

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-

Magnetic Levitation System With Permanent Magnet Motion Control -Study of Spinning Mechanism-

学 藤原 佑輔（高知工科大） 崔 天時（高知工科大）
正 岡 宏一（高知工科大）

Yusuke FUJIWARA, Kochi Univ. of Tech., 185, Miyanokuchi, Tosayamada-cho, Kami-gun, Kochi
Cui Tianshi, Kochi Univ. of Tech.
Koichi OKA, Kochi Univ. of Tech.

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 liner 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.

Key Words: magnetic levitation, spinning mechanism, permanent magnet, voice coil motor

永久磁石をアクチュエータにより駆動し、エアギャップを調整することによって非接触浮上を実現することができる⁽¹⁾。このような浮上機構を用いて浮上対象のどのような操りが可能かについて研究を行なっている。今回は記述した方式で浮上させた鉄球を回転させるための機構について述べる。

試作した実験装置を Fig.A1 に示す。図の中央部に浮上体である鉄球が浮上する。永久磁石はボイスコイルモータによって駆動され、永久磁石と鉄球との間隔を制御することで、鉄球を浮上させる。さらに、鉄球の水平面上に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ある程度の距離まで接近させたり、距離を離したりすることで、浮上体に回転運動を発生させる。永久磁石と浮上体の変位はそれぞれ渦電流センサを用いて計測する。また永久磁石の変位はボイスコイルモータの上端にプレートを取り付けその動きをセンサで計測する。

浮上体の鉛直方向の浮上制御と、水平面内の回転制御は互いに独立して行なわれる。鉛直方向の浮上はすでに成功しており、それは PD 制御による状態フィードバックによって行なっている。

水平面内の回転制御は以下のように行なう。

浮上体の回転のために、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。鉄球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付けることで、磁化された点が永久磁石の方へ引き付けられる。この力を利用し四方から繰り返すことで、鉄球を回転させる。その模式図が Fig A2 であり、これは鉄球の鉛直上部から見た図である。

永久磁石 a を 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。そして

の動きで永久磁石を鉄球から離し、永久磁石 b を の動きで近付けると、残留磁気部が引き寄せられ の動きで回転運動をする。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する。

返すことで鉄球が回転運動する。



Fig.A1 developed equipment

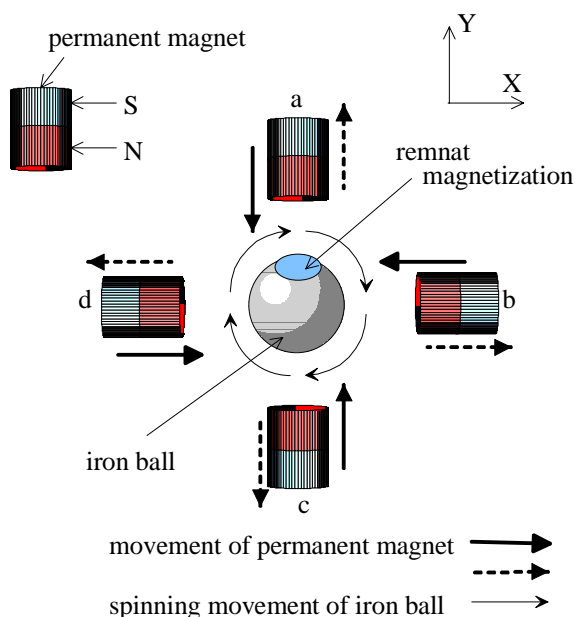


Fig.A2 image of spinning mechanism

1. 結論

今日、製造業界における機械の小型化や、精密機器生産におけるマイクロ・ナノ技術はめまぐるしく進展しており、それに伴い、機械パーツの小型化、精度向上が求められてきている。生産環境においても、工場のクリーンルーム化、埃塵の発生を抑え、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。今後更なる機械パーツの小型化、微細化が進むと、現在の組立・搬送技術では精度保持の面などで、対応しきれない可能性も考えられる。非接触で物体を搬送できれば、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、解決が可能であると考えられる。

