

ローレンツ力を用いた磁気浮上モータの回転子挙動の安定化

Stabilization of rotor behavior of magnetic levitation motor using Lorentz force

知能機械工学コース

機械・航空システム制御研究室 1245023 藤井 佑貴

1. 緒言

物体を非接触で支持することが可能な磁気浮上機構は、半導体の製造工場をはじめとしたクリーンルームや真空中などの環境での使用に適しているため、磁気軸受けや磁気浮上搬送装置などの製品に利用されている。磁気浮上の方式は電磁石の吸引力や永久磁石の磁性を利用したものなどがあり、先述した製品はこれらの方式を主に採用している^(1,2)。しかし、それらの磁気浮上機構は線形化による制御を行うため、可制御域が狭いという問題がある。

それに対し、線形制御領域を広げるため、ローレンツ力を用いた磁気浮上機構の一例として磁気浮上モータが提案されている^(3,4,5)。提案した磁気浮上モータは回転子の浮上位置制御と駆動制御を実現することを成功させたが駆動制御時に回転子に発生する水平方向の振動や回転の角速度を変化させることができないという問題点がある。これらの問題を解決するため、浮上位置制御方法の変更を提案し、それに合わせた非接触給電機構の設計、製作、新たな浮上位置制御方法を採用した磁気浮上モータの駆動実験を行った。

2. 磁気浮上モータ

2.1 磁気浮上モータの概要

図1に機構のモデル図を示す。本機構は回転子に巻かれたコイルに流れる電流と周囲に配置された永久磁石と電磁石の磁界との間に発生するローレンツ力を利用することで回転子の浮上と回転を可能にしている。動作の仕組みは、非接触給電により完全非接触で回転子コイルに電流を供給する。このコイルに流れる電流と永久磁石の磁界の間に発生する鉛直方向のローレンツ力が回転子にかかる重力とつり合う位置で浮上する。回転子の浮上位置を制御する場合は回転子の周囲に配置された電磁石に流す電流を制御することで、回転子コイルと電磁石の磁界の間に発生するローレンツ力を調整し安定させる。浮上位置の制御に用いる電磁石は鉛直位置制御用と水平位置制御用の2種類がある。駆動制御時は水平位置制御用電磁石に水平位置の制御に用いる電流に加えて、駆動制御に用いる指令電流を印加する。

試作した磁気浮上モータを図2に示す。本機構はC型の永久磁石6個(図中の1)、鉛直位置制御用電磁石3個(図中の2)、水平位置・駆動制御用電磁石6個(図中の3)、透過型レーザセンサ3個(図中の4)、PSDモジュール1個(図中の5)、反射型フォトセンサ3個(図中の6)、非接触給電機構(図中の7)、によって構成される、このとき非接触給電機構はPSDモジュールの上に搭載される。図3にモータの回転子を示す。回転子は6個の樹脂部品により構成され、ボビンの下部と上部にコイルを巻き付けている。下部のコイルは鉛直位置制御に上部のコイルは水平位置・駆動制御に用いる。図4に非接触給電機構を示す。非接触給電機構は樹脂部品のボビンにリッツ線をスパイダー巻きしたコイルが受電側と送電側の2つに分かれており、各ボビンは後述する新たな浮上位置制御方

法に対応させるため中央に穴を設けている。2つの回路は共にコンデンサが組み込まれており、受電側回路には交流電流を直流電流に変換するダイオードブリッジが組み込まれている。非接触給電の方式には送電距離に優れる磁界共鳴方式を採用している。この方式は送電回路に特定の周波数の交流電流を流すことで発生する磁場の振動が受電回路に伝わることで給電が行われる。この機構は共振点10[kHz]の交流電流が流れるとき給電が可能となっている。各回路のコイルのインダクタンス、コンデンサ容量を表1に示す。送電側回路の諸元は周囲に磁性体を配置しない場合と機構に搭載した場合の2通りを示している。コンデンサ容量の値は共振点とコイルのインダクタンスから式(1)により求めた。

表1より送電側コイルのインダクタンスの値が回路単独の場合とモータに搭載した場合で値が変化していることが分かる。これはPSDモジュールを構成する金属部品と送電側コイルの距離が近くなったことが原因と考える。

