

永久磁石のギャップ制御による非接触回転制御

Noncontact Rotation Control by Air Gap Control of Permanent Magnet

○ 森本 裕樹 (高知工科大)

岡 宏一 (高知工科大)

Yuki Morimoto, Kochi University of Technology, Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi, Japan
Koichi OKA, Kochi University of Technology

This paper describes a development of a magnetic levitation system with rotation 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 permanent magnet in the vertical direction and is rotated by four magnets in the horizontal plane. Rotation principle using air gap control between a four permanent magnets and the ball is introduced. Experiment result of changing the motion cycle of the four permanent magnets is reported.

Key Words : Rotation Control, Noncont, levitation, permanent magnet, linear actuator

1. 緒言

非接触磁気浮上機構には種々のものが提案されており、電磁石（コイル）を用いない磁気浮上方式も様々な研究が行われている⁽¹⁾。特に永久磁石と浮上体の空隙を調整する方式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くに配置できるため、離れたところからの操作でも発生力の低下を防ぐことができ、微小な浮上体に対しても有効であると考えられる。このことから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⁽²⁾。

筆者らは、マニピュレーションを目的とした浮上体の多自由度化制御の一つとして、浮上体に対して水平面内の様々な方向から永久磁石を接近させたり離したりすることで、浮上体が鉛直中心軸周りに回転することを確認している⁽³⁾。本報告では、水平面内の磁石の運動の周波数を変化させて鉄球の応答性を確認する。また、鉄球を回転させる原理は、残留磁気によるものとして考えて来たが、複数の浮上体について残留磁気を検討し、回転に与える影響について考察する。

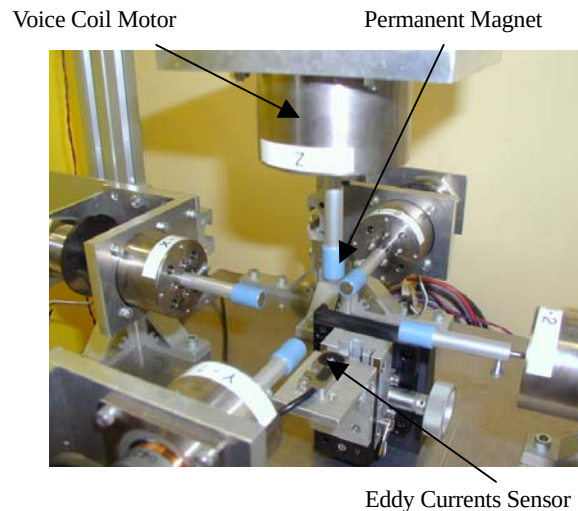


Fig.. 1 Photograph of Developed Equipment

2. 実験装置

今回試作した実験装置を Fig.1 に示す.. 本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。図に示すように5つの永久磁石を用いて鉄球を制御する機構となっている。ただし、この写真には鉄球は省略してある。実際には、5つの永久磁石の中心に浮上した鉄球がある。

鉄球の上部に配置したボイスコイルモ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、鉄球との間隔を調整することで磁気浮上を可能とする。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。浮上のために、浮上体の位置と永久磁石の位置のフィードバックを行い、回転のためには永久磁石の位置のフィードバックだけを行っている。

