

永久磁石を用いた非接触回転駆動機構のトルク特性

Torque performance of noncontact spinning mechanisms using permanent magnets

○学 孫 鳳 (高知工科大学) 鶴身 輝 (高知工科大学) 正 岡 宏一 (高知工科大学)

Feng SUN, Kochi University of Technology, Tosayamada, Kami, Kochi

Akira TSURUMI, Kochi University of Technology

Koichi OKA, Kochi University of Technology

This paper analyzes the torque performances of two kinds of noncontact spinning mechanisms, which are the linear driving type mechanism and the rotational driving type mechanism. In these two noncontact spinning mechanisms, the suspension of the suspended object is realized in the vertical direction by a suspension device using a permanent magnet and a linear actuator, and the spin of the suspended object is realized by the variable flux field around the suspended object. The flux field is changed by the linear movement of permanent magnets in the linear driving type mechanism and by the rotational movement of disk magnets in the rotational type mechanism. In this paper, first, two kinds of mechanisms are introduced. Second, the suspended object is modeling and the experimental device is installed using the strain gauges. Finally, the rotational torque results of the two kinds of mechanisms are shown and discussed.

Key words: Magnetic Suspension, Noncontact Spinning, Permanent Magnet, Torque Performance, Strain Gauge

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。本報告では、永久磁石リニア駆動による駆動機構と円盤磁石回転駆動による駆動機構との二種類の非接触回転機構を紹介し、2つの回転機構の回転トルクを考察するため、回転させる対象の表面の残留磁気点をモデル化し、測定装置を作製して、回転トルクの測定実験を行った。

永久磁石リニア駆動による非接触回転駆動機構は、まず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する。そして、磁石の同じ磁極は浮上体の方向に配置し、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。それぞれの永久磁石はリニアアクチュエータで駆動させている。

円盤磁石回転駆動による非接触回転駆動機構は、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する。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。そして、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。それぞれの円盤磁石はロータリアクチュエータで駆動させている。

浮上体のモデル化と測定装置を Fig.A1 に示す。浮上体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、回転用の浮上体表面の残留磁気点を1つの永久磁石と仮定する。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5mm、長さが15mm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。作製した測定装置を用いて、二つの回転機構の回転トルクを測定した。Fig.A2は永久磁石リニア駆動による回転機構のトルク結果を示す。Fig.A3は円盤磁石回転駆動による回転機構のトルク結果を示す。

