

論文の内容の要旨

論文題目 幾何学情報の事前計算テンソル化に基づく
精密太陽輻射圧外乱モデル構築に関する研究

氏 名 五十里 哲

近年、測位衛星の cm 級軌道決定、超低高度衛星、超高精度フォーメーションフライトの実現といったアドバンスで高精度な宇宙機プロジェクトが提案・実現されようとしている。これらの高精度な軌道・姿勢推定が要求されるプロジェクトを実現するためには、従来よりも高精度な外乱モデルが必要となってきた。特に、太陽輻射圧や熱輻射圧といった非重力外乱は、宇宙機の形状・熱光学特性・姿勢に依存したものとなっており、その複雑性から高精度かつ一般性の高い研究例は少ない。また、軌道上の宇宙機の形状・光学特性は事前に作る計算機上のモデルと一致しないことがほとんどであり、実用上これらの不確定性の高いパラメータを軌道上で推定する必要があるが、高精度かつ物理パラメータ推定が可能なモデルは、ほとんど研究されていない。したがって、本研究では、高精度かつ物理パラメータ推定が可能であり、かつ計算時間などの観点からも実用的な非重力外乱モデルの構築を目指す。本論文は、特に、最大の非重力外乱である太陽輻射圧に注目し、精度・計算時間・物理パラメータ推定を両立する計算手法を提案し、シミュレーションと軌道上実データを用いた外乱解析により、その有効性を実証するものである。

上記で示した三つの要求(精度・計算時間・物理パラメータ推定)は、お互いに相反する関係となっており、三つの要求全てを満たすモデルを構築することは難しい。そこで、著者は太陽輻射圧計算に必要な三つの要素である太陽情報・宇宙機形状情報・物質光学特性情報を分解し、計算式を再構築する手法を新たに開発した。この要素分解と再構築により、各情報が持つ特性に適した近似・圧縮を行うことが可能となり、重要な物理パラメータを陽に含みながら、高精度・高速計算が可能な式を導出することに成功した。さらに本論文では、提案手法実用化のための要素研究、シミュレーションによる従来手法との精度・計算時間比較、軌道上実データを用いたモデルの検証について議論し、提案手法の有効性を実証している。

実用化のための要素研究として、陰影を表現するための近似関数の研究、精密宇宙機モデルから事前計算テンソルを求めるための高速並列演算アルゴリズムの開発の 2 つの研究

要素について述べている。陰影を表現するための近似関数の研究として、単位球面上に定義される代表的な基底関数を導入し、近似精度、必要データ量、計算速度の観点で本計算手法に適したものを議論している。高速並列演算アルゴリズムの開発では、精密宇宙機モデルに対する事前演算の計算コストとその高速化について議論している。ポリゴン数が数十万に達する精密宇宙機モデルを用いた場合、単純な計算アルゴリズムでは計算時間が数週間に達し、事前計算といっても実用的でない。よって、グラフィックボードを用いた高速並列演算アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにより、実用的な大型衛星の精密モデルであっても、数時間で事前計算テンソルを計算することが可能となり、実用的な運用が可能となった。このように、理論的な部分だけでなく、実用化のための具体的な問題解決を行ったことも、本論文の成果の一つと言える。

シミュレーションによる提案手法の有効性検証では、従来研究との精度・計算時間の比較を行った。これにより、従来研究と比べて本研究が精度・計算時間の観点で優れている点を示すことができた。また、軌道上実データを用いたモデルの検証として、深宇宙探査機 PROCYON に加わる太陽輻射圧トルク解析という軌道上データを用いた検証を行った。この事例において、軌道上データと一致するように計算モデルを補正するため、物質の光学特性推定を行い、提案太陽輻射圧モデルの有効性を示した。

本論文により、高精度かつ高速計算が可能で、軌道上でのパラメータ推定にも適した実用的な太陽輻射圧解析モデルを提案し、その実用性を評価することができた。さらに、提案手法は太陽輻射圧のために作られたものだが、その計算手法は空力外乱や熱輻射外乱にも応用可能であり、今後さらなる発展性を見込むことができる。以上に述べたことから、今後計画されている、例えば数 cm オーダーの軌道推定精度を必要とする準天頂衛星のような高精度な宇宙機ミッションの実現のために必要な、軌道上非重力外乱の精密で実用的な計算が可能になったと言え、宇宙開発利用の発展に貢献できると考えている。