

永久磁石リニア駆動によるマニピュレーション -鉄球の回転制御-

Manipulation by Linear Driving Permanent Magnet -Rotation Control of Ironball-

藤原 佑輔^{*1}(学生員), 崔 天時^{*2}(学生員), 陳 麗^{*3}, 岡 宏一^{*4}(正員)

Yusuke FUJIWARA (Stu. Mem.), Cui Tianshi (Stu. Mem.), Chen Li, Koichi OKA (Mem.)

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

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。非接触浮上技術を用いると固体摩擦がないために、エネルギーロスがない、高速化が可能である、潤滑剤が不要である、真空・クリーン環境に影響を与えない、メンテナンスの必要がないなどの利点が得られると考えられる。また、マニピュレーション機構を非接触にできれば、接触が起因となって発生する製造部品の変形、それに伴う精度低下や埃塵発生の問題の解決も可能であると考えられる。

非接触浮上機構には種々のものが提案されている。主要なものとして、エアテーブルに代表されるような空気圧を用いるもの[1]、超音波を用いるもの[2]、静電力を用いるもの[3]、磁気力を用いるもの[4]などがある。これらの浮上方式は次のような特徴を持つ。空気圧および超音波浮上は、浮上対象物の材料にはこだわらないが、形状および精度の要求が厳しい。静電浮上は誘電体であれば浮上は可能であるが、発生力が小さい。磁気浮上は、浮上対象物が強磁性体に限られるが発生力が大きく扱いやすい。このため磁気浮上機構は比較的広く普及している。特に常電導における能動形磁気浮上装置については、古くから発明されて

いたこともあり、さまざまな研究が行われている[4]。その浮上方式の大半は、電磁石のコイルに流す電流を制御し、磁気力(浮上力)をコントロールする、EMS システムと呼ばれるものである。

これに対し、電磁石(コイル)を用いない浮上方式の研究も行われている。アクチュエータと永久磁石の吸引力を用いて永久磁石と浮上体の空隙を調整する方式[5,6]や、永久磁石の反発力を浮上力として利用する方式[7]、強磁性体をアクチュエータにより駆動し、永久磁石の磁路を変化させ吸引力を調整する方式[8]、磁歪素子を用いた起磁力制御による方式[9]などがある。これらの方式の特徴は、一般的なEMS システムがコイルに電流を流し続けることにより発生する発熱の問題を解決できる可能性があることである。特に永久磁石と浮上体の空隙を調整する方式[5,6]はアクチュエータによる制御であるため、広い範囲の操作性を持ち、また浮上磁気力が発生する場からアクチュエータを遠ざけて配置できるため、漏れ磁束を小さくすることができ、微小な浮上体に対しても有効であると考えられる。よって、永久磁石とアクチュエータを用いる方式は、微細な非接触マニピュレーションに適していると考えられる。非接触マニピュレーションをめざして現在、浮上体を2個の永久磁石により両側から吸引する方法の2自由度浮上機構[6]が提案されている。

本報告では、複数の異なる方向から駆動される永久磁石により、浮上体との空隙を変化させ、浮上中の物体を非接触で回転させるという、浮上体の非接触回転機構の開発について報告する。

連絡先: 藤原 佑輔, 〒782-8052 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口 185, 高知工科大学大学院 知能機械システム工学コース,
e-mail: 095226a@gs.kochi-tech.ac.jp

^{*1}^{*2}^{*3} 高知工科大学大学院 ^{*4} 高知工科大学

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。両図の中央部分にある球が浮上対象である鉄球である。実験装置は鉄球を浮上させかつ、鉛直軸周りの回転を制御する物である。制御は、鉄球の上部に配置したリニ

