

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420228

研究課題名(和文)5軸能動制御型磁気浮上ディスクモータの研究

研究課題名(英文) Research of 5-degrees-of-freedom active controlled magnetically levitated disk motor

研究代表者

上野 哲 (Ueno, Satoshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40322929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ディスク型ロータを非接触で支持・回転を行う5軸能動位置制御型アキシアルセルフベアリングモータの提案とその基本原理の確認を行った。ステータとロータの外側に円筒型の磁気回路を新たに設け、直流電流を印加することにより、ロータの回転制御と浮上制御を行う。有限要素法による磁場解析により、ラジアル力と傾きトルクが発生することを確認し、軸受力の制御方法を開発した。そして試作機を製作し、非接触での浮上回転制御に成功した。以上の結果より提案するモータが実現可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research proposed a novel 5-degrees-of-freedom active controlled axial self-bearing motor, which can actively control both rotor postures and motor torque without mechanical contact, and confirmed the basic principle of it. To control the levitation and rotation of the rotor, cylindrical flux paths are attached around the stator and rotor, and direct currents are applied to the stator currents. Finite element magnetic analysis confirmed the generation of radial forces and tilt torques, and the control method of them was derived. Then a prototype motor was made and tested and non-contact levitation and rotation were achieved. Above results demonstrated that the proposed motor can be realized.

研究分野：機械工学, 制御工学, メカトロニクス

キーワード：磁気浮上 磁気軸受 セルフベアリングモータ ベアリングレスモータ

1. 研究開始当初の背景

近年、樹脂フィルムや不織布などの生産ラインにおいて、圧延や接着などを行うローラの長軸化、高速回転化の要求が高まっている。また磁気共鳴画像装置(MRI)や脳磁計(MEG)などにおいては、超電導コイルの性能向上のため、冷凍チャンバ内で使用可能な真空ポンプの開発が求められている。また体内埋め込み型人工心臓では、回転するインペラを支持する軸受の耐久性が問題となっており、非常に長い寿命を有する軸受の開発が求められている。また民生用機器においては、回転機の付加価値を高めるため、軸受の静粛性の向上が必要となっている。

回転軸の高速回転、回転損失の低減、軸受の耐久性の向上、静粛性のため、流体軸受や磁気軸受などの機械的な接触が無い軸受が開発され、実用化されてきた。このうち磁気軸受は、磁気を用いて機械的な接触や脂や空気などの作動流体を用いずに、軸を支持することが可能なため、摩擦が無く高速回転が可能、摩耗が無く高い耐久性を有する、粉塵などの発生しない、油などを使用しないためクリーンな環境で使用可能、極低温、高温環境でも使用可能、アクティブ制御による振動の低減など、優れた特徴を持っている。しかし高価なセンサや制御装置が必要となるため高価であり、単位面積あたりで発生できる力が小さいため、装置が大型化してしまうなどの問題があり、広く普及するには至っていない。

これらの問題を解決する方法として、我々は磁気軸受と交流モータを一体化したセルフベアリングモータ(磁気浮上モータ、ベアリングレスモータなどと呼ばれることもある)を提案してきた。このモータは、一つのステータで回転トルクの発生とローラのラジアル方向またはアキシャル方向の位置制御を行うものであり、磁気軸受の1つを取り除くことを可能にする。このためモータの高性能化、小型化、制御装置を含めたシステムの簡単化、低価格化を実現することができる。現在までに、図1に示すようなアキシャル型のセルフベアリングモータの非接触浮上を実現し、このモータを用いた渦流ポンプ、真空ポンプの開発を行ってきた。

