回転モータを利用した浮上システムの開発 Development of Magnetic Suspension System Using Rotary Motor

〇学孫鳳(高知工科大学) 正 岡 宏一(高知工科大学) 西原 雄太(高知工科大学)
 Feng SUN, Kochi University of Technology, Tosayamada, Kami, Kochi
 Koichi OKA, Kochi University of Technology
 Yuuta SAIBARA, Kochi University of Technology

This paper describes a magnetic suspension system using a rotary motor and a disk magnet. In this suspension system, the suspension force to the suspended object is provided by a disk-type permanent magnet and controlled by a magnetic resistance control device, which controls the angle of disk magnet to change the flux flowing through the suspended object. This suspension system can generate a zero attractive force, change the polarity of the stator poles, and realize zero power control for any suspension poison. In this paper, the suspension principle of this suspension system is introduced, the IEM (Integral Element Method) analysis for magnetic flux path is performed, the model and simulation are carried out, and some suspension experiments are executed. Finally, some results are shown.

Key words: Magnetic Suspension, Permanent Magnet, Rotary Motor, Flux Path Control, Zero Power Control

永久磁石を用いた磁気浮上機構は数多く提案されている. 通常,永久磁石を用いた磁気浮上機構は,永久磁石の吸引 力を調整できないこと,浮上体が一度吸着してしまうと制 御できないこと,磁極を変えることができないなどの問題 がある.本報告では,これらの問題点を解決するため,回 転モータと円板磁石を用いた磁気浮上機構を提案する.こ の浮上機構は,永久磁石の回転制御により磁気抵抗を制御 し,浮上力を調整するものである.

試作した磁気浮上機構の写真を Fig.A1 に示す. この浮上 機構は、円板磁石、回転モータ、パーマロイのコア、四角 柱の浮上体,二つの渦電流センサで構成されている.円板 磁石は、装置の中央の円形のもので、直径が 30mm、厚さ が10mmのネオジム磁石であり、回転モータにより駆動さ れている.コアは円板磁石の両側にある二つのF型のもの で、厚さが 10mm のパーマロイである. F型のコアの下に ある四角柱はパーマロイの浮上体である.磁束が空気より 強磁性体に通りやすい特性を利用して、円板磁石と二つの コア,浮上体によって閉磁路が形成される.回転モータに より、円板磁石の回転角度を制御し、磁路中の磁気抵抗を 制御する. それにより, 浮上体とコアとの間の吸引力を調 整する. 浮上体下の二つの渦電流センサは浮上体の位置を 測定する.二つのセンサと回転モータのエンコーダの信号 を通して, PD 制御システムを利用し, 浮上体が浮上する ことを実現する.

実験により、コアの発生力がゼロになることと磁極を変 えられることが確認できた.しかし、浮上実験では、磁路 中で磁束が漏ることがあるので、浮上体の両側のコアの吸 引力が等しくない場合がある.そのため、四角柱の浮上体 を浮上できない.その解決方法として、Fig.A2に示すよう に、浮上体の浮上方向上に、一つのリニアレールを用いる ことにより、コアの不平衡の力を相殺し、浮上することが できた.

リニアレールを用いた浮上実験の結果を Fig.A3 に示す. 実験結果は、安定浮上状態を実現し、1 秒後に浮上体が下 に 0.2mm 動いた、5 秒までの応答結果を記録した. Fig.A3 より、浮上システムは、外乱が入力されたあと、すぐに再 び安定浮上になっている.尚、定常浮上しているとき、モ ータの電流がほぼゼロになっている.これによって、この 磁気浮上機構により、安定浮上とゼロパワ制御が可能であ

ることが確認できた.



Fig.A1 Photograph of a developed prototype



Fig.A2 Suspending photograph using a linear rail





1. はじめに

磁気浮上機構は、浮上体を非接触で支持できるし、機械的 な接触からの摩擦がなくて、塵埃などを発生しないものであ る.これらの利点によって、高速回転の磁気軸受、高速運行 の磁気浮上列車およびクリーンルーム中の磁気浮上搬送装置 などに利用されている.磁気浮上機構には、様々な形式があ るが、永久磁石を用いた磁気浮上機構はコイルがなく、発熱 の問題が無視できるので、現在この磁気浮上機構が数多く提 案され、また実現されている.永久磁石を用いた磁気浮上機 構は、浮上力が永久磁石の吸引力であり、永久磁石の起磁力 が直接に調整できないので、浮上力の調整方法は通常二つの 種類がある¹⁾.

