

氏 名	MAX EIRICH
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 752 号
学位授与年月日	平成 21 年 9 月 18 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	Repulsive Magnetic Bearings Using the Motion Control Of Permanent Magnets (永久磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受)
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 佐藤 勇一 委員 准教授 高崎 正也

論文の内容の要旨

This dissertation is organized as follows.

Chapter 1 is an introduction of the research, which describes the background of passive magnetic bearing, the proposed concept for the repulsive magnetic levitation and the objectives and scopes of the project.

Chapter 2 describes all analytical modeling of the applied control systems and physical modeling and design of the magnetically levitated cylinder. A method of changing radial stiffness is also described here.

In the Chapter 3 are presented: physical modeling and simulation of the experiment with magnetically levitated inverted pendulum.

The magnetic forces are always not linear and if the permanent magnet form is specific, as in a majority of cases, not easy to calculate. The simulation result regarding magnetic forces for the experiments from Chapters 2 and 3 and an overview of magnetic field and forces simulation and calculation possibilities at the present shown in Chapter 4.

Chapter 5, after the detail description of the used actuator, presents and describes in detail the experimental results of the achieving of levitation, changing the stiffness on levitated cylinder. The two-degree-of-freedom control using repulsive levitation is the third part of Chapter 5.

Chapter 6 presents conclusions and the description of the concluding remarks regarding this research work.

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は2009年8月18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。

磁気浮上の代表的な方式の一つとして、永久磁石間の反発力を利用した方式がある。永久磁石反発形磁気浮上は、反発力が働く方向（浮上方向）には無制御でも安定であるという利点を持つが、反発力の方向と垂直な方向（横ずれ方向）には不安定であるという問題を持っている。この問題を解決する一つの方法は、支持側永久磁石をアクチュエータで駆動して、倒立振子と同じ原理によって横ずれ方向の運動を安定化することである。この方法の有効性は、回転体の半径方向の4自由度の運動を永久磁石の反発力を利用して受動的に支持し、アキシャル方向の1自由度の並進運動を永久磁石の運動制御を利用して安定化する形式の反発形磁気軸受によって確認されてきた。本論文は、永久磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受を対象として、個別制御の導入による剛性制御及び2次元倒立振子の実現を行っている。

本論文は、以下の6章からなる。

第1章は、序章であり、研究の背景、磁気浮上方式の分類と原理、運動制御を利用した磁気浮上の原理、新たに製作した反発形磁気軸受及び磁気浮上式2次元倒立振子の概要、本研究の目的および構成について説明している。

第2章では、支持側永久磁石の個別制御を導入した反発形磁気軸受について述べている。対象とする磁気軸受は、回転体の半径方向の4自由度の運動を永久磁石の反発力を利用して受動的に支持し、アキシャル方向の1自由度の並進運動を永久磁石の運動制御を利用して安定化する形式のものである。従来の装置では、二つの支持側永久磁石が機械的に結合されており、両者の距離は一定に保たれていた。それに対し、本研究では、二つの支持側永久磁石の機械的結合をなくし、個々に制御する方式を提案している。このような方式を採用すると、永久磁石間の距離を変えることによって半径方向の軸受剛性を調整することが可能となる。本章では、まず、このような発想に基づいて製作した水平型磁気軸受のモデリングが行われ、対称性に注目することによって簡易モデルが導出されている。また、磁石の運動制御用アクチュエータとしては、ボイスコイルモータ（VCM）が用いられているが、その励磁用アンプとして電圧出力形アンプを用いた場合のモデルも導出されている。つぎに、半径方向の剛性を調整するには、磁石間の距離を任意に設定できるような制御系が必要であることが述べられ、そのような制御系の設計方法について詳細に論じられている。具体的な制御則として、状態フィードバック、PD制御、I-PD制御が検討されており、さらに、新たに簡易I-PD制御が提案されている。

第3章では、反発形磁気浮上機構を利用した2次元倒立振子について述べている。これは、浮上対象物となる回転体の底部に永久磁石を取り付け、これと支持側永久磁石との間に作用する反発力によって回転体の重量を支持し、水平方向の2次元的な運動を支持側永久磁石の運動制御によって安定化するものである。本章では、このような構想に基づいて製作した2次元倒立振子のモデリングが行われ、さらに回転体の上部にも同じ機構を設けることによって半径方向の4自由度の制御を可能とする磁気軸受のモデルも導出されている。

第4章では、電磁界解析ソフト（JMAG）を用いて行ったシミュレーションについて述べられている。まず、二つのリング状永久磁石間の横ずれ係数を評価し、ついで、二つの支持側永久磁石間の距離を変化させたときの軸受剛性が計算によって求められている。さらに、二つのリング状永久磁石間の横ずれ係数及び反発力が評価されている。

第5章では、実験の方法、装置および結果について述べられている。最初にアクチュエータであるVCMの特性が調べられている。電流出力形アンプを用いた場合に比べて、電圧出力形アンプを用いると、大きな減衰が得られることが実験的に示されている。また、磁気浮上式2次元倒立振子において、支持側磁石の駆動に用いられているX-Yテーブルの概要及びその特性が示されている。つぎに、個別制御を導入した磁気軸受において、3章で述べた各制御方法を適用したときの結果が示されている。実測された半径方向の軸受剛性は、4章で示したシミュレーションの結果とかなり一致していることが確認されている。また、支持側永久磁石と浮上側永久磁石の相対変位が零の場合の剛性に比べて、相対変位を0.75mm設けた場合には、剛性が約20%低くなることが実験的に確認されている。さらに、2次元倒立振子では、水平面内の2自由度の運動を安定化することに成功している。最後に、製作された半径方向の4自由度の制御する磁気軸受装置の概要が示されている。

第6章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は、永久磁石の運動制御を利用した反発形磁気軸受において、軸受剛性制御や2自由度安定化制御など、新しい機能や機構の実現に成功している。よって、本学位論文審査会は、本論文が博士（工学）の学位にふさわしいものであると判断する。なお、本論文に関しては、第一著者として、Automatisierungstechnik Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik (Methods and Applications of Control Engineering and Information Technology)に1編が掲載可となっている。また、国際会議からの推薦論文で構成されている単行本に1編が採録されている。さらにフルペーパーによる査読のある国際会議会議録に第一著者の論文3編が掲載されていることを付記する。