

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630024

研究課題名(和文)5軸能動制御式ベアリングレスモータを搭載した超精密・高性能加工機の研究開発

研究課題名(英文)Development of a High-Precision Milling Machine Using a Five-DOF Controlled Bearingless Motor

研究代表者

朝間 淳一 (Asama, Junichi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70447522

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)：本研究では、マイクロエンドミル加工に適用可能な超高速・超精密5自由度制御形磁気浮上モータの実現を目指している。しかし、モータの電磁外乱力が、磁気軸受の位置決め精度に悪影響を及ぼす。そこで、表面磁石形モータにおいて、1スロットに主・補助の2種類の巻線を施し、その巻数比を0.37とする巻線構造を提案した。提案巻線構造により、トルク脈動の主原因である回転数の6倍周波数成分を零にできることを理論式により示し、有限要素解析によりその有効性を示した。テスト機を用いたトルク測定試験の結果、平均値に対して6倍周波数成分が0.25%と十分小さい値であった。

研究成果の概要(英文)：We focus on a five-degrees-of-freedom controlled magnetically suspended motor that has high-precision positioning and high-speed operation for a micro-end milling machine application. The electromagnetic disturbance, however, induced by the motor drive has influence on the positioning accuracy of the magnetic suspension. As a first step of this study, torque ripple reduction of the motor is investigated. We propose the unique winding arrangement for a 2-pole/12-slot permanent magnet motor to minimize torque ripple. The proposed model has primary (a turns) and secondary (b turns) windings in one slot. We theoretically demonstrate that the primary 6th harmonic component of the torque ripple is minimized when the winding ratio is  $b/a=0.37$ . We built a test motor. The measured torque ripple of the 6th harmonic component is significantly decreased to 0.25 % of the average torque.

研究分野：精密機械システム

キーワード：ベアリングレスモータ 磁気軸受 磁気浮上 永久磁石モータ トルク脈動

### 1. 研究開始当初の背景

光学部品の金型加工，生化学分析用基板の流路加工などの超微細加工において，リソグラフィ・レーザ加工と比べ生産性・コストの点で優位なマイクロエンドミル加工が脚光を浴びている．既存のエアタービン駆動方式の問題点として，エアタービンによりスピンドルを回転させる場合，切削時の切削力による回転数の低下，高速で回転する刃の回転振れ，切削時の不均一な切削力等が原因で加工精度が低い，という点が挙げられる．さらに，低速回転で低トルクのため使用回転領域が制限され，大容量コンプレッサ必要でシステムが大形化する．

エンドミルの剛性が低いことに起因する問題点として，刃先と切削材の相対位置検出の際に，測定力により工具が破損することがある．このため，CCDカメラ等で検出する方式が実用化されているが，装置が大形化・高コスト化する．また，工具変位と振動が原因で加工精度が低下する．この加工現象を解明するために動的切削力を測定する研究が行われているが，機上ではなく，別途実験装置を用意するため現実的ではない．

### 2. 研究の目的

上記問題点解決のため，回転主軸を磁気力により非接触で支持する磁気浮上ベアリングレスモータ技術をマイクロエンドミルに応用すれば，モータによる可変速トルク制御と5軸超精密位置決め制御によりエアタービンでの問題を解決し，また，5軸制御電流から刃に作用する切削力をリアルタイムかつ超精密に機上測定できるため工具破損問題を解決できる．

本研究では，超精密5軸能動制御式磁気浮上ベアリングレスモータを設計・製作し，提案手法の有用性を明らかにし，実際に加工実験を行い，切削力をリアルタイム測定・制御することで，動的切削過程・加工現象を明らかにする．まずは，5万rpmで位置決め精度1 $\mu$ m以下を目指す．

### 3. 研究の方法

#### (1)高速化

磁気浮上技術を用いた回転主軸の非接触支持により軸受の高速化を図る．回転主軸の非接触支持方法には，磁気軸受とベアリングレスモータを用いる方法が挙げられる．磁気軸受は磁気力で回転主軸を非接触支持する機械要素であり，回転には別途モータを要する(図1)．一方，ベアリングレスモータは，固定子に浮上・回転用の2種類の巻線を施す，あるいは1種類の巻線に2種類の電流を重畳することで磁気支持・回転機能を一体化したモータ(図2)である．

