

第12回

## 「運動と振動の制御」シンポジウム

## 講演論文集

メルパルク長野

2011年6月29日(水)～7月1日(金)



## 主催

一般社団法人 日本機械学会 機械力学・計測制御部門

〒160-0016 東京都新宿区信濃町3番地 信濃町煉瓦館5階

TEL: 03-5360-3500 FAX: 03-5360-3508 URL <http://www.jsme.or.jp/>

## 協賛

計測自動制御学会, システム制御情報学会, 人工知能学会, 精密工学会, 電気学会, 電子情報通信学会, 土木学会, 日本音響学会, 日本建築学会, 日本航空宇宙学会, 日本知能情報ファジィ学会, 日本フルードパワーシステム学会, 日本ロボット学会, バイオメカニズム学会, 農業機械学会

12thMOVIC

# A102 永久磁石の直動駆動による鉄球の回転における磁気モデル

## Magnetic Model for Spinning Motion of Iron ball by Linear Actuated Permanent Magnet

○正 岡 宏一 (高知工科大学), 学 鶴見 輝 (高知工科大学)

Koichi Oka, Kochi University of Technology, Miyanokuchi 185, Tosayamada-cho, Kami-shi, Kochi, 782-8502

Akira Tsurumi, Kochi University of Technology

**Abstract:** This paper describes an analysis of 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, Remanent model, Linier actuator, Permanent magnet, Spinning mechanism, IEM analysis, Experimental analysis.

### 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。特に、永久磁石のリングなどを用いた非接触のギアとしての種々の伝達装置が報告されている<sup>(2)</sup>。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<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>。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<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>。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

円筒形の永久磁石リニア駆動による非接触回転機構を図1に示す。回転機構は、浮上体を鉛直方向上に非接触浮上させ、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. 浮上機構** 鉛直方向浮上機構は、図1の中央部分で、図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、センサなどが含まれる。永久磁石がVCMの出力軸に取り付けられており、鉛直方向に駆動される。VCMの出力軸の片側は永久磁石であり、他方は渦電流式ギャップセンサのターゲットとなっている。

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0.02mmである。下

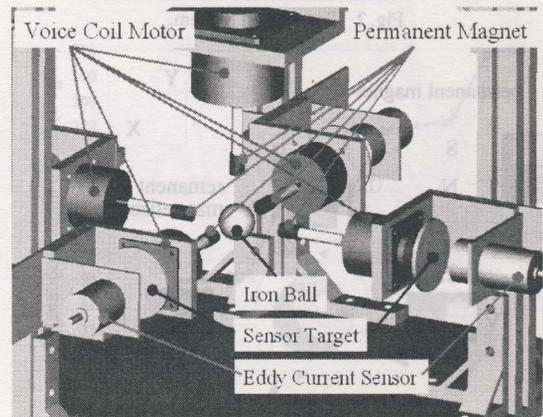


Fig. 1 Configuration of noncontact spinning system.

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1 $\mu$ 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. 回転機構** 回転機構は、図1の鉄球の周囲にあるもので、永久磁石を水平面内で直線的に駆動する4つのユニットから構成されている。それぞれのユニットは独立した動きを行う。回転機構で用いる永久磁石は浮上機構と同じものである。VCMは、10mmの可動範囲を持っており、定格電流2Aに対して10Nの力を発生させることができる。センサは検出範囲が10mmであり、分解能が0.02mmである。

**2-3. 回転原理** 回転原理を図3によって説明する。これは浮上体の鉛直上部から見た図で、浮上体と回転機構の永久磁石だけを表したものである。浮上体は鉄球であり、その表面には残留磁気があると考えられる。残留磁気は、浮上体の表面にS、Nの極性を持った複数の大小の点が不規則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時に浮上体の上下方向を決める。しかし、浮上体の水平面内には他の残留磁気の影響も残っている。

今、図3の矢印で示す点が、水平方向の最も大きな残留磁気点と考える。水平方向の異なる方向から永久磁石を近づけると、この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

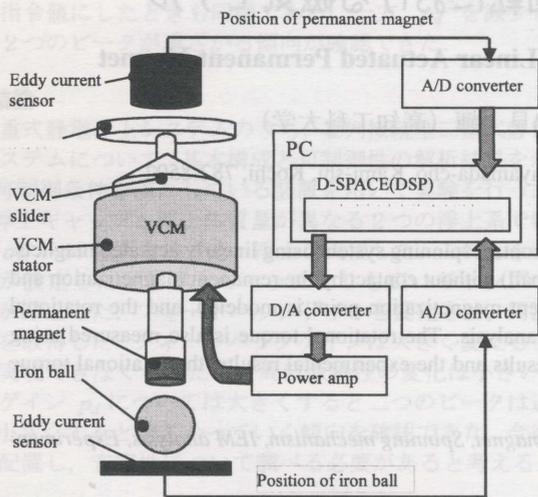


Fig. 2 Suspension System.