- (1) 永久磁石と浮上体との間の空隙の長さを制御する.
- (2) 磁気回路内にリラクタンス(磁気抵抗)調整機構を設ける.

方法(1)を利用した磁気浮上システムの例としては,著者ら は、クリーンルーム中の非接触搬送装置として、リニアアク チュエータを用いて永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力 を制御する方式を用いた,懸垂型磁気浮上機構を提案してい る²⁾³⁾. 崔・岡は,永久磁石とボイスモータを用いて永久磁 石を駆動し,浮上体とのギャップを制御し,小さい機械パッ ツを非接触操作するための浮上機構も提案している⁴⁻⁶⁾.こ の種類の磁気浮上システムは,永久磁石の発生力を調整でき ない,装置の磁極を変えられない,浮上体が一度吸着してし まうと制御できない等の欠点が克服されていない.

方法(2)を応用した磁気浮上システムの例としては、上野ら は、磁歪素子と圧電材料を用いて磁路を制御する磁気浮上装 置を研究している^{7/8)}.このシステムでは、永久磁石と浮上対 象物から形成される磁路と並列な磁路に複合機構を挿入し、 圧電材料による圧縮力によって磁路中の磁歪材料のリラクタ ンスを変化させて、吸引力を制御する.水野らは、永久磁石 の吸引力を利用した磁気浮上で、磁路中に挿入した強磁性体 の位置を変化させることによって、永久磁石から浮上体に到 達する磁束の大きさ及び方向を調整する⁹⁾¹⁰⁾.これらの磁気 浮上装置は、磁極を変えることができない.

本研究は、円板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する¹¹⁾¹²⁾.この浮上システムでは、回転 モータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制御すること により、円板磁石が発生した磁束の経路を変更し、浮上力を 制御する.円板磁石の回転角度の変化により、磁束の大きさ だけでなく、向きも変化させることが可能なため、磁極の極 性を変化させることもできる.さらに、円板磁石を一定の回 転角度に回転させると、浮上力がゼロになる.また、回転モ ータは浮上体の重量を支持する力を必要としない、従って、 安定浮上しているとき、この浮上システムによってゼロパワ 制御を実現することが可能である.

本論文では、まず円板磁石を用いた浮上原理を説明する. 次に、試作装置を紹介し、浮上システムの磁束を考察するため、株式会社エルプの ELF/MAGIC というソフトウェアを利 用して解析した.次に、試作装置によって、モデル化と数値 シミュレーションを行う.そして、試作装置を用いて、発生 吸引力と磁束密度を計測し、その結果を示す.また、浮上実 験を行った.しかし、磁路中で磁束が漏ることがあり、四角



Fig.1 Principle of magnetic suspension using a flux path control

柱の浮上体を直接浮上できないので,浮上体の浮上方向にリ ニアレールを用いて,浮上することができた.さらに,装置 の片側のコアによって,鉄球を浮上することもできた.

2. 磁路調整形磁気浮上原理

Fig.1 に提案する磁路調整形の磁気浮上機構の原理を示す. この磁気浮上機構は、円板磁石と二つのF型の強磁性体コア と四角柱の浮上体から構成されている.ここでは、円板磁石 は、ある 90 度の部分が N 極、反対側の 90 度が S 極であると 仮定する.

まず, Fig.1, (a)のように円板磁石のN極がちょうど真上に, S極が真下にあるとき,上部のN極から出発した磁束の半分 は右側のコアに,半分は左側のコアに流れ込んでいると考え られる.そして,これらの磁束はコア下部のS極に面した部 分までコアを通り,その後左右のコアから磁石のS極に入る. よって,円板磁石からの磁束は浮上体を通過することはない. 従って,コアと浮上体間では吸引力は発生しない.