ベアリングレスモータは，学術的には磁気軸受と区別され，磁気軸受と比較して軸長が短く，したがって，曲げ共振の周波数が高いため，最大回転数が磁気軸受よりも大きい．

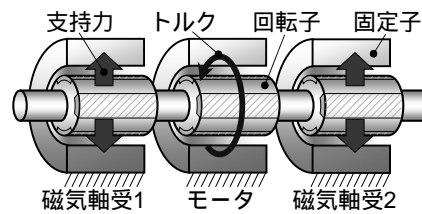


図1 磁気軸受とモータ

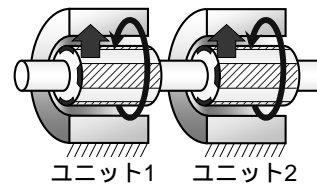


図2 ベアリングレスモータ

しかし，磁気支持とモータの磁気回路を兼用しているため，磁気支持電流がトルク発生に，またモータ電流が磁気支持力に相互に干渉する恐れがある．

#### (2)電動化

エアタービン駆動方式と比較して，モータ駆動は静音でかつ正確な速度・トルク制御が可能のため，切削力により刃の回転数が低下せず，均一な切削力が得られる．また，回転領域が大幅に拡張され，さらに大容量コンプレッサが不要である．ただ，回転角度位置によりトルクが変動(トルク脈動)すると，磁気支持系への電磁外乱力となり，位置決め精度に悪影響を及ぼす．このため，本研究では，トルク脈動が極めて小さいモータ，特に高効率駆動が可能な表面貼付形永久磁石モータの適用を検討する．

#### (3)5軸能動位置決め制御

回転主軸の位置・姿勢を超精密に制御するので，刃の芯ぶれを抑制し，さらに，5軸制御電流から回転子に作用する力を高速かつリアルタイムに測定することで，加工精度を飛躍的に向上させる．また，5軸能動制御形のため，刃自体がタッチプローブとなり，刃と被削材の相対位置を簡便かつ安全に検出できる．切削力制御による加工精度の飛躍的な向上と動的加工過程の解明に貢献する．

### 4. 研究成果

#### (1)ベアリングレスモータの検討

まず，高速化に有利なベアリングレスモータについて検討を行った．高速回転と磁気浮上制御の容易さから，回転子が鉄のみで，かつ磁気軸受のように直流磁界で位置決め制御が可能なホモポーラ形ベアリングレスモータ(図3)を採用した．固定子側に配置した永久磁石のバイアス磁束により，突形状の回転子鉄心部は単極に着磁される．このバイアス磁束に，支持巻線からの2極磁界を重畳させ，磁気支持力を発生させる．分布巻を施

すことで、空間高調波を低減し、支持力脈動と支持力の方向誤差を低減した。

図4に、モータ電流の有無による磁気支持力の三次元有限要素法による計算結果を示す。モータ電流が無い場合、回転子が突形状にもかかわらず、ほぼ一定の支持力が発生可能であった。しかし、モータ電流を流した場合、モータ電流が支持力に干渉し、支持力脈動が発生した。この支持力脈動は精密位置決め制御に悪影響を及ぼす。したがって、ホモポーラ形ベアリングレスモータによる超精密位置決めには、さらなる改善が必要である。

## (2)磁気浮上モータの検討

磁気軸受は、モータと磁気回路が別のため、干渉の問題が解決できる。また、磁気軸受モータの場合、軸長が長く、曲げ共振の周波数が低くなるため、最大回転数がベアリングレスモータよりも小さくなる場合がある。この対策として、図5の構造を考案した。中心部が永久磁石モータ、両端が磁気軸受を配置する。磁気軸受回転子はラジアルとスラストを

