

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13925

研究課題名(和文) 磁場空間形成による支持剛性の無限小化に基づいた磁気浮上技術の確立と応用展開

研究課題名(英文) Establishment of magnetic levitation technology utilizing magnetic stiffness minimized by magnetic field space formation and its application development

研究代表者

大路 貴久(Ohji, Takahisa)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：30334709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：磁気支持剛性が極めて低い永久磁石反発型磁気浮上装置を開発するために、リング状永久磁石が浮遊する空間の磁場分布を理論解析した。浮上磁石を含む3個のリング状ネオジム磁石を組合せることで、磁気支持剛性が非常に小さく(約19.6 N/m)、かつ水平軸回りの回転力が受動安定となる永久磁石の配置構成を導出した。この配置を維持しながら、4つの空芯コイル、磁場変化検出用センサ、周辺制御装置を設置し、プロトタイプ装置を製作した。浮上磁石の水平方向の並進運動にPID制御を施すことで、浮上磁石を非接触で安定浮上させることに成功した。このプロトタイプ装置を用いて微小質量測定を実施し、最小分解能0.3gを実現した。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a permanent magnet (PM) repulsive type magnetic levitation device with extremely low magnetic stiffness, we analyzed the magnetic field distribution around a Neodymium ring PM floating in mid-air. By appropriately arranging three ring PMs including the floating PM, we have derived a configuration in which the magnetic stiffness acting on the floating PM is extremely low (about 19.6 N/m) and the couple moment around the horizontal axis is passively stabilized. While maintaining this configuration, a prototype system was completed by preparing four air-core coils for changing the magnetic field, four sensors for detecting a change in magnetic flux from the floating PM, and peripheral control devices. We succeeded in stabilizing the floating PM in noncontact manner by applying PID control to the translational motion in the horizontal direction. Using this prototype device, we demonstrated that it is possible to detect a small mass with a minimum resolution of 0.3 g.

研究分野：電気機器工学, 電磁力応用工学

キーワード：磁気浮上 反発型 支持剛性 無限小 磁場空間形成 質量測定

1. 研究開始当初の背景

永久磁石の反発力(永久磁石反発)を利用した磁気浮上や磁気軸受が多数研究され、一部は産業用、民生用に製品開発されている。申請者らも永久磁石反発による受動支持を最大限利用し1軸のみを制御する装置(1軸制御型反発浮上磁気軸受)を研究対象としてきた。永久磁石反発の恩恵として能動制御軸数の削減による効果(制御の簡素化、センサやアンプの費用削減)はあるものの、磁気支持剛性が比較的小さく、機械式軸受の代替要素として利用するには制限がある。機械式軸受の代替を目指す(高支持剛性化)のではなく、永久磁石反発の磁気支持剛性を極限まで小さくすることで新たなアプリケーションの可能性が発現することが予想され、特に高感度センシング機器への応用が期待できると考えられた。

2. 研究の目的

本研究は、浮上物体の振動が極めて小さく、また、制御入力(浮上安定化のための電流など)による磁場変化も極めて小さい「あたかも無制御で浮遊するかのような究極に柔らかい磁気浮上状態」を作り出すことを目的とし、この特殊な磁気浮上状態を利用したアプリケーションを創出しプロトタイプ開発および性能評価を行う。具体的には、①支持剛性無限小化のための磁場空間の形成、②磁気浮上装置の開発と基本性能評価、③高感度センシング、④省電力多自由度アクチュエーションを当初目的として研究を遂行した。

3. 研究の方法

本研究は、上記①②が確立されたのち、③と④のためのプロトタイプ開発、性能評価を行う。

まず、①支持剛性無限小化のための磁場空間の形成について、例えば3個の同形リング状永久磁石を用い、中央の浮上磁石を下部固定磁石から反発し、上部固定磁石から吸引すれば、原理上、支持剛性を無限小化できる。このようなある特定の配置での磁場空間状態を把握するために理論解析及びFEM解析を実施し発生力やトルクを評価する。

②磁気浮上装置の開発と基本性能評価については、上記①により確定した永久磁石配置と磁場空間を維持しつつ、空芯コイル、変位センサ等を用いた能動制御を行う。この際、浮上磁石の水平並進とピッチ、ヨーの回転が複合的に生じると制御軸数が増加し能動制御が複雑化する。磁気支持剛性が十分小さい状態を維持しつつ運動方向を限定した制御軸数の少ない磁気浮上装置の実現を目指す。制御時に必要となる各種パラメータを静特性から導出する。

③高感度センシングについては、②で製作した装置に対し、周辺装置(制御機器、電力増幅器等)を接続し浮上安定化を図る。DSP、MATLAB/Simulinkを使用し補償器設計と実

