

永久磁石の運動制御を用いた非接触回転機構

-回転トルク特性の考察-

Noncontact Spinning Mechanism Using Movement Control of Permanent Magnet -Characteristics Analysis of Rotational Torque-

○ 孫 鳳（瀋陽工業大学，中国； 高知工科大学，日本）
鶴身 輝（高知工科大学） 岡 宏一（高知工科大学）

Feng SUN, Shenyang University of Technology, Shenyang-City, Liaoning-Province, China

Kochi University of Technology, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi, Japan

Akira TSURUMI, Kochi University of Technology, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi

Koichi OKA, Kochi University of Technology, Tosayamada-cho, Kami-city, Kochi

This paper analyzed the torque characteristics of a noncontact spinning system using linearly actuated magnets. This noncontact spinning system spins the suspended object (here is an iron ball) without contact by the remanent magnetization and the linear movement of four permanent magnets. In this paper, the remanent magnetization point is modeled, and the rotational torque of this mechanism is calculated by IEM (Integral Element Method) analysis. The rotational torque is also measured using a measurement device with strain gauges. According to the IEM analysis results and the experimental results, the rotational torque characteristics of the noncontact spinning system are discussed.

Key Words: Torque analysis, Permanent magnet, IEM analysis, Strain gauge.

1. はじめに

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達装置を報告した⁽¹⁾。著者らは、永久磁石と浮上体の残留磁気点を用いた二つの形式の非接触回転機構を提案した。その一つの回転機構は円盤形の永久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である⁽²⁾⁽³⁾。その機構では、円盤磁石は二つの磁極が径方向に磁化されており、浮上中の浮上体の水平面上に配置し、ロータリーアクチュエータで回転させ、浮上体の表面の残留磁気点を引き付けて、浮上体を回転させた。もう一つの回転機構は円筒形の永久磁石リニア駆動による非接触回転機構である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この機構は、配置した4つの円筒形の永久磁石をそれぞれ交互に浮上体に接近させ、残留磁気点を引き付けて、浮上体を回転させた。

本論文は後者の円筒形永久磁石の運動制御を用いた非接触回転機構の回転トルク特性を考察する。本論文では、永久磁石の運動制御を用いた非接触回転機構と回転原理を紹介し、浮上体（鉄球）の表面の残留磁気点をモデル化し、IEM解析によって、回転機構のトルク特性を考察する。また、検証実験として、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する。IEM解析結果と測定結果によって、回転特性の検討を行う。

2. 試作装置と回転原理

円筒形の永久磁石リニア駆動による非接触回転機構をFig.1に示す。回転機構は、浮上体を鉛直方向上に非接触浮

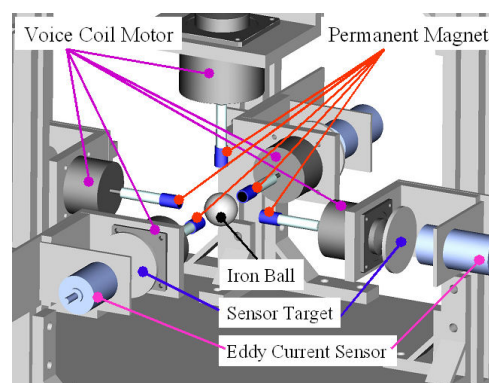


Fig. 1 Configuration of noncontact spinning system

上させ、水平面内で回転させる機構であり、浮上部分と回転駆動部分から構成されている。

2.1. 浮上部分

浮上部分は、Fig.1に示している機構の中央部分で、Fig.2に示すように、リニアアクチュエータと永久磁石を用いるものである。永久磁石、ボイスコイルモータ（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によって鉛直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 $1\mu\text{m}$ である。

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. 回転駆動部分

回転駆動部分は、Fig.1 に示している機構の回りの部分で、四つの永久磁石を直線的に駆動するユニットから構成されている。四つのユニットは互いに独立している。回転駆動部分の永久磁石は浮上部分と同じものである。VCM は、10 mm の可動範囲を持っており、定格電流 2 A に対して 10 N の力を発生させることができる。センサは検出範囲が 10 mm であり、分解能が 0.02 mm である。