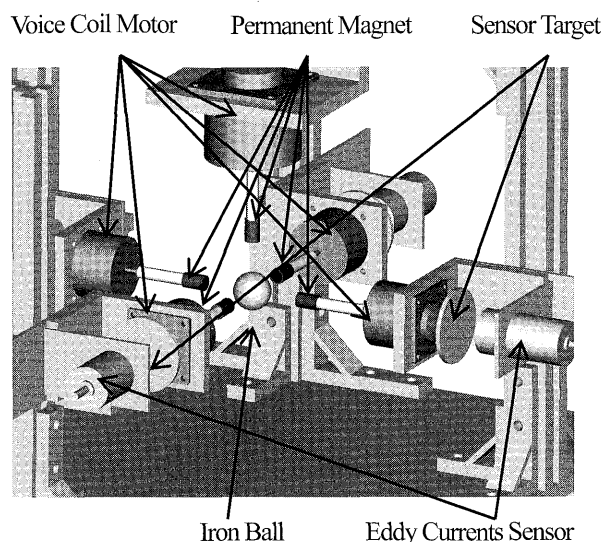


Fig.1. Illustration of Maglev System for Spinning Close-Up Around the Permanent Magnet

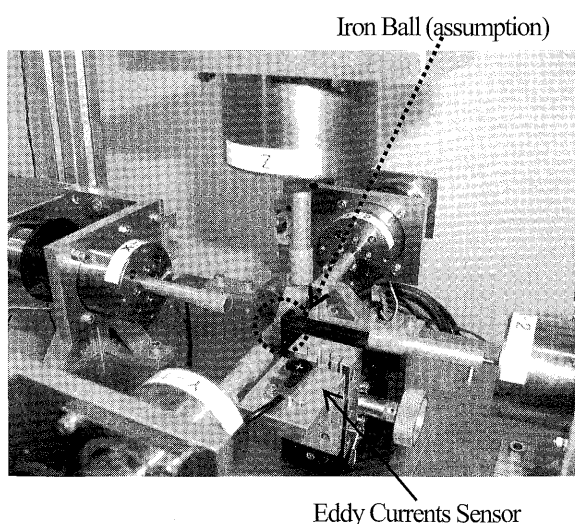


Fig.2 Photograph of Developed Equipment

Table 1 Specifications of Voice Coil Motor

Impressed current 1.0(A)	
Z(mm)	Force(N)
7.5	4.23
0	4.65
-7.5	4.19

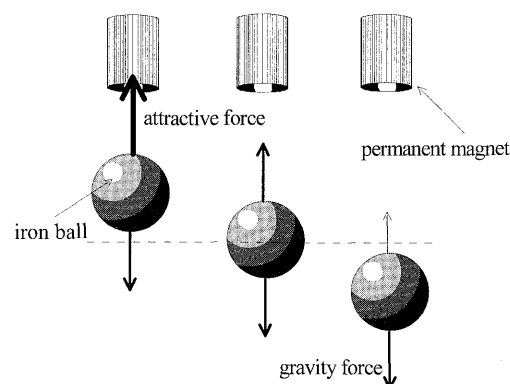


Fig.3 Relation of Attractive Force and Gravity Force

アクチュエータのスライダ部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[5]。さらに、浮上中の浮上体の水平面上に 4 個の永久磁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。また、本実験で用いるボイスコイルモータの可動距離は 15(mm)である。仕様を Table 1 に示す。

3 1 自由度磁気浮上

3.1 浮上原理[5]

本報告で用いる浮上原理は、永久磁石と浮上体との空隙を調整することで、吸引力を制御し、浮上させるものである。Fig.3 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 $\phi 8 \times 8$ (mm)の円柱形ネオジ磁石、浮上対象は質量 63.7(g)、直径 25.0(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した。測定方法は、鉄球を力センサに取り付け、永久磁石と鉄球との距離を変化させ、永久磁石が鉄球におよぼす力を力センサによって計測した。測定結果を Fig.4 に示す。Fig.4 より、永久磁石と浮上体との間に働く吸引力 f_m は、(1)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、Fig.4 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 $63.7(\text{g}) \div 0.625(\text{N})$ なので、平衡状態の空隙は $5.2(\text{mm})$ となる。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浮上させる吸引力を発生可能であることがわかった。

