

第14回 MAGDA コンファレンス in 岐阜
電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス
講演論文集



会期：2005年3月14日（月）～15日（火）

会場：岐阜大学工学部

主催：日本 AEM 学会

協賛：岐阜大学，日本機械学会，日本応用磁気学会，日本シミュレーション学会，日本生体磁気学会，計測自動制御学会，システム制御情報学会，日本非破壊検査協会，IEEE Magnetic Society (Japan Chapter)，プラズマ核融合学会，日本原子力学会，電気学会，日本保全学会

永久磁石とリニアアクチュエータによる浮上体の回転機構の開発

Development of Spinning Control Mechanism for Maglev System Using Permanent Magnet and Linear Actuator

藤原 佑輔 (高知工科大学)
崔 天時 (高知工科大学)
陳 麗 (高知工科大学)
岡 宏一 (高知工科大学) 正員

Yusuke FUJIWARA	Kochi University of Technology	
Cui Tianshi	Kochi University of Technology	
Chen Li	Kochi University of Technology	
Koichi OKA	Kochi University of Technology	Member

This paper describes a development of a magnetic levitation system with spin control mechanism. The feature of this magnetic levitation system is using permanent magnets and linear actuators. The levitated object is an iron ball, which is suspended by a magnet in the vertical direction and is spun by four magnets in the horizontal direction. Experimental system is introduced. One degree of freedom levitation is examined and carried out. A spinning control strategy is proposed.

Keywords: maglev system, permanent magnet, linear actuator, air gap control, spinning control, non-contact.

1. 緒言

今日、機械の精密化はめまぐるしく進展しており、それに伴い生産環境においても、埃塵の発生を抑えるクリーンルーム工場や、精度保持のためロボットを用いた組立・搬送、などが用いられている。今後更なる機械の小型化、微細化が進むと現在の組立・搬送技術では対応しきれない可能性も考えられる。非接触で物体を操ることができれば、接触が起因となって発生する製造部品の変形、またそれに伴う精度低下や埃塵発生の低減の解決が可能であると考えられる。

非接触で力を伝達方法の一つに磁力を用いるものがある。このうち常電導を用いて磁力によって浮上を行なう機構は、その多くが電磁石の電流を制御することにより発生力を調整し浮上を実現させている。本報告ではこの方式とは異なり、永久磁石とリニアアクチュエータによって浮上を実現させる方式を用いる。組立・搬送などを行なうために非接触の状態のまま移動、回転といったコントロールが必要である。今回は、浮上中の物体を非接触で回転させることについて報告する。

2. 磁気浮上装置

今回試作した実験装置の概観を Fig.1 に、写真を Fig.2 に示す。両図の中央部分に浮上対象である鉄球が浮上する。ただし、Fig.2 の写真では鉄球は省略してある。鉄球の鉛
連絡先: 藤原 佑輔, 〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185, 高知工科大学, 工学部知能機械システム工学科, e-mail: 050170a@ugs.kochi-tech.ac.jp

直上部に配置したボイスコイルモータの直動運動を制御し、モータの先端に取り付けた永久磁石の吸引力を利用し、浮上対象との間隔を調整することで磁気浮上を可能とする^[1]。さらに、浮上中の浮上体の水平面上に4個の永久磁

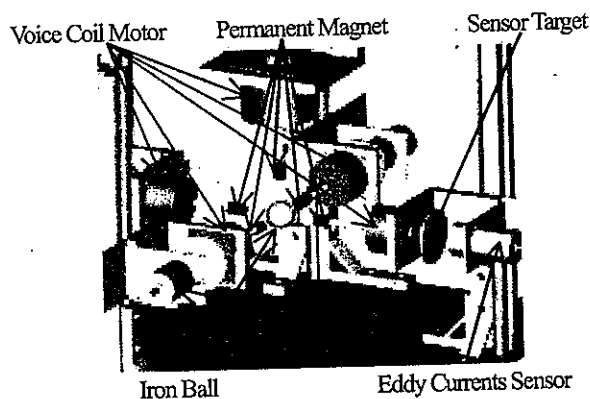
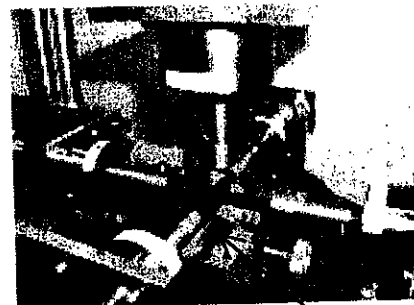


