

5 軸制御型セルフベアリングモータの開発

Development of 5-DOF Self-Bearing Motor

07NM404T 石川 達也

指導教員：増澤 徹 教授

1. 緒言

磁気軸受は、ロータを非接触で支持できるため、より高速な回転が可能となる。また、潤滑油を使用しないため、高温、低温、真空中、クリーンルーム内などの特殊環境下での使用が可能であり様々な分野への応用が試みられている。しかしながら、磁気軸受には装置の大型化という欠点がある。

本研究では、磁気軸受システムのさらなる小型化と高剛性化のためにロータの x, y, z 方向位置および θ_x, θ_y の5軸を能動的に制御する5軸制御型セルフベアリングモータの提案、開発、評価をおこなう。

2. 方法

2.1 構造

図1に5軸制御型セルフベアリングモータの構造を示す。ステータの突極数は12本で、それぞれに傾き制御コイル、軸方向位置制御コイル、径方向位置制御コイル、モータコイルの4種類の巻線が巻かれている。図2にロータ側面にも永久磁石を設置した側面永久磁石併用型ロータと突極がロータの横に突き出たオーバーハング型ステータを示す。これによって高い軸方向力と傾き制御トルクが得られる。

2.2 原理

図3(a)はロータの電気角が $\omega t=0$ の時の軸方向力発生原理を表しており、図3(b)は回転中の軸方向力発生原理を示している。軸方向位置制御コイルに電流を流すことによって、磁束の強めあいと弱めあいから軸方向力が発生する。軸方向位置制御コイルは向かい合う突極で同相に結線されているため、ロータの上下で発生する力の向きが同じである。ロータの回転角度に同期させてステータの3相4極の軸方向位置制御磁界を回転させることによって回転角度に依存しない軸方向力を発生する。

図4(a)はロータの電気角が $\omega t=0$ の時の傾き制御トルク発生原理を表しており、図4(b)は回転中の傾き制御トルク発生原理を示している。傾き制御コイルは向かい合う突極で逆相に結線されているため、傾き制御電流を流すと、ロータの上下では互いに逆向きの力が発生する。このため、ロータには傾き制御トルクが発生する。ステータには2相6極の回転磁界を発生させることによってロータの回転角度に依存しない傾き制御トルクが発生する。傾き制御の+z側のステータの極配置は径方向位置制御でのステータの極配置と等しい。

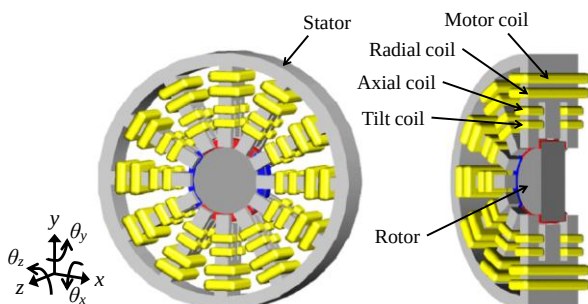


Fig. 1 Structure of 5-DOF self-bearing motor

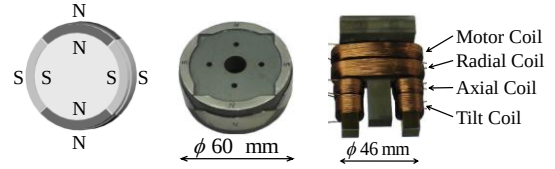
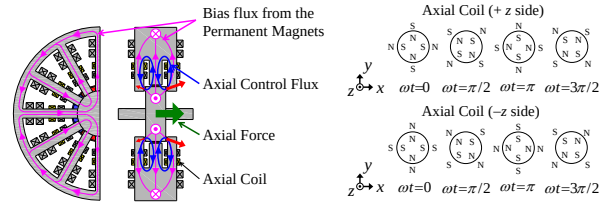
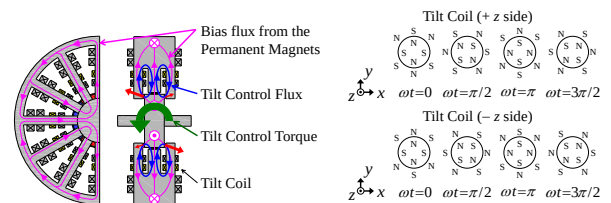