また、各回路のインピーダンスの周波数特性を調べた。測定結果を図5に示す、各回路のインピーダンスが最小となる周波数が共振点である。図5より、送電側、受電側回路単独での最小のインピーダンスはそれぞれ周波数10.3[kHz]で0.742[Ω]、10.1[kHz]で0.660[Ω]となっている。また、送電側、受電側コイルを重ね合わせた場合での送電側回路のインピーダンスは、周波数10.5[kHz]で0.750[Ω]が最小となっている。これは各コイル間の距離が近くなった影響と考える。

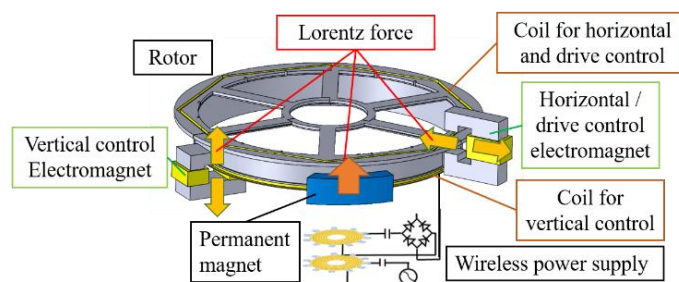


Fig.1 Model diagram of the mechanism

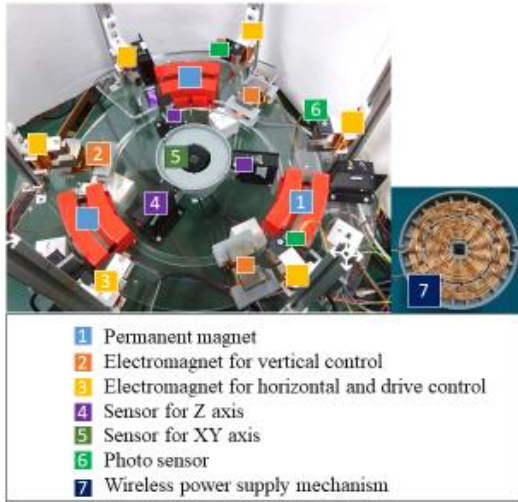


Fig.2 Magnetic levitation motor

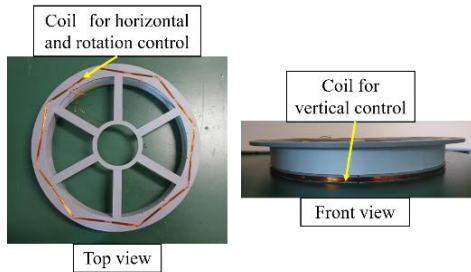


Fig.3 Rotor

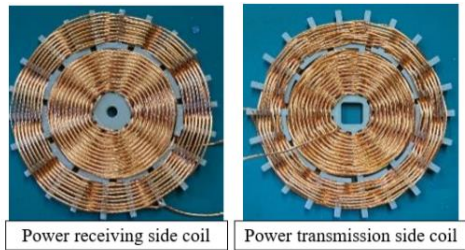


Fig.4 Wireless power supply mechanism

Table.1 Circuit introduction

| | Coil inductance [μH] | Capacitor capacity [μF] |
|--|--------------------------------|-----------------------------------|
| Power receiving apparatus | 166.9 | 1.52 |
| Power transmission apparatus | 173.7 | 1.46 |
| Power transmission apparatus (When incorporating) | 151.4 | 1.67 |

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Table.2 Each variable

| | |
|---------------------|---|
| Resonance frequency | f |
| Coil inductance | L |
| Capacitor capacity | C |