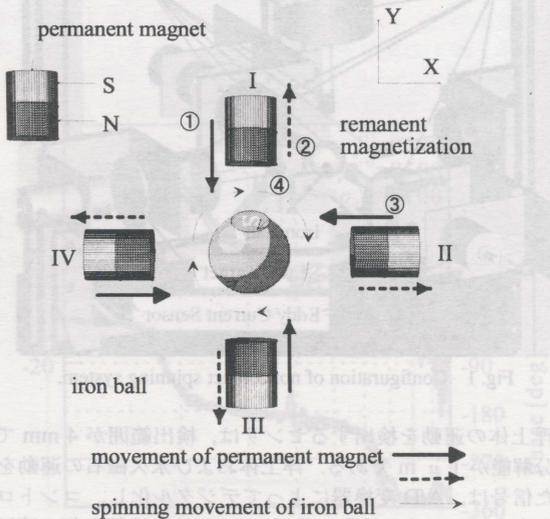


Fig. 3 Principle of Spinning.

を回転させる。

具体的な永久磁石の制御方法を述べる。まず、永久磁石 I を浮上体に近付けることにより、浮上体の表面にある残留磁気点を磁石 I に近付ける。次に磁石 I を離し、磁石 II を近付けると、残留磁気点が磁石 II に引き寄せられ浮上体は回転運動をする。同様なことを繰り返すことで浮上体に回転運動を発生させる。

**2-4. 回転制御システム** 回転のための制御システムのブロック線図を図 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。

### 3. 残留磁気点のモデル化

**3-1. 残留磁気点のための基礎実験** 回鉄球の表面にある残留磁気点を確認するため、ガウスメーターを用い、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。

測定した結果を図 5 に示す。図の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 極のように振る舞うと考え

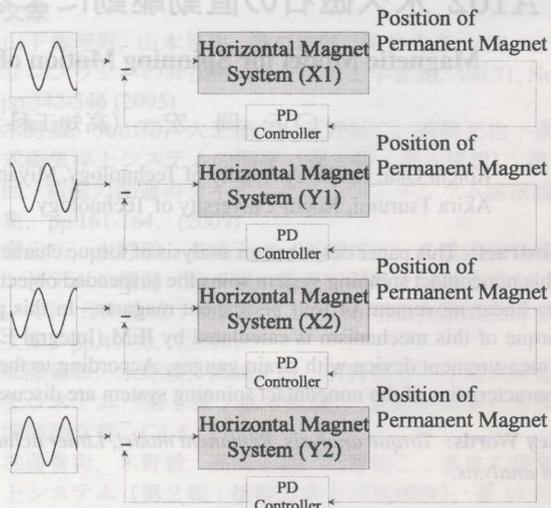


Fig. 4 Block diagram of Spinning Controller.

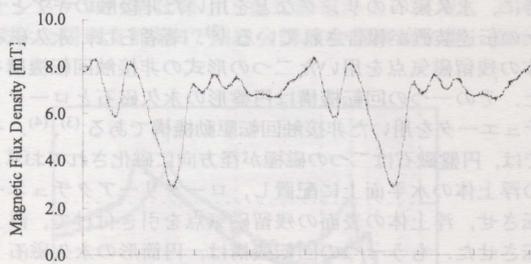


Fig. 5 Magnetic flux density along equator of iron ball.

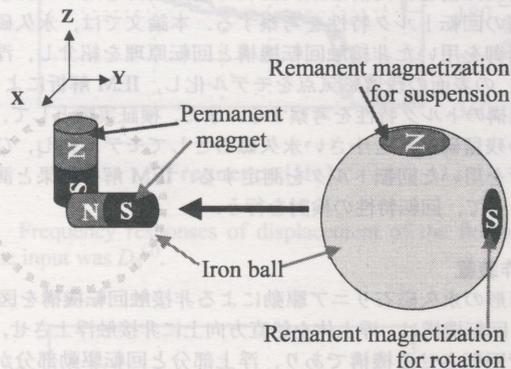


Fig. 6 Modeling for remanent magnetization point.

