

## 審査の結果の要旨

氏名 高尾 勇輝

修士(工学)高尾勇輝提出の論文は「Active Shape Control of Spinning Solar Sails for Orbital Maneuvers Using Boundary and Distributed Actuators (スピン型ソーラーセイルの軌道変換に向けた境界・分散アクチュエータによるアクティブ形状制御)」と題し、本文8章および付録から成っている。

推進剤を消費せず、太陽光の輻射圧を利用して加速を行うソーラーセイルは、次世代の推進システムとして様々な活躍が期待されている。しかし、ソーラーセイルの膜面は極めて柔軟であるため、軌道上で不確定に変形する。これに伴い、宇宙機に作用する太陽光圧が変動し、特に姿勢運動に対して巨大な外乱が発生する。この外乱を相殺しつつ、軌道操作のための姿勢制御を行うためには、莫大な量の燃料が求められる。ところが複雑な無限次元システムで記述されるセイルの変形ダイナミクスを管理する術は未だ確立されておらず、真の意味での燃料フリー宇宙機は実現できていないという課題があった。

そこで本研究では、セイルに共振を励起し、固有振動モードを用いてアクティブ形状制御を行う手法を提案している。さらに形状制御を応用することで、太陽光圧に起因する推力・トルクを操作し、完全燃料フリーで軌道・姿勢制御を行う方法について検討を行っている。本研究は、セイルの振動変形に関する解析的な理論構築を基にして、数値シミュレーションと地上実験によって研究を行っている。

第1章の序論では、本研究の背景と目的を述べている。以降では、第2～5章を第1部としてソーラーセイルの形状制御を扱い、第6～7章を第2部として軌道・姿勢制御に関する解析を行っている。

第1部では、まず第2章で回転する薄膜の振動モード解析を行っている。はじめに、シンプルなモデルを仮定して運動方程式を立式し、固有振動モードの解析解を導出することに成功している。次に、数値解析の結果と比較することで、導出された解析解の妥当性を示している。さらに、解析モデルと数値モデルを複合させることで、仮定の範疇に限定されない、一般的な設計のセイルの振動変形を体系的に表現する枠組みを構築している。続く第3, 4章では、制御

手法を境界制御・分散制御の 2 通りに分類し、それぞれについて詳細な解析を行っている。第 3 章では、内力アクチュエータを使った境界入力による形状制御について解析を行っている。ここでは、第 2 章で導出した理論モデルを用いて、特定の変形状態を励起するための形状制御則を設計し、その妥当性を非線形マルチボディシミュレーションによって示している。第 4 章では、太陽光圧を使った分布入力による形状制御の検討を行っている。特に、太陽光圧という微弱な力で共振を起こすためには、セイルの共振点を正確に狙い撃ちする必要がある。そこで第 2 章の理論モデルを状態空間表現に拡張し、特定の共振点を自動で追尾するフィードバック制御則を構築している。第 5 章では、以上で構築した形状制御の理論を、真空環境下における地上実験によって実証している。実験の結果は、同一条件下で実施した非線形数値シミュレーションの結果と整合しており、本研究が提案する形状制御が実際に宇宙空間で機能することを強く裏付けている。

第 2 部では、はじめに第 6 章で、形状制御の応用による新しい宇宙航行システムを提案している。セイルの変形に伴う太陽光圧の変化を定式化し、従来と比較して高い自由度で軌道・姿勢制御が可能となることを示した。さらに、ソーラーセイルを立体・可変構造物として扱うことで、発電や通信など、ミッション設計において宇宙機の幾何学形状に強く依存する制約条件を大きく緩和する方法についても言及している。次に第 7 章では、第 6 章で構築した軌道・姿勢制御モデルを用いて、リファレンスミッションを実際に設計することで、提案手法であるアクティブ変形による宇宙航行の有効性を立証している。

第 8 章では、結論として本研究で明らかにされたこととその意義を述べている。以上を要するに、本論文はソーラーセイルの形状制御手法を確立し、これを用いて、完全燃料フリーで宇宙航行を実現する術を見出すことに成功した。本成果によって、宇宙機を半永久的に運用することが可能となり、従来の推進システムでは到達不可能であった領域の探査が可能となるほか、衛星の長寿命化やコスト削減にも貢献することができる。また、単に実用的であるだけでなく、軌道・姿勢運動の 6 自由度を含めた無限自由度の力学系の挙動を、単一の入力で制御する枠組みを提供しており、学術的にも意義の大きい研究であると言える。

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。