

補助事業番号 2025M-431

補助事業名 2025年度宇宙機の光学特性の高忠実化と軌道・姿勢ダイナミクスへの応用補助事業

補助事業者名 九州大学 大学院工学研究院 航空宇宙工学部門 吉村 康広

1 研究の概要

限られた打ち上げ質量と体積で高精度な軌道・姿勢制御を達成することは、宇宙機(人工衛星)の本質的な課題である。本研究では、この課題解決に向けて太陽光圧を積極的に利用した宇宙機のダイナミクスとその制御に着目する。宇宙機に太陽光の光子(フォトン)が衝突し、反射することで太陽光圧が発生する。瞬間的には微小だが、その蓄積は無視できない加速度になる。特に深宇宙探査機等の高軌道に位置する宇宙機にとっては支配的な外力加速度になる。そのため、太陽光圧を積極的に宇宙機の軌道・姿勢制御へ活用しようとする研究が行われている。

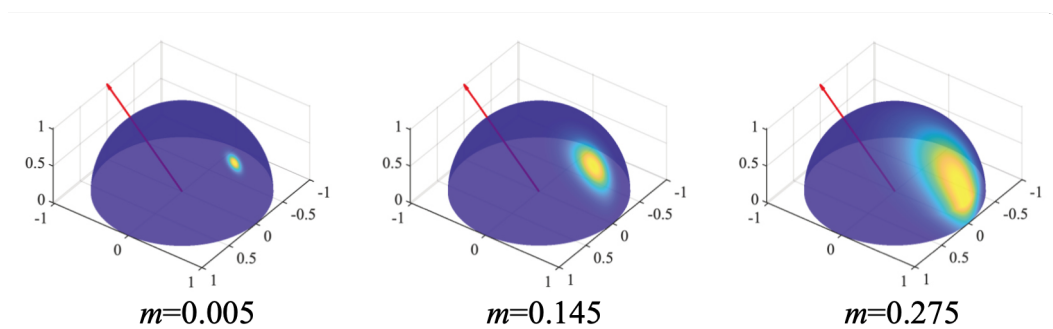
太陽光圧を宇宙機の制御に活用する場合、その力の発生方向と大きさが重要である。それらは宇宙機表面の反射モデルによってモデル化される。従来研究では完全拡散反射と完全鏡面反射という非常に簡易な反射モデルに基づいた計算を行っている。しかし、多様な宇宙機コンポーネントの光学特性を簡易な反射モデルだけで表現するには限界がある。特に、宇宙機を構成する金属や大面積を占める太陽電池パネルの反射特性は異方性を持つことが多く、それは既存の反射モデルでは全く考慮されていない。そこで本研究ではコンピュータグラフィックス分野で用いられる高忠実な反射モデルにより、異方性を考慮した太陽光圧計算の高忠実化を行う。それを活用し、高忠実な太陽光圧によって初めて可能になる宇宙機ダイナミクスの創出を狙い、宇宙機の制御・推定問題へ展開することを目的とする。

2 研究の目的と背景

限られた打ち上げ質量と体積で高精度な軌道・姿勢制御を達成することは、宇宙機(人工衛星)の本質的な課題を背景に、本事業では、宇宙機の光学特性を測定し、より詳細な反射モデルを構築する。それによる太陽光圧計算式を定式化し、太陽光圧を用いた宇宙機の制御へ寄与する。

3 研究内容

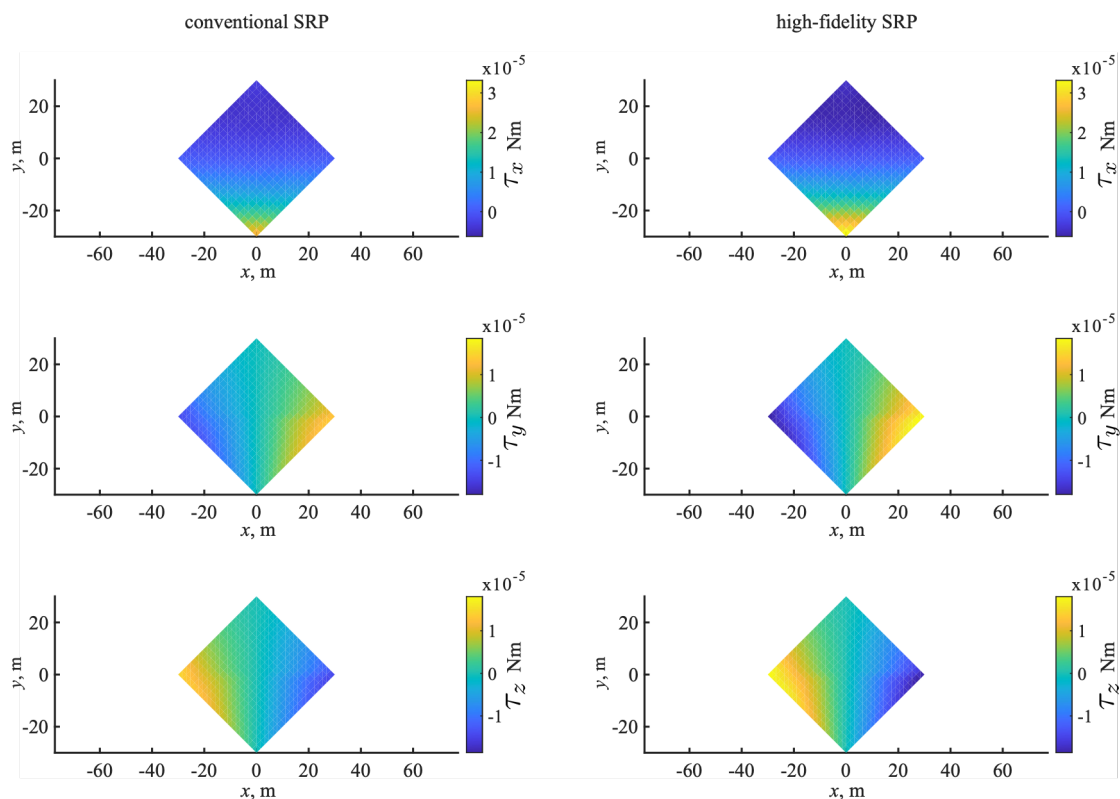
<https://ssdlab.info/2e726b2d6e4080d1aae2c092527e0b6b>