Fig. 2 Rotor and stator



(a) Regulation principle (b) Control with rotation

Fig. 3 Principle of axial position control



(a) Regulation principle (b) Control with rotation

Fig. 4 Principle of tilt control

2.3 実験方法

図5に5軸制御型セルフベアリングモータの寸法を示す。寸法は有限要素法による3次元磁場解析によって決定した。ロータとステータ間のエアギャップは径方向と軸方向ともに1 mm、永久磁石の厚みは全て1 mm、径方向位置制御コイルとモータコイルの巻数は150 turns、軸方向位置制御コイルと傾き制御コイルの巻数は100 turnsとなっている。

図6に実験装置の概略図と写真を示す。モータ特性の測定はボールベアリングによって自由度を θ_z 方向に制限して行った。軸方向位置制御特性の実験はボールプッシュによって自由度を θ_z 方向と z 方向に制限して行った。径方向位置制御特性の実験には十分に長いシャフトを使用して自由度を x, y, z 方向と θ_z 方向に制限した。傾き制御トルクの実験では θ_x 方向以外の自由度を制御することによって自由度を θ_x 方向のみに制限した。浮上回転実験では $x, y, z, \theta_x, \theta_y$ 方向を制御してインパルス応答、周波数応答、消費電力、最大振動振幅を測定した。

3. 結果

図7にモータトルクの測定結果を示す。ロータをボールベアリングで接触支持した場合、逆起電力の影響を受けているが2000 rpmまで回転させることができた。トルク定数は280 mN·m/Aであり、有限要素法による数値解析値の120%の静トルクが得られた。

図8に軸方向力を示す。力係数が15 N/Aであり、数値解析値の55%の軸方向力が得られた。ロータが0.15 mm変位した場合でも制御できることがわかる。

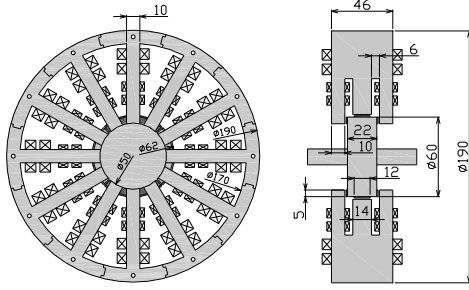


Fig. 5 Dimensions of 5-DOF self-bearing motor

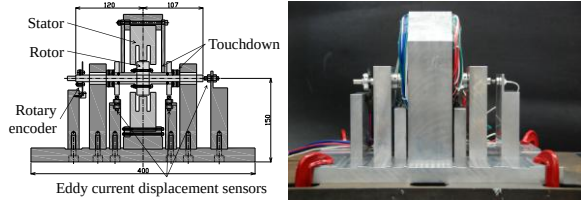


Fig. 6 Experimental setup

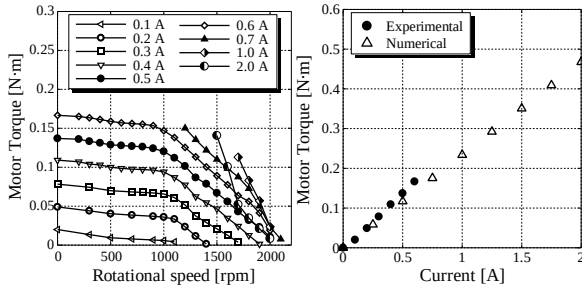


Fig. 7 Motor torque

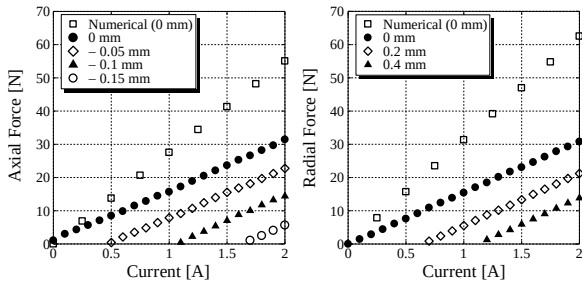


Fig. 8 Axial force

Fig. 9 Radial force

図9に径方向力を示す。力係数が15 N/Aであり、数値解析値の50%の径方向力が得られた。ロータが0.4 mm変位した場合でも制御できることがわかる。

図10に傾き制御トルクを示す。トルク定数が220 mN·m/Aであり、数値解析値の95%の傾き制御トルクが得られた。

図11から図14では5軸制御を行うことによってロータを非接触で浮上させた場合の特性を示す。図11にインパルス応答を示す。整定時間が0.02 secであり、速応性が高いことがわかる。また、他の自由度への影響が見られないため、独立して制御がおこなわれていることが確認できる。

