い時定数で姿勢マヌーバを行うための最適(最短時間)姿勢マヌーバ則を導出した。ここでは、Lyapunov 関数ベースのフィードバック制御系を用いることによって、簡便な計算でありながら非線形計画法等に基づいて計算された最適制御プロファイル計算に近い最適性を実現できた。さらに、この制御プロファイルを参考にすることにより、ポントリャーギンの最適性原理から最適(最短時間)姿勢制御則を解析的に導出することができた。

次に、導出した最短時間姿勢マヌーバを用いて、ソーラーセイルの姿勢・軌道の同時最適化問題を現実的な計算コストで解くとともに、高精度な輻射圧モデルとの間のモデル化誤差を補償する誘導制御方法を提案し、ソーラーセイルの姿勢・軌道十分な精度で誘導できることを数値シミュレーションによって確認した。

(2) 姿勢・軌道運動モデルの定式化

可変反射率デバイスによるソーラーセイルの燃料フリー姿勢制御システムについて、セイルの運動モデルへの影響の大きいセイルの変形と、可変反射率デバイスによってセイル膜面の光学特性を時間的に変更できることを組み込んだソーラーセイルの姿勢運動モデルを解析的に導出した。さらに、2010年度に JAXA が打ち上げ・軌道上運用に成功した小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の軌道上データに対して、本モデルを用いた姿勢・軌道運動推定を行うことにより、推定精度が向上することを数値シミュレーションにより示すことができた。本モデルは、従来より研究してきたセイルの変形のみを考慮にいたしたスピン型ソーラーセイルの姿勢運動モデル(GSSM: Generalized Spinning Sail Model)を、光学特性が制御可能な場合に拡張するものである。

計算の容易さとモデルの精度を考慮し、(1)で構築する誘導制御則の前提とするモデルはここで導出したモデル(extended GSSM)を用いるが、誘導則の検証のためには、さらに材料の光学反射特性を精密にモデル化した太陽輻射圧モデルが必要である。本研究で

は, BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) を含む任意反射特性かつ任意形状を有する宇宙機の高精度 SRP モデル化手法を導出した. 計算機上で構成できる最高精度のモデル (レイトレース手法を用いたモデル) に対する誤差をほぼゼロに抑えながら, 現実的な範囲の小さな計算コストで任意の姿勢での SRP の計算ができるようになった. そして, 深宇宙軌道上の宇宙機の軌道上データを用いて, 導出したモデル化手法の有効性を評価した. 十分に高い精度での軌道上モデル推定が可能であることが分かった一方で, 推定しきれない小さな系統的な誤差の存在も確認され, 太陽輻射圧のさらなる精緻化 (二次反射の取り込み等) や太陽輻射圧以外の外乱要因 (熱輻射など) の取り込みによってさらなる高精度化の可能性も示唆された.

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 0 件)

1.

[学会発表] (計 14 件)

1. Kenshiro Oguri, Takumi Kudo, Ryu Funase, "Design Criteria of Reflectivity Control System Under Uncertainty in Sail Property for Maneuverability Requirement of Spinning Solar Sail", AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Long Beach, California, USA, September 16, 2016
2. Satoshi Ikari, Kakeru Tokunaga, Takuji Ebinuma, Ryu Funase, Shinichi Nakasuka, "A Study of Shadow Representation for High-fidelity Solar Radiation Pressure Calculation", AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Long Beach, California, USA, September 16, 2016
3. 徳永翔, 五十里哲, 伊藤琢博, 稲守孝哉, 富木敦史, 船瀬龍, "超小型深宇宙探査機 PROCYON における軌道上外乱計測と高精度モデル構築", 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2J14, 函館アリーナ, 函館, September 7, 2016
4. 工藤匠, 小栗健士朗, 船瀬龍, "スピン型ソーラーセイルにおける可変反射率デバイスを用いた姿勢角・スピンレートの同時制御", 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, P32, 函館アリーナ, 函館, September 7, 2016
5. 小栗健士朗, 工藤匠, 船瀬龍, "反射率制御によるスピン型ソーラーセイルの時間最適姿勢制御則とセイル変形不確定性に対する安定性解析", 第 60 回宇宙

科学技術連合講演会, P34, 函館アリーナ, 函館, September 7, 2016

6. 五十里哲, 徳永翔, 海老沼拓史, 船瀬龍, 中須賀真一, "複雑な形状をした宇宙機に加わる太陽輻射圧の一般的計算手法", 日本航空宇宙学会第 47 回年会講演会, 東京大学山上会館, 東京, April 14, 2016
7. 工藤匠, 小栗健士朗, 古本拓朗, 船瀬龍, 中須賀真一, "可変反射率デバイスを搭載したスピン型ソーラーセイルの姿勢角・スピンレート同時制御に関する研究", 日本航空宇宙学会第 47 回年会講演会, 東京大学山上会館, 東京, April 14, 2016
8. Kenshiro Oguri and Ryu Funase, "An Optimal Attitude and Orbit Control Strategy of Spinning Solar Sail Spacecraft via Reflectivity Control", AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Napa, CA, USA, February 15, 2016
9. Satoshi Ikari, Takuji Ebinuma, Ryu Funase and Shinichi Nakasuka, "A Novel Semi-Analytical solar Radiation Pressure Model with the Shadow Effect for Spacecraft of Complex Shape", AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Napa, CA, USA, February 16, 2016
10. 五十里哲, 海老沼拓史, 船瀬龍, 中須賀真一, "高精度太陽輻射圧モデルのための BRDF 測定結果", 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, かがしま県民交流センター, 鹿児島, October 9, 2015
11. Takuro Furumoto, Tomohiro Yamaguchi and Ryu Funase, "Attitude Dynamics Modeling of Spinning Solar Sail under Optical Property Control", AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Vail, CO, USA, August 12, 2015
12. Kenshiro Oguri, Takuro Furumoto, Ryu Funase, "Time-Optimal Attitude Control of Spinning Solar Sail by Reflectivity Control", Proceedings of 25th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, JAXA 宇宙科学研究所, Sagami-hara, July 27, 2015
13. 五十里哲, 海老沼拓史, 船瀬龍, 中須賀真一, "みちびきの精密非重力外乱モデルに関する研究", 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール, 長崎, November 14, 2014
14. Satoshi Ikari, Takuji Ebinuma, Ryu Funase and Shinichi Nakasuka, "Analytical Non-Conservative Disturbance Modeling for QZS-1 Precise Orbit Determination", Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of

Navigation (ION GNSS+ 2014),
pp.2440-2447, Tampa, Florida, USA,
September 11, 2014

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船瀬 龍 (FUNASE, Ryu)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：70509819

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

小栗 健士朗 (OGURI, Kenshiro)

工藤 匠 (KUDO, Takumi)

古本 拓朗 (Furumoto, Takuro)

五十里 哲 (IKARI, Satoshi)