(1) 高忠実な反射モデルによる太陽光圧の定式化

コンピュータグラフィックス分野で用いられる反射モデルがまとめられたサーベイ論文をもとに、文献調査を行なった。定式化の扱いやすさと物理的根拠からAshikhmin-Shirleyモデルによる定式化を行い、球面ガウス関数の重ね合わせで一定の近似精度を持つ解析的な定式化を行った。

(2) 高忠実な太陽光圧を用いた姿勢安定性解析



ソーラーセイルの膜変形を定式化している論文に基づき太陽光圧による姿勢安定性解析を行った。ソーラーセイルの姿勢制御において、太陽輻射圧 (Solar Radiation Pressure, SRP) の不確定性が大きな課題となっている。従来のSRPモデルはランバート拡散と完全鏡面反射という単純化された反射モデルに基づいているが、実際のセイル膜面は表面粗さや変形を持つため、この単純化では精度が不足する。本研究では、コンピュータグラフィックス分野で用いられる物理ベース反射モデルである Cook-Torrance モデルを適用し、より高忠実度な SRP モデルを構築した。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

宇宙交通管理と衝突回避の精度向上に寄与する。低軌道・静止軌道ともに物体数が増え続けるなか、軌道予測の精度は衝突回避運用の根幹である。軌道予測誤差の主要因のひとつが SRP の不確定性で、特に高面積質量比物体や故障衛星では支配的になる。本研究は、反射特性のずれが従来SRPモデルからどの程度の偏差を生むかを物理的に説明する枠組みを提供しており、これを軌道伝播に組み込むことで衝突予測の確率精度が改善する。国内ではJAXAの業務において、衝突予測アラートの削減や限られた回避リソースの最適配分という形で社会的に意味のある効果を生む。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで、宇宙機の相対航法と姿勢推定、ならびに太陽輻射圧 (SRP) モデリングを軸として研究

を展開してきた。従来のSRP高忠実度化研究はもっぱら推力の静的評価にとどまっていたが、本研究では補正パラメータとそのヤコビアンを姿勢ダイナミクスに組み込み、反射モデルの選択がスピンセイルの章動という形で動的挙動に直接現れることを定量的に示した。これは、申請者が2023年に発表した解析的近似を出発点として、姿勢ダイナミクスの領域に展開した発展形である。同時に、章動から反射特性を逆推定する余地を開いた点で、宇宙状況把握の研究にもつながる。教育面では、本研究は研究室の修士・学部学生に対し、光学特性計測・数値積分・姿勢ダイナミクス・推定理論を横断的に学ぶ題材を提供している。研究室は相対航法を継続的に扱っており、本研究の成果はターゲット衛星のSRP不確定性評価という形で、研究室内の他テーマにも波及している。今回の研究は、申請者がこれまで個別に進めてきた相対航法・SRP モデリング・観測可能性解析を一つの体系に統合する位置づけにあり、その統合点として不可欠な役割を担う。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

Yasuhiro Yoshimura, Toshiya Hanada, Uncertainty Analysis of Solar Sail Attitude under High-Fidelity Solar Radiation Pressure, AIAA SciTech Forum 2026.

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

研究紹介動画(<https://ssdlab.info/2e726b2d6e4080d1aae2c092527e0b6b>)

(2)(1)以外で等事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：九州大学大学院(キューシュウダイガクダイガクイン)

住 所：〒819-0395

福岡市西区元岡744

担 当 者：助教 吉村康広(ヨシムラヤスヒロ)

担 当 部 署：工学研究院(コウガクケンキューウイン)

E - m a i l: y.yoshimura.a64@m.kyushu-u.ac.jp

U R L: <https://ssdlab.info/>