られ、鉄球の赤道には複数の 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が種々に分布していると考えられることができることを示している。

**3-2. 残留磁気点モデルの提案** 鉄球の表面にある残留磁気点の強さは非常に弱いため、直接鉄球の回転トルクを測ることができない。回転機構の回転トルク特性を考察するため、残留磁気点を永久磁石に置き換えたようなモデルを考え、このモデルの妥当性を検証することとする。残留磁気点のモデルの模式図を図 6 に示す。モデルは、永久磁石の 1 つの極を鉄球の表面に配置し、残留磁気点とし、他の極を鉄球の中心に配置するものである。

今回のモデルでは、鉄球は複数の残留磁気点を持つものと考えた。そのうち一つは N 極を持つ残留磁気点で、鉄球の真上に

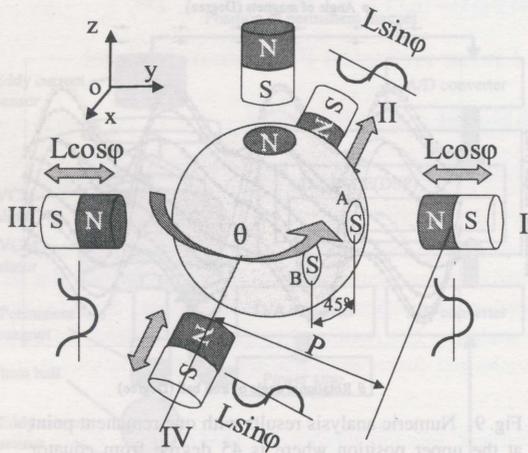


Fig. 11 IEM model with two remanent points on equator.

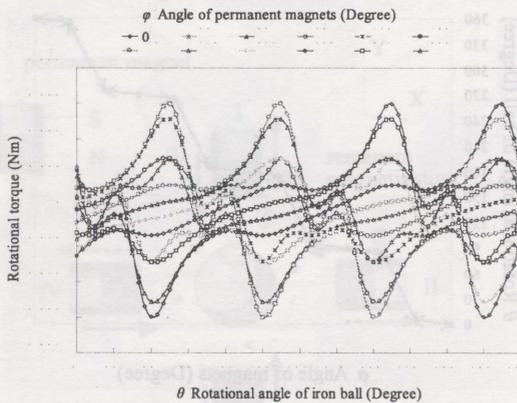


Fig. 12 IEM results with two remanent points on the equator and 45 degree between each other along the equator (L=10mm, P=39mm).

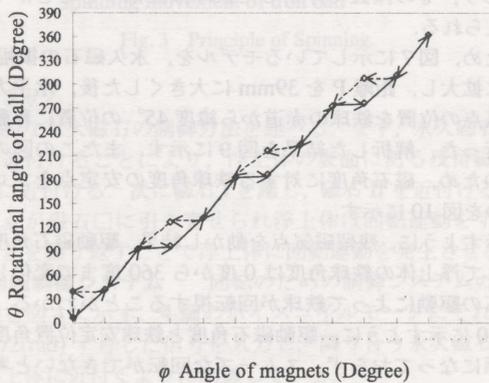


Fig. 13 Angle relationship of stable points of Fig. 12.

点の強さは同じであると仮定し、解析を行った。

解析した結果を図 12 に、駆動磁石角度に対する浮上体の安定点を図 13 に示す。図 13 の結果より、残留磁気点を 2 つにした場合、鉄球を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とにつれて、鉄球の角度変化が線形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、図 11 に示しているモデルの残留磁気点 B を鉄球の赤

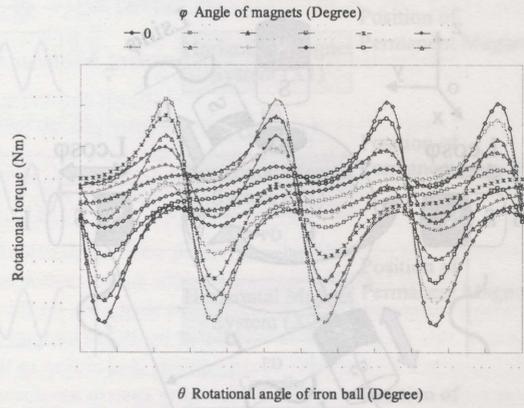


Fig. 14 IEM results with two remanent points and 45 degree between each other along the equator. Point A is on the equator; Point B is at the upper position where is 45 degree from the equator (L=10mm, P=39mm).

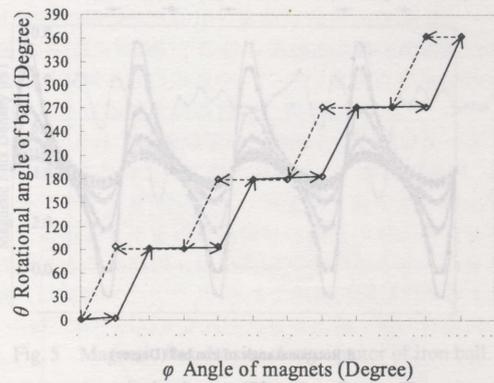


Fig. 15 Angle relationship of stable points of Fig. 14.

