

複数の永久磁石の回転機構による非接触支持機構

1. 緒言

近年、機械製品の小型化や精密化の進展は著しく、その生産過程では、精密部品の精度を保持できる搬送装置、機能的な組立て装置、塵埃の発生を抑えるクリーンルーム環境が必要とされている。現在、主にそれらの作業はロボットアームや人の手によって行われているが、接触による部品の変形やそれに伴う精度の低下、塵埃の発生などの問題が起こり得る。そこで、非接触で部品の支持ができればこれらの問題の解決が期待できると考えた。

非接触支持には空気圧、静電気、磁力などの利用が提案されている⁽¹⁾。空気圧を利用したものは、比較的大きな浮上力を得られ、対象物の制限も少ないが、エアの噴出による塵埃の発生が考えられ、クリーンルーム環境には不向きだと考えられる。静電気を利用したものは、対象物が絶縁体でなければ浮上力がはたらくが、その浮上力が非常に小さいため支持機構を構成することが難しい。磁力を利用したものは対象物が磁性体に限定されるが、塵埃の発生が無く、大きな浮上力も得られる。このことから、磁力の利用が最も有効であると考えられる。

磁力を利用した非接触支持機構には、永久磁石や電磁石などの使用が可能である。永久磁石を用いた支持機構は、浮上体との空隙をアクチュエータによって制御することで磁力を調整する。そのため、広い範囲の操作性をもち、電磁石のように発熱の問題もない。

本研究では、永久磁石を用いた新たな非接触支持機構の提案と開発を行う。

2. 非接触支持機構

2.1 支持機構の概要

図1に提案する非接触磁気支持機構の支持原理を示す。2本の永久磁石を、それぞれの中心を回転軸として回転させ、磁性体の浮上体にはたらく重力と支持力が釣り合うように回転制御する。このような永久磁石の回転機構により浮上体をx軸方向、y軸方向に制御し支持させる。

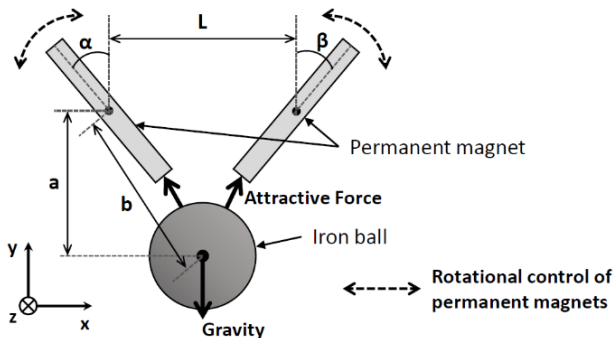


Fig. 1 Principle of levitation of proposed system

2.2 支持機構のシステム概要

提案する機構のシステム概略図を図2に示す。永久磁石はネオジウム磁石を用い、諸元を表1に示す。また、浮上体は鉄球を用い、諸元を表2に示す。永久磁石を回転させる2つのロータリーアクチュエータは、高出力トルクで、ガタが少なく高精度なハーモニックドライブのDCサーボアクチュエータを用いる。鉄球の位置の検出には、常に重力がはたらくy軸方向に特に精度が求められると考えられる。よって、y軸方向の検出には、非接触で金属の微小変位を測定でき、高い応答性をもつ渦電流センサを使用する。また、x軸方向の検出には、反射型レーザーセンサを使用する。

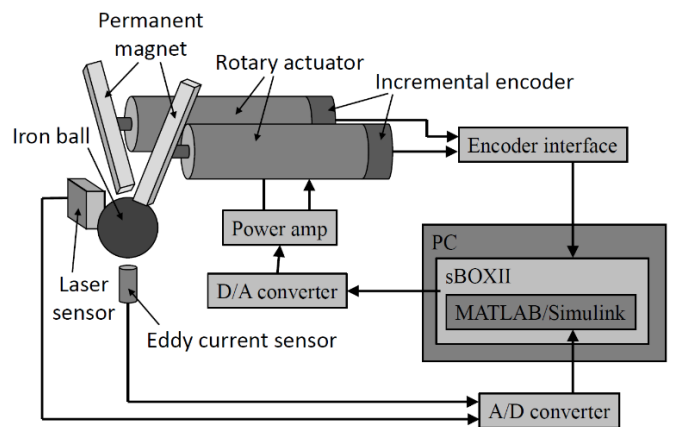


Fig. 2 Schematic diagram of magnetic levitation system

Table 1 Specification of Neodymium magnet

Length×Width×Height	5×5×40 [mm]
Residual magnetic flux density	11.7-12.2 [kG]
Coercive force	10.9 [Oe]
Maximum energy product	33-36 [MGOe]

Table 2 Specification of Iron ball

Material	SS400
Diameter	25 [mm]
Mass	64.2 [g]