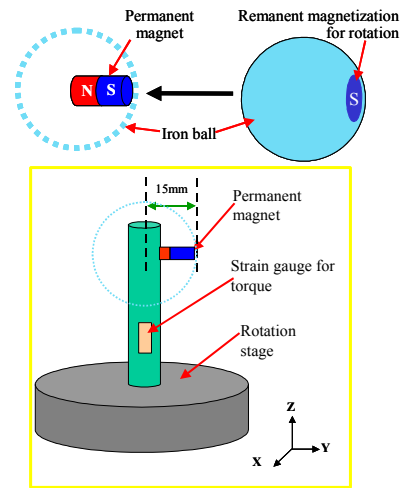


Fig.A1 Remanent magnetization modeling

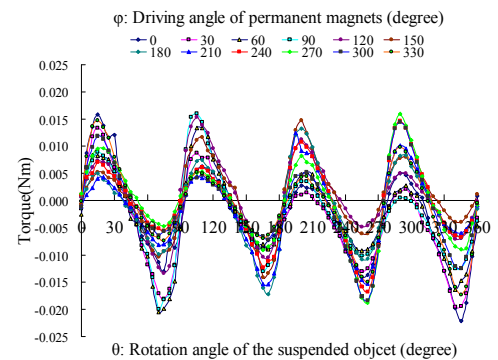


Fig.A2 Rotational Torque of Linearly Driving Type Mechanism

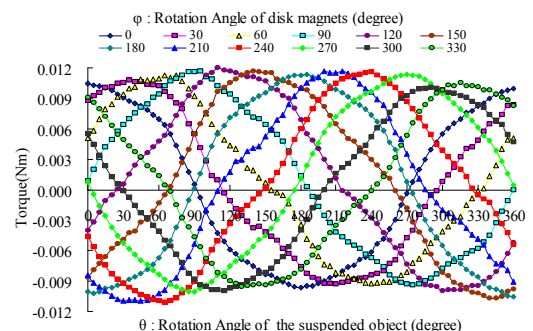


Fig.A3 Rotational Torque of Rotation Driving Type Mechanism

1. はじめに

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。

これまでに、様々な非接触操作機構が提案され実現されている。磁気浮上機構は、磁力を用いた磁性体の浮上対象を非接触で支持でき、また、発生力が大きく扱いやすい、塵埃も発生しない。このため、機械パーツに合っており、比較的広く普及している。

磁気浮上による非接触操作機構の例としては、著者らは、永久磁石とボイスコイル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、小さい機械パーツを非接触操作するための浮上機構を提案している¹⁾²⁾。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し、浮上体を3次元的に運動制御できる浮上機構を提案している³⁾。また、電磁石によって、磁場制御方法を用いた小さい永久磁石を3次元的に非接触操作する浮上機構⁴⁾と間隙がナノメートルの6次元の操作装置⁵⁾も研究している。さらに、磁気浮上による非接触回転機構の例としては、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⁶⁾。また、著者らは、永久磁石リニア駆動による非接触回転機構と円盤磁石回転駆動による非接触回転機構を考察している⁷⁾⁸⁾。こ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。

本論文では、永久磁石を用いた永久磁石のリニア駆動と円盤磁石の回転駆動によって浮上体を非接触回転させる機構⁷⁾⁸⁾について、歪みゲージを用いた機構の回転トルクを測定する実験を行いそれらの機構がどのように浮上中の物体を非接触で回転させるかについて検討を行う。まず、二種類の回転駆動機構を紹介し、浮上体をモデル化し、測定装置を構築する。この装置によって浮上体に加わるトルクを測定する。この発生トルクを検討することによって浮上体の回転原理に関する考察を行う。

2. 永久磁石を用いた非接触回転機構

2・1 浮上機構

今回用いた浮上装置は、Fig.1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、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

