

令和元年6月6日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06199

研究課題名(和文)円筒磁路を用いた5軸能動位置制御型磁気浮上ディスクモータの高性能化についての研究

研究課題名(英文) Research on improvement of 5-axis active position controlled magnetic levitation disk motor using cylindrical magnetic path

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ディスク型セルフベアリングモータに円筒型の磁気回路を加えて単極磁界を発生させることで、ロータの軸方向位置とモータトルクに加えて、ラジアル方向位置と傾きを制御するセルフベアリングモータの開発に取り組んだ。まず従来の試験装置の構造と制御方式を改善し、従来よりも安定した浮上回転制御を実現した。そしてロータの片側のみステータを配置したモータの設計と製作を行った。さらに電磁力解析によってラジアル方向の軸受力の発生原理を明らかにし、さらに4極以上のロータに対して、1組のロータとステータのみでラジアル方向力と傾きトルクが制御可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、簡単な構造によってロータの回転と支持を非接触で行うモータを開発している。非接触であるため効率の向上と低騒音が実現でき、摩耗がないため寿命が飛躍的に向上し、潤滑油が不要となるため環境に優しいモータとなる。

本研究では、ロータの新しい支持方法を提案し解析と実験により提案するモータが実現可能であることを示した。本研究で明らかにした手法は、小型・低価格・高効率の非接触モータの開発につながるものである。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed a self-bearing motor that controls not only motor torque and axial position but also the radial position and tilt of a rotor by adding a cylindrical magnetic circuit to a disk-type self-bearing motor and generating unipolar magnetic field.

First, by improving the structure and control system of the test device, we have realized more stable levitation and rotation control than before. Then, we designed and manufactured a motor in which stators were placed only on one side of a rotor. Furthermore, the generation principle of radial force and tilt moment was analytically developed, and it was shown that radial force and tilt moment can be controlled with only one set of rotor and stator for a rotor with four or more poles.

研究分野：メカトロニクス, 制御工学, 電気工学

キーワード：セルフベアリングモータ ベアリンレスモータ 磁気浮上 磁気軸受 永久磁石モータ キャンドボン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、軸受の高速回転、耐久性の向上が要求され、流体軸受や磁気軸受などの機械的な接触が無い軸受が実用化されている。このうち磁気軸受は、磁気力で軸を支持するため、摩擦が無く高速回転が可能、摩耗が無いため高い耐久性を持ち、粉塵などの発生がなく、油などを使用しないためクリーンな環境で使用でき、さらに極低温でも使用可能など、優れた特徴を持っている。また隔壁を通して力を伝えることが可能なため、ポンプ回転軸のシールを使用しないシールレスポンプの軸受に適している。しかし能動制御が必要なため高価であり、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の一つとして、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）が提案されている。このモータは、モータの機能と磁気軸受の機能を一体化したものであり、不要な磁気軸受を取り除くことができるため、モータの高性能化とともに小型化や構造の簡単化、低価格化が可能となる。

セルフベアリングモータは、様々なタイプのものが提案されているが、研究代表者は特にポンプ応用に適しているアキシヤルセルフベアリングモータの開発に取り組んできた。モータの構造は、図1に示すようにディスクロータの上下、もしくは片側のみにステータを配置した構造となっている。研究開始当初は、アキシヤル方向の1軸のみ能動位置制御を行っていたが、回転性能の向上とより一層の構造の簡単化のため、3軸能動位置制御を行うモータの開発を行い、さらに5軸能動位置制御が可能なモータを提案し、試作機により非接触での浮上回転が実現出来ることを確認している。

