第21回 「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム

The 21st Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD21)

講演論文集



写真提供: 善光寺

会期:2009年5月20日(水)~22日(金)

会場:メルパルク長野

主催:電気学会(産業応用部門)

共催:日本機械学会,日本 AEM 学会

協賛:日本鉄鋼協会,精密工学会,日本磁気学会,日本液晶学会 計測自動制御学会,日本原子力学会

後援:財団法人ながの観光コンベンションビューロー,財団法人長野県テクノ財団

アクチュエータ駆動による非接触回転駆動機構

一円板磁石の回転による駆動-

孫 鳳* 岡 宏一*

Noncontact Spinning Mechanism by Actuator —Using Permanent Magnet Rotation— Feng Sun*, Koichi Oka*

This paper proposes a noncontact spinning mechanism that spins a levitated object (here an iron ball) using four rotary permanent disk magnets driven by rotary actuators. When the object was levitated stably by a magnetic suspension system consisting mainly of a permanent magnet and a linear actuator, the four rotary permanent disk magnets spun the suspension object in the horizontal direction by means of attraction to a remanent magnetization on the surface of the suspension object. In this mechanism, the four disk magnets are arranged around the levitated object and in the same horizontal plane as the ball. Each magnet has two magnetic poles in the radial direction. The magnetic poles of the four disk magnets are arranged in a parallel configuration, and two facing disk magnets are a group. The magnetic poles all point in the same direction in the same group, and the directions of the magnetic poles are opposite between these two groups. The four disk magnets all rotate at the same speed and rotation direction. In this paper, a prototype of the noncontact spinning mechanism is introduced. Secondly, the suspension principle and control system of the magnetic levitation system in the vertical direction are set forth, and the suspension experimental results are shown. Thirdly, the spin principle and control system of the spin experiments performed indicate that a suspended object can be spun using this noncontact spinning mechanism.

キーワード:磁気浮上, 永久磁石, アクチュエータ, 回転制御, 非接触 **Keywords**: maglev system, permanent magnet, actuator, spinning control, noncontact

1. 緒言

現在,機械の精密化と小型化が目まぐるしく進展しており,それに伴い,塵埃の発生を抑えるクリーンルーム工場や,小型の機械パーツの組立・搬送中の精度保持が求められている.非接触で機械パーツを操作することができれば,接触が起因となって発生するパーツの変形,またそれに伴う精度低下や塵埃発生の低減が可能であると考えられる.

非接触浮上機構には空気圧,静電気,磁力などが利用可 能である.空気圧ではエアーによる塵埃の発生が考えられ 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,塵埃の問題もない.ここでは,

* 高知工科大学 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185 Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi 782-8502 磁力を用いた浮上機構について考察する.

これまでに、常電導を用いた浮上機構には多くの方式が 提案され、実現されている.非接触搬送機構には、電磁石 を用い、電流を制御する非接触搬送機構が考察されている ⁽¹⁾⁻⁽³⁾.また、永久磁石とリニアアクチュエータを利用した懸 垂型搬送装置が提案されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾.非接触操作機構には、 永久磁石とリニアアクチュエータを用いた2自由度磁気浮 上操作機構が提唱されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾.それと共に、永久磁石リ ニア駆動によるマニピュレーション機構も考察されている ⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾.それらの機構によって、浮上中の物体を非接触で回 転させることができる.しかし、配置した4つの永久磁石 をそれぞれ交互に浮上体に接近させるため、浮上体吸引力 の不平衡や、方向の変化により、浮上体は回転しながら脈 動するといった問題点がある.

本報告では,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,円板磁石とロータリーアクチュエータを 用いた非接触回転駆動機構について考察する.まず,磁気 浮上回転システムの試作装置を紹介する.次に,鉛直方向 の浮上について報告し,回転機構の原理を説明する.最後 に試作装置において回転実験を行い,円板磁石の回転によ って,鉄球の回転応答実験結果,円板磁石と鉄球との回転 数の追従関係の実験結果を示す.

2. 磁気浮上回転装置

試作した磁気浮上回転装置の写真を図1 に示す.この試 作装置は鉛直方向の浮上機構と水平方向の回転機構から構 成され,鉄球を浮上体としている.この鉄球は,直径が30 mm, 重量が109.8gである.