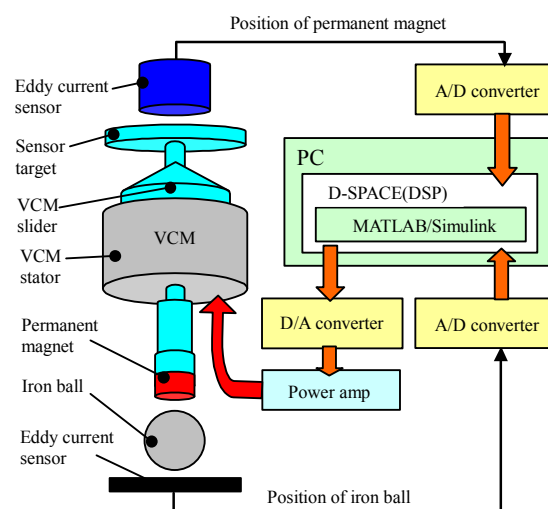


Fig. 1 Configuration of Magnetic Suspension System

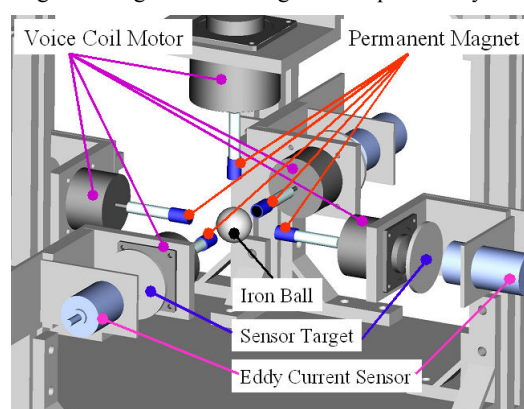


Fig. 2 Configuration of Linearly Driving Type Mechanism

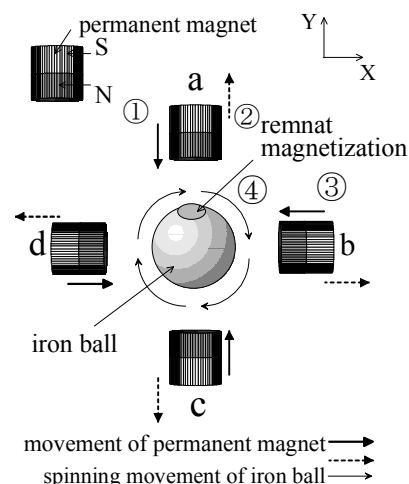


Fig. 3 Spin Principle of Linearly Driving Type Mechanism

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 μm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 永久磁石のリニア駆動による回転機構

永久磁石を直線的に駆動して浮上体を回転させる機構の試作装置をFig.2に示す。浮上対象の回転機構は、浮上体を水

平面内で回転させる機構である。その模式図 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 a 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 b 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。

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。

2・3 円盤磁石の回転駆動による回転機構

永久磁石を回転させて浮上体を回転させる形式の試作装置の写真を Fig.5 に示す。回転機構は、4 つの同じ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 6 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 のネオジウム磁石であり、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、Fig.6 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。

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を Fig.7 に示す。これは浮上体の鉛直上部から見た図で、浮上体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引き寄せられ、浮上体に回転運動を発生させる。

Fig.7 に示すように、円板磁石は二つの磁極が径方向に磁化

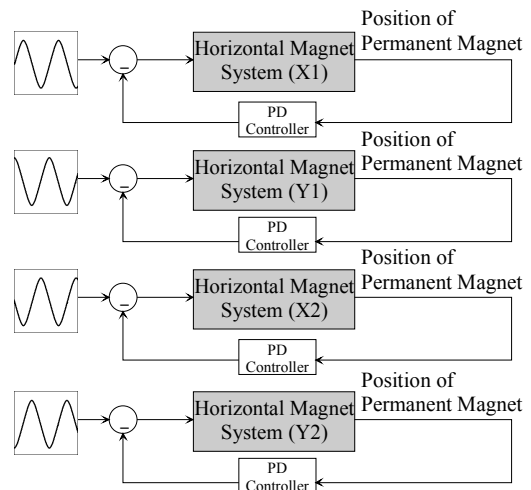


Fig. 4 Block Diagram of Linearly Driving Type Mechanism

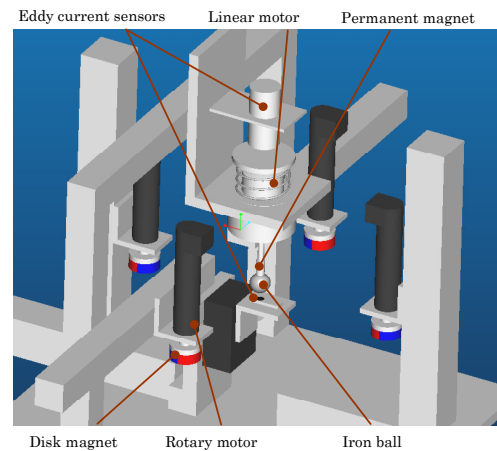


Fig. 5 Configuration of Rotation Driving Type Mechanism

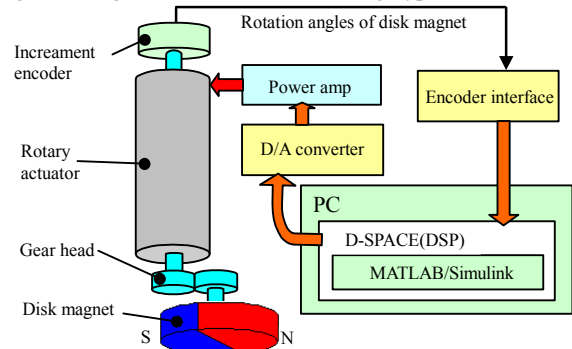


Fig. 6 Configuration of Spinning Control System (1/4)