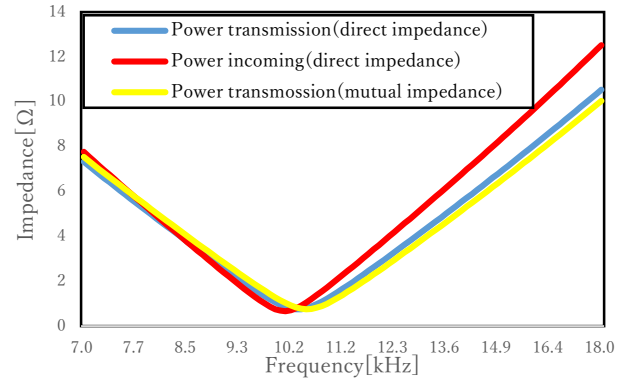


Fig.5 Frequency characteristic

2.2 制御方法

回転子の鉛直位置制御は回転子下部のコイルと鉛直位置制御用電磁石との間に発生する鉛直方向のローレンツ力を調節することにより行う。

水平位置・駆動制御は回転子上部のコイルと水平位置・駆動制御用電磁石との間に発生するローレンツ力を調節することにより行う。駆動制御を行う場合は、図7のように向かい合う電磁石で同じ方向に磁界を発生させることで生じるローレンツ力の周方向の成分を回転に用いる。水平位置制御を行う場合は、向かい合う電磁石で異なる方向に磁界を発生させることで生じるローレンツ力の半径方向の成分を制御に用いる。このとき Y 軸方向の位置は軸上に配置された 2 つの電磁石、X 軸方向の位置はそのほか 4 つの電磁石に流す電流を調節することで制御を行う。

電磁石で発生させる磁界の向きは電磁石に取り付けた色の明暗を識別する反射型フォトセンサを用い、図7中下側のように回転子のコイルの部分に設けた白黒のパターンを読み取ることによって回転子の角度ごとの指令電流を決定している。この制御方法は電磁石の磁束密度を白の場合と黒の場合 2 通りでしか制御しておらず、発生するローレンツ力の細かな調節を行っていないため、モータの回転速度を細かに制御することができない。

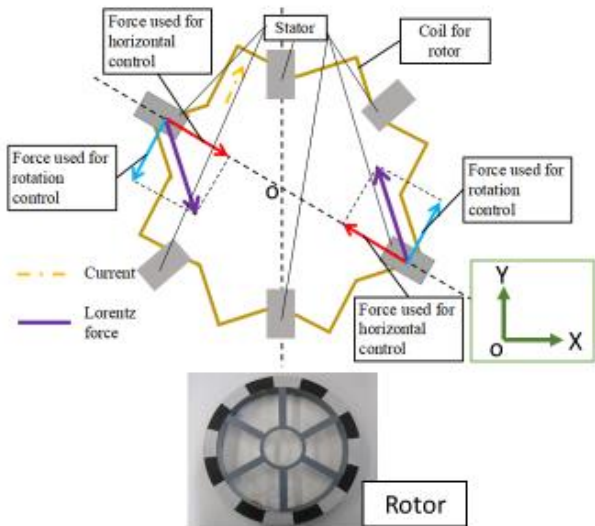


Fig.7 Horizontal and drive control method

2.3 従来の測定方法

水平位置は反射型レーザセンサを回転子側面に投射する水平位置を測定している。この水平方向は、回転子側面の表面粗さや回転子を構成する部品のつなぎ目の影響を受けやすく、駆動時に回転子の振動が発生する問題があり、回転子の浮上位置が機構の中心位置から大きく外れることでモータの駆動が止まってしまう恐れがある。



Fig.8 Measurement method

3. 測定方法の変更

図9に新たな水平位置の測定方法を示す。この方法は、PSDモジュール C-10443-02 を用いて回転子の中心位置を測定する。PSDモジュールは、センサ受光部に投射された赤外線光の重心位置を測定する装置である。測定方法としては、回転子中央に直径3[mm]の穴を設け、赤外線光を穴越しにPSDモジュール受光部に投射することで回転子の中心の座標を測定する。この方法は、回転子側面の粗さに測定値が左右されないという利点がある。この方法は機構の中心位置に赤外線光を投射するため、光線を妨げぬよう、給電装置のコイルのボビンに穴を設けた。