装を繰り返す。安定浮上状態が確立されたのち、浮上磁石の挙動に影響を与える因子(外部磁場や空気流動等)について、その対処法を検討し、最終的に様々な物理量の検出感度を評価する。

④省電力多自由度アクチュエーションについては、②で製作した装置に対し、周辺装置を接続し浮上安定化を図ったのち、浮上磁石に回転磁界を印加し回転力を与える。回転磁界は制御用コイルに微弱の交流電流を印加するものとし、制御状態に影響を与えないよう配慮する。浮上磁石は非常に小さい剛性で磁気支持されることから、速応性や負荷応答性は求めず、低速回転での磁気浮上テーブルの実現を目指す。

4. 研究成果

①支持剛性無限小化のための磁場空間の形成

前述のとおり、原理上は同寸法の3個のリング状永久磁石のうち、中央の浮上磁石と下部リング磁石を対面同極、浮上磁石と上部リング磁石を対面異極とすれば支持剛性を無限小化できるが、2個のリング磁石でも対面同極で配置すれば、浮上磁石の自重と反発力の平衡位置で低磁気支持剛性状態が得られる。そこで2個のリング磁石PM1、PM2(ともにネオジム磁石、 $54\phi\times 38\phi\times 5t[\text{mm}]$)を対面同極で同軸配置した基本構成を検討する。上下方向の受動磁気支持剛性が小さければ、Yonnet剛性定理から水平方向(不安定)の並進磁気支持剛性も小さい。従って水平方向の位置ずれを僅かな力で能動制御すればよいと考えていた。しかし実際、浮上磁石PM1は、水平並進運動とともに水平軸回りの回転運動が生じ、後者の回転運動が優位であった。能動制御の際、制御軸数の増加や運動方向の分離不可は好ましくない。そこで、小径のリング永久磁石PM_m(ネオジム磁石、 $26\phi\times 20\phi\times 6t[\text{mm}]$)を下部リング磁石PM2と対面異極で挿入することで回転運動を除去した(図1)。計3個の永久磁石の位置関係と回転運動の除去に関する考察のため、円形電流対に基づくリング永久磁石による磁場分布の理論解析を実施した。リング磁石を円形電流に見立て、完全楕円微分で表現された磁束密度と線電

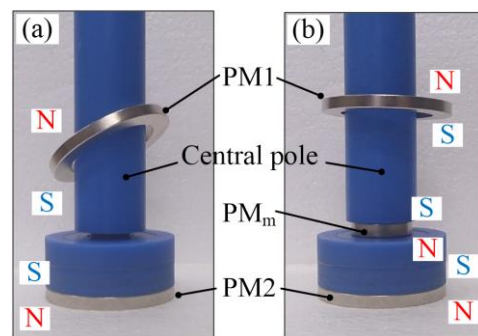


図1 リング磁石配置と状態
(a)PM_m無、(b)PM_m有。

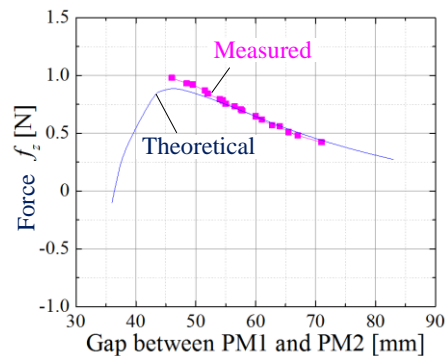
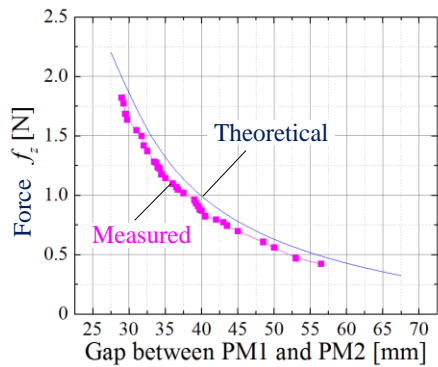


図2 PM_mの有無と反発力
(上: PM_m無, 下: PM_m有)

流との外積による力を算出する。この理論解析結果と測定結果は非常に良い一致を見た(図2)。そこでこの理論解析手法を基に図1(b)のリング磁石配置による水平軸回りの回転力を計算したところPM_mの設置により極めて小さい正の剛性(0.52 mNm/deg.)で支持され、PM1が傾き約50 deg.まで受動的に水平状態に戻そうとする力が生じることが示された。なお、図1の状態では非接触浮上が確立された際の上下方向の磁気支持剛性は浮上磁石PM1と重力の平衡位置で約20 N/mとなり、永久磁石反発に基づく量販品に比べ約1/20と非常に小さい値である。