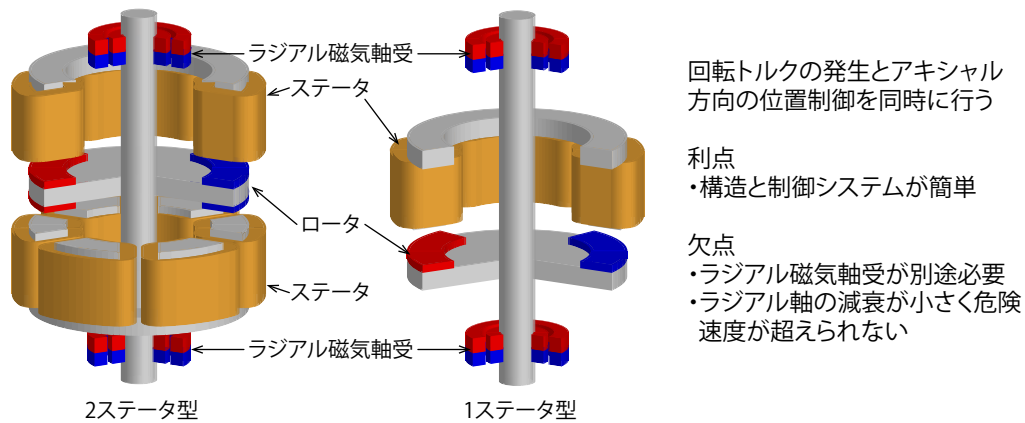


図1 従来のアキシヤルセルフベアリングモータの構造

2. 研究の目的

本研究で提案するモータ構造を図2に示す。図2(a)は過去に浮上回転制御の実現が確認できた構造である。ロータはシャフトを有しないディスク形状とし、図1の2ステータ型のアキシヤルセルフベアリングモータの外側に円筒形の磁路をステータとロータに追加した構造となっている。円筒磁路はエアギャップに単極磁界を発生させるために使用する。ロータの永久磁石は上側と下側で90°ずらして配置し、エアギャップに2極の回転磁界、4極の回転磁界、単極磁界を発生させることでロータの姿勢とモータトルクの制御を行う。

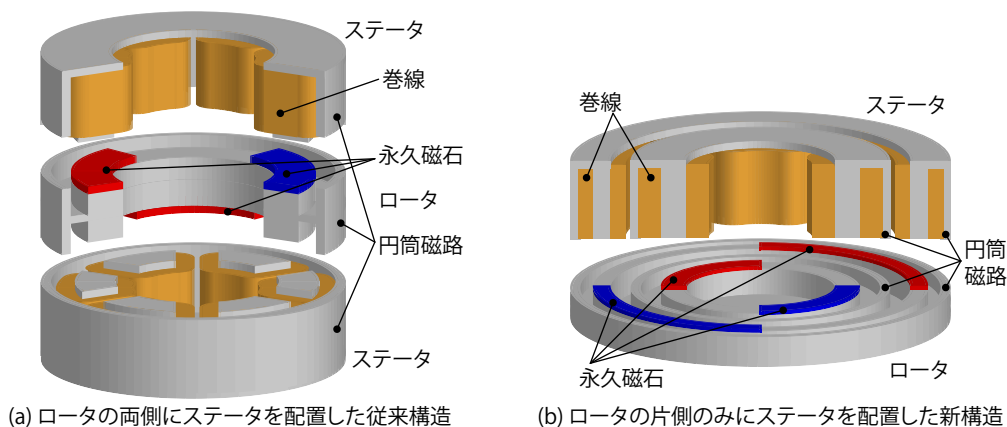


図2 提案するアキシヤルセルフベアリングモータの構造

本研究課題では、図2(a)の構造のモータの高性能化のため、モータ制御システムとモータ構造の見直しを行い、より低振動での浮上回転の実現とさらなる高回転を目指す。そして図2(b)のよ

うにロータの片側のみにステータを配置した構造での浮上回転制御が実現出来ることを磁場解析と試験機を用いた実験により明らかにする。そしてモータのラジアル方向の軸受力の発生原理を磁界解析により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ロータの両側にステータを配置した構造の性能改善

