

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289052

研究課題名(和文) 機械制御式磁気浮上機構の研究

研究課題名(英文) Magnetic Suspension System Using Mechanical Control

研究代表者

岡 宏一 (OKA, Koichi)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：10160649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：電磁石を用いずに機械的な吸引力調整方法を用いて磁気浮上機構を構成することについて、検討を行った。円盤磁石とコア材を用いることによって磁路可変型磁気浮上機構においては、2自由度浮上が可能なことと、減速機を解することにより省電力の浮上機構を構成する可能性があることを示した。また浮上体の複数の自由度を制御することが可能となる機構を示した。最後に機械的な非接触電力伝送機構を用いることにより、無給電で動作可能な磁気浮上スライダを構成できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Various magnetic suspension systems with mechanical control has been verified. The feature of these system is no use of electromagnets for levitation control. A variable flux path control mechanism has been developed by using a circular permanent magnet, magnetic cores, and a dc servo motor with a reduction gear. The suspension system using this mechanism can suspend two iron balls simultaneously. And some multi-degrees of freedom suspension systems with mechanical control magnetic suspension system are verified. A non-contact slider system with mechanical non-contact power supply system has been proposed. It uses open-end generator. We studied about suitable design of the generator for zero-power control method.

研究分野：メカトロニクス・モーションコントロール

キーワード：磁気浮上 運動制御 吸引力調整 永久磁石 可変磁路制御

1. 研究開始当初の背景

磁気浮上機構は、磁気力を用いて対象物を非接触で支持する機構である。機械的な接触による摩擦がないこと、塵埃などを発生しないこと、潤滑油が不要であることなどの利点があり、高速回転用軸受、磁気浮上列車、クリーンルーム中の搬送装置などに利用されている。これらの多くの磁気浮上装置や磁気軸受には、電磁コイルを用いた電磁石が使われているが、永久磁石を用いた種々の磁気浮上も提案されている。

永久磁石を用いた磁気浮上機構の特長はコイルがないため、発熱の問題が無視できることや、コンパクトな機構を実現できることである。浮上力の調整方法として、種々のものが提案されている。リニアアクチュエータを用いて空隙を制御し、吸引力や反発力を調整する方式のものや、磁路中の磁性体の位置により磁路を変化させて浮上力を調整するものなどが提案されている。

しかし、これらの機械制御による磁気浮上システムには、浮上体が一度吸着してしまうと制御できないことや磁極の極性を変えられないという問題があるため、かねてから研究代表者は、円盤磁石と回転モータを用いて浮上システムを構成することを提案していた。この浮上システムは、回転モータに取り付けられた円盤磁石の回転角度を制御することにより、円盤磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力を制御するものである。このようなシステムの開発を行い、その設計方針を明らかにするとともに、浮上システムの特長を活かした浮上システムを検討することは重要なテーマであると考えられた。

また、リニアモーターカーなどの浮上体上に電力を供給するために、非接触給電技術が用いられるようになってきた。これは、非接触で支持されている浮上体に対し、パンタグラフなどの機械的給電機構を用いることは、環境に影響を及ぼすなどの問題が発生するためである。この問題解決のためには、浮上体に電池を搭載することが用いられるが、これには給電の問題があり、長時間の利用は難しいことが指摘されていた。

従来、非接触給電技術には、磁気回路中の磁界変化を用いるトランスと同様の原理が用いられてきたが、近年磁気や電気の共振を用いて電力を伝送する方法が用いられるようになってきた。磁気浮上機構にもこのような非接触給電技術を積極的に応用することが考えられた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、機械制御による高機能な磁気浮上機構を開発し、その設計方針を明らかにすることである。ここで機械制御とは、回転や直動の運動を制御することであり、機械制御により浮上体の支持力を調整する浮上機構を研究対象とする。