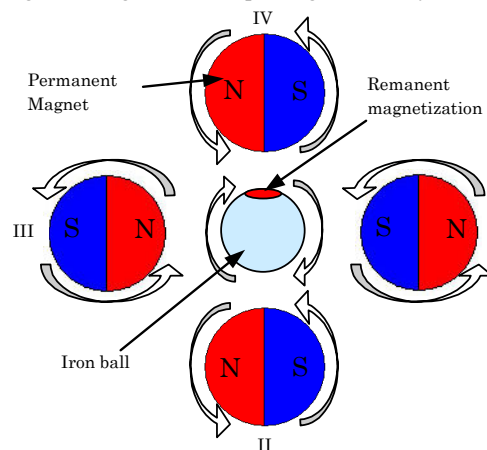


Fig. 7 Spin Principle of Rotation Driving Type Mechanism

されている。4つの円板磁石を、浮上している浮上体の水平面に、浮上体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、浮上体を支持している水平方向の吸引力は常に平衡となり、浮上体の合力はほぼ0となる。しかし、4つの円板磁石の回転によって、浮上体の表面の残留磁気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、残留磁気点に対して、円板磁石I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、浮上体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、浮上体が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、浮上体を継続的に回転させる。

回転機構の制御システムを Fig.8 に示す。回転機構では位置および、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。

3. 測定実験による回転トルクの検討

以上述べてきた2つの非接触回転駆動機構を用いて、回転駆動実験を行った⁷⁸⁾。実験結果より、リニア駆動形回転駆動機構では、浮上体を非接触で回転できたが、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。回転駆動形回転駆動機構では、用い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通りで、それぞれ実験を行い、浮上体を非接触で回転できた。しかし、用いた磁石の数が多くなると、浮上体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。2つの非接触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、浮上体の表面の残留磁気点をモデル化し、トルク用の歪みゲージを用いて測定実験を行い、浮上体の発生トルクについて検討を行った。行った実験は、浮上体の水平面の回転トルク考察であり、リニア駆動形回転駆動機構については永久磁石が4つのもの、回転駆動形回転駆動機構については円盤磁石が1つ、2つ、および4つのものについて検討を行った。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。