Fig.1. Illustration of Maglev System for Spinning Close-Up Around the Permanent Magnet



Eddy Currents Sensor
Fig.2 Photograph of Developed Equipment

石を配置しそれぞれ交互に永久磁石と浮上対象との間隔を変えることで浮上体に回転運動を発生させる。永久磁石の駆動方向の変位と浮上体の鉛直方向の変位はそれぞれ渦電流センサを用いて計測する。永久磁石の変位はボイスコイルモータの磁石と反対側の駆動軸にプレートを取り付けその動きをセンサで計測する。各永久磁石はボイスコイルモータの駆動軸の先端に取り付けてあり、各ボイスコイルモータはセンサと共に、ステイによりフレームに固定されている。ステイは可動式なので任意の位置・高さに固定可能である。

3.1 自由度磁気浮上

3.1 浮上原理

本報告で用いる浮上原理は、永久磁石と浮上体との間隔を調整することで、吸引力を制御し、浮上させるものである。Fig3 に示すように、永久磁石と浮上対象の間隔が狭くなると吸引力は大きくなり、浮上体は永久磁石に引き寄せられ、間隔が広がると吸引力は重力より小さくなり、浮上対象は落下する。よって間隔をアクチュエータにより調整し、吸引力と重力のバランスを取る、このことで浮上を可能としている。

3.2 吸引力の検討

実験装置で用いる永久磁石は $\phi 8 \times 8(\text{mm})$ の円柱形ネオジ磁石、浮上対象は質量 $63.7(\text{g})$ 、直径 $25.0(\text{mm})$ の鉄球を用いる。浮上を行なうための吸引力特性を知るために、永久磁石と鉄球との空隙に対する吸引力の大きさを測定する。測定方法は、鉄球を力センサに取り付け、永久磁石が鉄球に及ぼす力を永久磁石と鉄球との距離を変化させ、そのときの力センサの値を計測した。測定結果をFig4に示す。Fig4より、永久磁石と浮上体との間に働く吸引力 f_m は、次式のように空隙の二乗に反比例すると仮定した。

$$f_m = \frac{K}{\text{airgap}^2} \quad (1)$$

ここで、 K は吸引力定数であり、Fig4より $K=16.9 \times 10^{-6}(\text{N/m})$ と仮定した。また浮上体の質量は $63.7(\text{g})$ と

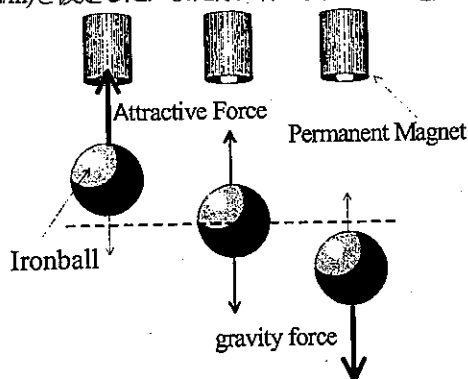


Fig.3 Relation of Attractive Force and Gravity Force

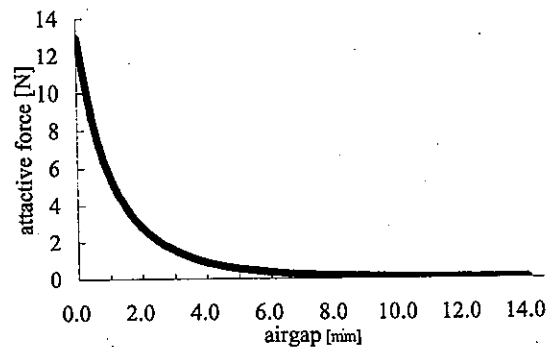


Fig.4 Attractive Force About the Air Gap Between the Magnet and the Iron Ball

$0.625(\text{N})$ なので、平衡状態の空隙は $5.2(\text{mm})$ である。また、この結果より、本研究で用いる永久磁石は、浮上対象である鉄球を十分に浮上させる吸引力を発生可能であることが分かった。