具体的な目標として、三つのことについて

研究を行う。一つめは、回転形のモータ制御による浮上機構の性能と設計方針を明らかにすること、二つめは、機械制御を用いた浮上機構の多自由度化をめざすこと、三つめは機械運動や磁気（電気）共鳴を用いて、浮上体に電力を供給した浮上機構を構成すること、である。それぞれの目標について、浮上機構の理論、実験面から浮上可能性、性能を検討し、浮上機構の設計方針を明らかにすることを目標とする。

本研究の一つ目の目的は、回転型の磁気浮上装置を用いて、浮上機構の有用性について検討し、浮上システム開発することである。まず、浮上機構の設計を行い、減速機付き回転形モータを用いた装置を試作する。減速機を含めた浮上性能を理論と実験の面から評価する。次に、減速機による省エネ浮上装置としての性能の検討を行う。提案のシステムでは、減速機を用いることで重量物を浮上させた場合のモーターの定常電流を減じることが可能である。この性能について、評価、検討する。また、1つのモータで2つの浮上体を浮上するデュアル浮上システムの検討を行い、理論的に実現性を確認し、浮上実験による検討を行う。

本研究の二つ目の目的は、機械制御式浮上機構の多自由度化の検討である。2組の機械的磁気浮上機構により、2つの永久磁石の運動を機械制御により行い、垂直平面内の2自由度の制御を行うシステム、および2つの機構を使って3自由度の浮上体の位置を制御するシステムを開発することを目的とする。具体的な検討事項は、以下に示すとおりである。まず、浮上機構の要素における検討を行った後、多自由度浮上機構の構成を検討する。要素の検討結果を統合し、多自由度浮上機構に適した構成を用いて、実験装置を施策する。実験装置を用いて、多自由度浮上機構の検討を、理論と実験から評価、検討を行う。

3つ目の目的は、機械的な運動を用いて、浮上体に電力を伝送し、浮上体が完全非接触で給電の時間なく駆動できるシステムに対する検討を行うことである。具体的な検討事項は、消費電流の非常に小さい非接触スライダを構築し、オープンエンドジェネレータ(OEG)を用いた給電システムを付加し、それらを統合した装置を開発することである。このために電磁石の検討、ジェネレータの軸心が偏心したときの検討、および零パワー制御コントローラの構築の検討、などを行い、試作装置に対して、理論と実験から解析を行い、両者の結果を比較検討し、システム構築することを目的とする。

提案した浮上システムは独自のシステムであり、また機械的な浮上システムを用いた多自由度化の統括的検討は、報告例がない。よって、これらの研究は、独創的であり、かつ非常に有用なものであると考えられる。また、本研究で提案する磁気浮上機構の設計方

針が確立することによって、重量物の非接触浮上装置、磁気浮上機構の省エネ運転、微小浮上機構の開発に役立つと考えられる。

3. 研究の方法

(1) 回転磁石を用いた磁路可変型磁気浮上機構の開発

①浮上装置の設計・制作

提案する磁気浮上機構の概略と原理の図を図1に示す。図に示すように円盤型永久磁石が回転することにより、磁路が変化し、対象物の浮上支持力を調整できる。この原理に従って装置を設計した。回転アクチュエータには、バックラッシュのできるだけ少ない機構として、ハーモニックドライブ減速機を介したDCモータを用いた。減速比は50である。永久磁石は直径が30mm、厚さが10mmの円形ネオジ磁石を径方向に着磁したものを利用した。コントローラは、DSPを用いたものを利用した。円盤磁石と浮上体位置を検出し、最適レギュレータ理論によるフィードバック制御を行った。

