

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 中村 泰

スペースシャトルを利用して宇宙での実験が頻繁に行われるようになって 30 年が経ち、近年はこれに加えて国際宇宙ステーションを利用した大規模な科学実験も行われるようになってきた。宇宙で科学実験を行う最大の利点は、微小重力と呼ばれる無重力に近い実験環境を利用して、地上では見ることのできない物理現象や生命科学現象を発現させて研究できることである。しかしながら実験によっては、スペースシャトルや国際宇宙ステーションが発生する微小な外乱加速度さえも妨げになる場合がある。静電浮遊炉は、クーロン力を利用して実験試料を電気炉内に浮遊させることでこのような環境外乱の影響を緩和できるユニークな実験装置である。

静電浮遊炉を使用した地上での実験はこれまでも数多く行われてきており、実験試料の浮遊技術もほぼ確立しているが、宇宙での実験に適した浮遊制御技術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、比重の大きな物質を熔融したり過冷却からの核発生を観察することができ、これまで不明だった物性値の取得や新機能材料の創生などの新たなブレークスルーが期待される。しかし、そのためには宇宙機の環境外乱と実験試料の帯電量変動という 2 つの課題を克服し、試料の位置制御と印加加速度に対する宇宙での実験条件を満足できる浮遊炉制御システムが必要である。

本研究では、PID 制御を基本とした「ピンポイント制御」とバンバン制御による「フリードリフト制御」という異なる制御ロジックを提案し、これらを実験内容に合わせて選択することで、位置制御の正確性が短時間の無重力かのいずれかを実現できるようにした。一方、実験試料の帯電量変動に対処する方法として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の全期間を通して安定した浮遊制御が行えるシステムを実現した。設計した制御システムの有効性については、小型ロケットでの飛行試験、数値シミュレーション、及び解析等により検証・評価した。

一般に浮遊炉実験では、レーザーによる加熱フェーズで試料を炉の中心付近に保持し、その後の凝固フェーズにおいて試料に印加する制御力を極力抑えることが重要である。このような実験条件を満足するために本研究では、以下に述べる統計的手法を用いて最適な制御システムの設計を行った。

まず、宇宙での科学実験の成立条件となる温度揺らぎに対する考察をもとに、浮遊炉実

験における位置制御と印加加速度に対する許容値を数値化した。次に想定される外乱加速度を駆動力として浮遊炉制御システムの伝達関数に入力し、そこで生じる位置変化と加速度がこの許容値を満足するようなシステム角周波数を探索した。具体的には、周波数領域でこの外乱加速度のスペクトル密度とシステム伝達関数を二乗したものと積を求め、その平方根の3倍（ 3σ 値）をシステム角周波数に関してプロットしたものが、位置と加速度の許容値を満足する範囲を読み取る方法を考案し実行した。

設計した浮遊炉制御システムの成立性と制御ロジックの有効性を検証するために行った、小型ロケットによる飛行試験の結果から、次のことが明らかになった。

- ・ 「ピンポイント制御」を実験試料の溶融フェーズで、「フリードリフト制御」を凝固フェーズで使用した結果、これらの制御ロジックの有効性が確認できた、また、実験要求に合わせて制御ゲインを調節することで、様々な実験に対応できる見通しを得た。
- ・ 溶融フェーズで実験試料の帯電量が大きく低下する現象が発生し、実験試料の位置制御が一時的に不安定になった。このことから、固定ゲインでは帯電量の変動の大きさに対応できないことが確認された。

この結果から、浮遊制御においては帯電量変動に対する対策が不可欠なことが明らかになったため、帯電量の大きさに合わせて制御入力を調整するセルフチューニング型の適応制御を導入することにした。また、帯電量を直接計測する手段がないことから、位置制御の入出力データから帯電量をリアルタイムに推定する逐次パラメータ推定アルゴリズムを考案した。これは未知パラメータの推定計算に最小二乗法を使用するもので収束が早いという観測ノイズに対するフィルタリング効果もあり、宇宙用の比較的低速なプロセッサの処理能力に合ったコンパクトなソフトウェア設計の見通しを得た。

逐次パラメータ推定アルゴリズムにおいては、更新ゲインと呼ばれる過去の予測値の重み付け関数が重要な役割を担っている。その設定いかんによって、推定計算の応答性と安定性が決まってくる。しかしながら、最適な更新ゲインを解析的に求めることは一般的には困難なことから、本研究では制御信号と帯電量変動を模擬したシミュレーションケースを設定し、パラメトリックな手法により「ピンポイント制御」と「フリードリフト制御」のそれぞれに適した更新ゲインを決定した。

こうして設計した適応制御システムを用いて、浮遊制御実験の数値シミュレーションを行った結果は良好で、目標とする制御精度を実現するとともに、実験によって異なる様々な制御要求を満足できる見通しを得た。

本研究を通して、静電浮遊炉による宇宙での浮遊制御実験の実現性についての目処が立ったものと考えられる。同時に、考案した制御方式には様々な応用の可能性があり、軌道上の環境加速度の計測や実験試料の特殊な操作など、静電浮遊炉を利用した新たな実験技術の発見も期待される。