

氏名	成澤 慶宜
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第1061号
学位授与年月日	平成29年3月22日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	並列多重磁気浮上の制御に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 水野 毅 委員 教授 綿貫 啓一 委員 教授 高崎 正也 委員 准教授 成川 輝真

論文の内容の要旨

電磁石の吸引力を利用した磁気浮上系では、能動的な制御によって安定化することにより、非接触で浮上体を支持することができる。これにより、摩擦・磨耗のないシステムを構築できることから、接触支持部を磁気浮上に置き換えることで振動・騒音の低減が可能であり、また粉塵の発生を抑えられることから真空中やクリーンルームなどの特殊環境下で使用できるなど、磁気浮上を利用することで多くのメリットが得られる。このような吸引制御型磁気浮上システムは、基本的には浮上対象となる物体一つに対して、電磁石を1個必要とする。システム全体で見たとき、複数の浮上体を扱うもの、もしくは複数の自由度の運動を制御するといった場合には、その数だけ電磁石が必要となる。また、励磁を行う電力増幅器も、各電磁石に対してひとつずつ用意しなくてはならない。従って、磁気軸受など複数の電磁石を用いるシステムの場合、多くのアンプを使用するため高価であり、システム全体が巨大化する問題があった。

そこで本研究では、単一の電力増幅器を用いて複数の浮上体を同時に制御する並列多重磁気浮上システムを提案している。複数のコイルを接続し、単一の制御入力によって同時に制御を行うことで、浮上に必要な電力増幅器の個数を減らすことができることから、コストの低減や省スペースな磁気浮上システムの構築が可能になると期待できる。

並列多重磁気浮上は従来型の磁気浮上系とは異なった特性を持つ場合があり、このシステムの諸特性の解明が本研究の目的である。並列多重磁気浮上は複数の浮上体の個々の無制御でのダイナミクスが異なるときに可制御となり、理論的には無限個の浮上体を同時に制御することが可能である。しかし、多数の浮上体を扱う場合にはシステムが複雑になりすぎるため、簡単のため浮上体二つの場合である4次系を取り扱い、諸特性の評価を行っている。本論文は第1章から第6章で構成されている。各章の内容を以下に示す。

第1章は序論として、研究の背景となる先行研究、関連研究について説明する。また本研究の目的についても説明する。

第2章は、並列多重磁気浮上の基本的な理論を説明している。状態方程式の導出及び可制御条件の導出を行う。また、ゼロパワー制御を適用した際の状態方程式、及び定常的な応答を示す。

第3章は、電圧制御型の電力増幅器によって、電磁石が並列に接続されている電圧制御型並列接続式磁気浮上のゼロパワー制御に着目している。このシステムでは、制御電圧、片側のコイル電流、およびコイル電

流の和の積分値を局所フィードバックする方式、計三つのゼロパワーコントローラが考えられる。特に片側のコイル電流を用いる方法は、並列二重磁気浮上システムの中でも、並列接続式の場合にのみ適用できる制御方法であり、これらの制御方法の検討は、本システムの諸特性を解明する上でも興味深い研究対象である。この章では、三つの方式のゼロパワーコントローラを包含した拡大系の可制御性を示し、各制御方法の比較結果を数値シミュレーション及び理論解析と検証実験によって示す。

第4章では、これまでの多重式磁気浮上系とは異なり、単一の浮上体の多自由度を支持する磁気浮上系を対象とする。磁気軸受などでは、浮上体の多自由度の運動の能動制御が行われる。そこで、単一の浮上体に対して複数の電磁石を持つシステムに多重式磁気浮上を適用することで、単一の電力増幅器による多自由度支持の実現を目指した。この章では、鉛直並進運動及び水平軸周りの回転運動を制御する2自由度磁気浮上系を対象として、2質点系の物理モデルにおける可制御性を示す。また製作した2自由度制御型磁気浮上装置を用いて、並列2重磁気浮上を実現及びゼロパワー制御による浮上を実現したことを示す。

第5章では、柔軟構造の浮上体を持つシステムに対して並列多重磁気浮上を適用する場合について考察する。二つの質量が単一の剛性で接続された練成系を解析モデルとして、可制御性及び可観測性を検討した結果を示す。

第6章では、第5章までの結果をまとめ、結論を述べて本論文を結ぶ。

論文の審査結果の要旨

本学位論文の審査委員会は2017年2月16日に論文発表会を開催した。その発表を含めて学位論文の審査を行った。研究の概要は以下のとおりである。

並列多重磁気浮上システムは、複数の浮上体を単一の電力増幅器を用いて同時に制御するシステムである。本論文では、二つの浮上体もしくは一つの浮上体の2自由度を制御するシステムについて、その特性の評価を行っている。具体的には、つぎの三項目を扱っている。

- ・ 電圧制御型並列接続式並列多重磁気浮上におけるゼロパワー制御の検討
- ・ 2自由度制御型並列多重磁気浮上の実現
- ・ 柔軟構造部を有する浮上体の可制御性、可観測性

