

論文の内容の要旨

論文題目 衛星姿勢制御用ホイールの振動アイソレーション法に関する研究

氏 名 初鳥 陽一

近年の人工衛星はミッションの高度化・複雑化にともない、高い指向精度・指向安定度が要求されている。例えば 2006 年夏、宇宙航空研究開発機構（JAXA）により内之浦宇宙空間観測所から M-V-7 号機で打ち上げられた太陽活動観測衛星 Solar-B「ひので」は、観測上の要求から 10 秒間の短期安定度が 60 ミリ秒角という、わが国の衛星では前例のない極めて高い指向安定度が要求された。このような高安定度衛星の実現にはさまざまな課題があり、衛星の内部擾乱源の系統的管理、擾乱の低減化、アイソレーションの高精度化に関する研究が進められている。特に、人工衛星の高精度姿勢制御用アクチュエータとして広く利用されているリアクションホイールは、内部に高速で回転する回転体を有しており、それ自身が主要な内部擾乱源のひとつとなっている。したがって、リアクションホイールには要求される制御トルクを高精度に発生しつつ、擾乱の発生は極めて低レベルに抑えることが求められている。そのため、この課題解決に向けて固有振動モード配置の最適化、熱歪みの低減、潤滑特性の改善、モータノイズの低減などに関するさまざまな研究が盛んに行われている。しかし、次世代の地球観測衛星や天体観測衛星では全周波域にわたり擾乱管理要求がいつそう厳しくなるため、リアクションホイールの加工精度や組み立て精度の向上といった技術的な努力や研究では実現が困難になりつつある。

そこで、リアクションホイールから生じる擾乱を抑制する手法として振動アイソレータが提案されている。振動アイソレータとはリアクションホイールと人工衛星の間にダンパを導入することにより擾乱の伝達を抑制する装置のことである。宇宙用の振動アイソレータは、柔軟構造物の振動抑制や打ち上げ時のロケットからの振動を抑制することを目的としてさまざまな研究がすでになされている。しかしながらリアクションホイールは衛星姿勢制御用のアクチュエータであることから、リアクションホイール用の振動アイソレータ固有の問題として、発生擾乱の伝達を抑えると同時に制御トルクの伝達は維持するという、相反する要求を満たさなければならない。

そこで本論文では、発生擾乱の伝達を抑えると同時に制御トルクの伝達は維持するという、相反する要求をみたす振動アイソレータの設計法に関して述べる。まず、リアクションホイールの内部構造をモデル化し、数値解析を行うことでリアクションホイール発生擾乱の特性把握および定量的評価を行った。その結果、擾乱トルクの主成分は回転体のスピン軸と慣性主軸がずれることによって生じる成分であることを確認し、その周波数はホイール回転周波数に同期することを明らかにした。つぎに、スチュワートプラットフォーム型振

動アイソレータの数学モデルを構築した。この数学モデルにより、スチュワートプラットフォームを設計する上での入力パラメータと出力を明らかにし、擾乱と制御トルクの伝達特性を定式化した。

リアクションホイール発生擾乱とスチュワートプラットフォームの伝達特性を用いて、設計パラメータを探索する手法を三種類提案した。一つ目の手法として、制御トルクの伝達が必要とされる周波数領域と擾乱を低減する周波数領域が異なる点に着目し、評価関数を用いて設計パラメータを最適化する手法を提案した。しかしながら、評価関数を用いた解探索手法は設計にミッション要求を考慮していないため最適化結果は必ずしも要求を満たさないことを明らかにした。二つ目の手法として、衛星のダイナミクスやミッション要求、制御系の特性からスチュワートプラットフォームに対する設計要求を定式化した。この設計要求を用いることで設計パラメータの探索方法を不等式拘束条件付きの非線形最適化問題へと落とし込み、設計パラメータの解探索方法を提案した。提案した手法を用いて、一軸回転テーブルを用いた実験を行ったところ、制御トルクの伝達を維持しつつ擾乱トルクの伝達を抑制できることを確認した。三つ目の手法として、設計パラメータだけでなく制御系パラメータも設計パラメータとして問題を定式化した。このとき、ミッション要求だけでなく、リアクションホイールの仕様や構造的な制約などさまざまな制約・仕様を考慮することで、実際の衛星設計の際に考慮しなければならない制約内で制御系および構造系のパラメータを同時に探索できることを確認した。

最後に三種類の手法を数値解析によって検証することで、提案手法がミッション要求やコンポーネントの仕様を満たした上で解が探索されていることを確認した。

以上により、制御トルクの伝達と擾乱の低減という、相反する要求を満たす振動アイソレーション法を確立した。