

講演論文集

SEAD22

The 22nd Symposium on Electromagnetics and Dynamics

第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム



会場：門司港ホテル

2010年5月19日(水)・20日(木)・21日(金)

門司港ホテル

主催：日本機械学会

共催：日本AEM学会，電気学会

協賛：北九州市，(財)西日本産業貿易コンベンション協会，精密工学会，
計測自動制御学会，日本シミュレーション学会，日本応用磁気学会，低温工学協会，
日本原子力学会，日本鉄鋼協会，静電気学会，日本工業技術振興協会，磁性流体研究連絡会，
高速処理応用学会，日本画像学会

円盤磁石の回転駆動による非接触回転装置のトルク特性分析

Torque Performance Analysis of Noncontact Spinning Mechanism
by Means of Disk-magnet Rotation

○正 孫 鳳 (高知工科大) 鶴身 輝 (高知工科大)

正 岡 宏一 (高知工科大)

Feng SUN, Kochi University of Technology, Miyakuchi185, Tosayamada, Kami-city, Kochi

Akira TSURUMI, Kochi University of Technology

Koichi OKA, Kochi University of Technology

This paper introduces a noncontact spinning system using permanent magnets and rotary motors, and examines the rotational torque characteristics of this proposed system by the torque-measurement experiments. This spinning system realized the noncontact spin of the noncontact suspended object (here is an iron ball) by means of the remanent magnetization on the surface of the suspended object and the rotation disk-type permanent magnets. The rotation of the suspended object had been realized using one magnet, two magnets, and four magnets, respectively. The spinning experimental results indicated that the suspended object could be spun regardless of the number of driving magnets used; however, as more magnets were used, the suspended object was spun more smoothly, but the velocity limit decreased. In order to examine the reasons of the spinning results, the measurement experiment of the rotational torque was carried out using strain gauges, and IEM analysis of the horizontal force was executed. In this paper, the spinning principle and the experimental prototype are introduced. The results of the measured rotational torque and the calculated horizontal force are shown, and the rotation performance of the noncontact spinning mechanism is discussed.

Key Words: Magnetic suspension, Noncontact spinning, Permanent magnet, IEM analysis, Rotary actuator

1. 緒言

近年、永久磁石を用いた種々の非接触回転機構が提案されている。生田らは、永久磁石のリングを用いた非接触のギアを提案し、高い安全性が必要な機械に応用する伝動装置を報告した⁽¹⁾。藤原らは、永久磁石リニア駆動による非接触回転機構を考察している⁽²⁾。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、藤原らの機構では配置した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、浮上体吸引力の不均衡や、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り、限界速度を速くできない。

本論文が対象とする装置は、永久磁石とリニアアクチュエータによって、鉄球を浮上させ、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よって、浮上中の鉄球を回転させるものである⁽³⁾。また、鉄球表面の残留磁気点を小さい永久磁石としてモデル化し、ひずみゲージを用いた回転トルクを測定し、回転機構のトルク特性を考察する。まず、回転原理を説明し、回転機構を紹介する。次に、回転トルクを測定するため、残留磁気点をモデル化した測定装置を製作する。最後に、測定装置による浮上体の回転トルクを測定し、IEM解析による横方向の力を計算し、回転特性の検討を行う。

2. 回転駆動原理

提案する回転駆動原理を図1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。中央にある浮上体は鉄球である。鉄球の表面には、残留磁気の影響があると考えられ、最も大きい残留磁気点は鉛直方向の浮上の際に鉄球の上下の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点も残っている。鉄球の水平方向の残留磁気を図1に表す。

図1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上に、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で回転させる。これによって、鉄球の表面の残留磁気点を支持している合力は常に変化する。残留磁気点をSと仮定した場合、図1では残留磁気点に対して、円板磁石Iの吸引力と円板磁石IIIの反発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。また、残留磁気点は、円板磁石Iに面する位置に縦軸の周りの回転トルクが0になり、安定点となる。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