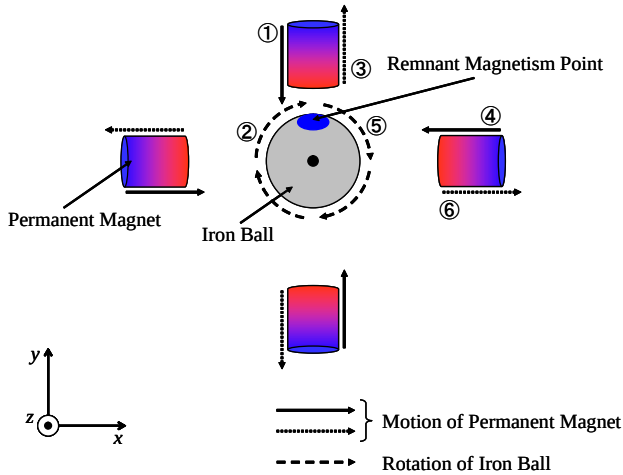


Fig. 2 Rotation Mechanism

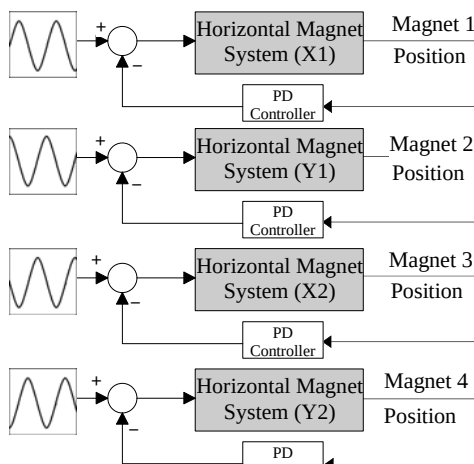


Fig. 3 Control strategy for rotation

2・1 回転原理 回転機構は、浮上体を水平面内で回転させる機構である。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、最も大きい残留磁気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. 2 に鉄球の鉛直上部から鉄球と永久磁石だけを見た図を示す。Fig. 3 に4つの永久磁石の制御方法を示す。Fig. 2 に示すように浮上体の水平面内に4個の永久磁石を直交位置に配置する。この4つの磁石をFig. 3 に示すように隣り合う永久磁石位置の

位相を 90 度ずらしたように制御する。このように永久磁石を浮上体に順番に接近させ、浮上体に回転運動を発生させる。

2・2 鉄球の残留磁気の影響 実際に残留磁気の影響があるかどうかを確認するための実験を行った。実験は浮上中の鉄球の水平面外周（上下の均分円：赤道）上表面の磁束密度を Fig. 4 に示す方法で計測を行った。その結果を Fig. 5 に示す。この図は横軸に鉄球の鉛直軸回りの回転角度、縦軸に磁束密度を記録したものである。1 回転ごとに同様な磁束密度の大小があることから、提案通り残留磁気の影響を持つ点が存在することがわかる。縦軸の上方向が N 極を示している。N 極しか表われていないのは、浮上に用いる磁石は鉄球側に N 極が向いていて、その漏れ磁束の影響だと考えられる。回転機構において横から近づける磁石の極も N 極である。よって 1 周期の最も小さな残留磁気の影響を持つ点が、回転運動時に引き寄せられている、または大きな値を持つ部分が永久磁石と反発していると考えられる。他の鉄球で計測した場合も 1 回転ごとに同様な磁束密度を確認することができた。

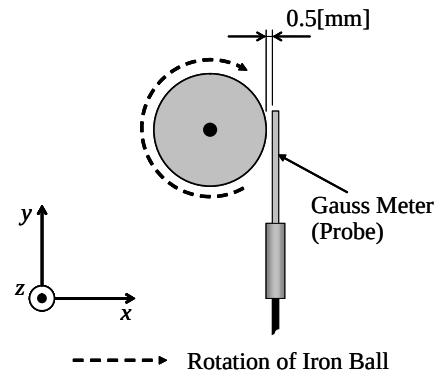


Fig. 4 Illustration of Measurement of Magnetic Flux Density

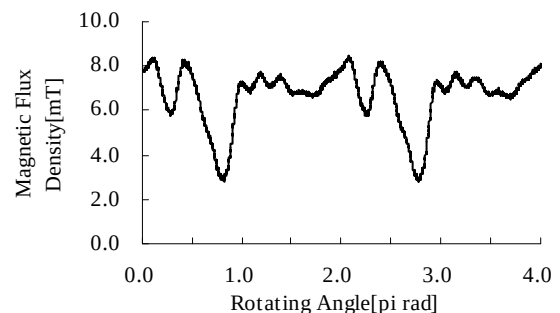


Fig. 5 Magnetic Flux Density of Equator Surface of Iron Ball

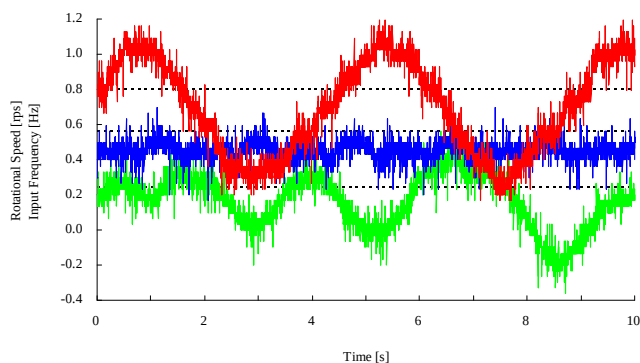


Fig.. 6. Rotational speed of ball in constant driving frequency.