非接触浮上機構では空圧、静電気、磁力などがある。空気圧では比較的強い浮上力が発生可能で、浮上対象の制限も少ないが、エアーにより埃塵の発生が考えられクリーン環境には不向きである。静電気力は、他に比べ格段に吸引力が小さく、対象物は薄く面積の広いものに限られる。磁力を用いた場合、浮上対象は磁性体に限られるが、他に比べ吸引力は大きく、埃塵の問題もない。ここでは、磁力を用いた浮上機構について考察する。

現在、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る、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。この浮上方式によって組立・搬送などを行なうには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をする。

2. 磁気浮上装置

今回開発した磁気浮上装置の概観を Fig.1 に、その写真を Fig.2 に示す。浮上対象である鉄球の鉛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ものである。

永久磁石と浮上体の変位はそれぞれ渦電流センサを用いて計測する。また永久磁石の変位はボイスコイルモータの上端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に取り付けられた軸の先端に取り付けてあり、各ボイスコイルモータはステイによりセンサと共に、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。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、このことで浮上が

可能となる。

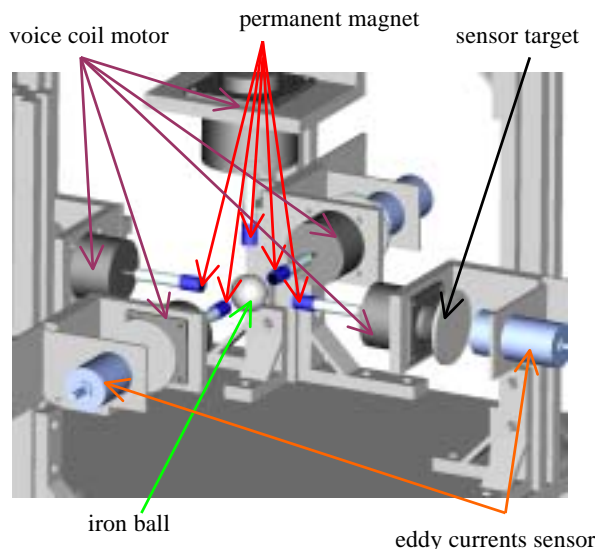


Fig.1 illustration of maglev system for spinning close-up around the permanent magnet

