

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 近澤 拓弥

本論文は「**B-plane Assisted Trajectory Design with Parameterized Swing-by Trajectories** (規格化したスイングバイ軌道と **B-plane** を利用した軌道設計)」と題し、スイングバイ軌道の設計手法を提案したものである。

天体の近傍を通過させることで軌道を操作する技術であるスイングバイを利用した軌道設計では、俯瞰した観点から大域的に好ましい設計解を得るため、スイングバイ後の軌道の選択肢を網羅した上で比較評価し、適切な軌道を選択していくことが望ましい。また探査機運用においても、この網羅性はオフノミナル時に必要となる即応的な軌道設計の実現に寄与する。本研究では、天体接近時の軌道設計で用いられる **Ballistic Plane (B-plane)** に着目し、スイングバイ前後のパラメータ間の写像を **B-plane** 上のパラメータを介する形で導出することにより、多様なスイングバイ後の軌道情報を **B-plane** 上に投影することを可能にして、複雑なスイングバイ設計問題を大域的にかつ迅速に解決する新しい設計手法を提案した。提案された手法は地球-月系における月スイングバイを利用した軌道遷移問題に適用され、その有効性と妥当性が示されている。

論文は全 6 章からなる。第 1 章の序論では、スイングバイ軌道設計の枠組みにおける先行研究を整理して示し、分野の動向と課題をまとめた上で、本研究の意義と方向性を述べている。第 2 章では、本研究で扱うモデルの定式化、軌道設計問題で不可欠となる最適化手法、提案する写像に必要な座標系など、本論文での議論の元になる基本概念が整理・定義されている。第 3 章では、本研究の起点となったスイングバイ軌道設計における課題と手法を整理するため、最近打ち上げられた超小型探査機における、月スイングバイ軌道の設計例が紹介される。

第 4 章では本研究の主題となるスイングバイ前後のパラメータ間の写像が導出される。スイングバイ前後の軌道を、天体への接近速度方向、あるいは天体からの脱出速度方向を示す 2 つのパラメータで規格化した上で、スイングバイ前後のパラメータ間の写像を **B-plane** 上のパラメータを介する形で導出している。ここでのパラメータ選択や、その媒介としての **B-plane** の活用が、スイングバイ設計における評価関数や制約条件を視覚化する上での鍵となっている。さらに、写像を含めたスイングバイ軌道設計を一単位としたパッケージを定義し、それを連ねることで、連続スイングバイの軌道設計も体系的に扱えるよう手法を拡張している。

第 5 章では、提案手法が 5 つの実用的な例題に適用され有効性が示される。まず最もシンプルな例として、月遷移軌道から 1 回の月スイングバイを経由し地球-月系の平面リアプノフ軌道に遷移する設計問題に適用される。スイングバイ後に目標軌道に向かう設計条件が提案手法により **B-plane** 上に写像され、他の条件をも充足する複数の選択肢が **B-plane** 上に投影される中、設計者がトレードオフにより軌道を選択していくプロセスが示される。次の例題では、1 回目の月スイングバイの後、月間遷移軌道 (**Moon to Moon transfer**) に投入するスイングバイ設計を

取り上げ、本手法の汎用性を示すとともに、月に再会合する際の接近速度方向の情報を利用することで、2 回目の月スイングバイについても本手法を適用できることを示し、本手法を再帰的に繋ぎ合わせることで連続スイングバイ軌道も体系的に設計できることを示している。この拡張性を利用し 3 つ目の例題では、平面リアプノフ軌道への遷移を目標とする問題において、1 回の月スイングバイだけで遷移する方法と、月間遷移軌道を介した 2 回の月スイングバイで遷移する方法という、構成が大きく異なる選択肢を同一の **B-plane** 上に投影し比較評価することで適切な軌道を選択できることを示している。4 つ目の例題では地球・月系のハロー軌道への遷移問題を扱って、手法が 3 次元問題にも拡張できることを示し、最後の例題では実際の探査機の運用問題への適用例を扱い、より忠実度が高い力学モデルへの適用性を示すとともに、想定外の事象が起こった場合でも、本手法を用いることで素早くバックアップ軌道候補を把握できることを示している。最後の第 6 章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

このように本論文は、深宇宙探査機のスイングバイ軌道設計について、俯瞰的・大域的な観点から適切な設計解を得ることを目的として、スイングバイ設計における評価関数や制約条件を **B-plane** 上に投影する体系的な手法を提案し、その有効性を示したものである。

特に、目指すスイングバイを実現するために必要な軌道制御量の評価に長けた **B-plane** に、スイングバイの成果・効用を示すスイングバイ後の軌道の特徴量を投影することのメリットに着眼しその手法を具体化した点、およびスイングバイ設計のパッケージを定義してインタフェースを規格化し、連続スイングバイ軌道の設計も体系的に扱えるよう手法を拡張した点が独創的である。近年、国際的な協力枠組みの下で、月近傍あるいは月表面での宇宙活動が活発になってきている。月近傍・表面への物資輸送や月近傍でのインフラ構築のためには、地球・月圏内での効率的な軌道間遷移が必須であり、月スイングバイはその重要なツールである。しかし、それを十分に活用しようとするれば、太陽潮汐力や連続スイングバイを組み合わせた複雑なスイングバイ軌道設計が必要になる。本論文で提案される手法は、複雑なスイングバイ軌道設計問題を体系的に処理する上で有用なものである。

以上、本論文は独自性・有用性を併せ持ち、先端エネルギー工学、特に深宇宙探査学に貢献するところが大きい。なお、本論文の第 4 章、第 5 章の成果は川勝康弘氏との共同研究によるものであるが、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上、2485 字