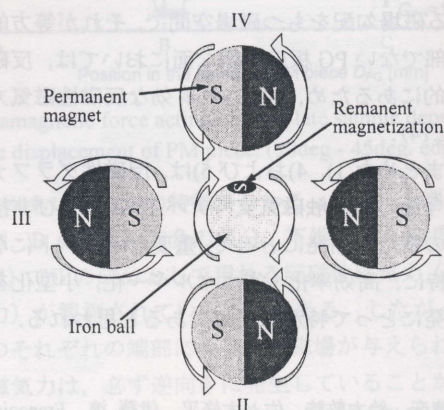


Fig. 1. Principle of spinning system

する時には、4つの円板磁石も90度回転している。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と反発力を持っている円板磁石はIIとIVになり、円板磁石IIに面する位置が安定点になり、残留磁気点は安定点に移動する。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. 試作装置と制御システム

3-1 試作装置 試作装置の概略図を図2に示し、製作した磁気浮上回転装置の写真を図3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109.8 gである。

磁気浮上機構は図2の中央の部分であり、永久磁石、VCM (Voice Coil Motor)、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8 mm、長さが10 mm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、15 mmの可動範囲を持っており、定格電流2 Aに対して20 N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10 mm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4 mmであり、分解能が1 μ mである。

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4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30 mm、厚さが10 mm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と角度を計測する。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度ずつに配置している。

3-2 制御システム 4分の1の回転機構の制御システムを図4に示す。制御システムでは、MATLAB/Simulinkにより、DSPコントローラ(DSPACE1104)と電流増幅器を用い、エンコーダの信号に基づいて、円板磁石の速度と角度を制御している。

さらに、回転機構の制御システムのブロック線図を図5に示す。回転機構では鉄球の水平面の位置および回転角度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コントローラと3つの回転角度制御のPDコントローラを用いている。4つの円板磁石は他の磁石の位相関係を保つため、1つの円板磁石の回転角度を参照して、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。

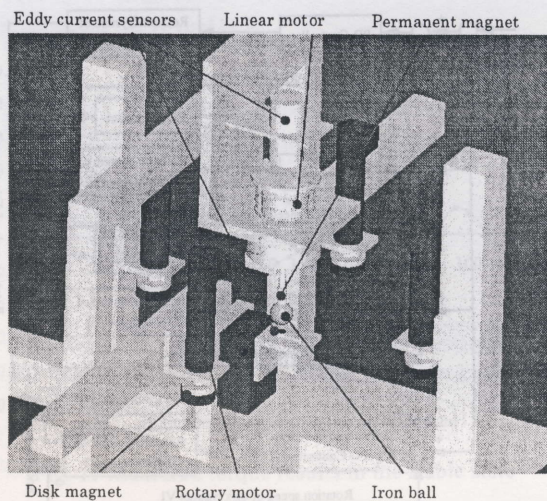


Fig. 2. Configuration of spinning system

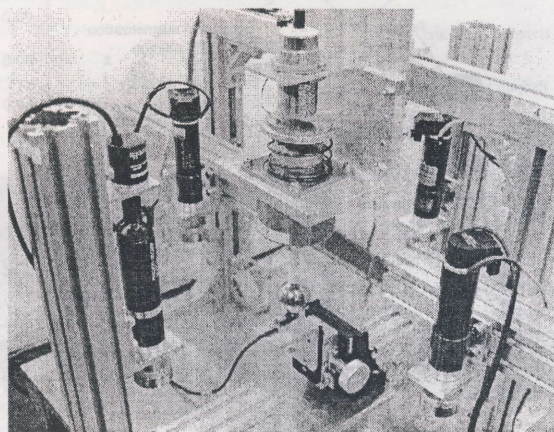


Fig. 3. Photograph of spinning system

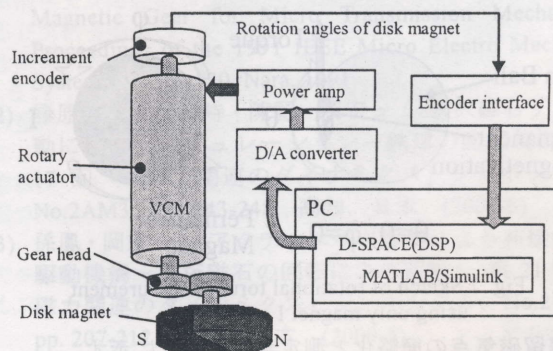


Fig. 4 Configuration of one-fourth spinning system

4. 回転トルクの考察

試作装置を用いて、回転駆動実験を行った⁽⁵⁾。実験結果より、用いた磁石の数が多くなると、鉄球の安定回転状態が良くなるが、限界速度が遅くなることが確認できた。回転駆動機構のトルク特性と回転結果より示した問題点を調べるため、鉄球の表面の残留磁気点を簡略化し、トルク用歪みゲージを用いて非接触回転機構のトルク特性の考察実験を行った。また、(株)エルフのエルフマジックを用いて、安定浮上を崩す横方向の力を計算した。

