

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560964

研究課題名(和文) 太陽光圧を積極的に利用した宇宙機誘導航法の実証的研究

研究課題名(英文) Demonstrative Study of Spacecraft Guidance and Navigation Utilizing Solar Radiation Pressure

研究代表者

津田 雄一 (TSUDA, YUICHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50370101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：人工衛星および深宇宙探査において、無燃料で姿勢制御および軌道制御を行う手法として、太陽光圧の利用を考える。太陽光圧を用いた姿勢軌道運動を効果的に抽出できるモデル化(“Generalized Spinning Sail Mode”と称する)を行うとともに、世界で唯一太陽光圧航行を行っている日本の探査機IKAROSの運用チームと連携し、本モデル化結果を実証的に評価した。さらに、本モデルに基づいた、太陽光圧を積極的に用いた無燃料の宇宙機誘導制御手法を提示した。

研究成果の概要(英文)：This research studies an attitude and orbital trajectory guidance and control which utilizes solar radiation pressure, and does not require fuel. A novel dynamics model called "Generalized Spinning Sail Model" has been developed, which effectively extracts the solar radiation pressure effect on translational and rotational motion of spacecraft. The model was validated using flight data of IKAROS, the Japanese world first solar sail spacecraft. Then the result was applied for developing a novel attitude/orbit guidance and control method which only utilizes solar radiation pressure, an unlimited energy source for deep space missions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：誘導・航法・制御 ソーラーセイル 姿勢制御 軌道制御

1. 研究開始当初の背景

2010年に我が国が打ち上げた世界初のソーラーセイル実証機 IKAROS により、「ソーラーセイル」技術が世界的に注目を浴び、ソーラーセイルの実ミッションへの利用が現実問題として認識され始めている。言うまでもなく、我が国はソーラーセイルの実運用データを持っている唯一の国であり、将来の新しい宇宙探査方式の一翼を担う技術として世界をリードしていける分野を保有していることになる。

光圧の宇宙機への影響は、古くから理論構築が行われ、限定的に(具体的には姿勢制御だけの目的で)実ミッションへその効果が積極的に利用された例も存在する。ソーラーセイルによる宇宙航行の概念自体もロケット工学の父ツィオルコフスキーの時代から存在し、著名な研究も枚挙に暇がない。しかしながら、宇宙航行(軌道制御)と姿勢制御の両方に太陽光圧を積極的に利用した例は、IKAROS が世界初であり、真の意味でのソーラーセイルを実現し、運用実績を保有するのはわが国だけである。

2. 研究の目的

太陽光圧によるトルクおよび並進力は柔軟構造物であるセイルの形状の関数であり、また太陽と探査機の位置関係・姿勢関係の関数でもある。つまり、形状、軌道、姿勢間のカップリングを十分な精度で把握することは、太陽光圧を利用する宇宙機的设计パラメータを抽出し、あるいは航法誘導戦略を見出す上で必要不可欠である。本研究は、前述の背景のもと、実データを利用できる優位性を最大限活用し、実データを持つことでしか成しえない研究を行うことを目指すものである。

具体的には、

太陽光圧を受ける宇宙機の詳細ダイナミクスモデルの構築、

詳細モデルに基づき、特徴的な挙動を説明する必要十分なパラメータ群の抽出および縮退モデルの構築、

詳細モデルと縮退モデルの物理的関係の結び付けおよび実データを利用した評価、
光圧を利用した姿勢軌道カップリング運動への一般化および近い将来の実ミッションを想定した姿勢軌道制御への応用研究を行う。

3. 研究の方法

3箇年の研究活動を通して、ソーラーセイルによる宇宙航行技術について、太陽光圧を用いた姿勢軌道制御の体系的な理論構築を行い、日本の探査機 IKAROS の運用チームと連携することで、本理論構築結果を実証的に評価した。

(1) 太陽光圧を含む力学系の詳細モデル構築
できる限り基本原理に忠実な太陽光圧によ

る姿勢軌道運動モデルの構築を行った。また次の3種の数値シミュレーションのための計算コードを開発した。(i)フライトデータからソーラーセイルに特有の姿勢と光学のカップリングを表すパラメータを推定するツール、(ii)探査機の詳細3次元モデルと光学パラメータの可視化ツール、(iii)ソーラーセイル膜面の形状を任意次数の基底関数の合成として表現しその重みパラメータ群をフライトデータへフィッティングするツール。また、IKAROS の実運用データから、姿勢軌道データを抽出し、本解析に適した形式で整理し、データベースを作成した。(目的に対応)

(2) モデルの縮退化、特徴パラメータの抽出

前述の詳細モデルの縮退化を行い、IKAROS の実データとの比較検証を実施した。また、逆問題として、姿勢運動上の要請からセイル表面特性の設計要求を導出できることが想定できるため、その理論構築を行った。(目的に対応)