3. 実験

3・1 回転実験 試作装置を用いて実験を行った。この結果、前節で述べた原理に基づいて、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ことが確認できた。しかし周波数によって回転速度の応答に違いが見られた。

駆動周波数をある一定の周波数（0.24, 0.56, 0.8 [Hz]）に固定した場合の鉄球の回転速度の結果を Fig. 6 に示す。駆動周波数が、0.56[Hz]のとき比較的安定した回転速度となることが確認できた。

他の周波数においても同様の実験を行った。その平均速度をまとめた結果を Fig. 7 に示す。図中の直線は駆動（入力）周波数である。今回の実験では、制御プログラムは、静止している状態の鉄球に、ステップ状に一定の周期で駆動させ、回転が安定した後の結果を示した。図に示すように、駆動周波数が1[Hz]程度になると、鉄球の回転が不安定となり、1[Hz]以上では回転させることができなかった。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。

次に駆動周波数を、0[Hz]からランプ状に徐々に高くした実験を行った。そのときの結果を Fig. 8 に示す。多少のばらつきがあるものの駆動周波数に回転数が追従している様子が確認できた。1[Hz]付近になると、回転中の鉄球の浮上自体が不安定になり鉄球は浮上用磁石に吸着した。この結果現在のシステムでは回転に関して1[Hz]が限界であると考えられる。より速い回転のためには、浮上の安定化のための制御方法の検討、鉄球に対する積極的な着磁

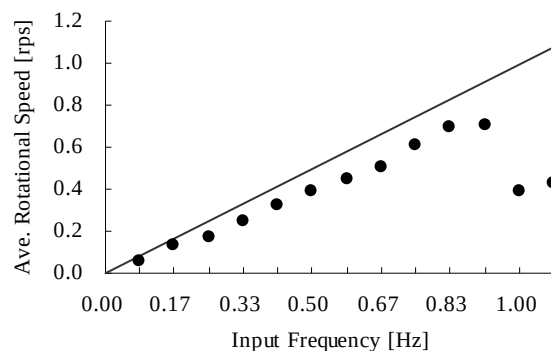


Fig.. 7. Result of rotational speed, when step input of constant frequency is added

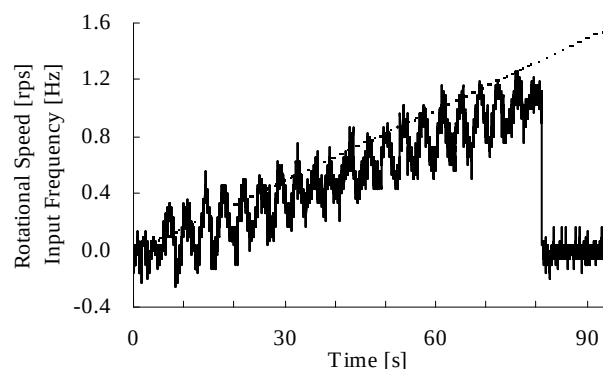


Fig.. 8. Result of Rotational Speed by Ramp Input Frequency

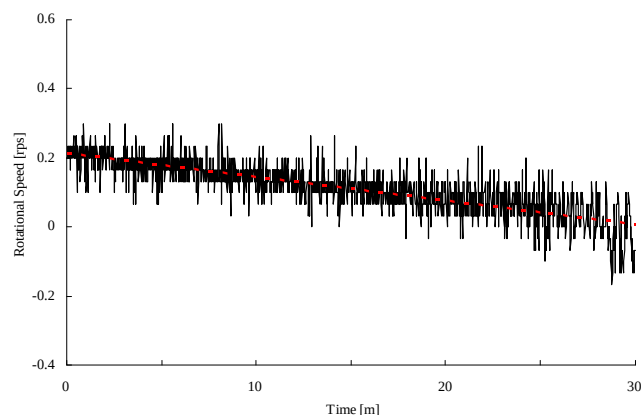


Fig.. 9. Loss of rotational speed of Iron Ball.

などが必要であると考えられる。

3・2 回転損失実験 回転機構の永久磁石を取り外し、回転機構を駆動させない状態で鉄球に初期速度を与えた場合の、鉄球の回転速度の損失を Fig. 9 に示す。図中の実線が回転数、破線は結果を基にした近似曲線である。回転速度にばらつきがあるが、時間が経過するにつれて徐々に減速していくのが確認できた。これは、空気抵抗の影響がほとんどだ

と考えられ、比例のグラフに限りなく近く、理想的な曲線を描いている。

5. 結 言

新しい非接触マニピュレーションの提案・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。この提案に基づいて、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。

回転機構に関しては、提案した原理での回転運動を確認し、永久磁石の運動周波数を変化させ、鉄球の回転の応答性を検証することができた。

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。また、鉄球表面の残留磁気の弱さを解決するために、新しく浮上体を試作することも検討しなければならない。また、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, 電磁コイルを用いない能動浮上方式, 平成 17 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp. III-83~pp. III-88(2005)
- (2) 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)
- (3) 藤原佑輔, 崔天時, 陳麗, 岡宏一, 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-, 日本 AEM 学会誌, Vol. 14, No. 1, pp. 126-131(2006)