3. 解析および磁力の測定

浮上体の支持に最適な磁石間の距離や、極の組み合わせの検討を行うため、磁場解析および磁力の測定実験を行った。

ここで、図1において永久磁石の中心間距離をL[mm]、永久磁石と鉄球のy軸方向の距離をa[mm]、永久磁石と鉄球の直線距離をb[mm]、永久磁石のy軸からの角度を α , β [°]とおいた。

卒業論文要旨

3.1 磁束線の解析

解析は、電磁界解析ソフトウェア JMAG-Designer Ver.14.0 を使用した。L=45[mm], $\alpha=\beta=45[^\circ]$ における xy 平面から出ている磁束線を解析した。異極対向時を図 3 に、同極対向時を図 4 に示す。

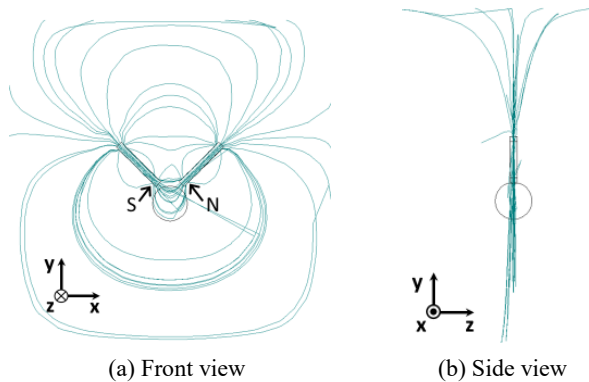


Fig. 3 Magnetic field lines of opposing S pole and N pole

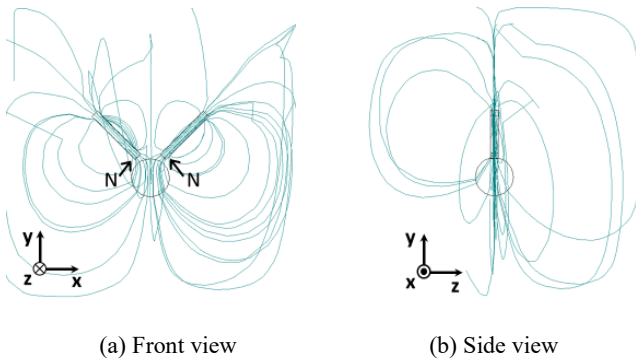


Fig. 4 Magnetic field lines of opposing N pole and N pole

異極対向時は、右側の N 極から鉄球上部を通り、左側の S 極に向かって磁束線が通過した。また、z 軸方向の磁束線はほとんどみられなかった。同極対向時は、鉄球の上部から下部に向かって鉄球全体に磁束線がみられた。また、z 軸方向にも磁束線がみられた。

3.2 実験方法

実験装置を図 5 に示す。実際に使用するものと同様の永久磁石と鉄球を配置して、L, α, β を変化させたときの支持力の変化を測定した。力の測定に用いたロードセルの諸元を表 3 に示す。



Fig. 5 Experimental device

Table 3 Specifications of load cell

Manufacturer	NEC San-ei Instruments
Model number	9E01-L35-5K
Measurement limit	5 [kgf]

始めに、異極対向において実験を行った。L=40, 42.5, 45, 47.5, 50[mm]において、 α, β が 35, 40, 45, 50, 55, 60[$^\circ$]のときの鉄球にはたらく磁力を測定した。また、永久磁石と鉄球の y 軸方向の距離 a は、L=40[mm]のとき a=30[mm]とし、このときの永久磁石と鉄球の直線距離 b が一定となるように、L の値によって a を変化させながら測定を行った。

3.3 実験結果

測定結果のグラフを図 6 に示す。グラフ中の点線は、鉄球が重力と釣り合う支持力 ($F_e=0.629[N]$) を示している。

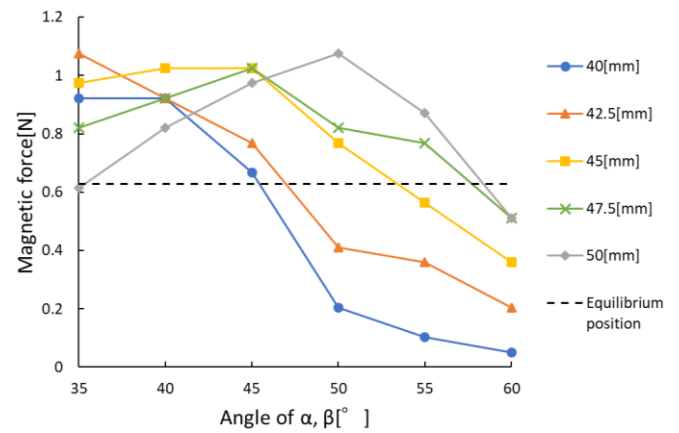


Fig. 6 Magnetic force in opposite pole

磁力の最大値は、磁石間距離が大きくなるほど、大きい角度で迎える傾向があることがわかった。L=40[mm]において、 $\alpha=\beta=40[^\circ]$ 以上になると急激に支持力が低下した。各グラフの最大値より右側に着目すると、L=45[mm]が最も直線的なグラフとなった。