4-1 残留磁気点の簡略化 鉄球の表面の残留磁気点は非常に弱いため、回転トルクを直接測定することができない。そのため、回転用の鉄球表面の残留磁気点を1つの永久磁石と仮定し、残留磁気点とする永久磁石と円板磁石との間の吸引力と反発力を用い、鉄球の回転トルク特性を考察し

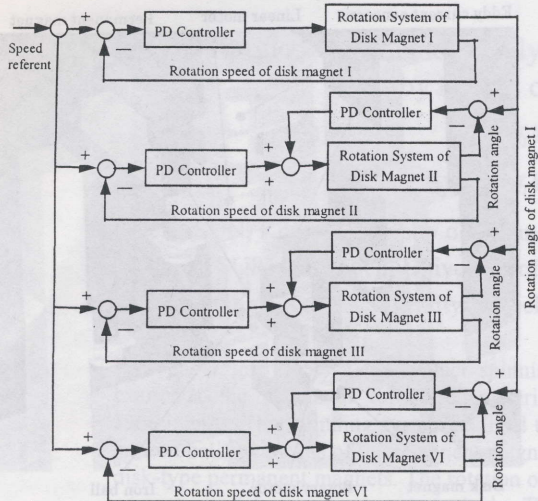


Fig. 5 Control diagram of spinning system

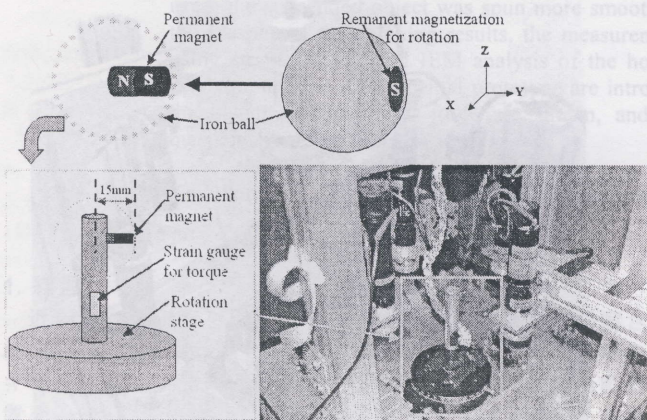


Fig. 6 Modelling remanent magnetization and measurement device

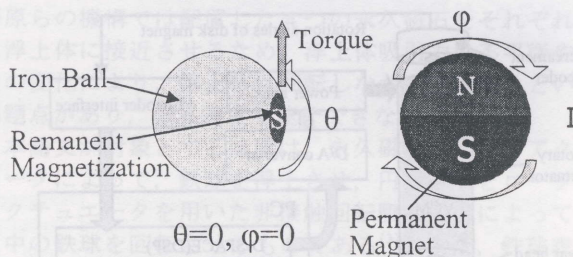


Fig. 7 Sketch of rotational torque measurement using only magnet I

た。残留磁気点の簡略化と測定装置を図6に示す。

測定装置には、回転ステージ上にアルミパイプを設置し、アルミパイプの側面にねじり方向のトルクを測定するひずみゲージを2つ対面位置に取り付けている。また、上部に浮上体表面の残留磁気点と仮定するため永久磁石を取り付けている。残留磁気点とする永久磁石は、直径が5mm、長さが15mmの円筒形のネオジウム磁石であり、その軸方向に着磁されている。そして、鉄球の表面はS極、中央はN極となるように配置している。歪みゲージには2軸0°/90°トルク用のゲージを用いた。抵抗値が350Ωで、ゲージ率約2.1となっている。

4-2 回転トルクの考察 考察実験では、円盤磁石を30°ずつ回転させ、その角度ごとに、測定装置を5°ずつ回転させて測定を行い、計測した値を元にトルクを求める。円板磁石の中心位置は鉄球の中心から60mmに固定した。円盤磁石の個数を1つの場合、2つの場合、4つの場合の3

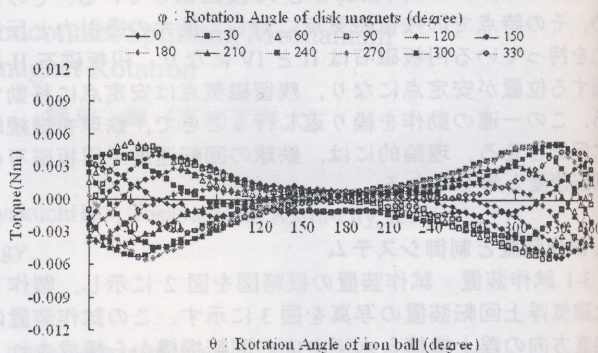


Fig. 8 Measured torque results using magnet I.