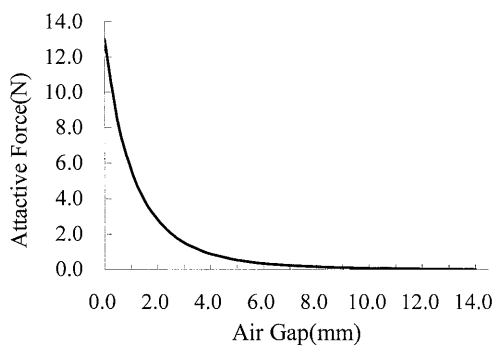


Fig.4 Attractive Force About the Air Gap Between the Magnet and the Iron Ball

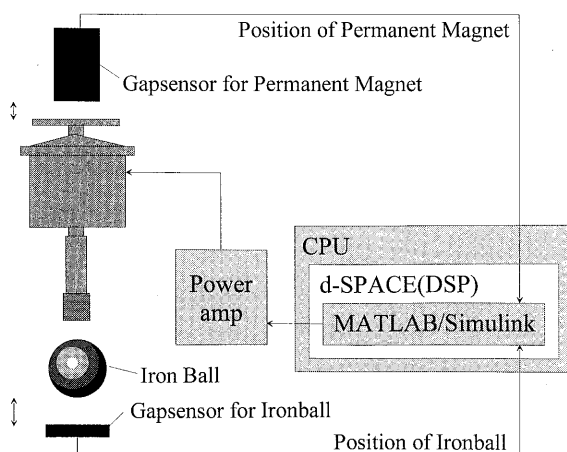


Fig.5. 1 D.O.F. Maglev System Configuration Chart

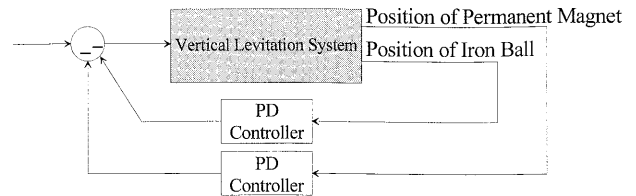


Fig.6. 1 D.O.F. Maglev System Control Chart

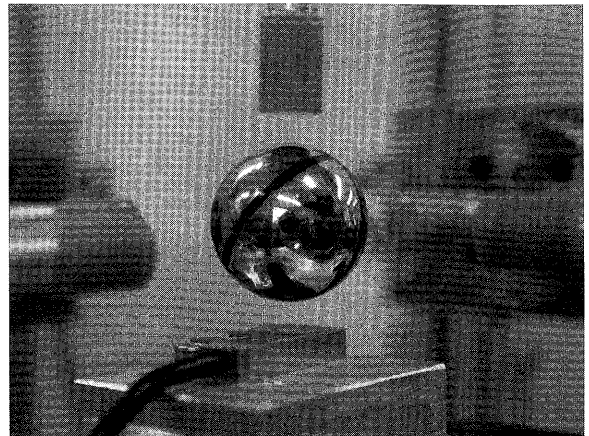


Fig.7. Photograph of During Levitation

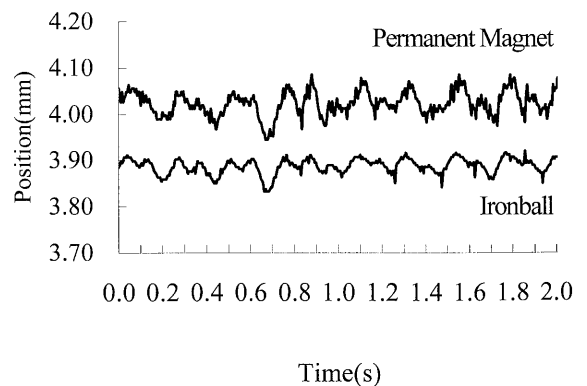


Fig.8. Result of Position of Permanent Magnet and Iron Ball

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で行う。このシステムの概要を Fig.5 に、制御システムのブロック線図を Fig.6 に示す。制御方法は2つのセンサの出力にそれぞれ PD 制御を行い、その結果を加算してフィードバックした。パワーアンプは電流を制御する形式である。この方式によりシステムは状態フィードバック制御を行える。