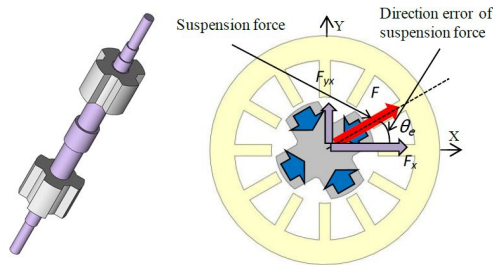


図3 ホモポーラ形ベアリングレスモータの回転子構造と磁気支持力

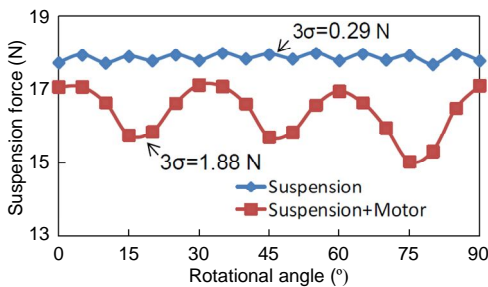


図4 ホモポーラ形ベアリングレスモータの磁気支持力の有限要素法計算結果

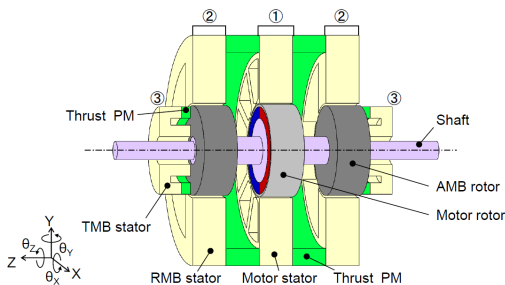


図5 提案する5軸制御形磁気浮上モータ構造

兼用している。さらに、センサターゲットも兼ねているため、軸長の短縮化が可能、すなわち高速化も可能である。

磁気浮上回転主軸の位置決め精度に影響を及ぼす要因の一つに、モータの電磁外乱力が挙げられる。この電磁外乱力の一つであるトルク脈動を低減する表面磁石形モータの設計を行った。まず、モータのトルク  $T$  は、以下の式で表せる。

$$T = k_1 \psi_a I + (k_5 + k_7) \psi_a I \cos 6\omega t$$

$k_1, k_5, k_7$  は起磁力分布の基本波成分、および第5次、第7次高調波成分である。 $\psi_a$  は、磁束鎖交数、 $I$  は電流である。第2項がトルク脈動である。 $\omega$  は回転角速度である。

本研究では、図6に示すように、各相の1スロットあたりの巻線比を変更する巻線構造を提案した。この巻線構造にて、発生する電磁トルクの脈動を極小にする巻線比を理論的に導出した。主巻線と補助巻線の巻数比  $M$  を  $M=b/a$  とすると、起磁力の振幅比  $A_5=k_5/k_1$ 、 $A_7=k_7/k_1$  は、

$$A_5 = \frac{k_5}{k_1} = -\frac{1-\sqrt{3}+2M}{5(1+\sqrt{3}+2M)}$$

$$A_7 = \frac{k_7}{k_1} = -\frac{1-\sqrt{3}+2M}{7(1+\sqrt{3}+2M)}$$

と表される。したがって、 $M=(\sqrt{3}-1)/2 \approx 0.37$  の時、 $A_5, A_7$  は零となる、すなわち、電磁トルク脈動成分を零にすることを理論的に示した。図7に、 $M=0$  の場合と、 $M=0.37$  の場合の、有限要素法によるトルクの計算結果を

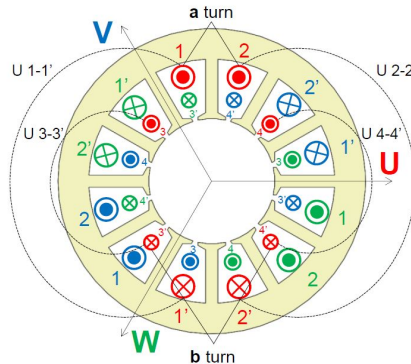


図6 提案するモータ巻線構造

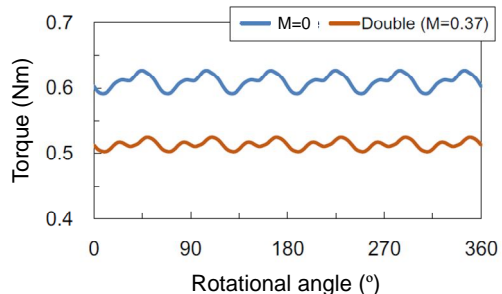


図7 トルクの有限要素計算結果

示す．トルクの平均値に対する脈動振幅 ( $3\sigma$ ) は, 33mNm から 19mNm と 42% 低減した．しかし, まだコギングトルクに起因するトルク脈動が観察される．そこで, コギングトルクを低減するために磁石スキューの検討を行った．永久磁石に 3 段階スキューを施すことで, 最終的に, トルク脈動を 0.7% まで低減可能であることを有限要素電磁界解析により示した．