次に、Fig.1, (a)の状態から、円板磁石が右に少し回転した ときの様子が Fig.1, (b)である. この時、上部の N 極と面す るコアの面積は、左側のコアより右側のコアの方が大きいの で、N 極から流出する磁束が左側のコアより右側のコアの方 が多く流れるようになる. また、下部の S 極と面する左右の コアの面積関係は、N 極より逆になっている. 従って、左側 のコアで流れる磁束は全て左側のコアと面する S 極に入る. 右側のコアで流れる磁束は二つの部分に分けて、一つの部分 の磁束は右側のコアと面する S 極に流れ、も一つの部分は浮 上体を通って、左側のコアと面する S 極に流れる. これによ り、コアと浮上体間に磁束が流れ吸引力が発生する.

上記より, Fig.1, (a)の状態から 90 度までの間では, 円板 磁石の回転角度が大きくなるに従って, 浮上体を通過する磁 束が大きくなり,吸引力も大きくなる. このことから, 円板 磁石の回転角度を制御することによって浮上力を調整するこ とが可能であると考えられる. また, 逆方向に円板磁石を回 転させることにより,磁束を逆に流すことが可能であり, コ アの磁極の極性を変化させることができる.

3. 試作装置と磁路解析

3·1 試作装置

今回提案する磁路調整形磁気浮上機構の概図を Fig.2 に, 試 作装置の正面から見た写真を Fig.3 に示す.この浮上機構は, 円板磁石,回転モータ,パーマロイのコア,四角柱の浮上体, 二つの渦電流センサで構成している.円板磁石は,装置の中 央の円形のもので,直径が 30mm,厚さが 10mm,直径方向 上に磁極が半分に磁化されているネオジム磁石であり,垂直 固定板の裏側に取り付けてある回転モータによって回転駆動 される.回転モータは,高い位置決め精度のハーモニックド ライブと回転エンコーダを取り付けている DC モータである. このエンコーダの分解能は 360 p/r である.コアは円板磁石の 両側にある二つのF型のもので,厚さが 10mm のパーマロイ である.F型のコアの下にある四角柱はパーマロイの浮上体 である.パーマロイは,透磁率が非常に高く,また保磁率が 極めてに低い金属であり,残留磁気の影響が少ない.回転モ ータにより,円板磁石の回転角度を制御し,磁路中の磁気抵 抗を制御する.それにより,浮上体とコアとの間の吸引力を 調整する.浮上体下の二つの渦電流センサは,測定範囲が 2mm から 3mm まで,再現確度が 0.01mm で,浮上体の位置 を測定する.

この磁気浮上システムのコントローラは Fig.4 に示したような DSP コントローラである. コントローラでは, A/D 変換器によってデジタル化した二つの渦電流センサの信号と回転モータのエンコーダからの回転角度信号はコントローラに入力される. その信号に基づいて DSP は演算を行い適切な回転モータの回転角度を計算する. その結果は, D/A 変換器を通して回転モータへの電流信号として出力される.

3·2 磁路解析

提案した磁気浮上システムにおける,磁路制御方法の可能 性を確認すること,及び円板磁石の角度が変化する時の磁路 での磁束の流れる状態を知るため,積分要素法によって,磁 気浮上システムの磁路を,ソフトウエア株式会社エルプの EGmap を利用して解析した.

積分要素法による磁路解析は、2次元による解析を行った. まず、磁路解析のモデルは、試作した磁気浮上機構とおりに 同じサイズで作った.磁路解析は、円板磁石と二つのコアと の距離は 2mm で、コアと浮上体との距離は 3mm で行った. 円板磁石を異なる回転角度に停める解析結果を Fig.5 に示す. 図の中では、中央の円形のものは円板磁石であり、磁束の流 れる方向は矢印の方向で、磁束の大きさは矢印のサイズと色 で表している.

まず, Fig.5 (a) に,円板磁石を0度に停める結果を示す. この時,円板磁石のN極がちょうど真上に,S極が真下にある.図から分かるように,円板磁石内以外の磁路中は,磁束 があまりない.磁束は浮上体を通らないので,コアと浮上体 との間の吸引力がない.

