

審査結果の要旨

論文提出者氏名 澤田英行

近年の天文観測衛星や地球観測衛星における撮像分解能要求の向上に伴い、人工衛星の姿勢指向精度に対する要求が厳しくなっている。本論文は、「人工衛星の精密姿勢制御に関する研究」と題し、精密姿勢指向のうちの特に短期間の指向安定性の改善について扱っている。

人工衛星の主な姿勢制御アクチュエータである玉軸受けフライホイールは、従来は回転数制御ループを介して使用されていたが、本論文ではこれを直接トルク駆動することにより制御系の広帯域化を実現した。また姿勢制御系には、人工衛星に働く環境外乱による角運動量の蓄積を解消するため、磁気トルカなどの外力トルカの併用が必須であるが、従来はこの駆動が不必要な制御トルクを発生してひとつの姿勢擾乱源になっていた。これに対しては、衛星に働く全トルクを0とするようにアクチュエータ駆動則を構築することにより解決している。さらにハードウェアの構成上、制御自由度が残る場合には、それをホイールの回転数変動を最小化することに用いて、ホイール発生振動擾乱を特定の周波数範囲に限定することにより、衛星構造柔軟振動モードの励起を回避することを可能としている。本論文では、これらを「アクチュエータ統合」という考え方を導入することにより、統一的に扱っている。

また本論文では、人工衛星での大きな発生振動擾乱源の一つである玉軸受けフライホイールを、より低擾乱の磁気軸受型ホイールに置き換えること、およびその軸受制御則の提案も行っている。さらに、この磁気軸受型ホイールを搭載した人工衛星に対しても「アクチュエータ統合」の考え方を適用し、高指向安定な制御系を実現している。

本論文は、以下のように5章から構成されている。

第1章では、研究の背景として、最近の天文観測ミッションの紹介とそれに要求される人工衛星の姿勢指向精度要求についてまとめ、これを達成するためには人工衛星に働く各種外乱が障害となること、これへの従来の姿勢制御系での対処法、およびその限界について述べた後、本論文で扱う研究内容について記述している。

第2章では、本論文の内容を理解する上で必要となる基礎知識として、人工衛星の姿勢運動の方程式、姿勢制御用センサならびにアクチュエータのハードウェアの概要、人工衛星に働く各種外乱の詳細、および従来の人工衛星に一般的に用いられてきた姿勢制御方式についてまとめている。

第3章では、人工衛星に働く擾乱そのものを低減する方法の1つとして、磁気軸受型ホイールの使用を提案している。姿勢制御用のフライホイールは、そのロータが回転する際に大きな振動擾乱が発生することが知られており、その原因はロータのマスインバランスと玉軸受の不完全性が主なものである。これを磁気軸受型のホイールに置き換えると、ロータを非接触で支持しているため、後者は完全に無くなり、前者についても適切な軸受制御によって大幅に低減することが可能である。本章では、磁気軸受型ホイールの動作原理、ハードウェア構成について解説した後、低発生擾乱となる軸受制御則について提案している。すなわち、システムの運動方程式におけるラプラス演算子 s をロータ回転数で正規化したパラメータを導入することにより、広範囲のロータ回転数変動ならびに軸受けの非線形性に対応でき、また、ロータのニューテーション減衰制御に伴って生じる振動擾乱を抑えられるホイールロータの制御を H_∞ 制御器により実現している。

磁気軸受ホイールは、その軸受制御により、ロータ回転軸に直交した方向のトルク（傾けトルク）を出力することが可能である。従来、この特性を利用して1台のホイールで人

工衛星の3軸制御を実現するような研究があったが、軸受の傾け可能角が非常に小さいため、角運動量の蓄積が困難、大角度姿勢マヌーバに対応できないなど、現実の人工衛星への適用に制約があった。本論文では、現実的には3軸姿勢制御のためには3台以上の磁気軸受ホイールが必要であるとの前提に立って、ホイールの回転トルクと傾けトルクは特性の異なる別のアクチュエータであるとの位置づけで、両者を適切に組み合わせている。すなわち、上述の方法で発生擾乱を抑えたホイール系を用いて、高周波側の制御はトルク出力に伴う電力消費の小さい傾けトルクにより、低周波側は角運動量蓄積能力の大きい回転トルクを使うことで、高性能な制御系を構築している。

第4章では、「アクチュエータ統合」という考え方を導入して、各姿勢制御アクチュエータの最適な組み合わせ駆動により、高指向安定な姿勢制御系を構築している。従来の玉軸受けホイールは、モータの摩擦トルクが外乱として働くため、ホイールの回転数制御ループを介してこれを補償していた。そのため制御系の帯域が制限されていたが、本論文では摩擦トルクは外乱オブザーバで補償することにより直接トルク駆動を可能とし、制御系の広帯域化を実現している。また、ホイールを、そのトルク出力部（モータ）と角運動量蓄積部（ロータ）にわけて考え、後者は人工衛星本体と同様に制御対象として扱っている。

本論文では、従来の人工衛星ではホイールの角運動量アンローディング用に使われてきた磁気トルカも、ホイールと同列のしかし特性が異なる（応答が遅い、地磁場並行方向のトルクが出力できない）トルク発生装置と考え、両者のトルク配分を人工衛星本体に働く全トルクの最小化とホイール回転数変動の最小化を実現するように行うことにより、姿勢指向安定性の向上とホイール回転数管理の両方を同時に実現している。さらに、耐故障性の観点から実際の人工衛星ではホイール4台以上搭載することが多いことを考え、この冗長自由度を用いてさらにホイール回転数の平均化を図っている。ホイールの発生する振動擾乱の周波数はロータ回転周波数に比例するため、この周波数が衛星の柔軟振動モードと干渉しないようにすることが重要であり、その観点では、ホイール回転数を指定した範囲に抑えることが可能となるこの制御系は、姿勢指向安定性向上に貢献することになる。

さらに本章では、磁気軸受型ホイールを用いた衛星についてもこの考えを適用している。磁気軸受ホイールの場合、回転トルクおよび傾けトルクが存在するため、これと磁気トルカをあわせて3種類のトルク発生装置のアクチュエータ統合を考えている。また、ロータ回転数と傾け角の両者が制御対象として扱われているため、傾け角が大きくなりロータがタッチダウンすることが無いようにトルク分配則を決めている。

設計した制御系の有効性は、計算機シミュレーションによって確かめられている。

第5章では、本論文で得られた成果をまとめている。

以上要するに、本論文は、「アクチュエータ統合」という考え方の導入により、各姿勢制御アクチュエータの特性を考慮した最適駆動則によって、制御帯域の広帯域化、不要制御トルクの低減、擾乱の発生する周波数の限定などを行うことによって、人工衛星の姿勢指向安定性の改善に対して大きな成果をあげている。またこの考え方は、従来の歴史的に開発されてきた各アクチュエータの使用法を制御理論的に根本から見直すことにより、合理的に高性能な制御系を構築しており、実現された制御系の性能のみでなく、その設計手法自体が優れた研究成果であると言え、宇宙工学、制御工学上の貢献が大きい。

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。