本学位論文は、以下の6章からなる。

第1章は、序章であり、研究の背景、既存の研究の動向、基本的な着想、本論文の目的および本論文の概要について説明している。

第2章では、最初に、電磁石の吸引力を利用した磁気浮上システムの基本モデルと基本定理が示されている。つぎに並列多重磁気浮上の基本構想及び各方式の基本モデルと可制御条件が示されている。ついでゼロパワー制御の基本原理、ゼロパワー制御を適用する場合の並列多重磁気浮上システムの基本モデル及び可制御条件について述べている。

第3章では、電磁石コイルを並列に接続して電圧出力形の電力増幅器を用いて浮上を行う並列多重磁気浮上システムのゼロパワー制御についてより詳しく調べている。この並列接続式電圧制御形並列二重磁気浮上システムにゼロパワー制御を適用する方法として、制御電圧の積分値を局所フィードバックする方法とコイル電流の積分値を局所フィードバックする方法を挙げ、特に後者の場合には、二つあるコイルのうち片側の電流をフィードバックする方法と、両側の電流の和をフィードバックする方法があることを指摘し、これら四つの制御方法と構成されるゼロパワー制御系の特性の関係について検討している。まず、それぞれの場合について積分器を含めた拡大系の可制御性が解析され、可制御となるための条件が導かれている。続いて、各制御方法の優劣の比較を、最適レギュレータの観点から数値解析的に比較している。評価関数における重みを同一としたとき、片側のコイル電流を用いる場合に評価関数は最小値となるが、そのときの応答特性に関しては、整定時間が他の場合に比べて長くなることを示している。つぎに、評価関数について考察し、コイル電流の積分値を局所フィードバックする場合、状態変数に与える重みをコイルの抵抗値の二乗とすることで、全ての場合の評価関数の値及び応答がよく一致することを示している。そのとき、設計された積分フィードバックゲインと与えた重みに相関があることから、制御方法を変更した際の極の変化を解析的に求め、この変化量が抵抗値に関わっていることを示している。最後に実験装置を用いて検証実験を行い、整定時間を比較することにより解析結果の妥当性を示している。

第4章では、2自由度制御型の磁気浮上系における並列多重磁気浮上について論じている。従来の研究では、二つの浮上体を持つシステムが取り扱われてきたが、本論文では、並列多重磁気浮上が複数の自由度の制御にも適用できることを実証している。鉛直並進運動及び水平軸周りの回転運動を制御する磁気浮上システムを対象として、まず並列多重磁気浮上を適用した場合の可制御性を導出し、これまで同様、サブシステムの無制御でのダイナミクスが異なるときに可制御となることが示されている。そして、製作した実験装置を用いて、浮上を実現したことが示されている。本装置では、電磁石を差動構造としており、四つの電磁石を単一の電力増幅器で制御する構成となっている。差動型電磁石を用いることで、二つの磁気支持部においてバ

イアス磁束を与える永久磁石を異なるものにすることができ、これによって、可制御性に関わる無制御でのダイナミクスを容易に変更できるような工夫がなされている。また、浮上実現のためのゲインチューニングが従来型の磁気浮上系と比較して困難であることから、根軌跡を利用してゲインと特性の変化の関係を検証し、特に速度フィードバックゲインの調整は、二つ同時にある比率をもって調整することで、安定化させやすくなるという考察が行われている。この方式での浮上特性は、ステップ応答及び周波数応答によって評価されている。これらの結果から、片方の支持部に外乱が作用した場合には、どちらの支持部も同位相で振動するという特徴を持つことが示されている。また、この方式でもゼロパワー制御が適用可能であることが実験的に示されている。

第5章では、二つの質点が単一の剛性で連成された浮上体を持つモデルを考案し、その可制御性と可観測性が検討されている。このようなシステムは柔軟構造部を有する浮上体の磁気浮上系を簡単にモデル化したものと捉えることができることから、並列多重磁気浮上が柔軟な浮上体を制御可能かどうかの検討となっている。可制御性を考える上で、浮上体にかかる磁気力と重力の静的な釣り合い条件を考慮することにより、可制御となるための条件はこれまでの並列多重磁気浮上システムと同一となることが示されている。この結果は、柔軟構造であることは可制御性に影響しないことから、並列多重が適用可能であることを示している。可観測性の検討では、まずセンサレス浮上が可能であるかの考察が行われ、可観測となるためには、解析モデルの剛性がある値を取らないことが条件となっていることが示されている。また、一方の変位のみ観測した場合には、この剛性がゼロでなければ可観測性が成り立つことが示されている。したがって、可制御性と対照的に、柔軟構造であることは可観測性に影響することが示されている。

第6章では、一連の研究の成果がまとめられている。

以上のように、本研究は、並列多重磁気浮上の制御について、これまでにない新規性のある重要な知見を明らかにしている。また、本学位論文の第3章の主要部分は、日本機械学会論文集に掲載されている。第4章の主要部分は、日本機械学会論文集に投稿され、掲載決定の通知を受けている(いずれも第1著者)。加えて、フルペーパーによる査読のある国際会議会議録に1編が掲載されている。

これらのことから、本学位論文審査会は、本学位論文が博士(工学)の学位にふさわしいものであると判断し、全員一致で合格と判定した。