次に, Fig.5 (b) に, 円板磁石を正面から時計回りに 20 度に 停める結果を示す.このとき,片方の磁束は,磁石の N 極か ら順番に右側のコアと浮上体と左側のコアを通り,磁石の S 極に戻る.コアと浮上体との間の空隙とその周りの空間に磁 束があるので,コアと浮上体との間の吸引力が発生した.さ らに,磁路以外の空間での磁束も認められる.つまり磁束が 漏ることがある.

上記の結果によって、磁束が磁路中で流れることは、説明 した磁気浮上原理とおりになっているので、提案した磁気浮 上システムにおける磁路制御方法の可能性を確認できた.

最後に, Fig.5 (c) と(d)に, 別々に円板磁石を時計回りに 90 度と 270 度に停める結果を示す.二つの結果を比べると, 浮上体に通る磁束の方向が逆になっている.従って,この磁気



Fig.2 Illustration of the developed prototype



Fig.3 Photograph of the developed prototype



Fig.4 Configuration of the magnetic suspension system

浮上機構によって、コアの磁極の極性を変化させることを確認できた.

4. モデル化と数値シミュレーション

4・1 試作装置によるモデル化

試作した磁気浮上システムにおける,浮上可能性の理論的 な確認,数値シミュレーションの実行およびコントローラの フィードバックゲインの決定などのために,磁気浮上システ ムのモデル化を行った. モデル化とシミュレーションのために以下のことを仮定 する.

- (1) 円板磁石は直径方向に磁極が半分に磁化されている.
- (2) 浮上体中を通る磁束は磁極と面するコアの面積に比例 する.
- (3) コアの磁気抵抗は小さく、コアと浮上体間の磁気抵抗 に比べ無視できる.
- そして、浮上体中を通る磁束は次式のように表される

 $Q = k \sin \theta / (2d) \dots (A1)$

ただし,

Q: 浮上体中を通る磁束

- 伊板磁石の磁極に面するコアの角度(装置正面から時計 回りを正とし、Fig.1、(a)に表している状態の角度は0で ある)
- d: コアと浮上体との間の距離
- k: 磁束定数

さらに、コアと浮上体との間の吸引力は浮上体を通る磁束 の自乗に比例すると考えられる.よって、浮上体の運動方程 式は次式となる

$$m\ddot{z} = k_m \frac{\sin^2 \theta}{d^2} - mg \cdots (A2)$$

ただし,

m: 浮上体の質量 (61g)

z: 浮上体の位置 (上向きを正)

km: コアからの吸引力の定数 (上向きを正)

4・2 数値シミュレーション

上記のモデルによって、円板磁石の回転角度を入力、浮上体の位置を出力として、簡単な数値シミュレーションを行った.また、浮上体にステップ入力を加えたときの応答結果は Fig.5 に示す.図から分かるように、ステップ応答の前後で安定浮上は実現されている.これより、提案した磁気浮上システムの実現の可能性が示されたと言える.

5. 試作装置による基礎実験

試作した装置では、コアと浮上体との間の吸引力と左右の コアが同じ位置での磁束密度を知るために、吸引力と磁束密 度の測定を行った.

5・1 吸引力の測定

吸引力の測定方法は、浮上体を力センサに取り付けたマイ クロメータに取り付け、円板磁石と両コアの距離を 2mm に 調整し、両コアの下部より 2mm から 8mm まで 1mm 間隔で 離し且つ、円板磁石を 0°(Fig.1, (a)とおりの状態) から 10° づつ1回転させ計測した.

それらの結果を Fig.7 に示す.図から分かるように,浮上体の位置が変わらないとき,円板磁石の回転角度により吸引力に変化が現れた.円板磁石の回転角度は 0°と 180°であるとき,吸引力がほぼゼロになり,角度は90°と 270°であるとき,吸引力が相対の最大値になる.さらに,同じ角度のとき,空隙が小さくなると吸引力は大きくなる.これより,空隙と円板磁石の回転角度により,コアの下側に発生する吸引力を調整することが可能であることが分かった.