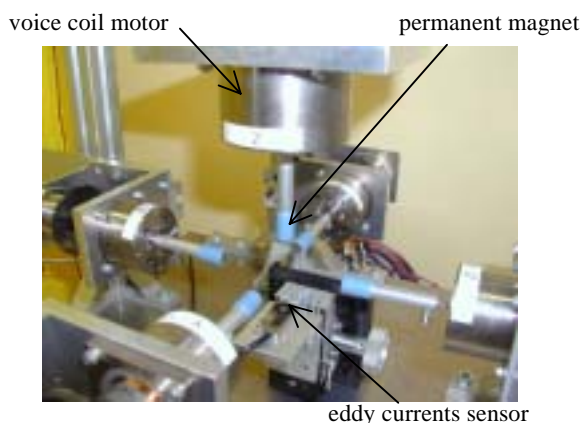


Fig.2 photograph of developed equipment

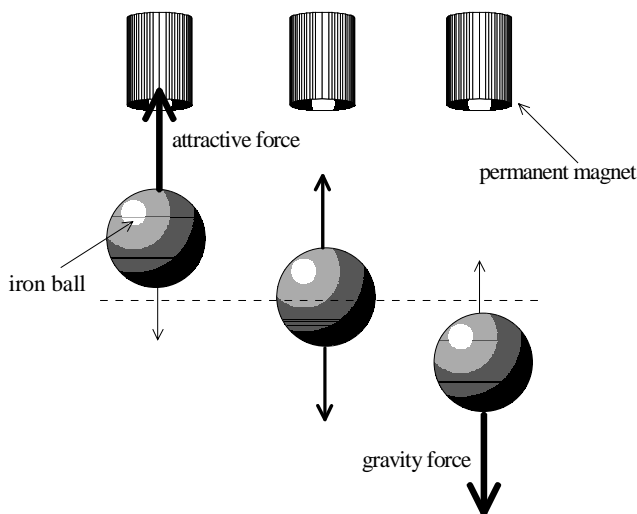


Fig.3 the relation of attractive force and gravity force

3-2. 吸引力の検討

実験装置で用いる永久磁石は 8×8 [mm] の円柱形ネオジウム磁石、浮上対象は質量 63.74[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 Fig.4 に示す。

図より、永久磁石と浮上体との間に働く吸引力 f_m は式 (3-1) のように間隔 gap の二乗に反比例すると仮定した。

$$f_m = \frac{K}{gap^2} \dots\dots\dots (3.1)$$

ここでの、 K は吸引力定数であり、Fig.4 より $K=16.9 \times 10^{-6}$ [N/m] と求められた。また浮上体の質量は 63.74[g] なので、平衡状態の空隙は 5.2[mm] である。

3-3. 浮上機構のモデル化⁽²⁾

3-2 における計測結果を用い、浮上機構の理論的な検証を行なうため、1 自由度浮上機構のモデル化を行なった。モデル化は Fig.5 に示す浮上機構について行なった。以下に用いた記号を示す。

- Z_0 : 浮上体位置
- Z_1 : 永久磁石位置
- m_0 : 浮上体質量 63.74[g]
- m_1 : 永久磁石質量 7.52[g]
- fa_1 : 永久磁石の駆動力
- fm_1 : 永久磁石が浮上体に及ぼす鉛直方向の支持力
- d : 永久磁石と浮上体までの距離 5.2[mm]
- K : 永久磁石の吸引力定数 16.9×10^{-6} [N/m]
- k_m : 線形化したときの永久磁石の吸引力定数
- k_1 : 永久磁石支持部のばね定数
- c_1 : 永久磁石の減衰係数
- g : 重力加速度 9.8[Gal]

また、平衡状態からの微小変化は を付けて表すものとする。

今、入力を永久磁石に加えるボイスコイルモータの力 fa_1 とし、出力を浮上体の位置とすると、状態空間法によるモデル化として、

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = cx$$

ただし、

$$x = \begin{pmatrix} \Delta z_0 \\ \Delta \dot{z}_0 \\ \Delta z_1 \\ \Delta \dot{z}_1 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_m}{m_0} & -\frac{k_m}{m_0} & 0 & 0 \\ -\frac{k_m}{m_1} & \frac{k_m - k_1}{m_1} & 0 & \frac{c_1}{m_1} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \end{pmatrix} \quad c = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

と表すことができる。ここで k_m は、Fig.4 より

$$k_m = K \left(\frac{1}{d} \right)^3 \dots\dots\dots (3.2)$$

である。

3-4. 浮上実験

製作した装置では、浮上は鉛直方向の磁石 1 個で行なわれる。よってまずこの目的の浮上について検証を行なった。前節の制御方法は PD 制御を用いて、状態フィードバックを行なった。モデルに基づいて PD 制御のゲインを求めた。フィードバックゲインは、ボイスコイルモータ側が $P:0.065$ [V/mm]、 $D:0.001$ [V・s/mm]、浮上体側が $P:0.1$ [V/mm]、 $D:0.0002$ [V・s/mm] である。浮上の様子を Fig.6 に示す。

4. 回転機構

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.7 に示す。これは鉄球の鉛直上部から見た図である。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付けることで、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繰り返すことで、鉄球を回転させる。

初期状態として、各永久磁石は鉄球から十分に離れているものとする。

まず、永久磁石 a を 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。そして の動きで永久磁石を鉄球から離し、永久磁石 b を