3・1 浮上体のモデル化と測定装置

浮上体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

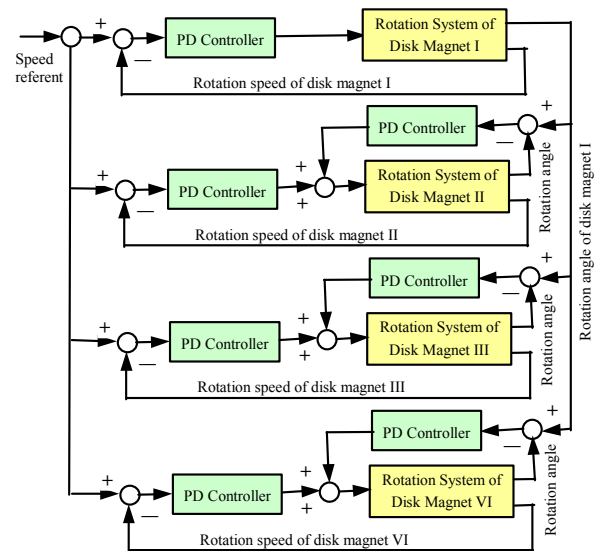


Fig. 8 Control Diagram of Rotation Driving Type Mechanism

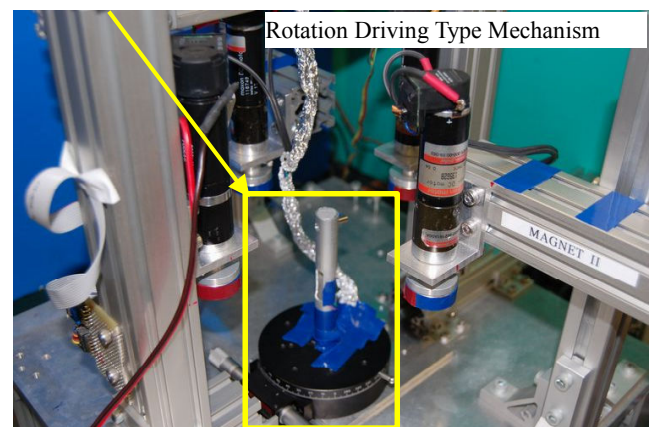
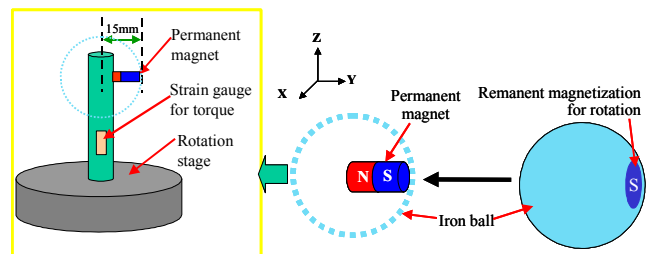
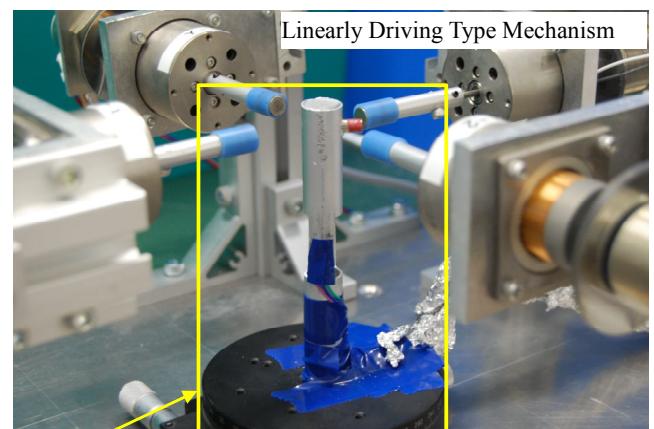


Fig. 9 Modelling Remanent Magnetization and Measurement Device

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、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

装置を用いた測定している風景の写真を Fig.9 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。

3・1 リニア駆動形回転駆動機構による回転トルク

測定実験では、正弦波を駆動信号として、4つの永久磁石が直線駆動され、作製した測定装置を用いたリニア駆動形回転駆動機構の回転トルクの測定を行った。永久磁石の往復運動の中心位置は浮上体の回転中心から22mmであり、往復運動の振幅は3mmである。また、永久磁石の駆動信号を30°ずつ変え、その永久磁石の位置ごとに、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。

測定したトルク結果を Fig.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、回転機構のトルク特性を見ることができる。図の横軸は浮上体の回転角度 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。残留磁気点が安定点に停まると、浮上体は回転しない。しかし、永久磁石を運動する時に、安定点の位置が変化すると、浮上体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。しかし、Fig.10 に示している結果では、永久磁石が動いたときに、安定点の位置は狭い範囲内で変化しているが、永久磁石の全ての運動範囲内に変化してないため、浮上体が回転できないと考えられる。この結果より、このリニア駆動形回転駆動機構は浮上体を回転させることができないといえる。しかし、実際は、この機構によって、回転制御ができた。そこで、この機構では、回転用の残留磁気点が1つでは足りないと考えられた。

3・2 回転駆動形回転駆動機構による回転トルク

回転駆動形回転駆動機構に関する考察実験では、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浮上体の中心から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通りで測定実験を行った。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。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 Fig.11～13 に示す。