5・2 磁束密度の測定

磁束密度の測定方法は、ガウスメータをマイクロメータに



(a) The rotation angle of magnet is 0 degree



(b) The rotation angle of magnet is 20 degrees



(c) The rotation angle of magnet is 90 degrees



(d) The rotation angle of magnet is 270 degrees Fig.5 Magnetic flux diagrams by FEM analysisThe distance between magnet and cores is 2 mm.The distance between cores and levitated object is 3 mm.



Fig.6 Simulation results of step response

取り付け,円板磁石と両コアの距離を 2mm に調整し,片側 のコアの下部より 3mm から 10mm まで 1mm 間隔で離し且つ, 円板磁石を 0° (Fig.1, (a)とおりの状態) から 10° づつ 1回 転させ計測した.

それらの結果を Fig.8 に示す.図より、磁束密度は、円板 磁石の回転角度と空隙に基づいて変化する.距離が小さくな ると、磁束密度は大きくなり、円板磁石の回転角度により磁 束密度にほぼ正弦曲線見たいの変化が現れる.また、左右コ アの磁束密度は、ほぼ角度と位置の向きが逆である.しかし、 ゼロになる時の角度は少し違っている.これは、磁束の漏れ の影響と考えられる.

6. 試作装置による浮上実験

6・1 リニアレールを用いた浮上実験

試作した磁気浮上機構を用いた四角柱の浮上体を直接浮上 させる実験を行った.しかし,試作装置では磁束が漏ること があり,両コアの発生力が等しくないので,安定浮上できな かった.そのため,四角柱の浮上体をリニアレールに取り付 け,回転の自由度を制限して浮上実験を行い,これに成功し た.

リニアレールを用いた浮上写真をFig.9に示す.また,浮上 の安定性を評価するためにステップ応答の実験を行った.実 験は、安定浮上しているとき、浮上体を、1秒後に下に0.2mm 動させ、5秒までの応答を記録した. その応答結果をFig.10に 示す. Fig.10では、上から回転モータへの入力電流、浮上体 の変位,及び円板磁石の回転角度を表している.図より,ス テップを入力した後,直ぐに安定浮上状態になった.浮上体 が下に変位したとき,磁石の回転角度は,まず,安定状態か ら突然小さくなり,そして大きく回転し,最後の安定角度が 前より大きくなった.これは,吸引力を小さくすることで, 浮上体を下に変位させ、そして吸引力を大きくすることで、 再び安定状態にさせたからである.また,変位した浮上体と コアとの距離は長くなったので、前より大きい吸引力が必要 なことが分かる. さらに、浮上体の動きの前後には、回転モ ータの入力電流がほぼゼロになっていることによって、この 磁気浮上機構は、安定浮上させられる範囲内なら、ゼロパワ 制御が可能であることを確認できたと言える.

6・2 鉄球を浮上させた実験

リニアレールを用いた磁気浮上実験は、摩擦が必ずあるの で、制御システムを考察するため、浮上機構の片側のコアを 用い、鉄球を浮上する実験を行った.鉄球が安定浮上してい



Left:3mn Left:4mm Left:5mm Left:6mm Left:7mm Left:8mm Left:9mm Left:10mm Right:3mm Right:4mm Right:5mm -Right:6mm Right:8mm Right:10mm Right:9mm Right:7mr 0.2 0.15 F 0.1 Magnetic Flux Density 0.05 -0.05 -0.1 -0.15 -0.2 0 20 20 2 6 S 30 S °° 2ho ŝ 30 26

Fig.8 Magnetic flux density between cores and levitated object

Rotation Angle of Magnet (Degree)



Fig.9 Suspending photograph with a linear rail



Fig.10 Step response results in suspension experiment using a rail



Fig.11 Suspending photograph of a levitated iron ball



Fig.12 Step response results in suspension experiment of an iron ball

る写真を Fig.11 に示す.また,ステップ応答の実験を行った. その結果を Fig.12 に示す.鉄球を浮上させた実験結果は,上 記のリニアレールを用いて浮上させた実験結果と比較すると、 同じであることを確認できた.また,この磁気浮上機構にお いて制御システムの有効性を実証することができた.