2.3. 回転原理

回転原理を Fig.3 に示す。これは浮上体の鉛直上部から見た図で、浮上体と永久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 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。それは、浮上体の表面に S, N それぞれの極性を持った複数、大小の点が不規則かつ全体に分布してあると考えられる。最も大きい残留磁気の影響は鉛直方向の浮上の際に浮上体の上下方向を決めるものである。このとき浮上体の水平方向には他の残留磁気の影響も残っている。Fig.3 の矢印で示す点が、水平方向の最も大きな影響点となる。よって水平方向の異なる方向から永久磁石を近づけることで、この影響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交互に永久磁石を近づけることを繰り返すことで、浮上体を回転させる。つまり一般の PM 型ステッピングモータの原理により回転させる機構と考えられる。具体的な永久磁石の制御方法を述べる。

まず、永久磁石 I を①の動きで浮上体に近づけることにより浮上体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づいた位置で安定する(図の現在の状態)。そして②の動きで永久磁石を浮上体から離し、永久磁石 II を③の動きで近づけると、残留磁気部が引き寄せられ④の方向に回転運動をする。同様なことを次々と隣の磁石に対して繰り返すことで浮上体に回転運動を発生させる。

2.4. 制御システム

制御システムを Fig.4 に示す。4 個のボイスコイルモータにそれぞれ位相を $\pi/2(\text{rad})$ ずらした信号を入力し、隣り合う永久磁石が、順番に浮上体に近づくように制御している。回転機構では浮上体と永久磁石との空隙を計測しないため、あらかじめそれぞれのボイスコイルモータの位置をステイにより浮上体の中心から等しい距離に固定しておく。

3. 残留磁気点のモデル化

3.1. 残留磁気点の考察

鉄球の表面にある残留磁気点を確認するため、ガウスメータを用い、鉄球の赤道に沿いの磁束密度を測定した。測定実験の前に、測定対象とする鉄球を浮上させ、鉄球表面の最大残留磁気点の位置を調べ、その位置をマークした。測定実