(3) 理論の体系化、応用的適用研究

(1)(2)の研究成果の総括として、次の3点を実施した。(i)初年度から開発を継続していた解析ツールを汎用性を考慮したソフトウェアとして完成、(ii)本問題に特化した研究会を複数開催、(iii)本解析手法の応用先として次期ソーラー電力セイルミッション構想への適用設計と小惑星探査機はやぶさ2への挙動予測解析を実施。(目的に対応)

4. 研究成果

本研究の成果は、4点に大別される。以下、各点ごとに、成果を記述する。

(1) Generalized Spinning Sail Model の構築

IKAROS 形態の探査機を行う環境を整えるため、太陽光圧を受けるスピン宇宙機について、できる限り光学の基本原則に忠実な詳細な力学モデルの構築を行った。また、宇宙機の3D形状をとり入れた運動解析モデルを計算機上に構築し(図1)、姿勢計算と光圧による力およびトルクのカップリングした問題を解くツールを開発した。

これらをもとに、IKAROS のフライトデータを解析することで、上述モデル化の妥当性を確認するとともに、太陽光圧の影響を表現する、縮退運動モデルを導くことができた。この縮退運動モデルを Generalized Spinning Sail Model (GSSM) と呼称する。

GSSM により、有限要素モデルによらずとも、太陽光圧を受けるスピン型探査機の運動モードをすべて表現することができることを示した。また、IKAROS の運用へ本研究成果をフィードバックすることにより、太陽光圧の影響を強く受ける探査機の軌道制御・姿勢制御を、短時間かつきわめて少ない作業量で実現できることを実証した。

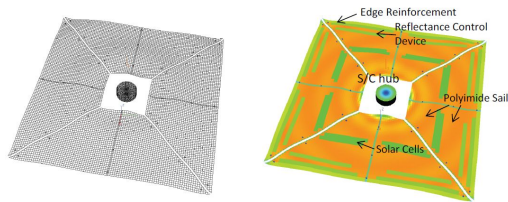


図1 探査機光学有限要素モデル

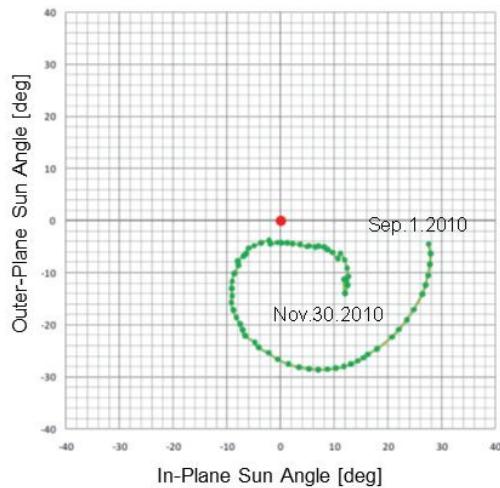


図2 IKAROSにおけるスピン軸の渦巻き運動

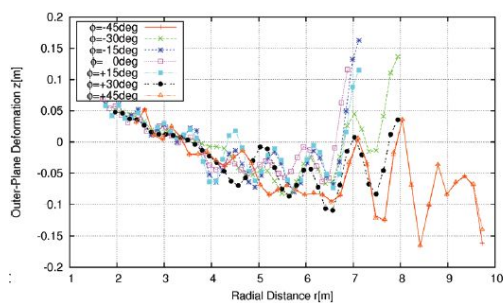
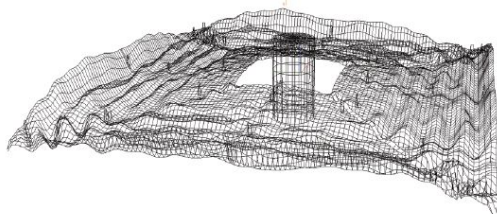