の動きで近付けると、残留磁気部が引き寄せられ の動きで回転運動をする。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。

現在、簡易な実験において、回転することが確認されている。しかし実験報告を行なうにいたっていない。

5. 結言

今回は、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報告を行なった。内容は以下のとおりである。まず永久磁石を制御することにより浮上体を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。現在 1 自由度の浮上に成功し回転に関する基礎的な実験を行なっているところである。

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点があること、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。

文献

- (1) 岡宏一，永久磁石の運動制御による磁気浮上機構
- (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 (2002)

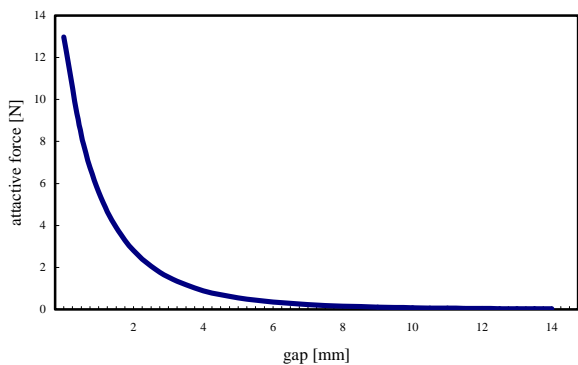


Fig.4 attractive force about the air gap between the magnet and the iron ball

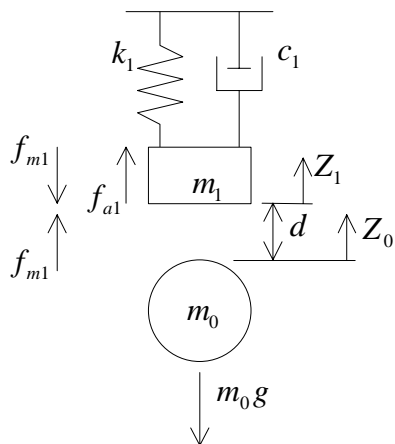


Fig.5 model of 1 d.o.f. magnetic suspension system



Fig.6 photograph during levitation

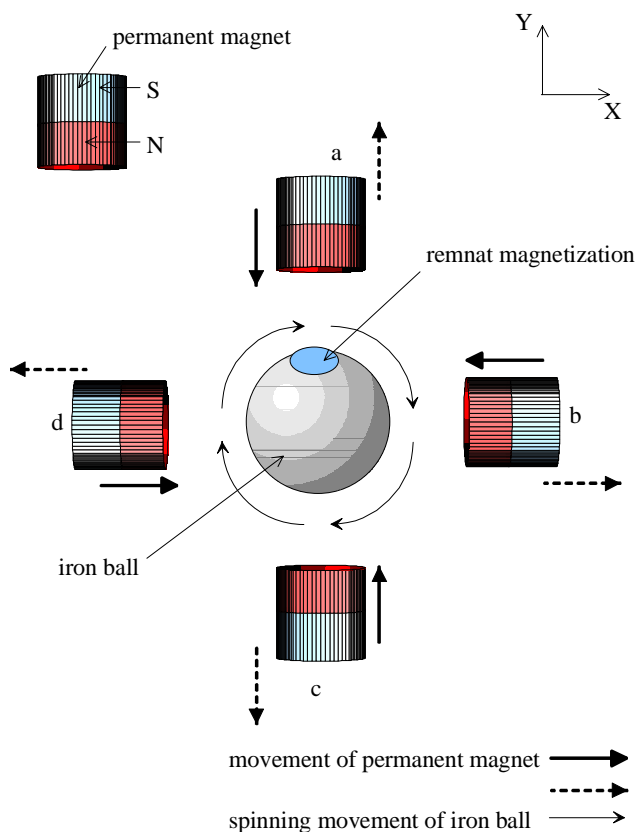


Fig.7 image of spinning mechanism