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 Fig.7 に示す。また、Fig.8 に、永久

磁石と鉄球の変位の推移を示す。Fig.8 は 0.005(s) 間隔で 2.0(s)間計測した結果である。Fig.8 より、約 0.1(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わかる。この振動の原因としては、PD コントローラ内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。

4 回転機構

4.1 回転原理

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 個の永久磁石を直角位置に配置し、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。それは、鉄球の表面に S, N それぞれの極性を持った複数、大小の点が不規則に全体に分布してあると考えられる。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。Fig.9 で示す点が、水平方向の最も大きな影響点とする。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

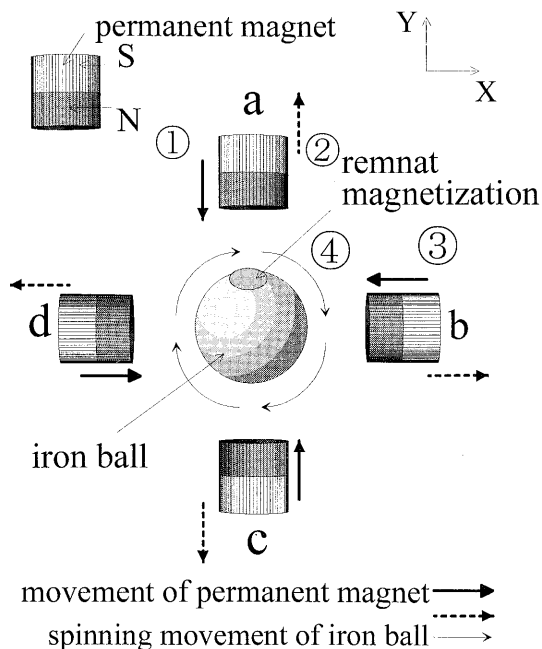


Fig.9. Image of Spinning Mechanism

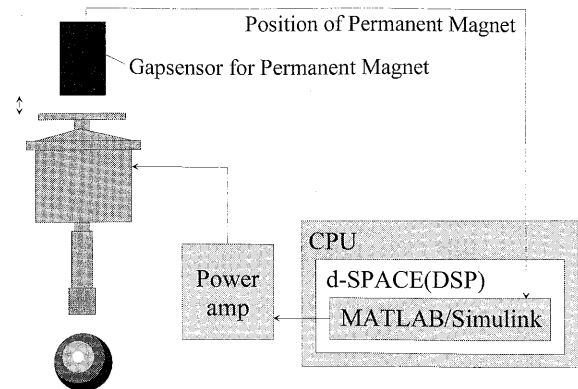


Fig.10. Spinning Mechanism System Configuration Chart