②磁気浮上装置の開発と基本性能評価

プロトタイプ装置による安定浮上時(支柱除去時)の様子を図3に示す。また、永久磁石、空芯コイル、センサ、制御環境を図4に示した。浮上磁石PM1と同一平面に配置された4個の空芯コイルを用いてx方向およびy方向の並進運動を能動制御する。コイルを空芯とした理由として、複数のリング状永久磁石によって生成された磁場空間が鉄心によって乱されないようにするため、磁気支持剛性が低い場合、過大な吸引力は不要であり磁場空間を僅かに変化させるだけで十分なためである。通常、磁気浮上制御では浮上体の位置を検出するが、ここではPM1の運動に伴う磁束密度変化を8個のホールICで検出している。以上のように本システムは磁束密度の変化を検出し磁場分布を制御している点で特徴的である。

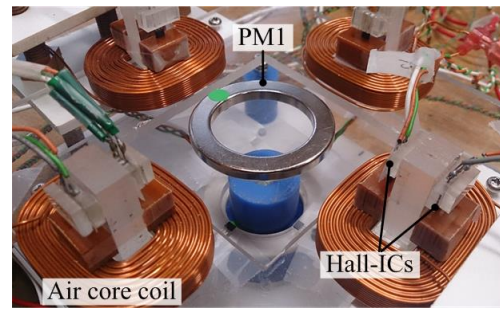


図3 浮上制御時の様子

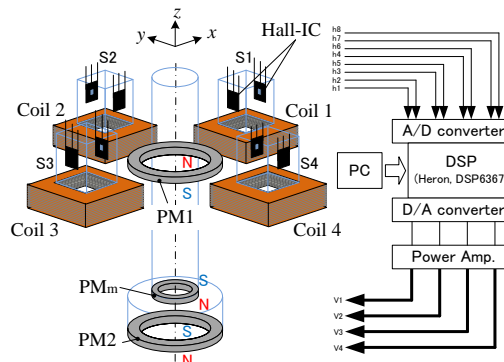


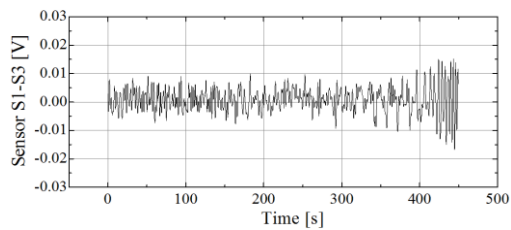
図4 各部の配置と制御環境

浮上実験では、支柱中央を中心軸とし、その中央でPM1をPID制御を施して安定浮上させた。この場合、理想的には空芯コイルにおける定常電流はゼロであり、制御電流のみが生じる状態となる。しかし実際の制御電流は、x方向、y方向ともにPM1を吸引する方向にしか与えていない。これは、逆向きの制御電流を印加した際に空芯コイルとPM1の間に反発力が生じ、PM1は水平軸回りの回転運動を引き起こすためである。このようにPM1が中心軸中央に存在するときのセンサ部での磁束密度を閾値として、通電する空芯コイルを随時切り替えて制御している。

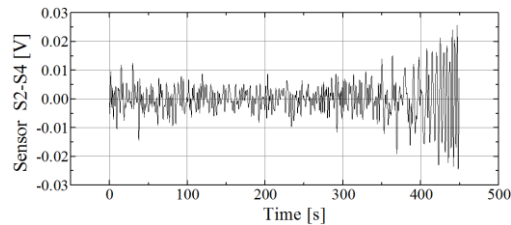
図5は実際の浮上状態でのセンサ電圧変動である。ホールICを複数用いた各方向のセンサは±4 mmの範囲で線形(73 mV/mm)であり、いずれの方向も340 secまでは20 mV_{p-p}以内であることから、振動幅0.3 mm_{p-p}以内で制御されているように読み取れる。しかし実際には、制御開始100 sec~340 secで徐々に中心軸回りの揺動が生じ、それ以降は回転運動となり最終的には制御不能に陥った。この原因を調査した結果、PM1の1周分の磁束密度分布に不均一(極大1, 極小1)があり、センサ位置で約82 mV_{p-p}(1.2 mm相当)の変動を検出しフィードバックがかかったためであると判明した。

③高感度センシング

高感度センシングの例として微小質量測定を実施した。上記の通り、浮上磁石PM1には僅かな磁束密度の不均一が存在し、この不均一性は永久磁石の製作精度の問題であるとすれば、現状ではそれを許容した上で質



(a) x 方向



(a) y 方向

図4 浮上制御時のセンサ電圧変動

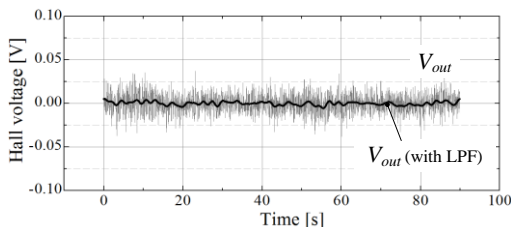


図5 質量検出信号 (無加重時)