7. おわりに

本論文では、円板磁石と回転モータを用いた磁気浮上シス テムを提案した.まず、磁路調整形磁気浮上原理を説明し、 試作の浮上装置を設計・製作した.積分要素法により、試作 装置の磁路を解析した.そして、モデル化と数値シミュレー ションを行った.試作装置の特性を知るため、コアの吸引力 と磁束密度などの基礎実験を行った.最後に、試作装置によ り、リニアレールを用いた四角柱の浮上体を浮上させる実験 と鉄球を非接触で浮上させる実験を行った.以上の結果によ って、この浮上システムは、下記のようにまとめられる.

- (1) 回転モータに取り付けられた円板磁石の回転角度を制 御することにより、円板磁石が発生した磁束の経路を変 更し、浮上力を制御できた。
- (2) 円板磁石の回転角度の変化により,磁束の大きさだけで なく,向きも変化させることが可能なため,磁極の極性 を変化させることができた.
- (3) 円板磁石を一定の回転角度に回転させると,浮上力をゼ ロにすることができた.
- (4) 回転モータは浮上体の重量を支持する力を発生させる

必要がないので、安定浮上させられる範囲内なら、ゼロ パワ制御が可能であることを確認できた.

文 献

- (1) 樋口 俊朗,岡 宏一,リラクタンス制御形磁気浮上シ ステムー永久磁石とリニアアクチュエータを用いた浮上 機構,電気学会論文集, Vol. 113-D, No.8, (1993), pp.988-994
- (2) 岡 宏一,催 天時, VCM を用いた懸垂形磁気浮上機構におけるゼロパワ制御,日本機械学会[No.03-8]第8回 「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集,(2003), 166-169
- (3) 孫鳳, 岡宏一, 永久磁石の吸引力を利用した懸垂型磁気 浮上機構における零パワ制御, Dynamic and Design Conference 2008, No.660, (2008), pp. 373
- (4) 催天時,岡宏一,政木慶次,永久磁石とリニアアクチュ エータを用いた磁気浮上機構-両側吸引の場合の浮上特 性について,第17回「電磁力関連のダイナミクス」シン ポジウム, No.2AM5, (2005), pp. 243-248
- (5) K. Oka, "Noncontact Manipulation with Permanent Magnet Motion Control", Proceeding of the 4th International Symposium on Linear Drivers for Industry Applications, LDIA2003, pp.259-262, September 8-10, 2003, Birmingham, UK
- (6) 藤原佑輔,催天時,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, Dynamic and Design Conference 2004, No. 517, CD-ROM, (2004)
- (7) T. Ueno, J. Qiu, J. Tani, "Magnetic Force Control Based on the Inverse Magnetostrictive Effect", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.40, No.3, pp.1601-1605, 2004
- (8) 上野 敏幸, 裘 進浩, 谷 順二, 超磁歪・圧電の複合 化による磁気力制御用電磁変換素子とその磁気浮上への 応用, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.67, No.658, (2001), pp.1897-1904
- (9) 水野 毅, 星野 博, 高崎 正也, 石野 祐二, 磁路制 御形磁気浮上の提案と基礎実験, 日本 AEM 学会誌, Vol.14, No.3, (2006), pp.96-102
- (10) 水野 毅, 平井 雄三, 石野 祐二, 高崎 正也, 磁路 制御形磁気浮上に関する研究-ボイスコイルモータを用 いたシステムの開発, 日本機械学会論文集(C編), Vol.72, No.721, (2006), pp.2869-2876
- (11)藤原 佑輔,三原 崇,岡 宏一,アクチュエータによる磁束制御を用いた磁気浮上装置の開発,第17回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム,No.2PM12, (2005), pp. 359-362
- (12) K. Oka, N. Ninomiya, L. Chen and Y. Fujiwara, Magnetic Suspension System with Variable Flux Path Mechanism Using Rotary Actuator, Tenth International Symposium on Magnetic Bearings 2006, p.86