3.3 浮上システム・実験

本研究では、浮上は鉛直方向の磁石1個で行う。システムの概要をFig5に示す。実験に用いた制御システム図をFig6に示す。制御方法はPD制御を用いて、状態フィードバックを行った。

3.4 浮上実験結果

前節で示したシステムを用いて浮上実験を行った。鉄球の浮上している様子をFig7に示す。また、Fig8に、永久磁石と鉄球の変位の推移を示す。Fig8は $0.005(\text{s})$ 間隔で $2.0(\text{s})$ 間計測した結果である。Fig8より、約 $0.1(\text{mm})$ 程度の振動が見られるが、比較的安定した浮上が行えていることが分かる。この振動の原因としてはPDコントローラ内

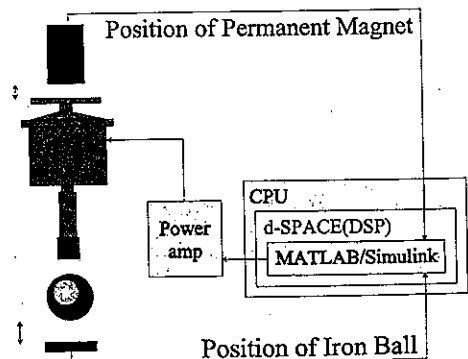


Fig.5 1 D.O.F. Maglev System Configuration Chart

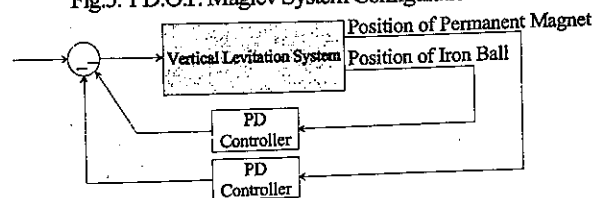


Fig.6 1 D.O.F. Maglev System Control Chart

のゲインがまだ完全に最適ではないことや、ボイスコイルモータ内のベアリングの非線形摩擦の影響であるとも考えられる。この問題は、結果を元にゲインの最適化を計ることで、さらに改善できると考えられる。

4. 回転機構

4.1 回転原理^{[4][5][6][7]}

浮上対象の回転機構は、浮上体を水平面内で回転させる機構である。その模式図を Fig.9 に示す。これは鉄球の鉛直上部から見た図で、鉄球と永久磁石だけの図である。今回は、浮上中の浮上体の水平面上に4個の永久磁石を直交位置に配置し、それぞれの永久磁石を浮上体に交互に接近させ、浮上体に回転運動を発生させる。この原理を具体的に以下に説明する。

浮上体は鉄球であり、その表面には残留磁気の影響があると考えられる。最も大きい残留磁気の影響は鉛直方向の浮上の際に鉄球の上下方向を決めるものである。このとき鉄球の水平方向には他の残留磁気の影響も残っている。よって水平方向の異なる方向から永久磁石を近づけることで、この磁化された点が永久磁石の方へ引き付けられる。この力を利用して四方から交互に永久磁石を近づけることを繰り返すことで、鉄球を回転させる。つまり一般のPM型ステッピングモータの原理により回転させる機構と考