次いで, 提案する巻線構造を固定子に適用し, かつ, 3 段階磁石スキューを回転子に施した高速モータを試作した．図 8 に, 試作したモータを示す．回転子直径は 40mm, 固定子高さは 15mm, 永久磁石表面から固定子鉄心表面までの距離は 1.5mm に決定した．

図 9 に, 測定した誘起電圧とその FFT 結果を示す．測定波形は, 正弦波に近く, 高調波も十分に小さかった．トルク測定は, パルス幅変調駆動による高調波の影響を排除するため, リニアアンプを用いて三相正弦波電流をモータに供給し, 渦電流ブレーキとトルクメータを用いて, 出力トルク信号のスペクトル解析を行った．その結果, トルク定数は, 0.02Nm/A であり, モータ定格電流 25A で 0.5Nm が発生可能である．図 10 に, トルクの第 6 次高調波振幅を示す．巻線比  $M=0$  と比較して,  $M=0.37$  の場合, 第 6 次高調波振幅の係数は 0.05mNm/A であり, トルク脈動は, 0.25% と十分小さい値であった．

今後の予定は, 定格電流を流した場合のトルク試験, 本提案モータの磁気浮上モータへの適用, 超精密トルク制御のためのインバータ回路の検討と超高速回転の実現, 位置決め精度の評価, および加工機への適用と切削力のリアルタイムモニタリングを検討する．

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 3 件)

山本陽, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “表面磁石形モータの低トルク脈動化の検討”, 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, 5-011, 第 5 分冊, p. 20, 東北大学, 宮城県, 仙台市, 3 月 16-18 日, 2016.

山本陽, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “表面磁石形モータにおけるトルク脈動低減のための巻線構造検討”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 3-29, 大分大学, 大分県, 大分市, 9 月 2-4 日, 2015.

山本陽, 朝間淳一, 大岩孝彰, 千葉明, “分布巻ホモポラ形ベアリングレスモータにおける磁気支持力干渉・脈動の低減”, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Y-113, 東京電機大学, 東京都, 足立区, 8 月 26-28 日, 2014.

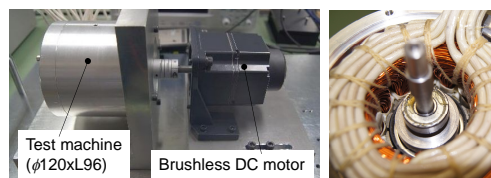


図 8 試作した表面貼付形永久磁石モータ

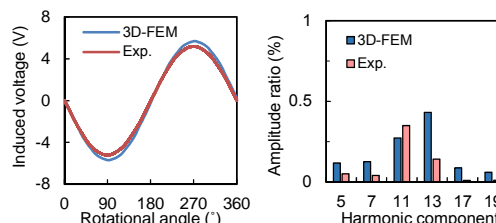


図 9 測定した誘起電圧と FFT 結果

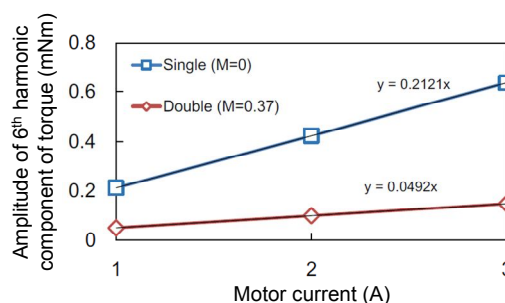


図 10 測定トルクの第 6 次高調波振幅

〔その他〕

静岡大学工学部機械工学科光電・精密コース  
朝間研究室ホームページ：  
<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tjasama/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝間 淳一 (ASAMA Junichi)  
静岡大学・工学部・准教授  
研究者番号：70447522