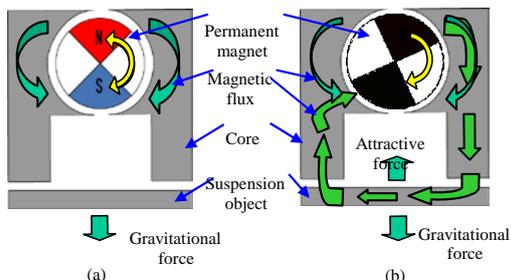


図1 磁路可変型磁気浮上機構の原理

②浮上性能の検討

提案する浮上機構の特長の一つは、機械的な駆動機構を用いており、減速機を介することにより、定常電流を減らせる可能性があることである。電磁石の場合はコイルで発生した起磁力を増幅することはできないが、提案する機構であれば、可能である。ここでは浮上機構の性能の検討として、浮上体の重量をどの程度の少ない電力で支持することが可能かについて評価した。具体的には、浮上体の重量を変化させて、浮上支持するために必要な電流を計測し、検討を行った。

③デュアル磁気浮上機構の検討

図2に示すように、今回試作する磁気浮上機構は、磁極が2つある。この2つの磁極の両方に浮上体を配置することにより、2つの浮上体を同時に浮上させるシステムを構築する。左右の浮上体に働く吸引力を、空隙と磁石の角度に基づいて解析し、平衡位置での各変数に対する係数を得ることにより浮上システムのモデルを、作成する。得られたモデルに基づいて、コントローラを設計する。浮上の数値シミュレーションと、浮上実験を行い、両者を比較し検討する。

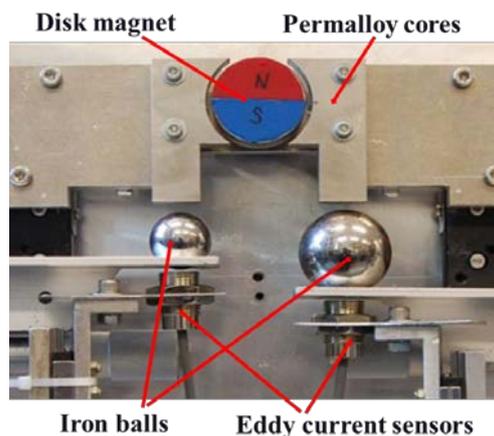


図2 デュアル磁気浮上装置

また、2つの浮上体の浮上だけでなく、棒の上下および回転の運動の2自由度の浮上を行うシステムについて検討を行った。2つの浮上体を浮上させる場合に比べ、平衡状態でのトルクが零となることなどの検討が必要であると考えられる。

(2) 機械運動制御による多自由度制御

①平面内2自由度浮上装置

図3に示すように、ひとつの浮上体を2つのVCMを使った磁石位置制御機構によって浮上させて、平面内の上下および左右の2自由度を浮上制御させる装置を試作し、検討を行った。検討事項は、浮上体の2自由度の運動をどのように与えるか、および磁石位置と浮上体との空隙距離による浮上体の横方向の安定性についてである。また、図に示すように浮上体の横方向の運動を検出し、能動的に制御することによる浮上体の安定性の向上についても検討を行った。

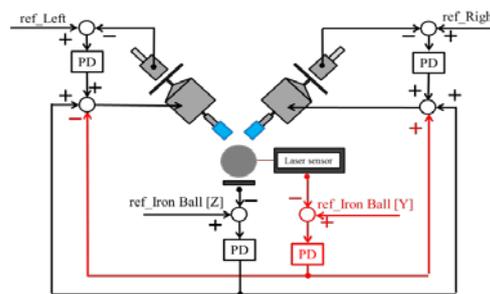


図3 zx 面内2自由度浮上システム

②3自由度浮上システム

図3の2自由度浮上システムに磁石駆動装置を1つ加えることにより、浮上体の並進3自由度を制御できる装置を試作し、浮上実験を行った。3つの永久磁石の位置関係と水平方向の安定性について検討を行い、開ループで安定な範囲に永久磁石駆動機構を配置した。3つの永久磁石による上下安定性を保ちながら、浮上体の水平面内位置決めができることを確認した。

