

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 清水 健介

修士（工学）清水健介提出の論文は、「軌道上での姿勢システムの構築を前提とした衛星設計手法に関する研究」と題し、7章と付録からなっている。

近年、超小型衛星の高機能化が進み、教育だけでなく地球観測や宇宙科学等の実利用に供されるようになり、その結果、1秒角を超える高姿勢安定度が必要な位置天文衛星 Nano-JASMINE のような、高度な姿勢制御要求のある衛星が現れてきた。高精度の姿勢制御系を構築するには、通常、姿勢制御に関連する質量特性や機器の各種パラメータを地上で十分推定し、end-to-end 試験なども含めた地上試験で制御系をチューニングした後に打ち上げることが通例である。しかしそのためには、太陽や星の光、磁気・無重量環境など軌道上の環境を地上で模擬する装置が必要で、超小型衛星の場合、その試験装置自体が時には衛星コストを超えることもあり、また長期の地上試験は超小型衛星の持つ短期開発のメリットを損なう可能性も有する。また、中・大型衛星においても、姿勢系に関する各種のパラメータの推定は地上で十分に実施することは難しく、軌道上でいかに短期間に推定するかは、定常運用の開始時期を左右する大きな技術課題となっている。

本論文では、衛星が動作する環境を完全に実現できる軌道上で、打ち上げ後に上記のパラメータ推定や制御系のチューニングを包括的に実施するという方法論を提案し、その効率のよい実施方策を検討することを目的としている。これを実現するためには、多くの不明な質量特性や姿勢制御センサー、アクチュエータのパラメータをどのような順序で、またどのような姿勢運動のもとで推定していけばよいかを検討する必要があり、そのよし悪しは推定に要する時間の長短にダイレクトに影響を与える。本研究では、推定すべきセンサーやアクチュエータのパラメータ間の誤差伝搬関係をモデル化し、推定に要する総時間を最小化する推定シーケンスを探索するアルゴリズムを導出している。さらに、まだ姿勢制御機能が完全ではない状態で軌道上運用することで衛星が機能停止しないような衛星設計の方法論を、特に質量特性、太陽電池と通信アンテナ等のキネマティックスの観点で議論している。以上の提案や検討は、理論的な考察と、一部シミュレータによるケーススタディで検証されている。

第1章は序論であり、近年の超小型衛星の姿勢制御の高精度化の現状と、軌道上での姿勢系パラメータの較正の必要性を概観し、それをふまえて、本論文の目的と構成について述べている。

第2章では、軌道上での姿勢系パラメータ較正の利点・欠点を議論し、それを実現するには、効率的な推定シーケンス導出の必要性、安全性の確保、地上へダウンリンクすべき情報の選択および軌道上での姿勢システム構築を容易にするソフトウェアシステムの必要

性などの技術課題があることを明確にし、本論文は最初の2課題についての研究を行ったものであるとのスタンスを述べている。

第3章では、まず、安全性の保証についての設計の方法論を提案している。人工衛星の危険状態をもたらす要因として、通信リンクの途絶と太陽発電の不足の2点を取り上げ、特に後者のリスクをタンブリング角との関係で導出し、リスクを小さくする慣性モーメント設計、太陽電池の貼り方や衛星の残留磁気モーメント設計への指針を明らかにしている。

第4章、第5章では、軌道上での姿勢系パラメータ推定のシーケンスを導出する手法を提案している。まず、第4章では、姿勢系パラメータを推定する一般的な方法を定式化し、その式から推定すべきパラメータの誤差の伝搬関係を導出する手法を提案している。その際、どのような姿勢状態での運用を行うかが誤差の伝搬に大きな影響を与えることを示し、どのセンサーを使って、どんな姿勢状態のもとで、どのパラメータを推定するかの3項目を「推定運用」の自由度として定義してその推定精度をモデル化し、第5章での提案手法の基礎を作っている。

第5章では、上記のモデルをもとに、探索によりパラメータの推定シーケンスを探索する手法を提案している。打ち上げ前のパラメータ推定状態を初期条件とし、第4章で述べた推定運用の自由度を使って幅優先探索を実施し、また、パレート最適の考えにより不要なノードの枝刈りを実施することで、必要とするパラメータ精度を持つゴール状態への最短時間のシーケンスが大きな計算負荷なく発見できることを示している。

第6章は、前章で得られた手法を実際の姿勢系パラメータ推定の複数の例題に適用し、提案した手法により最短時間のパラメータ推定シーケンスが発見できることを示したのち、実際の推定運用のシミュレーションで、その妥当性を実証している。

第7章は、本論文の結論と今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文は、特に高精度姿勢制御を要求する超小型衛星において重要な要件となる軌道上パラメータ推定を実施するための技術課題を明確にし、推定運用のモデル化と探索により短時間で目標とするパラメータを推定するシーケンスの導出手法と、その間の衛星の安全性を確保する設計手法を提案し、シミュレーションでその有効性を検証したものであり、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。