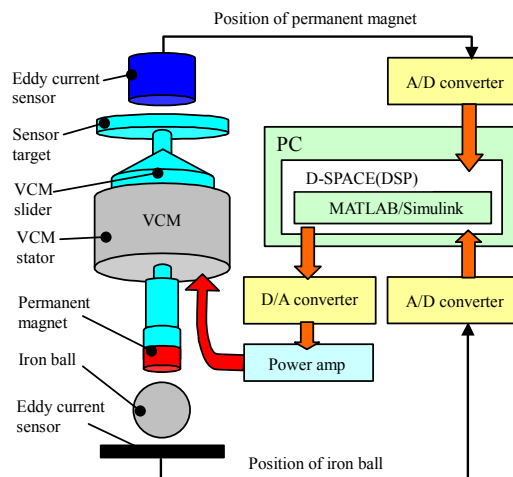


Fig. 2 Configuration of Magnetic Suspension System

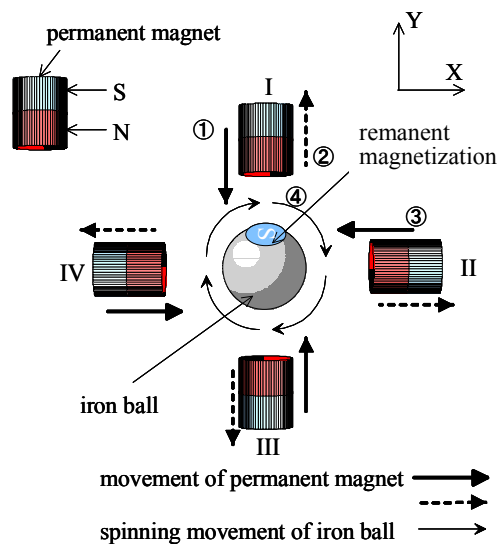


Fig. 3 Spin principle of spinning mechanism

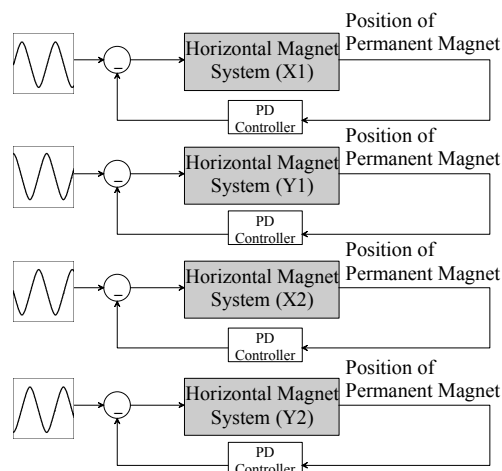


Fig.4 Block diagram of the spinning system

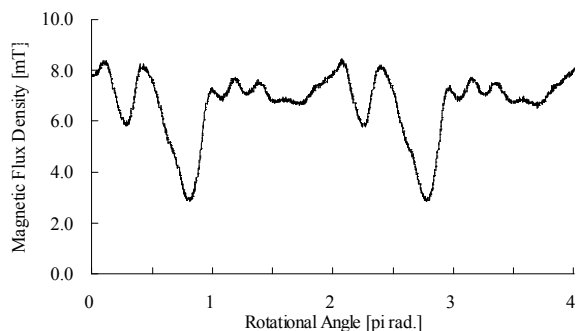


Fig.5 Magnetic flux density along equator of iron ball

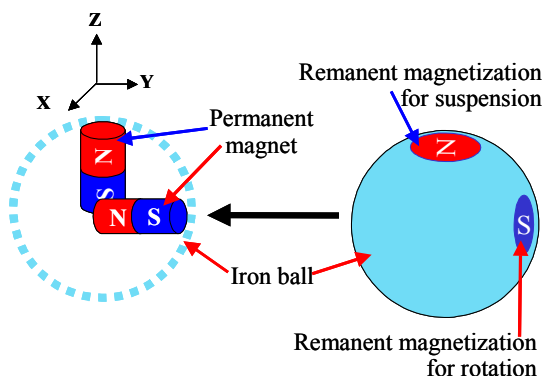


Fig.6 Modeling for remanent magnetization point

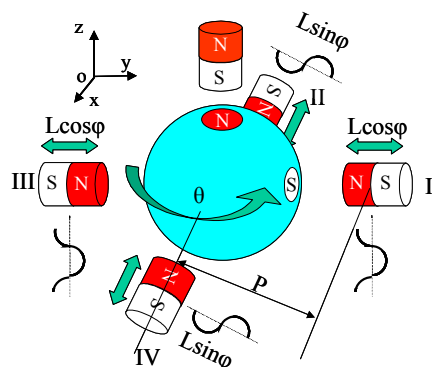


Fig.7 IEM model with one remanent point on equator

験では、マークした点を鉄球上部の極点として、鉄球の赤道の位置を決め、ガウスメーターを鉄球の表面から 0.5mm に配置し、2 回転の磁束密度を記録した。測定した結果を Fig.5 に示す。Fig.5 より、磁束密度が大きい所が N 極のように、磁束密度が小さい所が S 極のように思われ、鉄球の赤道上に 2 つの S 極の残留磁気点があることがわかった。この結果は鉄球の表面にある残留磁気点のいろいろな分布の 1 つだと考えられる。

3.2. 残留磁気点のモデル化

鉄球の表面にある残留磁気点の強さが非常に弱いため、直接鉄球の回転トルクを測れない。回転機構の回転トルク特性を考察するため、残留磁気点を小さい永久磁石にモデル化した。モデルを Fig.6 に示す。モデルでは、永久磁石の 1 つの極を鉄球の表面の位置に配置し、残留磁気点とする。また、