(3) 機械運動による非接触給電を用いたり

ニアスライダの開発

①リニアスライダの設計と試作

機械的な運動による非接触給電機構を用いて、電池などへの給電時間をなくした特長を持つリニアスライダを設計し、試作した。その概要を図4に示す。スライダは、ハイブリッドマグネットにより浮上支持され、リニアモータによって駆動される。スライダの上部には、駆動用のリニアモータが配置し、下部には給電用のOEGを取り付ける。このようなスライダを完全に非接触支持するためには、

a)省エネルギーの浮上方法を用いること

b)給電機構を非接触化することと、

が必要である。今回は、a)のために浮上支持磁石に永久磁石と電磁石のハイブリッドマグネット (HEM) を用いて、浮上時にゼロパワー制御を用いて浮上支持させた。また、b)の給電機構としてOEG機構を用いた給電装置を用いた。ゼロパワー制御を用いた場合、スライダに積載物の荷重が加わったときには浮上位置が変化する。このとき、給電機構のロータは地上側に、ステータはスライダ側にあるため、それらの軸が偏心する。このような場合でも安定した電力を給電する設計を行った。また給電のトルク変動が浮上に影響を及ぼさないように、トルク変動の少ないジェネレータの構成を検討した。

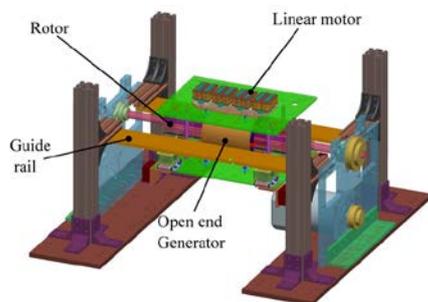


図4 機械的非接触給電機構を持つ磁気浮上スライダ

②スライダの浮上制御と給電性能の評価

試作装置を用いて、ゼロパワー制御が可能であることを実験的に確認した。また浮上中に、急に積載重量が加わったときなどを模擬した実験を行い、安定浮上が保たれていることを確認した。

ジェネレータの性能評価として、軸に偏心があった場合に、どの程度給電が変化するか、またスライダに必要な電力を得ることができるのかを評価した。

4. 研究成果

(1) 回転磁石を用いた磁路可変型磁気浮上機構の開発

①浮上実験および浮上性能の評価

吸引力を実験的に解析した結果、ほぼ磁石角度に応じて正弦波形になることが確認で

きた。この結果に基づいて、浮上システムのモデルを制作し、最適レギュレータ理論に基づいてフィードバックゲインを求めた。浮上コントローラをDSP演算装置を用いて、制作し、浮上実験および、数値シミュレーションを行った。両者はほぼ同様の結果を示し、提案した磁気浮上機構の実現性を証明した。

②浮上性能の検討

浮上体の重量に対する駆動電流を検出し、浮上支持力を比較的小さい電流で行えることを確認した。図5に結果を示す。10N程度の浮上体を0.1A以下の電流で支持できることがわかる。この値は、減速比を大きくすることにより、より小さくすることが可能である。

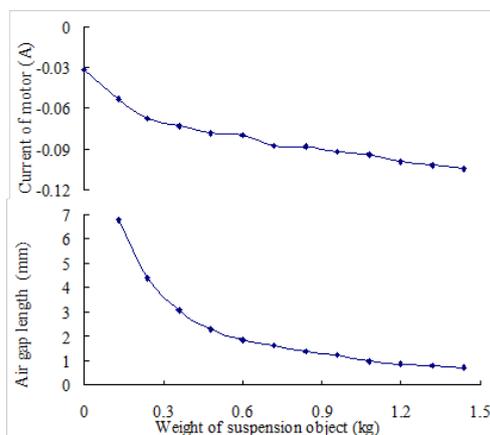


図5 浮上体重量と駆動電流、空隙との関係

③デュアル磁気浮上機構の検討

デュアル磁気浮上装置を用いて、2つの浮上体を1つの永久磁石の回転制御で浮上させる実験を行った。結果を図6に示す。図は上から駆動電流、磁石の回転角、左右の浮上体位置、左右の浮上体目標値であり、左側の図が数値シミュレーションを、右側の図が実験結果を表している。また、左の浮上体位置に対しステップ入力があったときの応答を示している。実験結果の応答のほうが収束が遅いことがわかる。また、図よりステップ入力に対する動きが、逆であることがわかる。これは、本システムには、複数の安定平衡位置が存在するために、応答時の収束の過程により、収束する平衡位置が変化するためであると考えられる。