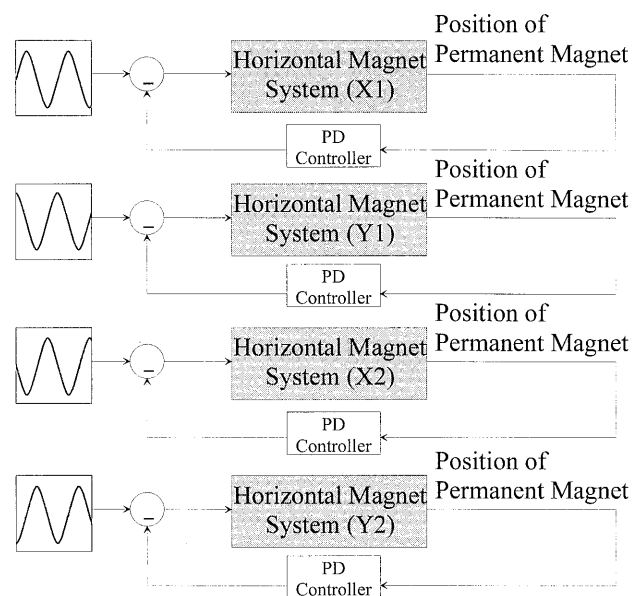


Fig.11. Spinning Mechanism System Control Chart

とでこの影響点が永久磁石の方へ引き付けられる。この力を利用し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の動きで鉄球に近づ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の動きで近づけると、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に回転運動を発生させる。

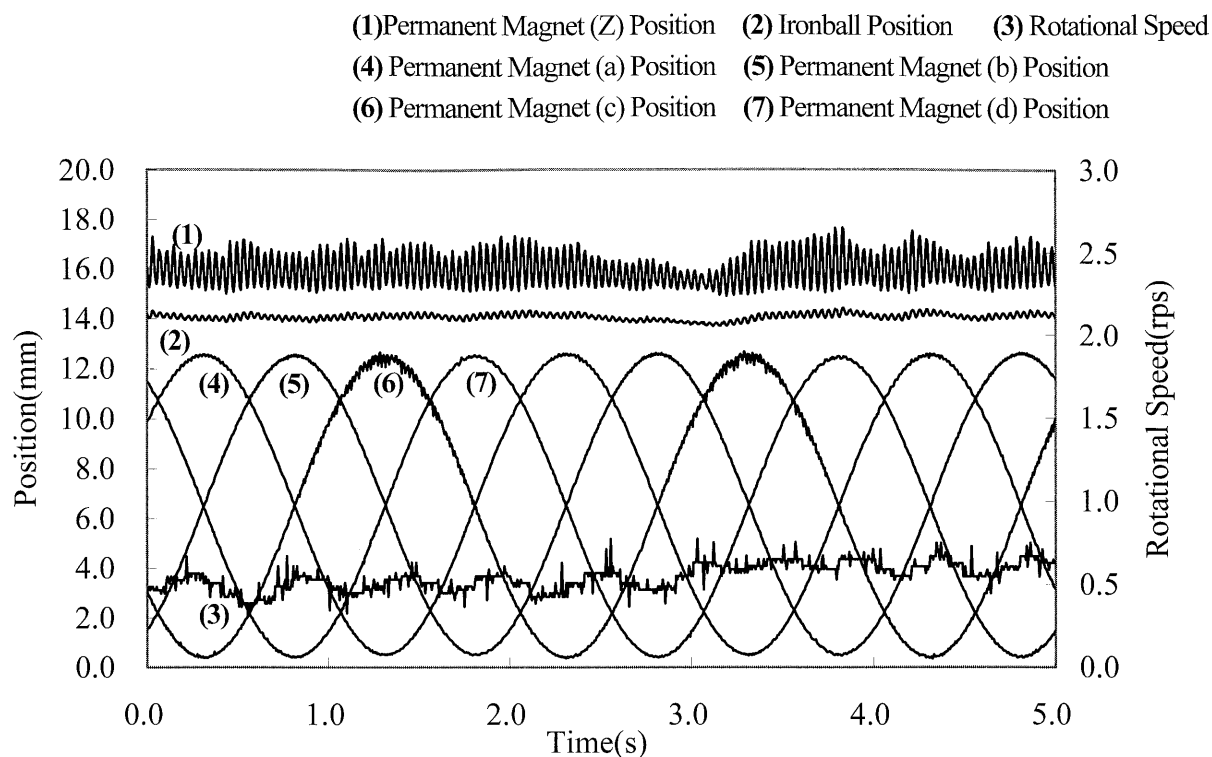


Fig.12 Result About Rotational Speed

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るよう、永久磁石 4 個を用いて行う。よって、Fig.10 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、順番に鉄球に近付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鉄球の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。しかし安定した回転運動を発生させることができなかった。回転数の推移を、Fig.12 に示す。Fig.12 中の回転数(rps)は回転運動中の鉄球の表面をレーザフィードモニタ(表面変位計)で、計測し、回転数に直したものである。