Fig.11 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、浮上体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。

Fig.12 の結果から、円板磁石 I、III を用いた場合の結果で

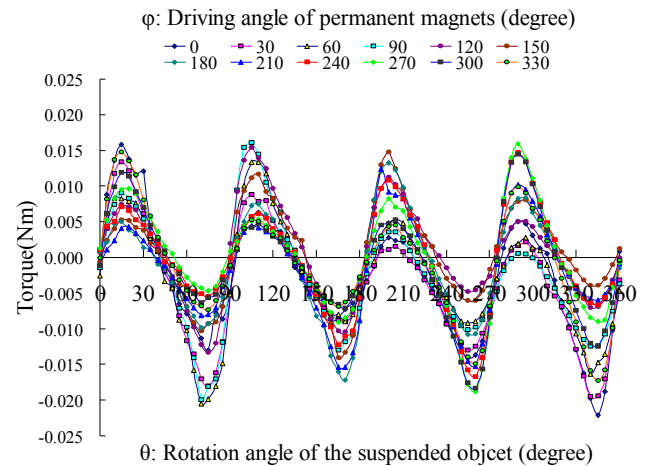


Fig.10 Rotational Torque of Linearly Driving Type Mechanism

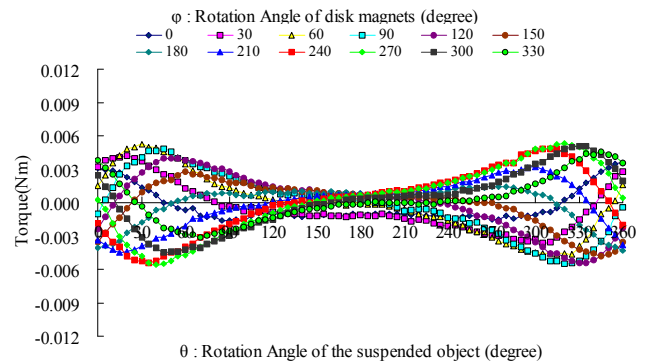


Fig. 11 Rotational Torque Using Disk Magnet I

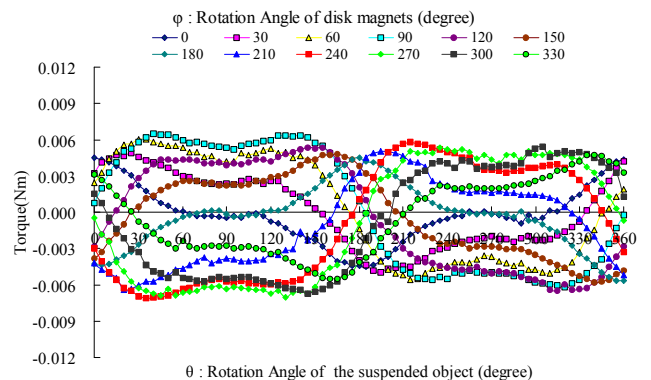


Fig. 12 Rotational Torque Using Disk Magnets I and III.

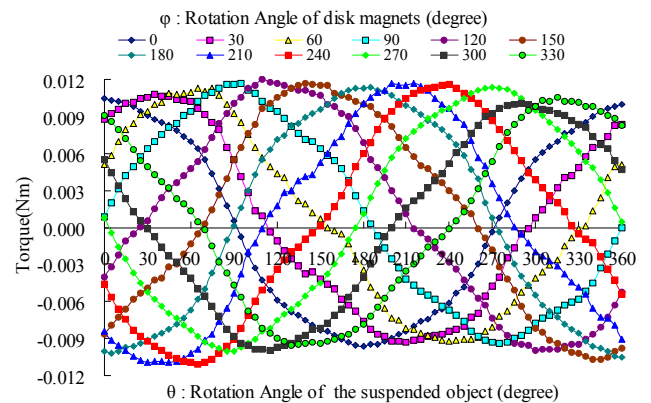


Fig. 13 Rotational Torque Using Four Disk Magnets

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、浮上体の回転制御が可能であることが確認できた。

Fig.13 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、浮上体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。安定点が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、浮上体の回転がスムーズに行えることがわかった。