〈2・1〉磁気浮上機構 磁気浮上機構は図1の中央の部分であり、永久磁石、Voice Coil Motor (VCM)、センサターゲット、2 つのセンサなどが含まれる.1 つの永久磁石がVCM の駆動軸に取り付けられており、VCM によって軸方向に直線的に駆動される.VCM の駆動軸は、永久磁石と渦電流のギャップセンサのターゲットとを VCM の内部を貫いてつながっている.よって永久磁石の運動の検出は上部の渦電流センサによって行われる.

永久磁石は,直径が8mm,長さが10mmの円筒形のネオ ジム磁石であり,その軸方向に着磁されている.VCMは, 15mmの可動範囲を持っており,定格電流2Aに対して20N の力を発生させることができる.上部の永久磁石の運動を 検出するセンサの検出範囲は10mmであり,分解能は0.02 mmである.下部の浮上体の運動を検出するセンサは,検出 範囲が4mmであり,分解能が1µmである.

浮上制御システムの構成を図 2 に示す. 浮上体および永 久磁石の運動を測定した信号は, A/D 変換器によってデジ タル化し, 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 VCM への発生力を計算する. その結果は, D/A 変換器を通して VCM へ電流信号として出 力される.

〈2・2〉回転機構 回転機構は,試作装置の周りのものであり、4つの同じ回転機構から構成されている.1つの回転機構の基本構成を図3に示す.回転機構は、円板磁石、ギアヘッド、ロータリーアクチュエータ、エンコーダなどから構成されている.円板磁石は、直径が30mm、厚さが10mmのネオジム磁石であり、その径方向に磁化されている.ロータリーアクチュエータは、ギアヘッドを通して、円板磁石を回転する.さらに、エンコーダにより、円板磁石の回転速度を計測する.回転機構は、レールに取り付けられており、任意の位置・高さに固定可能である.4つの同じ回転機構は、浮上中の浮上体を中心として、水平面上に90度ずつ配置している.さらに、図3に示す回転機構の制御システムは、エンコーダの信号を用い、速度と角度で制御している.

3. 回転原理と制御システム

(3・1) 回転原理 浮上体の回転機構は,浮上体を水平 面内で回転させる機構である.今回の試作機構の回転原理



図1 磁気浮上回転装置の写真 Fig. 1 Photograph of Magnetic Suspension-Spin Device



図2 磁気浮上部分の基本構成

Fig. 2 Configuration of Magnetic Suspension System





を図 4 に示す.これは鉄球の鉛直上部から見た図で,鉄球 と円板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 つの円板磁石を直交位置に配置し,全部の円板 磁石を同じ回転速度で回転させると,浮上体の表面の残留 磁気が引き寄せられ、浮上体に回転運動を発生させる.

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.水 平方向の残留磁気が図8に表す.

図4に示すように、円板磁石は二つの磁極が径方向に磁 化されている.4つの円板磁石を,浮上している鉄球の水平 面に,鉄球に対して同じ距離で,直交位置に配置しており, 全ての磁極方向が平行している.また浮上体を中心として、 向かい合う円板磁石は共に磁極方向は同じであり、隣り合 う円板磁石の磁極方向は反対となるように配置する. さら に,4つの円板磁石を同様の回転方向と回転速度に回転させ る.これによって、鉄球を支持している水平方向の吸引力 は常に平衡となり、鉄球の合力はほぼ0となる.しかし、4 つの円板磁石の回転によって,鉄球の表面の残留磁力点を 支持している合力は常に変化している.残留磁気点を N と 仮定した場合,図8では残留磁気点に対して、円板磁石1 の吸引力が一番大きいため,残留磁気点が円板磁石 I へ引き 付けられ、残留磁気点が円板磁石 I に面する位置に移動す る. その結果,鉄球を時計回りに回転させることができる. それと同時に、4つの円板磁石は左周りに回転する. そのた め,鉄球が90度回転し残留磁気点が円板磁石Iに面する時 には、4つの円板磁石も90度に回転している.そのため、 その時点での残留磁気点に対して最大の吸引力を持ってい る円板磁石はⅡになっている.この一連の動作を繰り返し 行うことで,鉄球を継続的に回転させる.理論的には,鉄 球の回転速度が円板磁石の回転速度と等しくなる.