道から緯度 45° に移動させて解析を行った。解析した結果を図 14 に示す。また、駆動永久磁石角度に対する浮上体の安定点を図 15 に示す。図 15 の結果より、鉄球は行きと帰りで違うルートを通るが、時計回り、反時計回りどちらの方向にでも回転可能である。しかし、出力トルクの特性は、図 14 より小さくなった。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、トルクを発生させるためには不利であるためである。

最後に、解析モデルでは、2 つの残留磁気点が緯度 45° にあった場合の解析を行った。解析したトルクの結果を図 16 に、駆動磁石角度と安定点の角度の関係の推移を図 17 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、この場合では、鉄球が鉛直の軸の周りに回転するとき、水平方向の軸周りの角速度が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回転トルクを一樣に発生させるためには最適であると考えられる。

### 5. 試作装置による検証実験

今回行った解析結果の有効性を確認するため、試作したトルク計測装置による計測を行った。この結果を上で得られた解析結果と比較し、検証実験を行った。

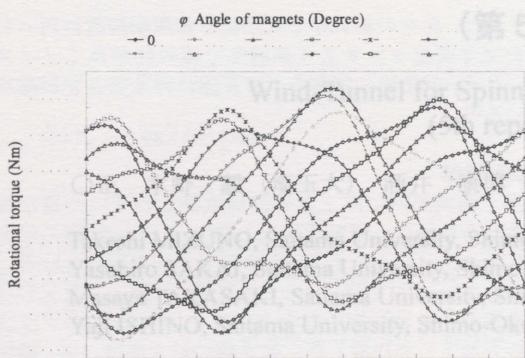


Fig. 16 IEM results with two remanent points and 45 degree between each other along the equator. Two points are all at the upper position where is 45 degree from the equator (L=10mm, P=39mm).

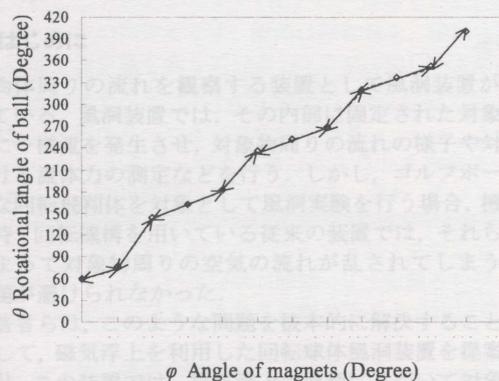


Fig. 17 Angle relationship of stable points of Fig.16.

**5-1. 測定装置** 測定装置は図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図18に示す。この測定装置では、解析モデル中の鉄球の上部に位置する残留磁気点の永久磁石を省略指定ある。その残留磁気点は鉛直軸の周りの回転トルクに影響しないと考えられるためである。

測定装置には、回転ステージ上にアルミパイプを置き、アルミパイプの側面にお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、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350Ωで、ゲージ率約2.1となっている。

**5-2. 検証実験の結果** 測定実験は図8に示している結果の解析と同じ条件で行った。測定結果を図19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。図19の測定結果は、図8の解析結果とほぼ一致しているため、図8の計算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。

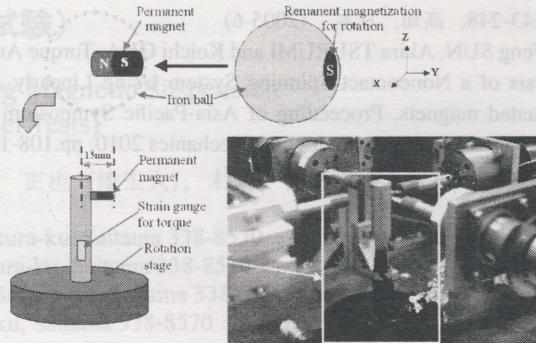


Fig. 18 Experimental measurement device.

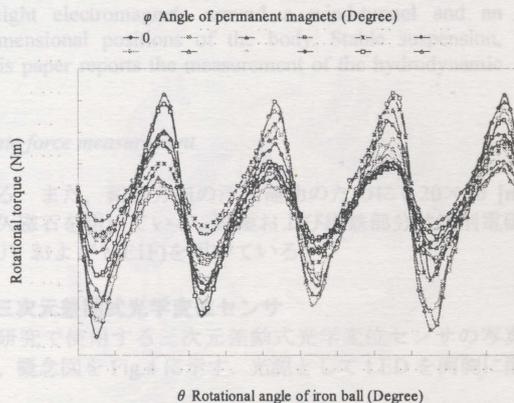


Fig. 19 Experimental results with one remanent point.

