

氏 名 山口 智宏

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1489 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Modeling and Estimation Method of Solar Radiation
Pressure for Spinning Solar Sail Spacecraft

論文審査委員 主 査 准教授 川勝 康弘
准教授 吉川 真
准教授 澤井 秀次郎
教授 山川 宏 京都大学
准教授 大坪 俊通 一橋大学

論文内容の要旨

This dissertation investigates practical solar radiation pressure (SRP) modeling and its estimation approach for spinning solar sail spacecraft in order to reveal solar sail dynamics for future solar sail exploration missions.

In many space missions, SRP is considered as a perturbation. However, for solar sail missions it becomes a main controllable force. Without making use of fuel, the solar sail technique expands the possibility for new deep space exploration missions by making use of the introduced momentum by solar photons with a large sail. As the solar sail is deployed to fit inside the launcher fairing, it needs to be deployed on-orbit. Due to the complexity of the sail surface and shape, the refinement of the SRP model is done after the deployment in space. This study concentrates on the SRP modeling with radiometric tracking data, which is available for all the interplanetary spacecraft.

Two SRP models are introduced to simulate the deformation of a large and flexible solar sail. A Spinning Sail Model (SSM) is introduced to describe the SRP force on a sail for given optical properties and spin axis symmetry shape. The SSM characterizes the SRP force with five parameters, however these parameters cannot directly represent the optical properties and shape. In order to implement a mutual transformation between the shape and the SSM model parameters, a Linearized Spinning Sail Model (LSSM) is described assuming a linear deformation as a function of radius. The LSSM consists of three optical parameters and one deformation parameter.

The new SRP estimation approach proposed uses the dynamic link between the orbit and the attitude of the solar sail spacecraft. The method uses Doppler measurements to estimate not only orbit but also attitude parameters. In general, Doppler measurements do not have enough accuracy to estimate the attitude, however the SRP force acting on the solar sail is big enough to accomplish the required accuracy. In this approach, the attitude is expressed using the Spiral Attitude Model (SAM), which is introduced to describe the SRP torque on a spinning solar sail. The common SRP model parameters are introduced by the LSSM and the SAM. This hybrid estimation method is demonstrated using the flight data of the world's first interplanetary solar sail mission IKAROS. For this mission a systematic error on the attitude determination was corrected and the performance of the SRP acceleration is confirmed with 90 % of the expected value based on ground based experiments. Since this hybrid estimation method becomes more accurate for large solar sails due to the large SRP force, this strategy is recommended to be utilized for future solar sail exploration missions.

The analysis of the IKAROS flight data points out a need for SRP modeling before a critical navigation phase. For such cases, attitude optimization for SRP modeling is proposed to perform an efficient refinement for solar sail navigation. Analytical

and numerical methods are used to find the optimum attitude that minimizes the SRP parameter covariance.

The analytical solution is solved while minimizing the covariance of the SRP model parameters using Doppler measurements. The ideal attitude motion is assumed to have a constant angle with respect to the Sun's direction during the characterization phase. It is found that the optimum attitude lies in the orbital plane and the optimum in-plane Sun angle is a function of the Earth phase angle. It is also found that the optimum attitude for the optical parameter estimation is independent from the values of the other parameters. According to the solution, the best geometry to estimate the SRP is presented in terms of a trade-off between solar sail trajectory planning and navigation.

The numerical simulation is used to simulate more practical conditions. Spiral attitude motion and multiple parameters estimation are considered. It is found that the optimum attitude is similar for the ideal attitude motion as for the spiral attitude motion, however the optimum attitude changes dramatically due to the combination of the estimated SRP model parameters. Based on these results, the efficient scenario is discussed for the navigation of critical phases.

博士論文の審査結果の要旨

本研究は、スピン型ソーラーセイルの航法・誘導のために、ソーラーセイルのダイナミクスを明らかにし、効率的な太陽輻射圧のモデリングとその力学的パラメータに関する実践的な推定法を提案したものである。本研究では、主に次の3項目の成果を挙げている。

(1) ソーラーセイルの光学特性と変形を考慮した太陽輻射圧加速度モデルの構築：

これまで太陽輻射圧は主に、平板を仮定したモデリングが行われてきた。しかし、IKAROSのような柔軟な膜面を有したソーラーセイルでは、その変形の影響が小さくない。そこで、スピン型ソーラーセイルのために軸対称の変形を考慮したモデル（Spinning Sail Model：SSM）と線形の変形を仮定したモデル（Linearized SSM：LSSM）を構築した。LSSMのパラメータは、セイルの光学特性と変形量に分離できており、スピン型ソーラーセイルのトルクモデルパラメータと共有することができる。これらのモデルパラメータを推定することで、実際の軌道運動に即した太陽輻射圧加速度を求めることができることになる。

(2) ソーラーセイルの大きな太陽輻射圧による軌道と姿勢のカップリングを利用したハイブリッド推定の提案と実データを用いた検証：

ソーラーセイルでは、姿勢の不確実性が軌道に大きな影響を与えるため、軌道決定の観点からも姿勢精度が重要である。そこで、軌道と姿勢は太陽輻射圧を通じて強く繋がっていることを利用し、軌道と姿勢のハイブリッド推定を提案した。太陽輻射圧加速度とトルクの共通パラメータをドップラーデータから推定することで、膜面自体の姿勢を求めることができ、その結果として軌道決定精度を向上させることができる。この新しい推定法は、ソーラーセイル実証機 IKAROS の実データを用いて実証し、より整合性のあるパラメータを求めることができ、軌道決定精度向上に貢献することができた。その結果、IKAROS の太陽輻射圧加速は打ち上げ前の予測値の 90%であることが推定され、将来のソーラーセイルミッションのための貴重なリファレンスを構築することができた。

(3) 効率的な太陽輻射圧モデリングを実現する最適姿勢の導出：

太陽輻射圧モデリングのための最適な姿勢を解析的、数値的手法を用いて導いた。解析解は、変数を太陽相対姿勢、目的関数を太陽輻射圧モデルの光学パラメータの分散として求められ、太陽-探査機-地球がなす角の関数となっている。導かれた解析解は、ソーラーセイルだけでなく太陽輻射圧を主な誤差源とするあらゆる宇宙機に有効なものとなっている。また、スピン型ソーラーセイルの太陽輻射圧トルクを考慮した最適姿勢を数値シミュレーションで導くことも行った。太陽相対運動の変化量が小さい場合には、解析解と最適姿勢がほぼ一致することも明らかにした。その結果、解析解が現実に即した環境においても有効であることが分かり、将来のソーラーセイルミッションにおける効果的な姿勢運用を提案している。

以上の研究成果は、深宇宙探査機としてのソーラーセイルの軌道・姿勢推定や太陽輻射圧推定に関連して、出願者が独自に手法を構築し、世界で初めて実データで検証した解析となっている。また、解析に使われたソフトウェアについても、出願者独自で開発されたものである。本研究は、ソーラーセイルというこれからの深宇宙探査機の軌道姿勢運用や太陽輻射圧推定に関連して新たな知見をもたらすものとなっており、申請された論文は博士論文としてふさわしいものであると判定した。