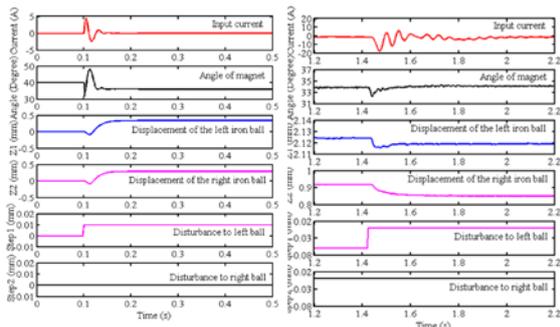


図6 デュアル磁気浮上機構のステップ応答

(2) 機械運動制御による多自由度制御

① 平面内 2 自由度浮上装置

この装置では、磁石の開度、浮上体とのギャップなどが、浮上体の横方向の安定性に影響をおよぼすことが確認された。浮上体の上下方向の運動は、両方の磁石の空隙を同じように変化させることにより、また左右方向の運動は左右の磁石の空隙に差をつけることにより制御することで可能となることが確認された。また、上下方向の運動だけでなく、横方向の運動を能動的に制御することにより、浮上安定性を向上させることが可能であることがわかった。

② 3 自由度浮上システム

浮上体は図 7 左に示すように 3 つの磁石でつり下げられている。これら 3 つの磁石位置を図 7 右上の図のように同時に変化させることにより、右下図のように上下方向の位置を変えることが可能である。また上下方向の浮上を閉ループ制御によって保ちながら 3 つの磁石目標位置の位相を変化させることにより、水平面内の位置決めが可能であることがわかった。

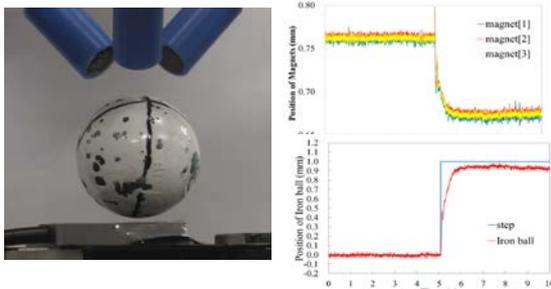


図 7 3 自由度磁気浮上システム

(3) 機械運動による非接触給電を用いたリニアスライダの開発

① リニアスライダの設計と試作

スライダへの搭載質量によって浮上位置が変化することへの対応と給電による発生力が浮上に及ぼす影響を低減できることなどを考慮してジェネレータの磁極構造、材質について検討した結果、コアとして空心コアを用いることが有用であることがわかった。また、ロータとステータに偏心があっても得られる電力量が変わらない、トルクおよび力の変動の少ないジェネレータの開発に成功した。図 8 に種々のロータに偏心があったときのロータとステータに働く吸引力の例を示す。開発したロータ（緑の線）では、ほぼ吸引力を無視できることがわかる。