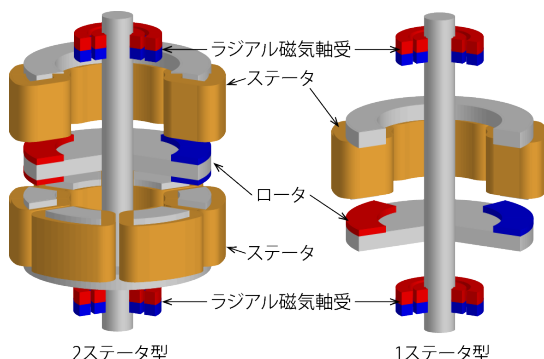


図1 アキシャル型セルフベアリングモータ

アキシャル型セルフベアリングモータは、ディスク型ローラの上側もしくは上下にステータを配置し、ローラの回転トルクの発生とアキシャル方向の位置制御を同時に行うモータである。構造や制御システムが簡単になる利点があるが、1軸のみしか能動制御ができないため、他のラジアル4自由度は普通の制御型の磁気軸受、もしくは図1に示すような受動磁気軸受で支持する必要がある。これらのラジアル磁気軸受を必要とするためモータ構造の自由度が小さく、ポンプに応用するとき理想的な流路の確保が難しく、また流体シールの構造が複雑になる等の問題が生じた。さらに受動磁気軸受を用いた回転実験では、受動磁気軸受で発生する減衰力が小さいため、危険速度を通過することができず、回転速度を上昇させるために減衰力を付与する仕組みが必要となった。このため構造がさらに複雑になり、回転損失も増加する結果となった。

2. 研究の目的

本研究では、従来のアキシャル型セルフベアリングモータの問題点を解決するため、モータの構造をほとんど変更せずに、5軸の能動制御を実現することを目的とする。提案するモータの構造を図2に示す。ローラはシャフトを有しないディスク形状とし、ステータはローラを挟むように両側に配置する。提案するモータは、従来のアキシャル型セルフベアリングモータに一樣磁界とモータ用とは別の回転磁界を追加することによりラジアル方向とラジアル軸周りの回転の制御を行う。そのため、一樣磁界のための円筒磁路をステータとローラの外側に追加する。

ローラの回転トルクとアキシャル方向の力の制御は、従来と同じく、ローラと同じ極数の回転磁界で行う。ラジアル方向の力とラジアル軸周りのトルクは、ローラの極数+2極の回転磁界と一樣磁界によって行う。

本研究では、まず提案する構造でラジアル軸方向の力とラジアル軸周りの回転トルクが発生することを有限要素法を用いた磁場解析により明らかにする。そしてそれらの制御方法を検討し、試験機を用いた実験、実際に制御可能かどうかを明らかにする。

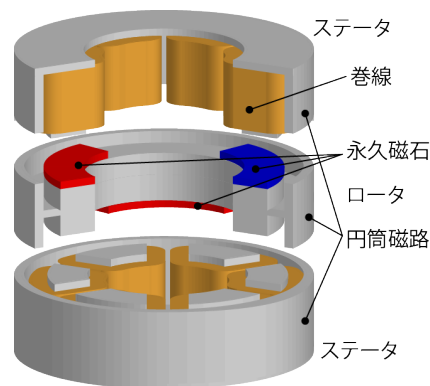
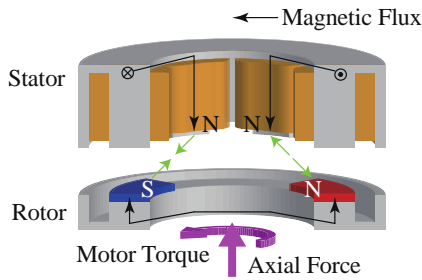