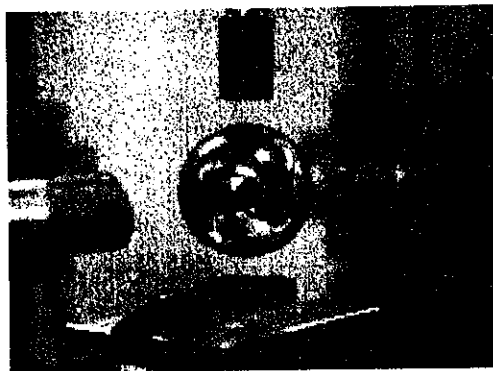


Fig.7. Photograph of During Levitation

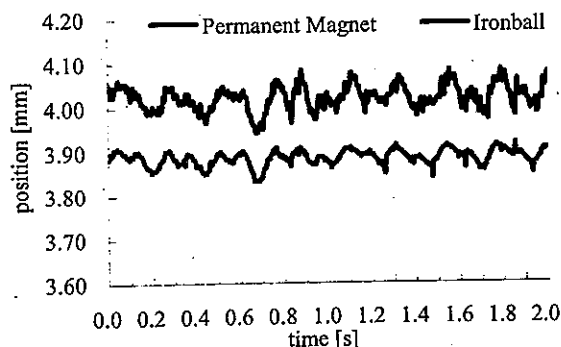


Fig.8. Result of Position of Permanent Magnet and Iron Ball

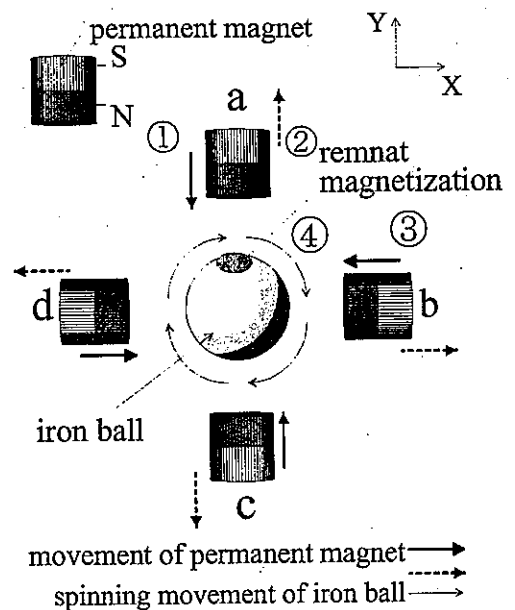


Fig.9. Image of Spinning Mechanism

えられる。具体的な永久磁石の制御方法を述べる。

まず、永久磁石 a を①の動きで鉄球に近付けることにより鉄球の表面にある残留磁気のうち永久磁石と逆の極性の影響の部分が回転し永久磁石に近付いた位置で安定する(図の現在の状態)。そして②の動きで永久磁石を鉄球から離し、永久磁石 b を③の動きで近付けると、残留磁気部が引き寄せられ④の方向に回転運動をする。同様なことを次々と隣の磁石に対して繰り返すことで鉄球が回転運動を発生する。

4.2 回転システム・実験

回転機構のシステムの概要を Fig.10 に示す。4.1 で示したように回転機構は浮上体の水平面内に直行位置となうよう、永久磁石4個を用いて行う。よって、Fig.11 に示すシステムを4つ用いる。回転機構では鉄球の位置および回転のフィードバックは行っていない。また、浮上機構と、回転機構は独立した制御を行っている。

実験で用いた、制御システム図を Fig.11 に示す。4個のボイスコイルモータにそれぞれ位相を $\pi/2(\text{rad})$ ずらした信号を入力し、隣り合う永久磁石が、順番に鉄球に近づくように制御している。回転機構では鉄球と永久磁石との空隙を計測しないため、あらかじめそれぞれのボイスコイルモータの位置をステイにより中心から等しい距離に固定しておく。

4.3 回転実験結果

実際に、回転機構を移動し、4.1 で述べた原理の通り、鉄球のある点が永久磁石の動きに連動して、鉄球が回転運動を行う事が確認できた。しかし今回、回転運動のデータ収集を行うまでは至っていない。