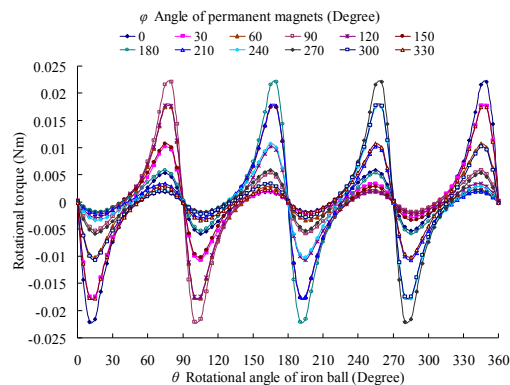


Fig.8 IEM results with one remanent point on equator ($L=4\text{mm}$, $P=26\text{mm}$.)

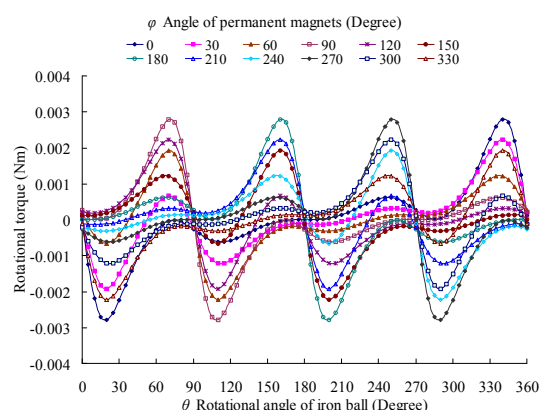


Fig.9 IEM results with one remanent point on equator ($L=10\text{mm}$, $P=39\text{mm}$.)

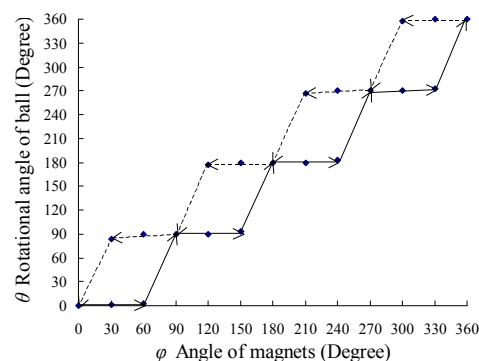


Fig.10 Angle relationship of stable points of Fig.9

永久磁石のもう 1 つの極を鉄球の中心に配置する。上部の永久磁石は鉄球の真上の最大残留磁気点とし、横の永久磁石は鉄球の赤道上の残留磁気点とする。このモデルは Fig.3 に示している回転原理の図と Fig.5 に示している結果と一致になっている。

4. 回転トルクの IEM 解析

4.1. IEM 解析のモデル

鉄球の赤道上に 1 つの残留磁気点がある場合の IEM 解析モデルを Fig.7 に示す。図では、鉄球の回転角度を θ に、永久磁石の角度を ϕ に表している。磁石の振幅 L は 4mm で、

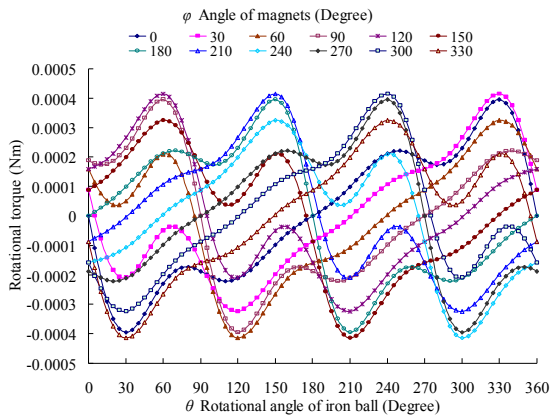


Fig.11 IEM results with one remanent point at the upper position where is 45 degree from equator ($L=10\text{mm}$, $P=39\text{mm}$.)