図3に原理確認に使用したロータの両側にステータを配置した構造の実験装置を示す。この装置により単極磁界を用いることによりラジアル方向力と傾きトルクの発生を確認することができたが、ロータの軸長が長く高速回転が実現できなかった。そこで図4に示すような装置を製作した。図4では、ロータのシャフトを取り除き、ロータの形状を円筒型にした。そしてラジアル方向の変位センサの取り付け位置をロータの上下端から中央部へと移動させ、アキシャル方向の変位センサを下側ステータの中央部に埋め込む構造とした。これによりロータやステータの構造を単純化するとともに、ロータ軽量化、高剛性化を行った。

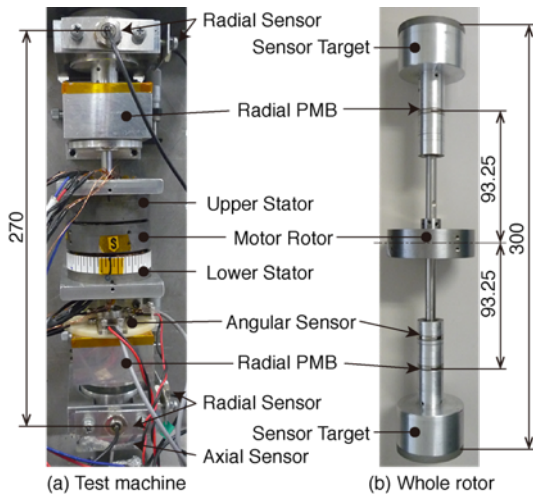


図3 従来の実験装置

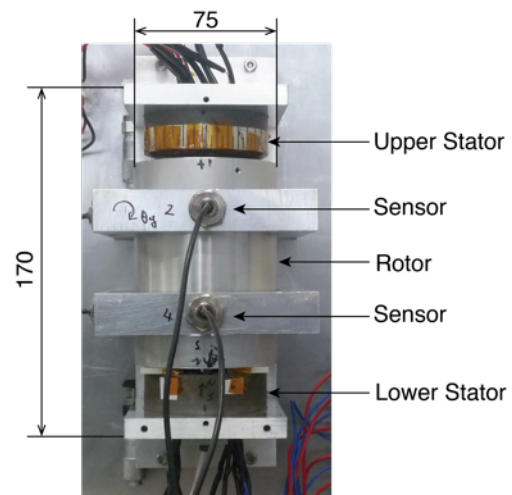


図4 改良した実験装置

(2) 片側ステータのみにステータを配置した構造のモータの設計と製作

片側のみステータを配置した構造によりラジアル方向の位置と傾きが制御可能か検証するため図5に示すような装置の設計・製作を行った。ロータは2極の永久磁石ロータを内側と外側の二重に配置する構造とし、内側と外側のそれぞれで一方向の制御を行う。ステータは磁場解析ソフトを用いて設計し、ラジアル方向力の変動を小さくするため8スロット構造としている。今後、制御システムの構築を行い、試験を行う予定である。