Fig.12 より、回転する中で、回転速度の上がり下がりが見られる。前後にも述べるが、回転のフィードバックは行っていないため 1 回転ごとにおける鉄球の回転周期が、永久磁石の運動周期に同調していないためと考えられる。

今回の実験では、提案した原理で実際に鉄球が回転するのかを調査することを優先したため、制御プログラムは、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付け、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。もしくは、回転機構において、回転数の情報を各回転機構の永久磁石にフィードバックし、鉄球の動きに同調させる制御を行うことでも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、永久磁石を近付ける位置、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 回転制御の応用

回転運動が行えると、鉄球の中心軸周りの様々な回転制御が可能となると提案する。その例をいくつかFig.13に示す。Fig.13は鉄球を鉛直上部から見た、鉄球と永久磁石のみの図である。鉄球の色の付いた部分に残留磁気の影響があるものとする。(a)では、ある磁石1個だけを近付ける事で、鉄球の中心軸周りの運動を停止させることができる。(b)では、隣り合う磁石を近づけることで、任意の角度で、鉄球の中心軸周りの運動を停止させることができる。

6 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、回転機構における鉄球の回転をフィードバック制御することの検討、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。

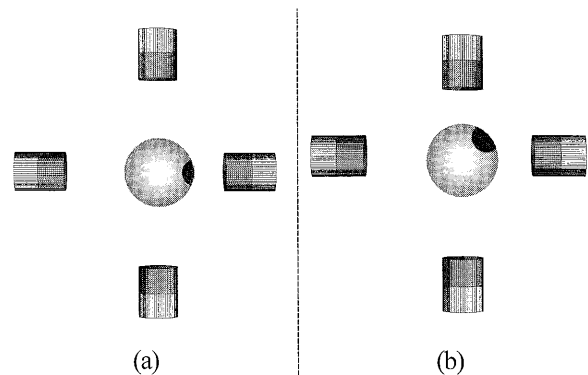


Fig.13. Spinning Control Example

(2005年5月5日受付, 2005年12月2日再受付,
2006年1月20日再受付)

参考文献

- [1] 例えば, 株式会社 工藤鉄工所, 製品カタログ エアテーブル.
- [2] 橋本芳樹, 小池義和, 上羽貞行, 近距離音場浮揚を利用した非接触物体搬送, 計測と制御, Vol.38, No.2, pp.105-108, 1999.
- [3] 樋口俊郎, 静電浮上, 計測と制御, Vol.38, No.2, pp.101-104, 1999.
- [4] 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.
- [5] K.Oka, T.Higuchi, Magnetic Levitation System by Reluctance Control: Levitation by Motion Control of Permanent Magnet, *Int.J.of Applied Electromagnetics in Materials*, Vol.4, No.4, pp.369-375, 1994.
- [6] Koichi OKA, Tianshi Cui, 2-DOF Suspension Mechanism for Noncontact Manipulation with Permanent Magnet Motion Control, *Mechatronics & Robotics'04*, Part1, pp.383-387, 2004.
- [7] 水野毅, 関口秀樹, 荒木献次, 永久磁石の運動制御を利用した反発型磁気軸受けに関する研究, 日本機械学会論文集(C編), Vol.64, No.628, pp.4717-4722, 1998.
- [8] T.Mizuno, H.Hoshino, M.Takasaki, Y.Ishino, Flux Path Control Magnetic Suspension, *Proc. of 9th Int. Symp. on Magnetic Bearings*, CD-ROM, 2004.
- [9] 上野敏幸, 樋口俊郎, 磁歪材料と圧電材料の積層体を用いた磁気力制御素子による零パワー磁気浮上制御, 電気学会論文誌D(産業応用部門), Vol.124, No.7, pp.724-729, 2004.