## 6. おわりに

本論文では、数値解析によって、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つおよび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つの残留磁気点で、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には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、解析結果の有効性が確認できた。

## 参考文献

- (1) 日本機械学会, 講演原稿の書き方, <http://www.jsme.or.jp/conrule.htm#kakikata>
- (2) 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)
- (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-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)
- (4) Feng SUN and Koichi OKA, Noncontact Spinning Mechanism Using Rotary Permanent Magnets, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.130, No.7, pp.913-919, (2010-7)
- (5) 藤原佐輔, 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)

- (6) 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)

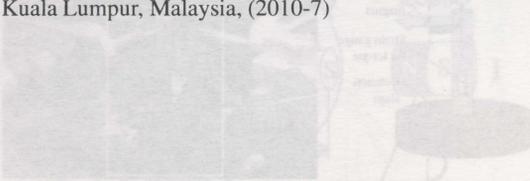


Fig. 18 Experimental measurement device



Fig. 19 Experimental results with one treatment point

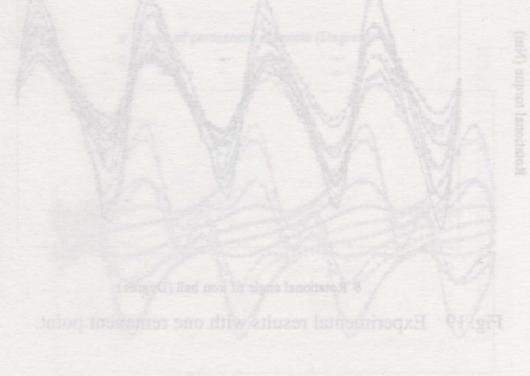


Fig. 20 Experimental results with two treatment points

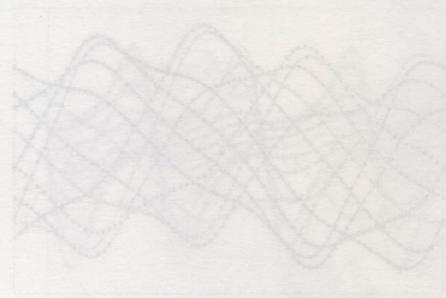


Fig. 21 IEM results with two treatment points and 45 degree between each other along the rotor. Two points were all the upper position which is 45 degree from the center (L=10mm, P=30mm)



Fig. 22 Relationship of angle of magnet

この研究は、非接触回転システムを用いたトルク分析に関するものである。本研究では、線形駆動磁石を用いた非接触回転システムを構築し、そのトルク特性を解析した。実験結果から、回転角と磁石の位置との関係が明らかになった。また、磁石の位置を調整することで、回転角を制御できることが確認された。本研究の結果は、非接触回転システムの設計と制御に役立つと考えられる。

本研究は、非接触回転システムを用いたトルク分析に関するものである。本研究では、線形駆動磁石を用いた非接触回転システムを構築し、そのトルク特性を解析した。実験結果から、回転角と磁石の位置との関係が明らかになった。また、磁石の位置を調整することで、回転角を制御できることが確認された。本研究の結果は、非接触回転システムの設計と制御に役立つと考えられる。

おわりに

本研究は、非接触回転システムを用いたトルク分析に関するものである。本研究では、線形駆動磁石を用いた非接触回転システムを構築し、そのトルク特性を解析した。実験結果から、回転角と磁石の位置との関係が明らかになった。また、磁石の位置を調整することで、回転角を制御できることが確認された。本研究の結果は、非接触回転システムの設計と制御に役立つと考えられる。

参考文献

- (1) 日本機械学会, 非接触回転システムの研究, 2005.
- (2) K. Imai, 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).
- (3) 藤原, 阿部, 岡田, 非接触回転システムによるトルク伝達機構の解析, 機械工学の発展による新技術, 第21回, 機械工学の発展による新技術, 第21回, pp.207-212, 2005.
- (4) Feng SUN and Koichi OKA, Torque Analysis of a Noncontact Spinning System Using Linearly Actuated Magnets, Proceedings of the 2010 Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, pp.108-109, Kuala Lumpur, Malaysia, (2010).
- (5) 藤原, 阿部, 岡田, 非接触回転システムによるトルク伝達機構の解析, 機械工学の発展による新技術, 第21回, pp.207-212, 2005.