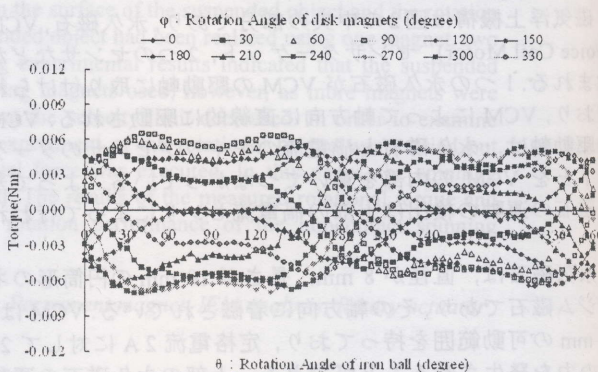


Fig. 9 Measured torque results using magnet I and III.

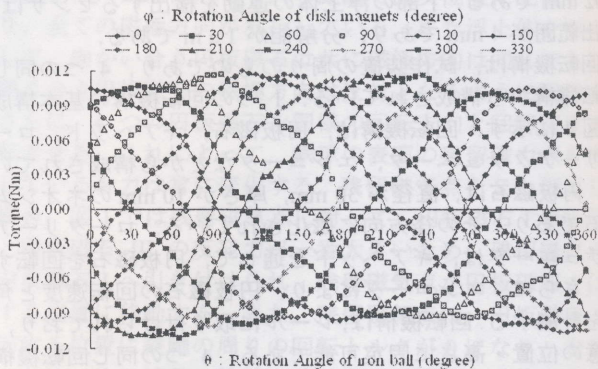


Fig. 10 Measured torque results using the all four magnet.

通りで測定実験を行った。

円板磁石Iだけを用いて測定する場合の概略図を図7に示す。実験では、他の円板磁石の影響を避けるために、使用しない円板磁石を取り外した。また、残留磁気点とする永久磁石の回転角度を θ 、円盤磁石の回転角度を ϕ とし、示している矢印の方向に回転させ、図7に示す位置を初期位置として測定した。磁石の個数がそれぞれ、1つ、2つ、4つの場合の測定結果を図8~10に示す。測定結果では、歪みゲージの信号に影響するノイズがあるため、少しずれる場所がある。しかし、3通りの場合でトルク特性を見ることができる。図の横軸は鉄球の回転角度 θ 、縦軸は鉄球のZ軸周りのトルクであり、各線は円板磁石の回転角度 ϕ となり、回転角度に対するトルクを表している。グラフの右下がり度でトルク0と交わっている点が安定点である。残留磁気点が安定点に停まると、鉄球は回転しない。しかし、円板磁石を回転する時に、安定点の位置が変化すると、鉄球は次々と安定点の位置に動き、回転することができると考えられる。

図8の結果から、円板磁石Iだけを用いた場合では、重なっている安定点はなく、安定点は 0° と 180° の付近に集中していることがわかった。 0° の付近では、交差する傾きが大きく剛性が高い。 180° の付近では剛性は低い。また、 90° や 270° の付近では安定点が疎である。この結果より、重なっている安定点がなく、鉄球の回転駆動が可能である。しかし、剛性が場所によって変化し、安定点間が均等ではないため、スムーズな回転ができないことがわかった。

図9の結果から、円板磁石I, IIIを用いた場合の結果では、剛性の高い部分が円板磁石と近い場所である 0° と 180° の二ヶ所となっている。安定点が疎になっている部分は円板磁石から遠い場所である 90° と 270° となっている。この結果により、1つの時よりも安定点間の距離のばらつきが小さくなっているため、鉄球の回転制御が可能であることが確認できた。