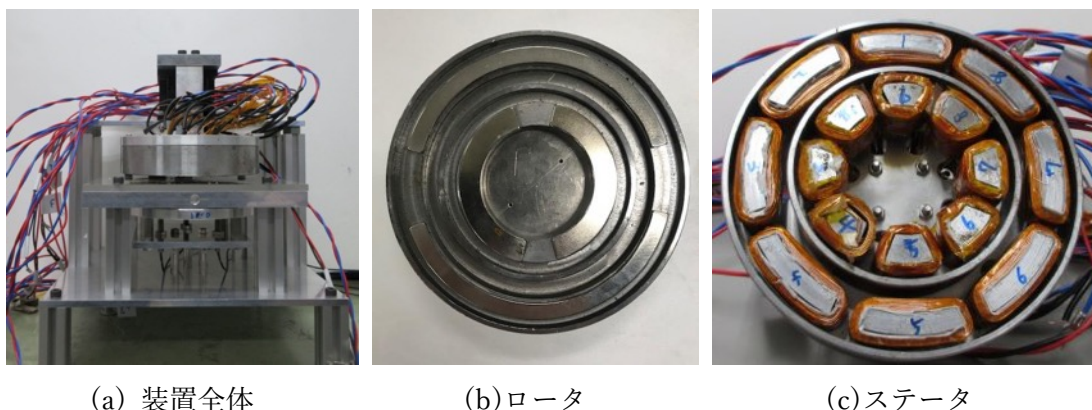


図5 片側のみステータを配置した構造の実験装置

(3) 軸受力の解析

ラジアル方向の軸受力を磁界解析により導出した。従来の解析手法ではラジアル軸周りの傾きトルクの導出は行えていたが、ラジアル方向の力の導出が行えていなかった。そこで軸受力とモーメントの算出方法をローレンツ力から求める方法に変更して理論解析を行った。解析ではステータスロット、磁気飽和、漏れ磁束の影響を無視し、ステータはカレントシートで近似し正弦波状の電流分布を仮定した。

4. 研究成果

実験装置と制御装置の改良により、外乱に対する安定性が向上し、従来よりも短い時間で振動を低減させることに成功した。しかし上側ステータと下側ステータで制御特性が異なる結果となり、特に上側ステータではラジアル方向と傾き方向に干渉が生じる結果となった。これはモータの構造を変えたことにより、軸受力の発生位置とロータの重心位置の関係が変化し、電流に対する制御力のゲインが上側と下側で異なってしまったためである。そして上側ステータの干渉のため回転数を高回転まで上げることが出来なかった。この問題はロータの重心位置の見直しによって改善できると考えている。

またラジアル方向の軸受力を理論的に導き、軸受力特性を明らかにした。そして2極永久磁石ロータと4極および単極磁界の組み合わせだけでなく、4極永久磁石ロータと2極および6極磁界などのロータの磁極数±2局磁界の組み合わせで二方向のラジアル方向力と傾きトルクの制御が可能であることを示した。実験的な検証を行う必要があるが、この構造では円筒型の磁気回路や2重構造とする必要がないため、より簡単な構造で5軸能動位置制御が実現できる。

本研究では、小型で簡単な構造で5軸の能動位置制御が可能なセルフベアリングモータを提案し、実験により実現可能であることを示した。また提案する手法でロータの片側のみにステータを配置した構造でも5軸能動制御が可能であることを示し、さらに多極ロータに対してより簡単な構造で5軸能動制御が可能であることを示した。本研究で得られた成果を活用することにより、小型で低価格の浮上モータが実現でき、人工心臓や真空ポンプなどの低価格化、高性能化が期待できる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- (1) 井上諒, 上野哲, 姜長安, 片面のみにステータを配置した5軸能動制御型アキシヤルセルフベアリングモータの開発, 日本機械学会関西学生会 2018年度学生員卒業研究発表講演会, 2019.
- (2) 間々田和也, 上野哲, 姜長安, 単極磁界を用いた5軸能動位置制御型アキシヤルセルフベアリングモータの開発, 日本機械学会関西学生会 2018年度学生員卒業研究発表講演会, 2019.
- (3) 上野哲, 根本一輝, 姜長安, 5軸能動位置制御型アキシヤルセルフベアリングモータの回転試験, 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2018.
- (4) 上野哲, 姜長安, ±2極磁界に組み合わせによるアキシヤルセルフベアリングモータのラジアル運動制御, 第26回MAGDAコンファレンス in 金沢, 2017.
- (5) Satoshi Ueno, Junichi Mameda, Changan Jiang, Analysis and Control of Radial Force and Tilt Moment for an Axial-Gap Self-Bearing Motor, IEEE, International Electric Machines & Drives Conference, 2017.

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。