図12に周波数応答を示す。共振点での振幅が十分に抑えられており、また周波数帯域が十分に広いため良好な特性を示した。x, y, z方向共にほぼ一致した特性が得られたが、x, y, z方向の-3 dBの周波数帯域が約220 Hzであるのに対して、 θ_x 方向の周波数帯域は約86 Hzと狭かった。図13に浮上回転中の消費電力を示す。回転数に対して比較的大きな消費電力を示した。これは、5軸をアクティブに制御しているからであると考えられる。

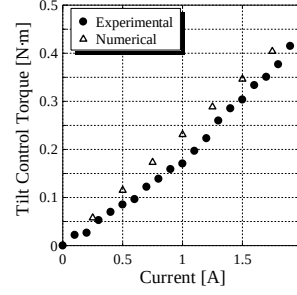


Fig. 10 Tilt control torque

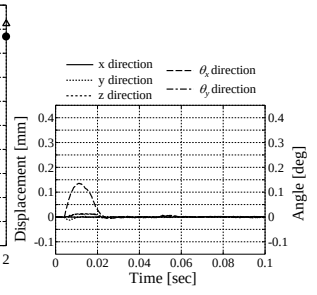


Fig. 11 Impulse response

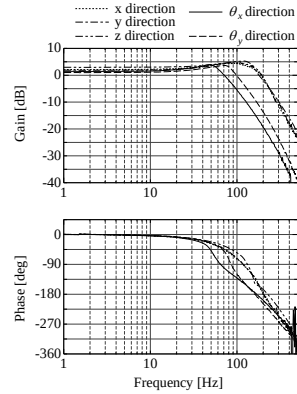


Fig. 12 Frequency response

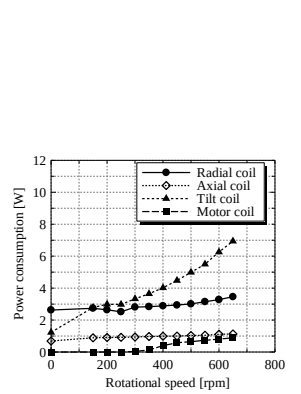


Fig. 13 Power consumption

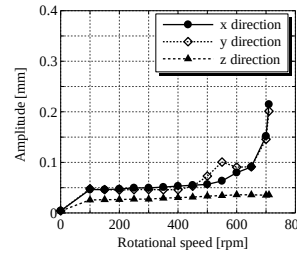


Fig. 14 Maximum oscillation amplitude

えられる。特に傾き制御コイルでの消費電力は回転数の増加に合わせて急激に増加している。

図14に浮上回転中の最大振動振幅を示す。700 rpmまで浮上回転可能であることが確認された。5自由度とも500 rpmまでは安定している。傾き角度の最大振動振幅が緩やかに増加するのに対して、径方向位置の最大振動振幅は500 rpm以降で急激に増加している。

4. 考察

θ_x 方向の周波数帯域が狭いのはシャフトが長いためであると考えられる。消費電力はPWMアンプを使用することで軽減できると考える。ロータの最大振動振幅の悪化の原因は逆起電力のために径方向位置制御コイルに十分な電流が流れなくなるためであると考えられる。電源電圧を高くすることで高速回転が実現できると考えられる。

5. 結言

5軸を一つのステータコア内で能動的に制御することで小型化と高剛性化が同時に達成可能な5軸制御型セルフベアリングモータを開発した。実験を行い700 rpmまでの回転数で浮上回転に成功した。また十分な特性が得られることを確認した。500 rpm以降で径方向位置の最大振動振幅が増加してしまうのは逆起電力の影響を受けて径方向位置制御コイルに電流が流れなくなっているためであると考えられる。電源電圧を高くすることで高速回転が実現できると考えられる。