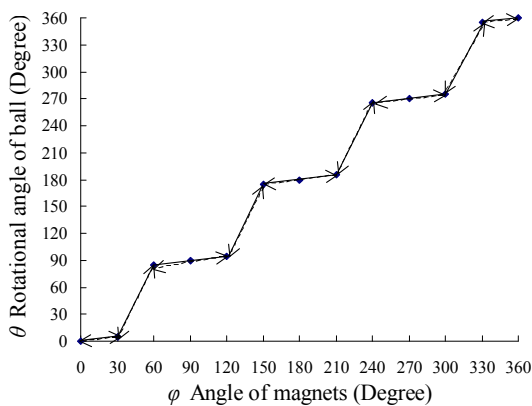


Fig.12 Angle relationship of stable points of Fig.11

振幅の中心から鉄球の中心までの距離 P は 26mm である。横方向の残留磁気点とする磁石は直径が 5mm で、長さが 15mm である。

このモデルを用いた回転トルクの解析を行った。解析は、残留磁気点を鉄球から最近の永久磁石に面する位置から始めて、 5° ずつ、1 回転まで、回転トルクを計算した。そして、永久磁石を 30° ごとで駆動させ、 360° まで解析した。

4.2. 一つの残留磁気点の解析

Fig.7 のモデルを用いた解析結果を Fig.8 に示す。グラフでは、横軸は鉄球の回転角度 θ 、縦軸は浮上体の Z 軸周りのトルクであり、各線は永久磁石を駆動する正弦波の駆動角度 ϕ となり、駆動角度に対するトルクを表している。また、グラフの右下がりでトルク 0 と交わっている点が安定点である。永久磁石位置を固定すると、浮上体は安定点に停まり、回転しない。永久磁石が駆動され、安定点の位置が変化すると、浮上体の安定点の位置は次々とに変化し、回転することができると考えられる。

しかし、Fig.8 に示している結果では、永久磁石が動いたときに、全ての安定点は動かず、 0° 、 90° 、 180° と 270° の四点に集まっているため、浮上体が回転できないと考えられる。しかし、実際は、この機構によって、回転制御が可能である。

そのため、Fig.7 に示しているモデルでは、永久磁石の振幅 L を 10mm に拡大し、距離 P を 39mm に大きくした後、解析を行った。結果を Fig.9 に示す。Fig.9 での最大トルクは Fig.8 より小さくなったが、安定点は一つの点に集まらず、

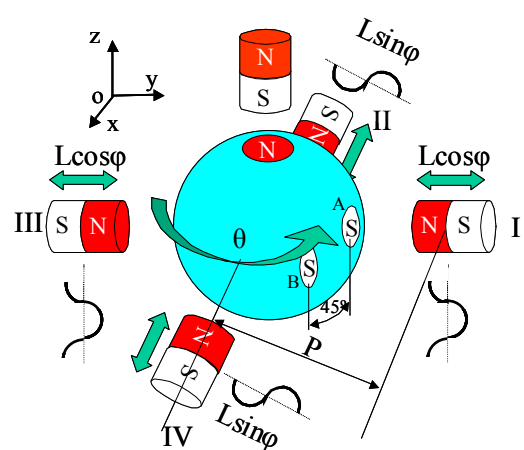


Fig.13 IEM model with two remanent points on equator

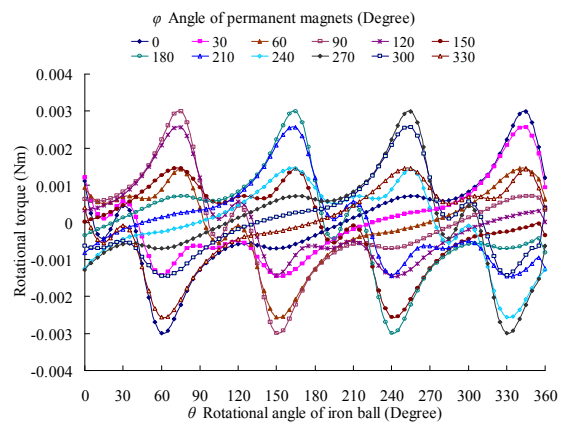


Fig.14 IEM results with two remanent points on the equator and 45 degree between each other along the equator ($L=10\text{mm}$, $P=39\text{mm}$.)

