

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 清水 健介

人工衛星の姿勢を軌道上で予定通りの動きをさせるためには、人工衛星のダイナミクスを予測し、それに合わせた制御則などをあらかじめ搭載しておく必要がある。そのために、これまで多くの人工衛星は地上でそのダイナミクスに影響を与えるようなパラメータが予定通りになるように設計したうえで試験を行い、設計要求を満たす精度を保証することが求められてきた。そしてその保証されているパラメータで正常に動作するように設計されたアルゴリズムを人工衛星のソフトウェアに搭載するということが基本方針としていた。しかし、近年、軌道上で求められる性能の向上とともに、推定すべきパラメータの精度も高まり、地上での試験では達成できない、あるいは可能ではあるが非常にコストがかかってしまうという問題が出てきている。特に、近年注目を浴びつつある超小型衛星ではその最大のメリットである開発コストの低さやコンポーネントのサイズから来る高い精度要求などにより、地上での姿勢システムの保証が難しく、超小型衛星では高精度な姿勢システムを構築することは難しくなっている。このような問題に対してこれまでの人工衛星では、より高精度な精度が必要な場合は、打ち上げ後軌道上において取得されたデータをもとにシステムの推定を行い、その結果をあらかじめ準備していたパラメータに反映させる「軌道上キャリブレーション」という手法が取られてきている。本論文は、この「軌道上キャリブレーション」というコンセプトをさらに拡張し、軌道上でほぼすべてのシステム推定を行うことで、地上における開発コストを小さくする「軌道上の姿勢システム構築を前提とした衛星システム」という新しいコンセプトを提案している。本コンセプトは人工衛星のサイズに関わらず適用されうるものであるが、研究対象の単純化と本コンセプトの適用効果の大きさから超小型衛星を中心に考えて議論している。

このコンセプトにおけるメリットは、地上での試験を減らせることである。超小型衛星では打ち上げ機会が大型衛星などの相乗りである場合が多く、打ち上げ時期は外的要因で決まりやすい。そのため、打ち上げの期限に迫られ、地上での検証試験が十分にできないことが発生しやすいのが現状である。地上での試験の数自体を減らす、しなくても打ち上げられるという設計にしておくことで、開発の負担を大きく減らすことができる。一方、デメリットは、軌道上での較正が終わるまでシステムの保証がされていない状態で運用をしなければならないというリスクと、その初期の較正運用にかかる時間である。本論文はこのデメリットを小さくしこの新しいコンセプトを実現するために、重要な設計点や必要な概念などを挙げ、その設計手法・設計方針を提案するものである。本論文ではこの新しいコンセプトの実現に必要な課題を、その衛星が運用不能に陥らない「安全性」と全システム推定運用の「迅速性」、推定後のシステム修正による要求達成の「確実性」として挙げている。その中で主に新しい種類の課題となる「安全性」の概念と、多数の不明パラメー

タを軌道上で推定していく運用設計について注目し検討している。

まず、このコンセプトを実現するために最も重要な、このコンセプトで設計された人工衛星が軌道上において機能を停止せずに運用を続けられる安全性に関して、その定義からリスクの計算手法、設計論などを提案している。人工衛星における最も重要な機能のうち、姿勢の状況によって機能不全となるものは、電力、通信、熱の3つである。このうち、通信に関しては、非常に短時間でその機能を果たしうするため、非常に高速な回転運動をしていない限りは機能不能状態にはならないとしている。また、熱に関しても、熱の主な入力源となるものが電力と同じ太陽光であり、電力よりも要求が厳しくなることは通常の設計では考えがたいため、主に電力に関して、つまり衛星表面に配置された太陽電池にあたる太陽光の量に関して主に議論を行っている。初めに、リスク管理の計画として、受動的な姿勢運動によって発電量を確保する手法と、簡易な姿勢制御を行って発電可能な姿勢を維持する手法に分けられる。最もシステムへの要求が少ない受動的な姿勢運動における安全性の計算に関しては、慣性座標系における人工衛星の姿勢運動を解析し、その上で衛星の各方向の太陽光入射余弦の平均値を計算することにより、平均的な発電量を計算している。これに衛星における各方向発電能力や消費量など条件などを入れることで、軌道上における電力不足になる確率を計算することができる。簡易な姿勢制御による発電可能姿勢の維持に関しては、初期の姿勢システムにおいて、どの程度の精度が保証されていれば、想定範囲内の制御が可能であるかをいくつかの外乱環境下でシミュレーションをし、見積もっている。これらにより、姿勢システムが完全ではないこのコンセプトの人工衛星における初期状態でのリスクを計算し、どのような設計にすれば、どれだけリスクを抑えられるかを算出出来るようにしている。それにより、安全性を確保するためにどのような衛星設計をすればよいのかを提示し、それぞれの人工衛星の設計における前提条件に従って検討することに際しての判断材料となるリスクの見積もり方法を提案している。

続いて、もう一つの課題である実際の軌道上における姿勢システム再構成の運用に関して、その各々の運用に関する解析を行っている。まず、衛星の搭載姿勢機器の仮定のもと、推定すべきパラメータを列挙している。それらを推定する手法を出来るだけ汎用的にするために、関係式からの最小二乗法を適用して推定の方程式を記述し、それぞれの推定におけるパラメータや推定誤差、観測誤差の関係式を洗い出した。また、詳細なシミュレーションによりその誤差の感度解析を行い、パラメータ間の誤差の伝搬を見積もった。それらによって多く不明パラメータを持つ姿勢システム推定における、最適な運用形態や推定に必要な最適データ量を見積もる手法を提案している。

また、これらの各パラメータの推定の関係性から全体の推定にかかる時間を短縮することを目的に、全体の運用シーケンスを設計する手法を提案している。まず、軌道上における推定シーケンスをモデル化し、その要素をデータ取得運用、データダウンリンクを含むパラメータ推定、アップリンクによるシステムのアップデートの3種類シーケンスのイタレーションとしている。その中で必要な時間をそれぞれ算出し、その中で支配的なものと

その関係性を見つけることで見積もっている。また、次の運用に移行する際にその運用状態の差によって移行時間を見積り、それも全体のシーケンスにかかる時間に累積される。その上でデータ完成後の推定結果を衛星に反映させることによって、次の推定運用への影響があるかどうかという推定同士の関係もふくめ、全パラメータ推定における必要期間を短縮するための運用計画をパラメータつきの組み合わせ問題として解く方法を提案している。

本研究ではこれらの運用シーケンスの妥当性の確認と具体例として、ある衛星モデルに対して全運用システム較正のシミュレーションを行い、その適用方法をまとめている。また、実際の軌道上にある超小型衛星である PRISM の姿勢システムにも適用し、推定の一部であるセンサのパラメータ推定を本研究の手法を適用して行い、その効果に関して検証をしている。