〈3・2〉制御システム 回転機構の制御システムを図 5 に示す.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.回転機構は 4 つの同じ回転装置 から構成されており、4 つの円板磁石を同じ速度で回転させ る.そのため回転機構の制御システムは、4 つの速度制御の PDコントローラを用い、また 3 つの回転角度制御の PDコ ントローラを用いている.4 つの円板磁石は初期位置での互 いとの角度を保てるため、1 つの円板磁石の回転角度を参考 値として、他の 3 つの回転角度を制御する.そのため、こ の制御システムによって 4 つの円板磁石は同期して動き、 同じ速度で回転し、また停止する.

4. 円板磁石の磁束密度特性の検討

回転試作装置で用いる永久磁石は \$ 30×10 mm の円板形 ネオジム磁石である.この円板磁石の磁束密度と回転角度 と距離との関係を知るために,円板磁石からの距離を変え, その場所で円板磁石を一回転させた場合の磁束密度を測定 する.測定方法は,円板磁石をロータリアクチュエータに 取り付け,ガウスメータを円板磁石よりそれぞれ 20 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm の距離に固定し,円板磁 石をある点より 10 度ずつ回転させ計測した.それらの結果







図 5 回転システムの制御構成図 Fig. 5 Control Diagram of Spinning System





Fig. 6 Magnetic Flux Density Characteristic of Disk Magnet







図82つの円板磁石を用いた鉄球の回転応答 Fig. 8 Rotation Response of Iron Ball Using Two Disk Magnets



図 9 4 つの円板磁石を用いた鉄球の回転応答 Fig. 9 Rotation Response of Iron Ball Using Three Disk Magnets

を図6に示す.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変化が現れた.これ より,この装置により吸引力の強さを調整可能であること が分かった.

5. 回転実験と実験結果

試作装置を用いた回転実験を行った.まず,円板磁石の 磁極を調整し,全ての円板磁石の位置をレールにより鉄球 の中心から等しい距離に固定した.次に,磁気浮上機構に よって,鉄球を安定に浮上を行う.さらに鉄球の安定浮上 中に,4つの円板磁石を同じ速度で回転させ,鉄球に回転運



図 10 1 つの円板磁石を用いた鉄球の回転状態 Fig. 10 Rotation State of Iron Ball Using One Disk Magnet



図 11 2 つの円板磁石を用いた鉄球の回転状態 Fig. 11 Rotation State of Iron Ball Using Two Disk Magnets



図 12 4 つの円板磁石を用いた鉄球の回転状態 Fig. 12 Rotation State of Iron Ball Using Three Disk Magnets

動をさせる.

今回は、円板磁石の位置を鉄球の中心から 75 mm に固定 した.また、円板磁石の数を1つの場合、2つの場合、4つ の場合の3通りで回転実験を行った.全ての場合で、原理 通りに鉄球が円板磁石の回転方向の逆に回転していること が確認できた.

実験では、円板磁石の回転数は円板磁石を駆動させるア クチュエータのエンコーダの信号を回転数に変換する.ま た,鉄球の回転数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,回転数に変換する.

〈5・1〉鉄球の回転応答の考察 鉄球の回転は円板磁石の回転に応答することを考察するため、回転の応答実験を行った.実験では、浮上している状態の鉄球に対して、円板磁石を突然速く回転させており、鉄球の回転に対して円板磁石は回転のフィードバックを行っていない.円板磁石と鉄球が静止状態から、2秒後に、円板磁石を左周りに 0.5

rps で回転し,20 秒後までの応答を記録した.各実験での 応答結果を図7から図9までに示す.これらの実験結果中 の回転速度は時計周りの方を正とする.図では、上の方が 鉄球の回転速度を示し、下の方が円板磁石の回転速度を表 している.

1つの円板磁石を用いた場合では,鉄球の回転速度が円板 磁石の回転速度に時々応答しなかった.図7は応答した時 の回転応答結果である.図7より,鉄球の回転数が応答し た後,周期的に変化し,段々大きくなっている.回転数が 周期的に変化することは,円板磁石の磁極と鉄球の残留磁 気点との相対位置が周期的に変化するので,互いの吸引力 が変化しているためだと思われる.応答しないことには, 鉄球表面上の残留磁気点が円板磁石に対して鉄球の背面に あるときに,残留磁気点が引き寄せられないことが分かる.