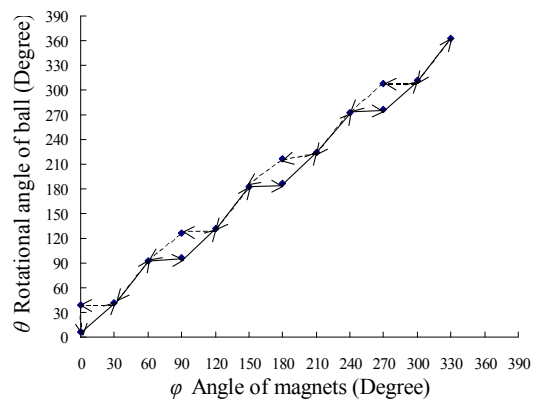


Fig.15 Angle relationship of stable points of Fig.14

離れている。判りやすくするため、Fig.9 での安定点をまとめて、Fig.10 に示す。Fig.10 より、永久磁石の角度を増やすにつれて、鉄球の回転角度が実線の矢印沿いに増えていることが判る。逆に、永久磁石の角度を減らすにつれて、鉄球の回転角度が点線の矢印沿いに減少していることも判る。従って、鉄球を違うルートで両方向に回転できた。この結果より、鉄球をステップモータのように回転させることが確認できた。

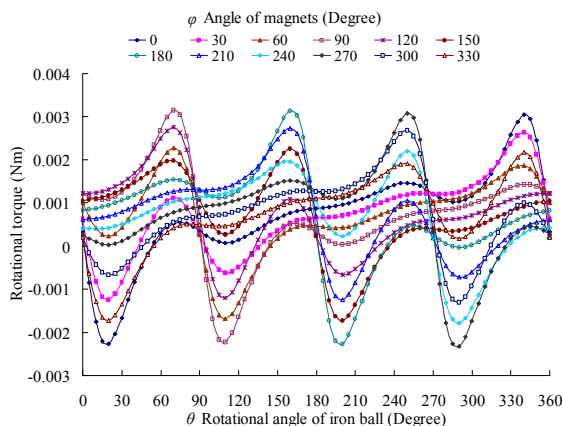


Fig.16 IEM results with two remanent points and 45 degree between each other along the equator.
Point A is on the equator; Point B is at the upper position where is 45 degree from the equator.
($L=10\text{mm}$, $P=39\text{mm}$.)

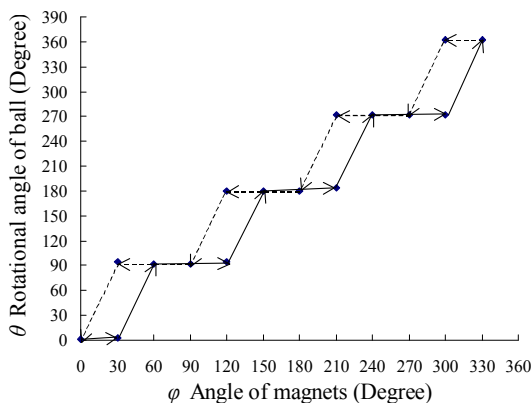


Fig.17 Angle relationship of stable points of Fig.16

また、運動範囲を拡大したモデルに基づいて、水平方向の残留磁気点の位置を鉄球の赤道から真上の最大残留磁気点に近づく方向に 45° に移動させ、解析を行った。解析した結果を Fig.11 に、まとめた安定点の分布を Fig.12 に示す。Fig.11 での最大トルクは Fig.9 より小さくなった。それは、残留磁気点を赤道から上に移動すると、残留磁気点から永久磁石までの距離が大きくなるためである。Fig.12 より、鉄球を同じルートで両方向に回転できることを確認できた。しかし、もし残留磁気点がこのモデルのようになれば、鉛直の軸の周りに回転しながら、水平方向のある軸の周りに揺れることも発生してしまうと考えられる。