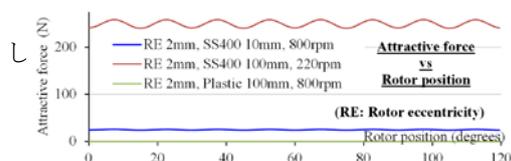


図 8 ロータの回転角に対する発生力

② スライダの浮上制御と給電性能の評価

スライダをゼロパワー制御による浮上状態のときに荷重が加わったときの応答を計測し、浮上制御の評価を行った。実験は図 9 に示すスライダの P1, P2 の点に加重をかけることによって、行った。P1 よりも P2 に加重を加える方が収束が悪いことがわかった。このときの応答の様子を図 10 に示す。図は上側が重心の変位と水平軸周りの回転を表しており、下側の図が 4 つの電磁石の電流を表している。図に示すように収束までに 2 秒ほどの時間がかかっているが、電流は加重を加える前と後で零に収束することがわかった。

また、OEG で発生する電力は浮上および駆動を行うために十分であることがわかった。

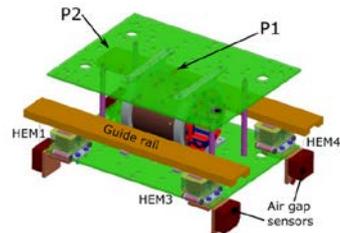


図 9 OEG を用いたスライダ

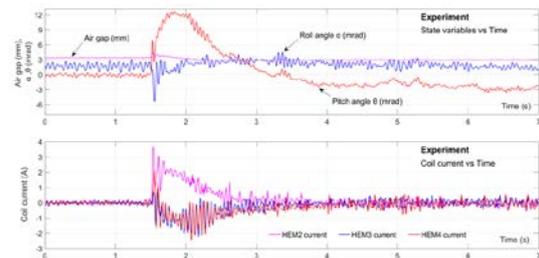


図 10 加重が加わったときの応答結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- 1) Annasiwaththa Imantha, Oka Koichi, Harada Akinori, Magnetically levitated linear slider with a non-contact power transfer method, 査読あり, International Journal of Applied Electro- magnetics and Mechanics, vol. 54, no. 2, pp. 223-237, 2017, DOI: 10.3233/JAE-160097
- 2) Annasiwaththa Imantha, Oka Koichi, Design concept and analysis of a magnetically levitated linear slider with non-contact power transfer, 査読あり, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 52, no. 1-2, pp. 207-213, 2016, DOI: 10.3233/JAE-162039
- 3) Jin Junjie, Sun, Feng(3/7), Oka Koichi(7/7), Model identification and analysis for parallel permanent magnetic suspension system

based on ARX model 査読あり International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 52, no. 1-2, pp. 145-152, 2016, DOI: 10.3233/JAE-162027

- 4) Oka Koichi, Okazaki Tomohiro, Morimitsu Toshiyuki, 2 DOF non-contact magnetic suspension system: A feasibility study, 査読あり International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 45, no. 1-4, pp. 627-632, 2014, DOI: 10.3233/JAE-141886

[学会発表] (計 12 件)

- 1) Oka Koichi, Tanaka Masako, A simple levitation system using wireless power supply system and Lorentz force, 査読あり, Proceedings of Motion and Vibration Control 2016, Southampton, UK, 2016
- 2) Oka Koichi, Annasiwaththa Buddhika, Non-contact Linear Slider Using Wireless Power Transfer, 査読あり, Proceedings of The 10th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Aachen, Germany, 2015
- 3) Oka Koichi, Okazaki Tomohiro, 2 DOF Non-contact Magnetic Suspension System, 査読あり, Proceedings of International Symposium on Applied Electromagnetic and Mechanics, Quebec Canada, 2013

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.kochi-tech.ac.jp/kut/about_KUT/faculty_members/prof/oka-koichi.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 宏一 (OKA, Koichi)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：10160649

(2) 研究分担者

芝田 京子 (SHIBATA, Kyoko)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：00307117

(3) 連携研究者

井上 喜雄 (INOUE, Yoshio)

高知工科大学・システム工学群・特任教授

研究者番号：50299369

(4) 研究協力者

Annasiwaththa Imantha

Lecturer, University of Ruhuna, Sri Lanka

(4) 研究協力者

Sung Feng

Associate Professor, Shenyang University of Technology