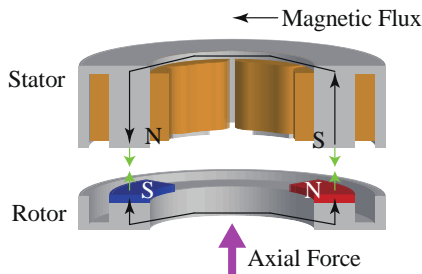
図2 提案するモータの構造

3. 研究の方法

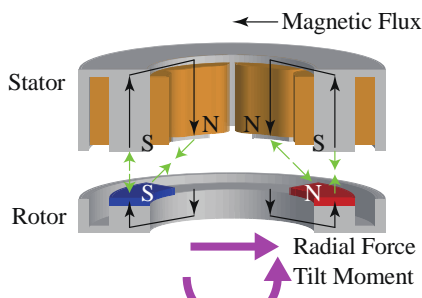
(1) 回転トルク，軸受力の発生原理を図3に示す。2極の回転磁界によりモータトルクとアキシャル方向力の制御を行う。ロータ磁石と90°位相がずれた電流によりモータトルクを制御し，ロータ磁石と同位相の電流によりアキシャル方向力を制御する。ラジアル方向力とラジアル軸周りのトルクは，4極の回転磁界と直流電流により制御する。この場合，ロータ磁石が設置している軸に沿ったラジアル方向力とその軸に直交する軸周りのトルクが制御できる。よって上下磁石の位相を90°ずらすことで2方向の制御を行う。



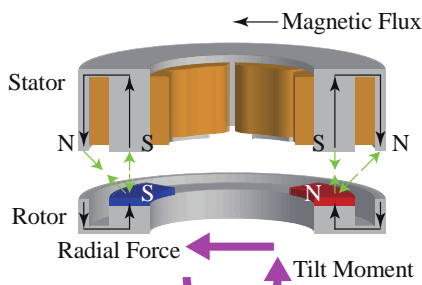
(a) 位相 90° 2 極電流



(b) 位相 0° の 2 極電流



(c) 4 極電流 (位相 0°)



(d) 直流電流

図3 回転トルクと軸受力の発生原理

(2) 有限要素法による磁場解析により，モータで発生するモータトルク，アキシャル方向力，ラジアル方向力，ラジアル軸周りの回転トルクを求め，提案する構造で制御力が発生するかどうか確認した。そしてそれらの制御方法の検討を行った。解析には株式会社 JSOL の JMAG を使用し，3次元静磁界解析を行った。解析には，実際に使用する鉄心および磁石の B-H 曲線を用いた。メッシュは安定した解析結果が得られるまで小さくした。図3にメッシュモデルを示す。メッシュ数は約 90,000，接点数は約 16,000 である。

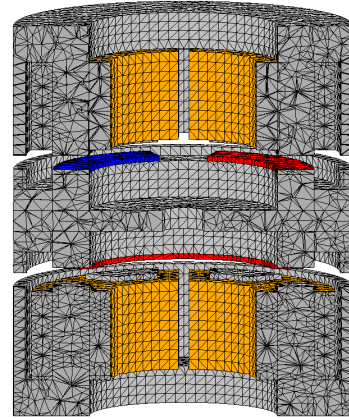


図4 有限要素メッシュモデル

(3) 解析で得られた結果を確認するため，試験装置を製作し，軸受力の測定と浮上制御および浮上回転制御実験を行った。製作した装置を図4に示す。中央に提案するアキシャル型セルフベアリングモータを配置し，その上下に永久磁石反発型磁気軸受を配置した。これは，制御電流を印加したときに力が発生していることを確認するために用いたものである。5軸制御による浮上を行う場合は永久磁石反発型磁気軸受を取り外して実験を行う。また変位センサを永久磁石反発型磁気軸受の外側に配置し，ロータのアキシャル方向の変位，ラジアル方向の変位，ラジアル軸周りの傾き角を検出する。

ステータは積層鋼板と S45C の無垢材から製作した。それぞれ6個のコイルを取り付け，独立したパワーアンプでコイルに電流を印加する。ロータも積層鋼板と S45C の無垢材から製作し，セグメント型のネオジウム磁石を貼り付けた。上側と下側の磁石の位相は 90° ずらした。

制御には Digital Signal Processor (DSP) を用いた。AD コンバータにより変位センサの信号を DSP に取り込み，DSP で各コイルに流す電流を計算する。そして DSP から DA コンバータでその値を出力する。しかし DSP に備わっている DA コンバータの数がコイルの数より少ないため，アナログ演算回路を用いて各コイルの電流を計算した。パワーアンプにはパワーオペアンプを用いて電流型アンプを製作した。