2つと4つの円板磁石を用いた場合での鉄球の回転応答結 果を図8と図9に示す.図8と図9より,円板磁石の回転 速度を速くさせると,鉄球の回転速度が速くなっているこ とがわかる.これらの場合の応答特性は,1つの円板磁石の 場合より良くなった.しかし,応答した回転数も周期的に 変化している.変化周期は,円板磁石の数が増えるによっ て,小さくなっている.図9から,速くなった鉄球の回転 速度が安定していないが,速度の変化趨勢が安定になって いることを見える.

図 7 から図 9 までの実験は、応答した少し時間後の回転 状態を図 10 から図 12 までに示す.図より、回転数も周期 的に変化している.これは、円板磁石と鉄球の残留磁気点 との吸引力が変化するためだと思われる.回転速度は多く の円板磁石の場合での方が安定することが確認できた.

〈5・2〉回転数の追従特性の考察 鉄球の回転数は円板磁石の回転数に追従することを確認するため、回転数の追従実験を行った.各実験での円板磁石と鉄球の回転数の推移を図13から図15までに示す.円板磁石の回転速度を0msから0.1msずつ速くし、毎回円板磁石の速度が変わった後、鉄球の回転速度を比較的安定している時に、10秒間の鉄球の回転速度を記録して、平均値を計算する.計測は鉄球の浮上状態が崩れるまでとした.

図13は円板磁石が1つの場合の回転実験結果である.こ の実験では,他の円板磁石は影響を避けるために,取り外 している.図13より,鉄球の回転数は円板磁石の回転数の 増加に伴い増加しており,相関係数は0.99885となり両方の 関係はほぼ線形であることが分かる.また,円板磁石の回 転数が3 rps,鉄球の回転数が約3.8 rps であるときに,鉄球 の安定浮上状態が崩れた.

図 14 は円板磁石が 2 つの場合の回転実験結果である.2 つの円板磁石は対面になるように配置し、磁極方向が同じ になるように調整した.他の 2 つの円板磁石は取り外して いる.図 14 に示すように,相関係数は 0.9995 となり円板磁 石と鉄球の回転数の関係はほぼ線形であり、また線形性は 円板磁石が 1 つの時より良い.円板磁石の回転数が 2.5 rps, 鉄球の回転数が約 3 rps であるときに,鉄球の安定浮上状態



図 13 1 つの円板磁石を用いた追従実験結果 Fig. 13 Spin Following Experiment Using One Disk Magnet



図 14 2 つの円板磁石を用いた追従実験結果 Fig. 14 Spin Following Experiment Using Two Disk Magnets





が崩れた.回転速度の限界は円板磁石が1つの場合より小 さくなった.円板磁石は浮上に用いている磁石に影響を与 えることが考えられ,その影響は1つの場合より2つの場 合の方が大きいと思われる.

図15は円板磁石が4つの場合の回転実験結果である.図 15より,相関係数は0.99979となり円板磁石と鉄球の回転 数の関係はほぼ線形である.4つの場合では残留磁気点に対 する磁気力が大きくなるため,制御性が向上した.

しかし,円板磁石の回転数が2rps,鉄球の回転数が約2.5 rps であるときに,鉄球の安定浮上状態が崩れた.2つの場 合と同様に,4つの場合でも円板磁石が浮上に用いている磁 石に影響を与えため,限界速度が小さくなった.その原因 として,4つの円板磁石の磁力の大きさが異なること,初期 位置において4つの円板磁石は互いに微小な角度のずれが あること,4つの円板磁石と鉄球との距離精度が良くないこ となどが考えられる.

6. 結言

本報告では、永久磁石を用いた非接触浮上・回転システ ムを提案した.また試作装置と制御システムを設計・作製 し実験を行った.鉛直方向上の非接触浮上は、永久磁石と ボイスモータを利用し、永久磁石と浮上体の空隙を制御す ることにより、浮上体を安定浮上することを実現させた. 次に、水平方向上の浮上体の回転は、4つの直径方向に磁化 した円板磁石とロータリアクチュエータを用い、浮上体表 面の残留磁気点を吸引し、浮上体を円板磁石の逆回転方向 に回転させた.試作装置により、提案した原理での回転運 動を実証・確認できた.また回転応答の実験結果より、多 くの円板磁石を用いた方が浮上体の回転可制御性が良くな り、回転数が相対に安定することが確認できた.回転数の 追従実験の結果より、浮上体と円板磁石の回転数の関係は ほぼ線形で追従可能である.