これらの結果より、1つの残留磁気点で鉄球を回転できることがわかった。

4.3. 二つの残留磁気点の解析

また、2つの残留磁気点を用い、機構の回転トルク特性を考察した。2つの残留磁気点のモデルを Fig.13 に示す。モデルでは、振幅 L と距離 P は 10mm と 39mm であり、水平方向の残留磁気点 A は Fig.7 に表している残留磁気点と同じである。残留磁気点 B は A から赤道沿いに、時計周りに 45° の所に仮定し、2つの残留磁気点の強さは同じにし、解析を行った。解析した結果を Fig.14 に、まとめた安定点の分布を Fig.15 に示す。Fig.15 より、鉄球を違うルートで両方向に回転できることがわかった。また、磁石の角度を変化させるこ

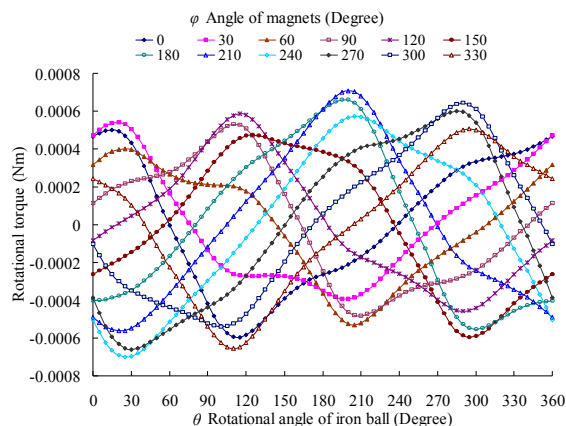


Fig.18 IEM results with two remanent points and 45 degree between each other along the equator.
Two points are all at the upper position where is 45 degree from the equator.
($L=10\text{mm}$, $P=39\text{mm}$.)

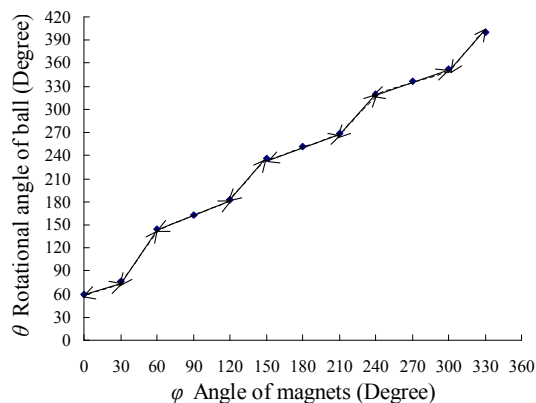


Fig.19 Angle relationship of stable points of Fig.18

とにつれて、鉄球の角度変化が直線に近づくこともわかった。したがって、2つの残留磁気点を用いて、鉄球の回転安定性は、1つの残留磁気点の結果より良くなったといえる。

さらに、Fig.13 に示しているモデルに基づいて、残留磁気点 B を鉄球の赤道から真上の最大残留磁気点に近づく方向に 45° に移動させて、解析を行った。解析した結果を Fig.16 に示し、まとめた安定点の分布を Fig.17 に示す。Fig.17 の結果より、鉄球を違うルートで両方向に回転できるが、回転の特性は Fig.15 より悪くなった。これは、残留磁気点 B を上に移動させると、残留磁気点 B の影響が弱くなり、有効の残留磁気点数が減るためである。

最後に、解析モデルでは、2つの残留磁気点を鉄球の赤道から真上の最大残留磁気点に近づく方向に 45° に移動させて、解析を行った。解析した結果を Fig.18 に、まとめた安定点の分布を Fig.19 に示す。これらの結果から、トルクの最大値は小さくなるが、鉄球を同じルートで両方向に回転でき、また磁石と鉄球の角度の関係はほぼ線形になることがわかった。しかし、この場合でも、鉄球は鉛直の軸の周りに回転しながら、水平方向のある軸の周りに揺れることも発生してしまうことが考えられる。