今回、回転駆動形回転駆動機構は、安定回転する時のトルクの考察も行った。浮上体の回転角度 θ が ($\theta = \phi + 90^\circ$) となったとき、浮上体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 Fig.14 に示す。Fig.14 より、全ての場合の回転トルクは 0 Nm を中心として、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 Fig.11~13 に示した結果とも一致する。

3・3 回転駆動形回転駆動機構による横方向の力の解析

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 Fig.15 に示す。グラフは横軸が円盤磁石の回転角、縦軸が浮上体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、浮上体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、浮上体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、浮上体の限界回転速度が小さくなることが分かった。

4. おわりに

本論文では、永久磁石のリニア駆動と円盤磁石の回転駆動により、浮上体を回転させる機構において、歪みゲージに基づいた回転機構の発生トルクを測定し、回転原理について検討を行った。その結果、本論文で提案した浮上体の磁化では直線駆動による回転はできないことが明らかになった。このことにより、永久磁石のリニア駆動機構には、本論文で提案した浮上体のモデルが妥当ではないと考えられる。しかし、円盤磁石の回転駆動による浮上体の回転は可能であることが確認され、また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、浮上体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。

今後は実験による浮上体の磁化の状態を検討しより実際に近い測定のモデルを構築していくことを検討中である。

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—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) 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

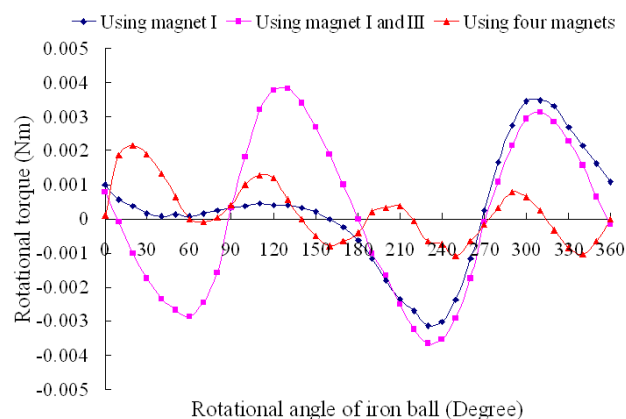


Fig. 14 Rotational Torque Results in the Stable State

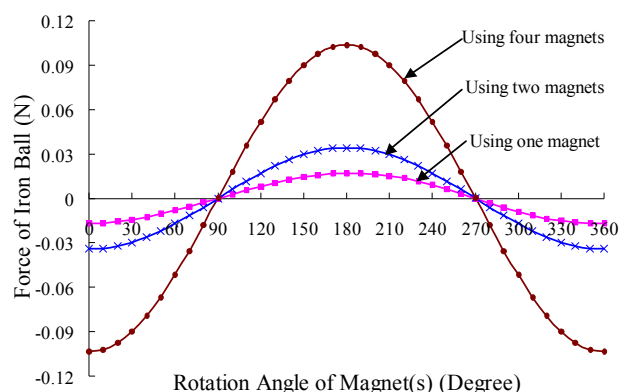


Fig. 15 Calculated Attractive Force in the Horizontal Plane.

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

- (3) 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
- (4) T. Nakamura and M.B. Khamesee, "A Prototype Mechanism for Three-Dimensional Levitated Movement of a Small Magnet", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 2, No. 1 pp. 41-50 (1997)
- (5) S. Verma, H. Shakir and W.J. Kim, "Novel Electromagnetic Actuation Scheme for Multiaxis Nanopositioning", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 8 pp. 2052-2062 (2006)
- (6) 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
- (7) 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)
- (8) 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)