

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 中村 泰

工学修士 中村泰提出の論文は、「逐次パラメータ推定による微小重力下での静電浮遊炉実験試料の位置・加速度制御」と題し、7章からなっている。

静電浮遊炉を使用した地上実験はこれまでも数多く行われてきており、実験試料の浮遊制御技術もほぼ確立しているが、宇宙での実験に適した制御方法の研究はまだほとんど報告されていない。宇宙では重力の影響を受けずに浮遊制御が行えるため、地上では浮かすことができない比重の大きな物質を熔融させたり、静かな環境で過冷却からの核発生が観察できたりするなど、これまで不明だった物性値の取得や新機能材料の開発等において新たなブレークスルーが期待される。しかしながらそのためには、浮遊炉が搭載される宇宙機の環境外乱下で、試料に作用する加速度を抑えながら試料の位置を正確に制御するという、実験からくる要求を満足することと、発生する制御力を変えてしまう大幅な試料の帯電量変動に対抗して安定した制御を行うことという2つの課題を解決する必要があった。

本論文は、その課題の解決を目指すことを目的としている。PID制御を基本とした「捕捉制御」、「ピンポイント制御」、及び「フリードリフト制御」という3種の制御ロジックを考案し、これらを目的に合わせて使い分けることで、位置制御の正確性、あるいは短時間の無重力状態の維持の特性を選択できると主張している。このうち「捕捉制御」と「ピンポイント制御」は、実験試料を浮遊炉の中心に固定しようという制御で、それぞれ、実験試料の放出フェーズとレーザによる加熱フェーズに適している。「フリードリフト制御」は、試料が自由に運動できる範囲を炉内に設けて、その中にいる限り力を加えないというもので、熔融後の凝固フェーズに適している。さらに、実験試料の帯電量変動に対応するために、逐次パラメータ推定による適応制御を導入し、上記の制御ロジックと組み合わせることで、実験期間を通して一定した精度で浮遊制御が行えると主張している。

また、微小重力環境におけるこれらの制御ロジックの有効性を、小型ロケットによる実際の飛行試験で検証している。帯電量変動に対応するための逐次パラメータ推定には、計算機の負荷が小さく収束性のよい最小二乗法を用いている。上記の制御ロジックに、最小二乗法による推定アルゴリズムを組み込んだ適応制御モデルをMATLABで作成し、宇宙ステーションで予想される擾乱環境をモデル化した数値シミュレーションにより、要求される制御精度が維持できることを検証している。

第1章は序論であり、静電浮遊炉を使用する目的と、実験試料の浮遊制御に関するこれまでの研究動向を紹介し、本研究の位置づけを行い、目的を明確化している。

第2章では、宇宙ステーション用の浮遊炉の特徴と静電浮遊方式の原理について述べ、開発中の静電浮遊炉の基本的な機器構成を説明し、制御の対象となるシステムの特徴を明確化している。

第3章では、浮遊溶融実験における制御要求と宇宙ステーションの環境条件を示し、制御要求を満たすために「捕捉制御」、「ピンポイント制御」、「フリードリフト制御」等の制御ロジックを提案し、解説するとともに、実験試料の帯電量変動に対応するための逐次パラメータ推定を利用した適応制御の基本概念を示している。

第4章では、小型ロケットによる飛行試験を中心に、搭載ハードウェアの機器特性を示すとともに、制御ソフトウェアの設計方法について詳しく述べている。また、飛行試験での試料の運動を分析し、ハードウェア性能及び制御ロジックの妥当性を評価している。その結果、実験中の帯電量の変動幅が明らかになり、固定ゲインでは全実験期間を通して安定した制御を行うことが困難であるという見解を得ている。

第5章では、適応制御を実現するための、最小二乗法による逐次パラメータ推定アルゴリズムを定式化し、浮遊炉制御において使用すべき最適な更新ゲインを決定している。前述の制御ロジックにここで設計した推定アルゴリズムを組み合わせた、浮遊炉制御系の統合システムモデルを用いて、宇宙ステーション等の環境加速度を模擬した条件下で数値シミュレーションにより適応制御の妥当性を検証している。また、比較のために、最適レギュレータに同じ適応制御を適用した場合についても数値シミュレーションを行い、PID制御の優位性を明らかにしている。

第6章では、設計した浮遊炉制御系の、国際宇宙ステーションでの実利用に向けた考察として、帯電量の自動推定機能を生かした運用面での貢献、特殊な装置を使わなくとも環境加速度が計測できることによる軌道上作業の効率化、及び実験中の試料の帯電量の同定により新たに帯電量変動の研究が可能になること等のメリットを示している。また、考案した制御ロジックにさらに工夫を加えることにより、溶融状態の実験試料の固有振動数や粘性が調べられることにも言及している。

第7章は結論であり、提案した制御方法と検討の結果得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を述べている。

以上要するに、本論文は、宇宙で静電浮遊炉を活用するための制御方法を提案し、解析および飛行試験やそれをベースにした数値シミュレーションを通じて、その有効性と適用範囲を検証したものであり、宇宙工学、制御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。