図10の結果から、円板磁石を4つ用いた場合、4つの円盤磁石で形成される外部磁場の変化が一様に変化し、鉄球に対しても回転角度に応じたトルクが発生している。また、各トルク曲線の最大値もほぼ等しく、安定点の剛性もすべての場所で傾きがほぼ等しいことも確認できた。安定点も円板磁石の回転角度の変化量と等しく 30° ごとであることが確認できた。この結果から、永久磁石が4つの場合には、鉄球の回転がスムーズに行えることがわかった。

今回、安定回転する時のトルクの考察も行った。図7の鉄球の回転角度 θ が($\theta = \phi + 90^\circ$)となったとき、鉄球と円盤磁石の回転速度が等しくなり、安定回転状態となる。安定回転状態での3通りの場合の回転トルクを図11に示す。図11より、全ての場合の回転トルクは0Nmで揺れているが、振幅は4つの磁石を用いた場合が最も小さい。この結果は図8~10に示した結果とも致する。

4.3 横方向の力の解析 IEM解析は回転トルクの考察実験と同じ条件と場合で計算した。解析した結果を図12に示す。グラフは横軸が円盤磁石の回転角、縦軸が鉄球に対する水平方向の力である。

グラフより、円盤磁石が1個の場合では残留磁気点に対する吸引力が小さいため、鉄球の回転時に生ずる遠心力が小さくなる。そのため、回転のバランスが崩れにくく、鉄球の限界回転速度は大きくなる。しかし、円盤磁石の数が増えると、吸引力が増えるために遠心力が大きくなる。そのため、回転のバランスが崩れやすく、鉄球の限界回転速度が小さくなることが分かった。

5. 結言

本論文では、回転原理を説明し、試作装置の紹介を行い、鉄球の回転トルクの考察実験を行った。考察実験では、残留磁気点を永久磁石に簡略し、ひずみゲージを用いたトルクの測定を行った。回転と測定結果から、円盤磁石の個数を増やすと、回転トルクと安定点の距離の変化がスムーズになり、鉄球の回転は滑らかになる。しかし、横方向の力が強くなり振動的な力が発生しているため、限界速度が小さくなることが確認できた。

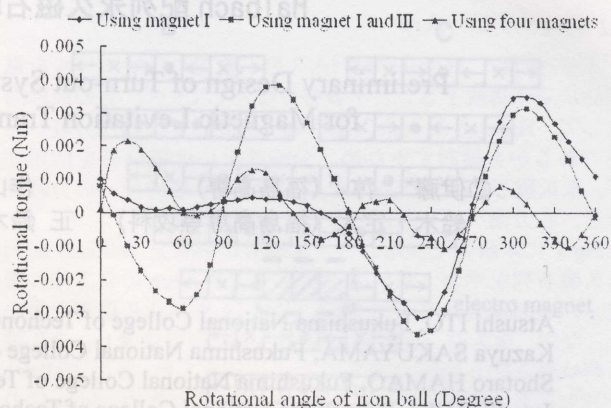


Fig. 11 Measured torque results in the stable state

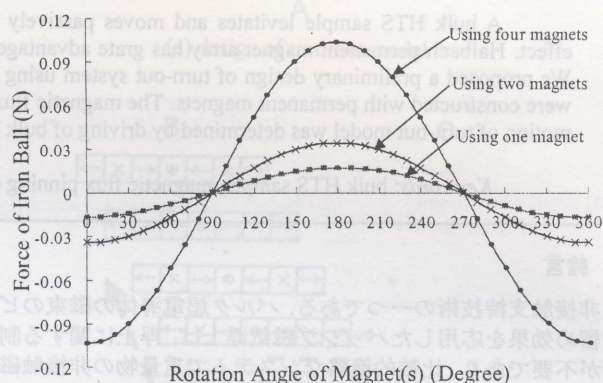


Fig. 12 Calculated attractive force in the horizontal plane.

参考文献

- (1) K. Ikuta, S. Makita and S. Arimoto: "Non-Contact Magnetic Gear for Micro Transmission Mechanism", Proceedings of the 1991 IEEE Micro Electro Mechanical System, pp.125-130, Nara, 1991
- (2) 藤原佑輔・催天時・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ー鉄球の回転制御」, 第17回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.2AM3, pp.243-248, 高知, 日本 (2005-6)
- (3) 孫鳳・岡宏一:「アクチュエータ駆動による非接触回転駆動機構ー円板磁石の回転による駆動」, 第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, No.20B4-1, pp.207-212, 長野, 日本 (2009-5)