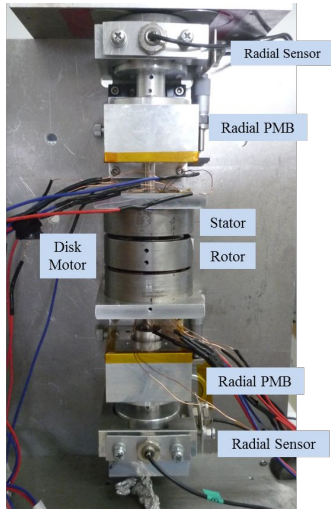
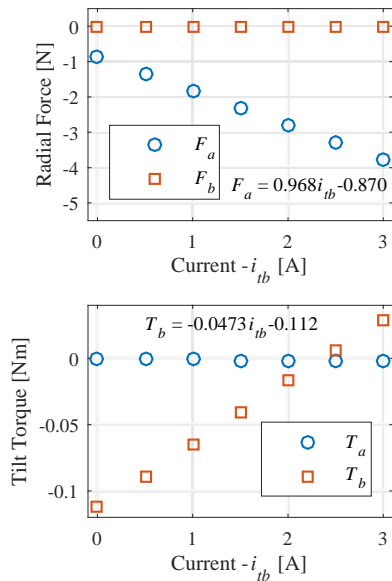
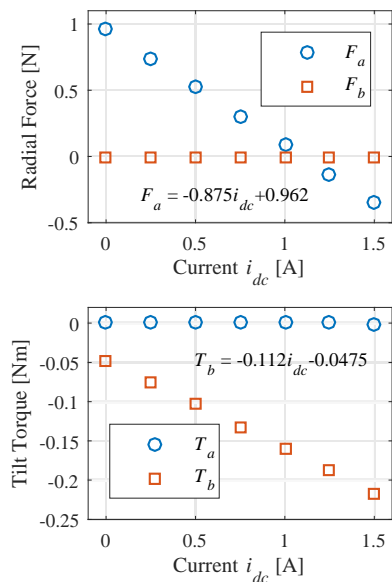


図5 実験装置

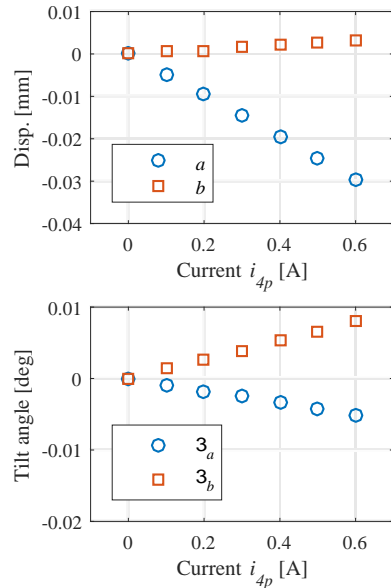


(a) 4極電流による軸受力

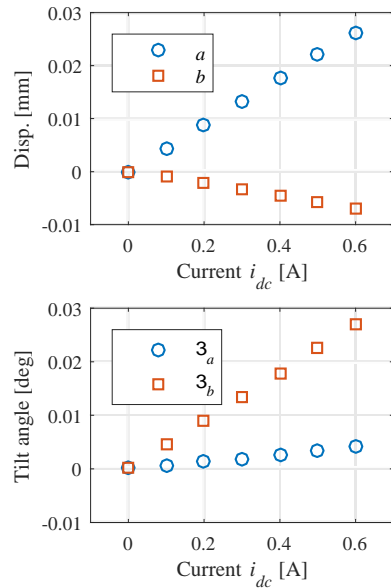


(b) 直流電流による軸受力

図6 解析結果



(a) 4極電流によるロータ変位



(b) 直流電流によるロータ変位

図7 軸受力の測定結果

4. 研究成果

(1) 磁界解析の結果、各コイルに同じ直流電流を流すと、永久磁石と直流磁界によってロータに傾きトルクとラジアル方向力が発生し、また4極の回転磁界を印加することによっても傾きトルクとラジアル力が発生することが分かった。さらにそれぞれの電流によって発生するラジアル方向力は逆向きに、傾きトルクは同じ向きになることが分かった。