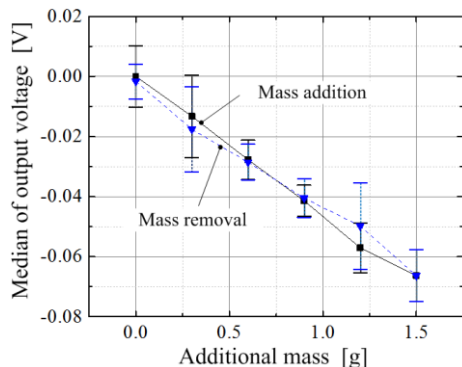


図6 質量検出特性 (質量追加時, 除去時)

量測定する必要がある。そこで、中心軸から等距離かつ中心軸に対し 90deg.おきに質量検出用ホール IC 4 個を別途設置し、平均化処理を行うことで PM1 の周方向の磁束密度不均一性を除去し、鉛直方向の追加質量に対する沈み込み量の測定を行った。図 5 はホール電圧校正後の初期状態 (無加重時) である。

安定浮上中の揺動が小さい段階で、PM1 にフィルム状試料 (0.3g/枚) を追加、除去した際の出力電圧 (中央値) を図 6 に示す。本実験では最大 1.5 g の追加質量に対しても非接触浮上状態が維持されており、ほぼ線形な沈み込みに基づく中央値が検出された。換算係数は 22.7 mg/mV である。しかし、試料追加時と除去時で出力電圧値に最大 8 mV の誤差 (換算係数より 0.18 g 相当) が生じている。

<課題>

1) 浮上磁石 PM1 の磁束密度の不均一性への対処

前述の通り、永久磁石によって生じる磁場の不均一性は不可避であり、特に、磁気支持剛性の無限小化においては、支持剛性を小さくするほどその影響が顕著となる。対処として、PM1 の回転角を検出量としモデル化の際に磁束密度の不均一を陽に含める方法や、不均一性を誤差として包含し、補償器でロバスト安定化を図る方法を検討する。一般に機械式軸受の代替として永久磁石反発を利用する磁気浮上装置では、この周方向の磁場不均一への厳密な対応はおおむねにされており、これらの対処方法が新たな研究題材となりうる。

一方、現状のプロトタイプ装置でも非接触浮上状態において PM1 の揺動、回転が生じた。つまり、PM1 の磁束密度の不均一は、回転界磁型永久磁石同期機の回転子として利用可能であるといえる。上記、後者の対処法と併用し空芯コイルに回転磁界のための電流を重畳することで、④省電力多自由度アクチュエーションとして、非接触回転テーブルの実現可能性が期待できる。

2) センシングの高感度化への対処

磁気支持剛性を無限小化するためには、最終的には 3 個の同形リング状永久磁石で原理通りに上下方向の力平衡点で浮上磁石を保持する必要がある。本研究結果から、支持剛性を無限小とすることで、微小質量測定での高感度化 (即ち、試料を載せた際の沈み込み増) の実現性は明確となったが、一方で最大秤量も同時に小さくなることが予想され、市販の分析用電子天秤 (5 桁表示等) のような用途は適さない。この知見より、本システムは微小質量測定以外の物理量変化に対する検出器 (微振動、微粒子測定、微弱磁場計測等) に適正が高いことが示唆された。

本申請研究での成果と経験を踏まえ、表出した各課題の解決に向けて研究を継続する。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- ①桂川岳之, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, リング状永久磁石を用いた反発型低支持剛性磁気浮上の提案, 平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, A3-6 (CD), (2015.9), 金沢工業大学 (石川県野々市市)
- ②桂川岳之, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 円形電流表現を用いたリング状永久磁石間の作用力評価, 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, 5-136, pp. 208-209, (2016.3), 東北大学 (宮城県仙台市)
- ③桂川岳之, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 複数のリング状永久磁石による浮上磁石の運動方向の限定, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 19A2-1, pp. 228-229, (2016.5), 慶應義塾大学 (東京都港区)

④桂川岳之, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平, 作井正昭, 低支持剛性磁気浮上装置による質量検出, 平成 29 年電気学会全国大会講演論文集, 5-147 p.216, (2017.3), 富山大学 (富山県富山市)

⑤桂川岳之, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平, 作井正昭, 低支持剛性を持つ反発型磁気浮上装置の提案と浮上状態の評価, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 3-1-08, pp. 89-94, (2017.5), 倉敷アイビースクエア (岡山県倉敷市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

大路 貴久 (OHJI Takahisa)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・

教授

研究者番号 : 3 0 3 3 4 7 0 9