次に、代表して L=45[mm]の同極対向時の磁力を同様に測定した。測定結果のグラフを図 7 に示す。

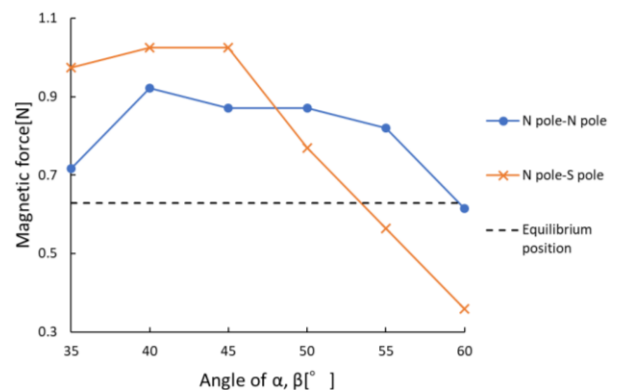


Fig. 7 Comparison of magnetic forces of N pole-N pole and N pole-S pole

卒業論文要旨

$\alpha=\beta=45[^\circ]$ 以下では異極対向時が、 $\alpha=\beta=50[^\circ]$ 以上では同極対向時が高い支持力を得られた。異極対向時は、同極対向時と比較して $\alpha=\beta=45[^\circ]$ 以上で安定した支持力の低下がみられた。

3.4 考察

浮上体の y 軸方向の支持には、浮上物が重力と釣り合う支持力より大きい支持力と、小さい支持力が永久磁石の回転によって得られる必要がある。図 6 より、 $L=45[\text{mm}]$ のとき、 F_e に交差する前後のグラフが最も直線的であり、安定した磁力を得られると考えられる。

また、図 7 や磁束線の解析結果から、異極対向時に回転による安定した磁力の変化が得られることがわかった。

$\alpha=\beta=55[^\circ]$ 以上になると、永久磁石の極同士が接近し、磁石間の吸引力や反発力によりアクチュエータの回転に影響を及ぼす可能性がある。反対に、 α, β が小さい場合は、図 6 から磁力の変化があまりみられない。したがって浮上体の支持は、異極対向、 $L=45[\text{mm}]$ 付近で、 $\alpha=\beta=45[^\circ]$ から $\alpha=\beta=50[^\circ]$ 付近の回転で行うことが最適だと考えた。

4. 支持機構の設計

提案する支持機構の概要図を図 8 に示す。

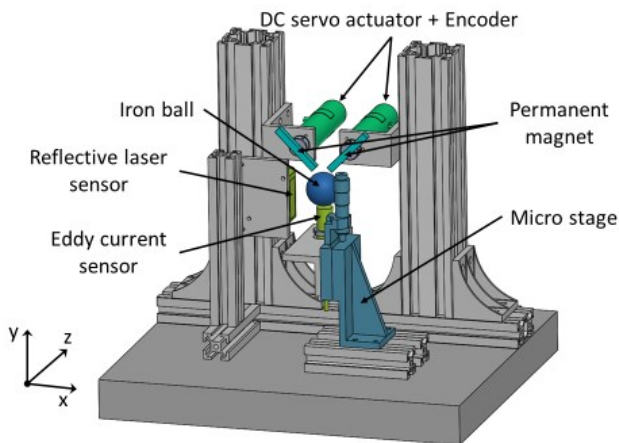


Fig. 8 Overall view of the magnetic levitation system

浮上物の支持は、浮上体に対して常に重力が働いている y 軸方向の制御が、特に難しいと考えられる。そのため、y 軸方向の位置検出をする渦電流センサは、マイクロステージで細かい位置調節が可能である。また、2本の永久磁石、反射型レーザーセンサは x 軸方向、y 軸方向に移動可能である。

5. 結言

新たに提案する永久磁石を用いた非接触支持機構の支持原理を示し、磁束線の解析や、様々な条件で磁力の測定を行った。その結果を考察し、浮上体支持の y 軸方向の制御における最適な磁石間距離と、永久磁石の極の組み合わせがわかった。今後は、これらの結果を考慮し、支持機構の製作および実験を行っていく。

文献

- (1) 一般社団法人電気学会磁気浮上技術調査専門委員会編 “磁気浮上技術の原理と応用”(2018) 科学情報出版株式会社