次に直流電流と4極電流を組み合わせることで、ラジアル力と傾きトルクがどのように変化するかを解析した。図5および図6に結果を示す。図5は一定の直流電流をコイルに印加した状態で、4極の回転磁界の振幅を変化させたときのラジアル方向力と傾きトルクの計算結果、図6は4極の回転磁界の振幅を一定とした状態で、直流電流の値を変化さ

せたときの結果である。これらの結果より、次式のような電流を印加することで、ラジアル方向の力と傾きトルクの両方が制御できることが確認出来た。

$$\begin{bmatrix} i_{dc} \\ i_{4p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Fdc} & -K_{F4p} \\ K_{Mdc} & K_{M4p} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_a \\ M_b \end{bmatrix}$$

(2)次に解析の結果を実験により確認した。アキシャル方向の位置制御を行い、ロータを浮上させた状態で、制御電流を印加し、その時のロータ変位を測定した。結果を図7に示す。解析と比べて若干、力の発生する方向が異なっているが、ラジアル方向力および傾きトルクが発生していることが確認出来た。

次に永久磁石反発型磁気軸受を取り除き、5軸位置制御による浮上実験を行った。結果を図8に示す。このグラフは浮上させた状態でラジアル方向に外乱を加えた時のラジアル方向の変位と傾きの応答である。これより5軸制御により安定浮上が実現出来ていることが確認出来た。

図9に回転試験の結果を示す。回転数は、100rpmである。回転時は振動が大きくなったが、タッチダウンに接触せずに回転することに成功した。これより提案するモータにより非接触での浮上回転が実現出来ることが確かめられた。

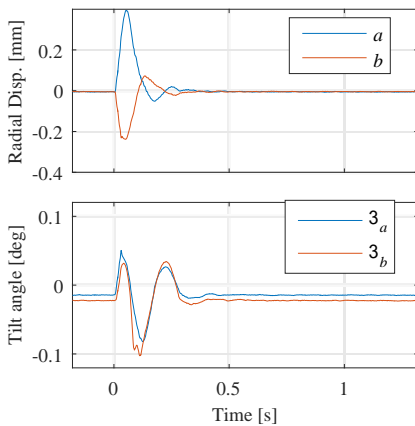


図8 浮上試験

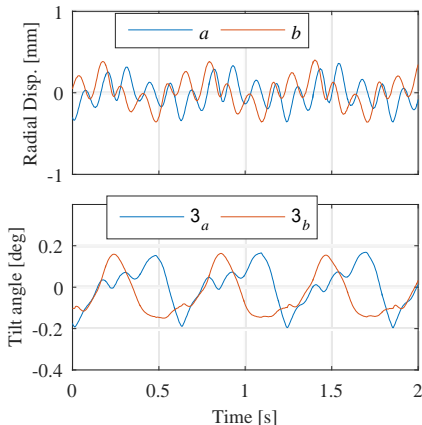


図9 浮上回転試験

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

福浦卓也, 上野 哲, 円筒型磁気回路を用いた5軸能動位置制御型ディスクモータの開発, Dynamics and Design Conference 2015, 2015年8月26日, 弘前大学(青森県弘前市)

Satoshi Ueno, Takuya Fukuura and Tran Van Toan, Development of a 5-DOF active-controlled self-bearing disk motor, The 10th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, 2015年7月27日, Aachen(Germany)

Satoshi Ueno, Takuya Fukuura and Tran Van Toan, A 5-DOF Active Controlled Disk Type PM Motor with Cylindrical Flux Paths, 14th International Symposium on Magnetic Bearings, 2014年8月12日, Linz(Austria)

福浦卓也, 上野 哲, 5軸能動制御型セルフベアリングモータの電磁力解析, 第22回MAGDAコンファレンス in 宮崎, 2013年12月2日, 宮崎観光ホテル(宮崎市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

上野 哲 (UENO, Satoshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 40322929