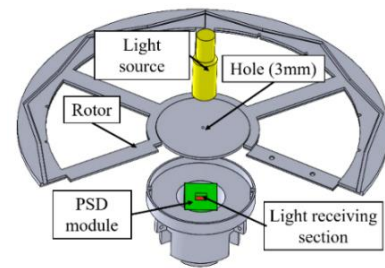


Fig.9 New horizontal measurement

4. 回転浮上実験

新たに提案した測定方法を用いた磁気浮上モータで回転浮上実験を行った。まず、制御する目標値に対する回転子の水平位置の変化を確認するため、回転子の浮上位置制御実験を行った。鉛直方向の目標値4.5[mm]、水平位置が機構の中心位置である目標値0[mm]に収束した状態から実験を開始し、開始後約7秒からX軸方向の目標値を7秒間隔で1[mm]、2[mm]、1[mm]、0[mm]と変化した。実験結果を図10に示す。図10よりX軸方向の目標値の変化に対し、実測値が追従しており、測定方法の変更による水平位置制御への悪影響がないことが確認することができた。

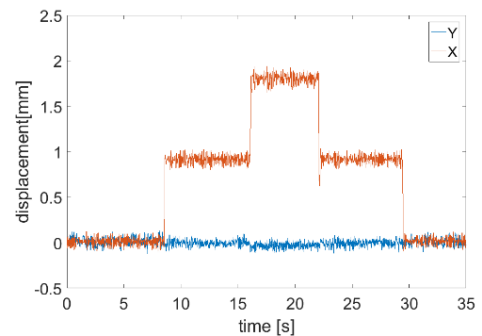


Fig.10 Result of levitation control experiment

次に駆動制御時のモータ回転子の挙動の変化を確認するため、駆動実験を行った。鉛直位置の目標値4.5[mm]、水平位置が機構の中心位置である目標値0[mm]に収束した状態から実験を開始し、開始後約7秒後から駆動制御を開始し、約20秒から回転子が回転した。実験中の回転子の水平位置の変位を図11に示す。回転子の水平位置は駆動制御開始までの間、目標値近傍で浮上していたが、駆動制御開始後は測定方法を変更した場合でも振幅約1.0[mm]程の振動が発生しており、目標値からの誤差が大きくなっていることが分かる。測定方法を変更した場合でも回転子の横ぶれが生じた理由としては、モータ回転子の回転速度と水平位置制御の制御速度の同期ができておらず、モータ回転角速度に対して水平制御速度が遅れているからだと考えられる。この問題を解決するためには、制御パラメータの調整やモータ回転子の角速度を測定するシステムの設計、回転子の回転角ごとに印加電流を制御することのできる駆動制御方法を開発する必要があると考える。

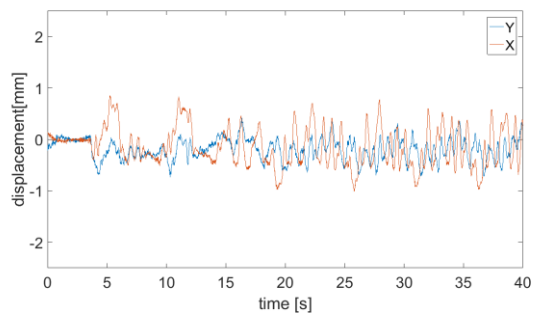


Fig.11 Result of driving control experiment

5. 結言

回転子の挙動を安定化させるため、水平位置測定方法の変更を提案、新機構の製作を行い、浮上回転実験を行うことで浮上位置制御、駆動制御時の回転子の挙動を確認した。今後はモータ角速度を測定するシステムの構築、駆動制御の変更による問題点の改善を行う。

文献

- (1) 一般社団法人電気学会磁気浮上技術調査専門委員会，磁気浮上と磁気軸受，コロナ社，1993.
- (2) 一般社団法人電気学会磁気浮上技術調査専門委員会，磁気浮上技術の原理と応用，科学情報出版，2018.
- (3) 小栗佑斗，岡宏一，原田明德，共鳴型非接触給電を用いた MC 型磁気浮上システム-回転制御機構の開発-，中国四国支部総会・講演会講演論文集，Vol.57,No.909,2019.
- (4) 梶澤勇亮，岡宏一，原田明德，藤井佑貴，共鳴型非接触給電を用いた MC 型磁気浮上モータの開発，中国四国支部総会・講演会講演論文集，Vol.58,No.09b4,2020.
- (5) 岡田養二，三好理文，増澤徹，榎園正人，小型磁気浮上モータのサーボモータ制御，日本 AEM 学会誌，Vol.20,Vo.1,pp.40-46,2012.