図3 姿勢運動からのセイル形状推定例

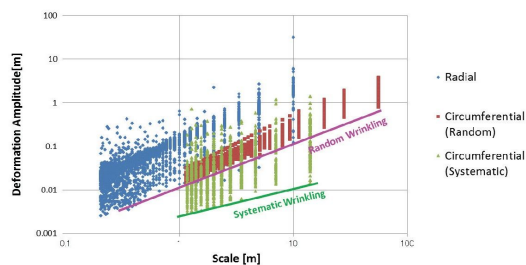


図4 セイル製造要求の設定例

さらに、GSSMを、非スピン型ソーラーセイルの一般化モデルである Generalized Sail Model (先行研究) と、理論的に結びつけら

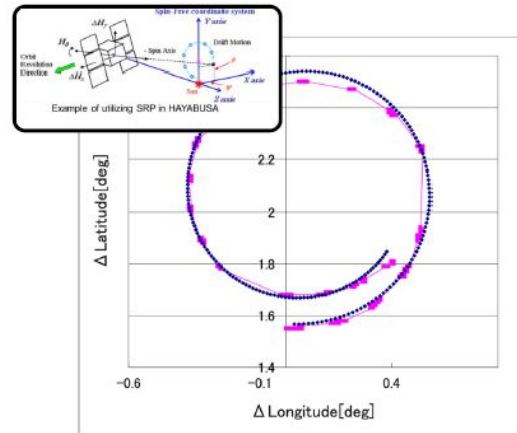


図5 固定太陽電池パドルを持つ探査機の無燃料太陽指向制御への応用

れることを証明し、一般姿勢状態のソーラーセイル宇宙機の力学を体系化することができた。

(2) IKAROSで観察された特異な姿勢運動の解明

IKAROSでは、打上前に予期されなかった特異な運動(スピン軸の渦巻き運動)が観察されたが(図2),GSSMを適用することにより、それがセイルのしわの形状・光学特性の空間分布と、太陽光圧のカップリングにより生じていることを示した。

また、フライトデータとGSSMを照合することにより、他の手法では計測不可能な、軌道上におけるセイルの変形・しわの度合いを定量化することができた(図3)。

(3) ソーラーセイル機の薄膜セイル設計論の構築

(2)で解いた、フライトデータからセイルの変形度を推定する問題の逆問題として、スピン型ソーラーセイル機の姿勢・軌道挙動に対する設計要求から、ソーラーセイルの平面度の要求(製造要求)を導く手法を示した。これにより、従来不明確であった、太陽光圧受光面の設計論構築への道が開けたと考えることができる(図4)。

(4) 次世代ミッションへの応用的適用研究

本研究成果をもとに、次世代ミッションへの応用の検討を実施した。本成果は、ソーラーセイル機のみならず、角運動量を有する探査機一般(スピンの必要は必ずしもない)への適用が可能であり(例:図5)、一般的な宇宙機の姿勢運動を太陽光圧を介してパッシブに安定化できることから、特に長寿命・高信頼性・低リソースの要求が厳しい深宇宙探査機において、有効であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Chujo, T., Tsuda, Y., and Kawaguchi, J.,

Analysis of Sail Deformation Based on Attitude Motion of Spinning Solar Sail, The 29 ISTS Special Issue of Transaction of JSASS (掲載決定,2014)

Tsuda, Y., Saiki, T., Funase, R., Mimasu, Y., Generalized Attitude Model for Spinning Solar Sail Spacecraft, AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.36, No.4, 2013, pp.967-974, DOI: 10.2514/1.59516.

Tsuda, Y., Saiki, T., Mimasu, Y., Yamaguchi, T., Ikeda, H., Nakamiya, M., Takeuchi, H. and IKAROS Demonstration Team, Modeling of Solar Radiation Pressure Effect for Trajectory Guidance of Spinner Solar Sailer IKAROS, Transaction of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol. 10, No. ists28, 2012, pp. Po_4_7-Po_4_12.

Tsuda, Y., Mori, O., Funase, R., Sawada, H., Yamamoto, T., Saiki T., Endo, T., Yonekura, K., Hoshino, H., Kawaguchi, J., Achievement of IKAROS -Japanese Deep Space Solar Sail Demonstration Mission, ActaAstronautica, Vol.10, Issue 2, 2012, pp.183-188, DOI: 10.1016/j.actaastro.2012.03.032.

[学会発表](計 7件)

Tsuda, Y., Saiki, T. and Mimasu, Y., Realization of Minimal Attitude Determination System for Small Spinner Spacecraft IKAROS, Small Satellite Conference, Logan, Utah, USA, 2013.

Tsuda, Y. and IKAROS Demonstration Team, How IKAROS Shape is Designed -Attitude Stability of Spinning Solar Sail, The 3rd International Symposium on Solar Sailing, Glasgow, UK, 2013.

Tsuda, Y., Mimasu, Y., Funase, R., Okano, Y., Design Criteria of Spinning Solar Sail Surface Based on Attitude Dynamics, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Minneapolis, 2012.

Tsuda, Y., Sail Surface Design of Spinning Solar Sail Based on Attitude Dynamics, 22nd JAXA Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagamihara, 2012.

Tsuda, Y., Okano, Y., Mimasu Y., Funase, R., On-Orbit Sail Quality Evaluation Utilizing Attitude Dynamics of Spinner Solar Sailer IKAROS, AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Charleston, SC, 2012.

Tsuda, Y., Saiki, T., Mimasu, Y., Funase, R., Sun-Earth Based Spin Axis Determination for Interplanetary Missions and Its Application to IKAROS, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, Girdwood, Alaska, 2011.

Tsuda, Y., Saiki, T., Mimasu, Y., Yamaguchi, T., Ikeda, H., Nakamiya, M., Takeuchi, H. and IKAROS Demonstration Team, Modeling of Solar Radiation Pressure Effect for Trajectory Guidance of Spinner Solar Sailer IKAROS, 28th International Symposium on Space Technology and Science, Okinawa, 2011.

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

津田雄一(TSUDA, Yuichi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 50370101

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし