

審査の結果の要旨

氏名 柿原 浩太

修士（工学）柿原浩太提出の論文は、「Integrated Optimization of Guidance Navigation and Control Strategy for Deep Space Exploration via Stochastic Trajectory Optimization Approach（確率的軌道最適化を用いた深宇宙探査における航法誘導制御方策の統合的最適化）」と題し、英語で書かれ、本文6章および附録からなっている。

深宇宙探査ミッションにおいて、軌道修正に必要な燃料や軌道決定のコストが重要な課題となってきた。軌道修正に必要な燃料を最小化するための研究は従来行われてきているが、それらの研究では解析的に解くための様々な近似が行われており、最適化の余地が残る。例えば、ダイナミクスに線形性を仮定し、軌道決定誤差や制御誤差等の各種の誤差が一定であると仮定されている。また、軌道決定運用を適切に行い効率的に軌道決定誤差を減少させるための研究は近年着目されつつあるが、軌道決定計画と軌道修正に必要な燃料の相互依存性に着目して統合的に最適化するような研究は行われていない。

不確定性を考慮した軌道最適化手法として、近年確率的軌道最適化と呼ばれる手法が着目されている。確率的軌道最適化の手法では、軌道の状態量を確率過程として表現し、各時刻での確率分布に基づいた目的関数や制約条件が設定された最適化問題を解いている。軌道の確率分布は打ち上げ誤差・制御誤差・ダイナミクス誤差等の不確定性を考慮した上で計算されており、その確率分布をパラメータ化して確定的な軌道最適化問題に変換することで数値的な最適化が行われている。これらの確率的軌道最適化の研究では、各種不確定性や軌道の確率分布を考慮した上でロバストな軌道最適化問題を解くことに成功しているが、軌道決定計画や軌道決定誤差を考慮したような研究はあまり行われておらず、本研究の対象とするような軌道決定計画の最適化問題にそのまま適用することはできない。

本論文は、運用コストの大きい深宇宙での軌道決定運用を適切に計画し、また軌道修正のタイミングも合わせて最適化することで軌道修正に必要な燃料を最小化することを目指している。この最適化問題を解くため、近年着目を集めている確率的軌道最適化の手法を発展させ、現代的な枠組みで最適化問題の定式化を行っている。最適化問題の定式化においては、真値と推定値のカップリングに着目し、それらを同時に扱う拡張状態量の概念を導入し、軌道決定誤差を確率的軌道最適化で取り扱うことができるようにしている。そして、確率的軌道最適化の定式化を用いて軌道修正時刻や軌道決定時刻を統合的に数値最適化可能であることを示し、数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示している。

第1章では、近年訪れつつある超小型探査機による深宇宙探査時代における軌道修正及び軌道決定の問題の重要性を述べ、これらの最適化に関する関連研究の調査を行っている。

従来の軌道修正や軌道決定の最適化に関する研究では、両者を統合的に最適化するような試みはなされておらず、また、様々な不確定性を定量的に適切に扱えておらず、確率的軌道最適化の手法を用いてその問題を解決することの必要性を述べている。

第2章では、軌道修正の最適化について必要な論点をまとめている。軌道修正則に基づいて軌道修正を定式化し、ダイナミクス之感度・軌道決定誤差・ダイナミクス誤差などが軌道修正に必要な ΔV に与える影響について考察を行っている。また、終端時刻での誘導精度についても同様に定式化をしており、終端時刻での誘導精度を守りながら軌道修正に必要な ΔV を最小化する問題において、軌道修正時刻や軌道決定方策が ΔV の大きさに複雑に影響を与えていることを示している。

第3章では確率的軌道最適化手法について解説しており、本研究の対象である軌道修正に必要な ΔV を最小化する問題における、必要な定式化に関する課題を整理している。

第4章では、前章で識別した課題を解決するための具体的な定式化を行っている。本研究の手法では「拡張状態量の導入」「状態量や制御量の確率分布のパラメータ化」「目的関数や機会制約の確率分布パラメータによる表現」という定式化により、軌道修正に必要な燃料を最小化する問題を数値最適化アルゴリズムを用いて最適化可能な問題に変換することに成功している。また、適用可能な数値最適化アルゴリズムを複数提案し、それぞれの性質について議論を行っている。

第5章では提案手法の有効性を評価するために、数値シミュレーションを行っている。まず、地球・火星間軌道遷移問題（二体問題）へ提案手法を適用し、複数の数値最適化アルゴリズムによる最適化結果を比較している。また、各種不確定性についての感度解析を行い、それぞれのパラメータの大小により最適な軌道修正時刻や軌道決定方策が変化することを示している。さらに、軌道決定の総回数と軌道修正に必要な ΔV の間にトレードオフ関係があることを示し、そのトレードオフをミッション設計に役立てることが可能であることを示している。次に、二体問題だけでなく、その他の天体の重力や太陽輻射圧を考慮した超小型深宇宙探査機 PROCYON の軌道に対して最適化シミュレーションを行い、より現実的な問題に対しても提案手法が適用可能であることを示している。

第6章では、本論文の結論、提案手法の発展性と今後の課題をまとめている。

以上要するに、本論文は、深宇宙探査における軌道修正に必要な燃料を最小化するように航法誘導制御方策を統合的に最適化する手法を確立し、さらに提案手法の実用性も示したものであり、宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。