

## 審査の結果の要旨

氏名 ジョ ソンミン

本論文は「Study on Model Predictive Control for Flyby Space Mission (フライバイミッションにおけるモデル予測制御に関する研究)」と題し、モデル予測制御手法に着目し、高速フライバイミッションにおける探査機の観測自動化をめざしたものである。その実現のために探査機に搭載された観測装置の指向制御を研究対象とし、高精度かつロバストで計算負荷が増加しない自動制御手法について研究したものであり、7章からなる。

第1章「序論」では、本研究の背景、目的、研究のアプローチ方法、研究の新規性と貢献についてまとめている。

第2章「モデル予測制御」では、さまざまな分野で応用が期待されるモデル予測制御理論の概要を紹介している。特に、多入力多出力システムで制御可能で角速度制限を考慮する必要があるフライバイミッションなどの宇宙機への応用が期待される。本章では、モデル予測制御を高速フライバイミッションに適用する場合の問題点と限界を述べている。

第3章「重み行列選定アルゴリズム」では、モデル予測制御の性能指標として精密性（オーバーシュート）と整定時間を考慮し、両方の性能を満足する重み行列の決め方について検討している。オーバーシュートと整定時間という2つの要求を満足するために、評価関数を新規に定義し、同時摂動確率近似

(SPSA)を用いて、評価関数の値を小さくする重み行列選定アルゴリズムを新規に構築した。本手法は、確率近似法の枠組みを用いているため計算効率を向上できるという利点がある。提案手法の有効性を確認するために、ゼロモーメント衛星の3軸姿勢制御に適用し、その効果を確認している。

第4章「状態と入力のクロス積項」では、モデル予測制御において、いままで考慮されてこなかったクロス積の項の影響を検討している。評価関数の中で制御系の安定条件を考慮し、クロス積項の1つの係数のみで重み行列を容易に表現できることを利用する。クロス積項を考慮した制御系を、第3章で用いたゼロモーメント衛星の3軸姿勢制御に適用し、その効果を確認している。オーバーシュートおよび整定時間の両方について、改善が見られる。

第5章「ロバストなモデル予測制御」では、探査機搭載の駆動系や太陽電池パドルなどの柔軟構造物に起因する外乱に対して、制御系は剛健であることが必要である。また、計算コストを考慮したロバストな制御系が求められている。そこで、外乱包含制御 (DAC) を用いたロバストな制御系を新規に設計している。本手法は、さまざまな周波数を有する外乱を低減することができる。提案手法は、第3章で用いたゼロモーメント衛星の3軸姿勢制御に適用し、その効果を確認している。

第6章「フライバイミッション DESTINY+」では、提案するモデル予測制御の性能について、実ミッションを想定して評価を行っている。最初に DESTINY+ ミッションの概要を紹介している。DESTINY+は、小惑星 Phaethon を相対速度約 33km/s で接近距離 500km ほど軌道を通過する際に、マルチバンドカメラや望遠カメラで撮像し、Phaethon の科学観測を行うミッションである。撮像タイミングと撮像方向を精度良く推定し、制御することが重要である。また小惑星 Phaethon をトラッキングし観測するためには、アクチュエータの角速度制限と入力制限を考慮することが重要である。DESTINY+の探査機パラメータを用いて、従来の PD 制御および一般的なモデル予測制御と本提案手法を数値シミュレーションにて比較している。評価項目としては、カメラの露出時間でのスリップ角を定義している。スリップ角が小さいほど、振れがなく追従できることを意味しており、クロス積項を考慮した提案手法が有効であることを示している。また、探査機搭載のカメラ指向用アクチュエータに起因する外乱や探査機の接近軌道に誤差があった場合についても評価し、 $\pm 150\text{km}$  の誤差があった場合にも、小惑星 Phaethon のトラッキングに成功しており、ロバスト性を示すことができている。

そして、第7章「結論」では、本論文の総括と今後の課題を具体的に記述している。

以上要するに、本論文は、高速フライバイミッションにおける探査機の観測自動化をめざして、探査機に搭載された観測装置の指向制御を対象とし、高精度かつロバストで計算負荷の増加のないモデル予測制御手法を新規に提案、日本が推進している DESTINY+探査計画のフライバイにおいて、数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示し、フライバイ探査機の最接近時の自動制御機能の実現可能性を示すとともに、将来の新しい探査ミッションの可能性を示唆したもので、宇宙工学、制御工学、電気工学への貢献が少なくない。

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。