全ての場合の結果を比べると、回転特性には、2つの残留磁気点が鉄球の赤道沿いに 45° の間隔にある場合が最適だと考える。

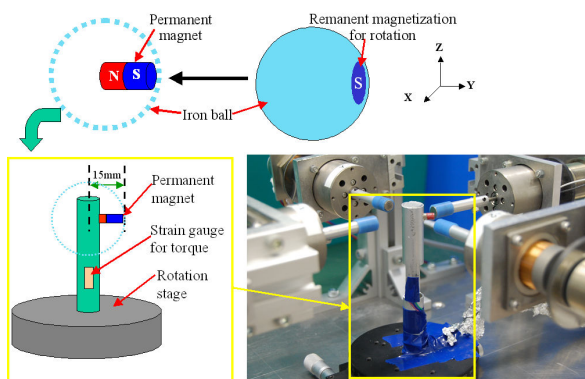


Fig.20 Experimental measurement device

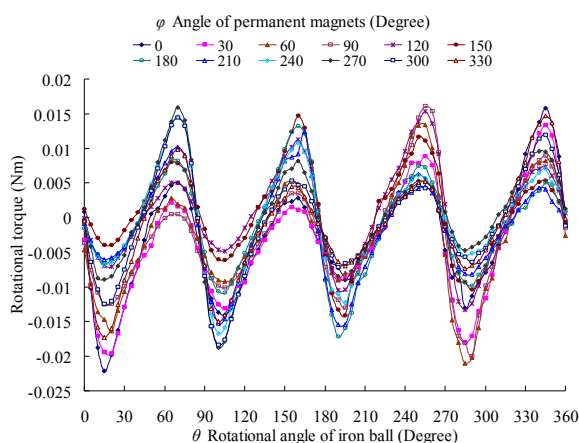


Fig.21 Experimental results with one remanent point

5. 試作装置による検証実験

IEM 解析結果の有効性を確認するため、試作した回転機構によって、測定装置を用いた検証実験を行った。

5.1. 測定装置

測定装置は Fig.7 に示している IEM 解析モデルと同じように試作した。回転用の浮上体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回転機構の永久磁石との間の吸引力を用い、浮上体の回転トルク特性を考察した。浮上体のモデル化と測定装置を用いて測定している写真を Fig.20 に示す。この測定装置では、IEM 解析モデル中の真上の最大残留磁気点とする永久磁石を組み立てていない。それは、その最大残留磁気点は鉛直軸の周りの回転トルクに影響しないためである。

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 5 mm、長さが 15 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。そして、浮上体の表面は 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 350 Ω で、ゲージ率約 2.1 となっている。

5.2. 検証実験の結果

測定実験は Fig.8 に示している結果の解析と同じ条件で行った。測定結果を Fig.21 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、回転機構のトルク特性を見ることができる。Fig.21 の測定結果は、Fig.8 の解析結果とほぼ一致しているため、Fig.8 の解析結果は正しいと言える。同様に、他の解析結果の有効性もわかった。

6. おわりに

本論文では、IEM 解析によって、永久磁石の運動制御を用いた非接触回転機構の回転トルク特性を考察した。1 つ及び 2 つの残留磁気点を用いて、残留磁気点の位置をいくつか仮定し、考察を行った。考察結果によって、1 つ及び 2 つの残留磁気点の場合、鉄球を両方向に回転できること、2 つの残留磁気点の場合は 1 つの残留磁気点の場合より、回転の安定性が良くなったことがわかった。また、歪みゲージを用いた測定装置と回転機構に基づいた回転機構の発生トルクを測定した。測定実験は検証実験として、IEM 解析結果の有効性が確認できた。

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, Japan, (1991)
- [2] 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—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)
- [3] Feng SUN and Koichi OKA, Noncontact Spinning Mechanism Using Rotary Permanent Magnets, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.130, No.7, pp.913-919, (2010-7)
- [4] 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—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)
- [5] Feng SUN, Akira TSURUMI and Koichi OKA, Torque Analysis of a Noncontact Spinning System Using Linearly Actuated magnets, Proceeding of Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2010, pp.108-109, Kuala Lumpur, Malaysia, (2010-7)