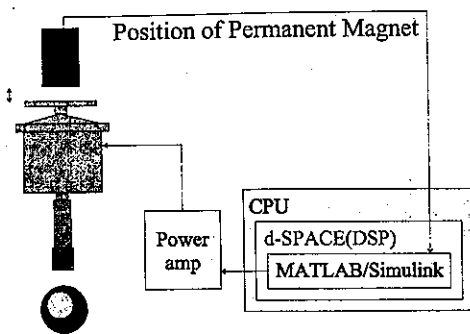


Fig.10. Spinning Mechanism System Configuration Chart

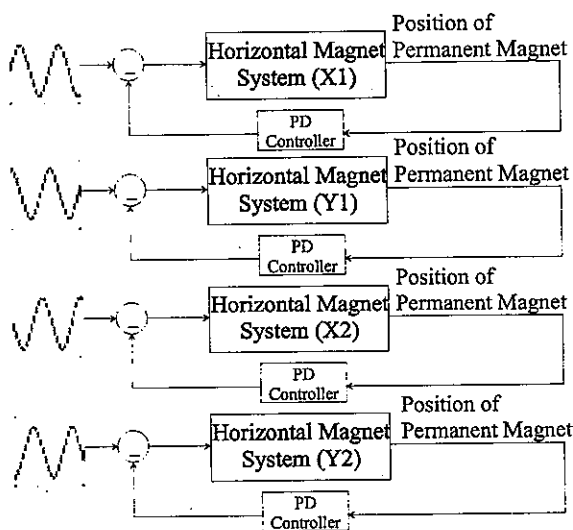


Fig.11. Spinning Mechanism System Control Chart

今回の実験では、浮上している状態の鉄球に、突然回転機構を一定の周期で移動させる形となっており、回転のフィードバックを行っていない。そのため鉄球が安定した回転を行うまでに長い時間が必要である。回転機構の始動直後は、鉄球が永久磁石に同期した運動を行う状態ではなく、鉛直上部から見て、右回りと左回りを不規則に繰り返す状態である。ある時偶然的に永久磁石に浮上体の回転運動が同期し始め回転運動が開始する。これは、垂直方向の残留磁気の影響がある点の磁気力が非常に弱いためであると考えられる。最初に、ある1個の永久磁石だけを鉄球に近づけ、残留磁気の点が引き寄せられ、鉄球の中心軸周りの運動が停止(安定)した状態から、回転機構全体を浮上体の回転に同期させて移動させることで、改善できると考えられる。また、回転機構の永久磁石を駆動することにより、鉛直方向の浮上が不安定となり、鉄球が浮上機構の永久磁石にくっついてしまうことがある。これは、浮上機構におけるPDコントローラ内のゲインの改善を行い、浮上自体を更に安定させること。および、回転機構における、永久磁石を近づける位置、高さ、運動周期などを改善させるこ

と、および水平方向の永久磁石の運動を考慮した鉛直方向の永久磁石の制御を行うことなどで、回転機構を駆動させたときの浮上を安定させることができると考えられる。

5. 結言

本報告では、新しい磁気浮上機構の提案・実証として、永久磁石の運動制御による磁気浮上と浮上体の回転機構についての研究及び実験を行なった。

まず永久磁石と浮上対象の空隙を制御することにより浮上体を浮上、回転させることを提案した。この考えに基づいて、永久磁石を鉛直方向に1個、水平方向に4個配置した実験装置を設計、製作した。製作した装置を用いて浮上体を回転させる方法を具体的に示した。1自由度の浮上に成功し、安定した浮上を実現させた。また、回転機構に関しては、提案した原理での回転運動を実証、確認できた。

今後の課題としては、1自由度浮上の更なる安定化・外乱に対する対応策のために、フィードバックゲインなどを見直す必要があること、水平面内に配置した永久磁石を鉄球の真中心に向けて直動運動させることが望まれるため、水平面内の各永久磁石、及びボイスコイルモータの位置を精度良く配置する方法の検討、などである。これらの検討の後、永久磁石を運動させる周期と鉄球の回転運動の関係を調査し、回転運動の制御を行う予定である。

参考文献

- [1]岡宏一、永久磁石の運動制御による磁気浮上機構、東京大学、博士論文、1997
- [2]政木慶次、永久磁石の運動制御を用いた2自由度磁気浮上装置の開発、高知工科大学、修士論文、2002
- [3]電気学会 磁気浮上応用技術調査専門委員会 編、磁気浮上と磁気軸受、コロナ社、1993
- [4]藤原佑輔・崔天時・岡宏一、永久磁石の運動制御を用いた磁気浮上装置-浮上体の回転機構の開発、電気学会他、電気関係学会 四国支部連合大会 講演論文集 p.98, 2004*
- [5]藤原佑輔・崔天時・岡宏一、永久磁石の運動制御を用いた磁気浮上装置-浮上体の回転機構に関する考察、日本機械学会、No.04-5 D&D2004 講演論文アブストラクト集 p.223 & CD-ROM, 2004*
- [6]藤原佑輔・崔天時・岡宏一、永久磁石の運動制御を用いた磁気浮上装置-浮上体の回転機構の開発、日本知能情報ファジィ学会、第14回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集 p.133~p.136, 2004*
- [7]藤原佑輔・崔天時・陳麗・岡宏一、永久磁石による磁気浮上体の回転機構の開発、電気学会、リニアドライブ半導体電力変換合同研究会資料 p.49~p.52, 2004*

*本報告に関係する発表である。