今後の課題としては、浮上・回転の安定性を向上させる ため、浮上時の外乱に対する対策、浮上体からの円板磁石 の位置の最適化、初期位置における円板磁石間の角度の一 致性を高めることが必要である。

文	献

- M. Morishita, and T. Azukizawa: "Zero Power Control Method for Electromagnetic Levitation System", Trans. IEE of Japan, Vol.108-D, No.45 pp.447-454 (1988) (in Japanese) 森下明平・小豆沢照男:「常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制 御」,電学論 D, Vol.108, No.5 pp.447-454 (1988)
- (2) M. Morishita, T. Azukizawa, S. Kanda, N. Tamura, and T. Yokoyama : "A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.38, No.4 pp.230-236 (1989)
- (3) M. Morishita, and H. Iton: "The Self-gap-detecting Zero Power Controlled Electromagnetic Suspension System", Trans. IEE of Japan, Vol.126-D, No.12 pp.1667-1677 (2006) (in Japanese) 森下明平・伊東弘晃:「常電導吸引式磁気浮上系のセンサリスゼロパ
- ワー制御」, 電学論 D, Vol.126, No.12 pp.1667-1677 (2006) (4) K. Oka, T. Higuchi, and T. Shiraishi: "Hanging Type Mag-lev System with
- Permanent Magnet Motion Control", Electrical Engineering in Japan, Vol.

133, No.3, pp. 63-70 (2000)

- (5) F. Sun, and K. Oka: "Zero Power Control for Permanent Magnetic Suspension System", The Eleven International Symposium on Magnetic Bearings, No.631, pp. 489-495, Nara, Japan (2008-8)
- (6) F. Sun, and K. Oka: "Zero Power Control for Hanging Type Magnetic Suspension System Using Permanent Magnet", Dynamic and Design Conference 2008, No.660, pp. 373, Yokohama, Japan (2008-9) (in Japanese)
 孫娘、阔宏・:「永久磁石の吸引力を利用した懸垂型磁気浮上機構に いたいろくいるのでは、これのないない。

おける零パワ制御」, Dynamic and Design Conference 2008, No.660, pp. 373, 橫浜, 日本 (2008-9)

- (7) T.S. Cui, K. Oka, and K. Masaki: "Magnetic Levitation System Using Permanent Magnet and Linear Actuator – Study of Push-Pull Levitation Mechanism", The 17th Symposium of Electromagnet and Dynamics, No.2AM5, pp. 243-248, Kochi, Japan (2005-6) (in Japanese) 催天時・固定 · 政本慶次:「永久磁石とリニアアクチュエータを用 いた磁気浮上機構一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」シンボジウム, No.2AM5, pp. 243-248, 高知, 日本 (2005-6)
- (8) T.S. Cui, Y. Fujiwara, and K. Oka: "2 DOF Maglev System with Permanent Magnet Motion Control", SICE Annual Conference 2005, pp. 3859-3862, Okayama, Japan (2005-8)
- (9) Y. Fujiwara, T.S. Cui, L. Chen, and K. Oka: "Manipulation by Linear Driving Permanent Magnet – Rotation Control of Iron ball", The 17th Symposium of Electromagnet and Dynamics, No.2AM3, pp. 231-236, Kochi, Japan (2005-6) (in Japanese) 藤原佑輔・催天時・陳麗・岡安一:「永久磁石リニア駆動によるマニ ビュレーション-鉄球の回転制御」,第 17 回「電磁力関連のダイナ
- ミクス」シンボジウム, No.2AM3, pp. 243-248, 高知, 日本 (2005-6) (10) K. Oka, Y. Fujiwara, T.S. Cui, and L. Chen: "Noncontact Spinning Mechanism Using Linearly Actuated Magnets", The 5th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, pp. 552-555, Kobe, Japan (2005)
- (11) Y. Fujiwara, T.S. Cui, and K. Oka: "Magnetic Levitation System with Permanent Magnet Motion Control – Study of Spinning Mechanism", Dynamic and Design Conference 2004, No. 517, CD-ROM, Tokyo, Japan (2004-9) (in Japanese) 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, 東京, 日本 (2004-9) (12) T.S. Cui, K. Oka, and Y. Fujiwara: "Suspended Object Rotation Control by Permanent Magnet in Maglev System", The 8th International Conference on Motion and Vibration Control, No. MA2-3, pp. 131-135, Daejeon, Korea (2006-8)