

# 共鳴型非接触給電を用いた MC 型磁気浮上モータの開発

## Noncontact MC type rotary motor using Lorentz Force and Wireless power supply

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1225011 梶澤 勇亮

### 1. 緒言

磁気浮上システムは、非接触で物体を支持できる機構であり、摩擦、潤滑、塵埃などの問題を解決できる。主に磁気浮上式列車、真空中やクリーンルームなどの特殊環境でよく利用されている。磁気浮上には永久磁石の磁性や、電磁石の吸引力を利用したものなど様々な形式がある。しかし、一般的な電磁石の吸引力や永久磁石などの反発力を用いた機構は、つり合いの位置近傍での浮上制御のため、非線形性が強く、制御可能な範囲が狭くなる問題がある。

本研究ではローレンツ力を用いた磁気浮上システムを提案し、この問題を解決するものとする。ローレンツ力は、線形として考えられる範囲が広く、制御範囲を広げることができる。浮上体本体の軽量化にあたり、MC 型の浮上機構を用いると、力の発生のために浮上体に電流を流すことが必要である。従って、非接触給電と組み合わせた新たな磁気浮上システムを開発している。

現在までに非接触給電を用いて、鉛直方向、水平方向、回転方向を合わせた浮上制御を実現している。今回の発表では、機構全体の簡素化を図った。以下では、回転制御機構の構成と、その制御方法を示す。

### 2. 回転制御機構の概要

製作した回転制御機構の全体を図 1、浮上体を図 2、給電装置を図 3 に示す。図 1 のように、本機構の構成要素として、C 型の永久磁石を 6 個 (図 1 の 4)、鉛直制御用の電磁石を 3 個 (図 1 の 2)、水平・回転制御用の電磁石を 6 個 (図 1 の 3)、透過型レーザーセンサを 3 個 (図 1 の 5)、反射型レーザーセンサを 2 個 (図 1 の 6)、非接触給電機構 (図 1 の 1) で構成されている。また、図 2 の浮上体は 3D プリンタで製作したボビンにコイルを巻きつけている。コイルは浮上体下部の鉛直制御用と、浮上体上面に水平・回転制御用のコイルに分かれている。非接触給電機構部は図 3 のように、3D プリンタで製作したボビンに、リッツ線をスパイダー巻で巻き付けており、送電側と受電側に分かれている。回路にはこのコイルに加え、コンデンサ、ダイオードが含まれる。この回路の共振点は 10[KH]である。

機構の仕組みとして、まず非接触給電の受電部で電力供給を行い、整流回路で直流電流に変換し、浮上体のコイル(以下、浮上コイルと呼ぶ)に電流を流す。浮上コイルの両側には永久磁石と電磁石を配置することで、浮上コイルに流れる電流と磁石の間にはローレンツ力が発生し、重力とつりあわせることで浮上が可能となる。また、電磁石の電流を制御することでその間に働くローレンツ力を調節し、浮上体の浮上位置を安定化させ、上部の電磁石で回転方向のローレンツ力を働かせ、回転させるものとする。

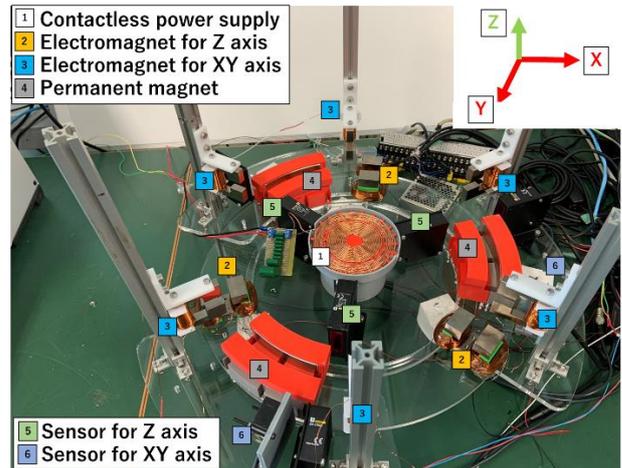


Fig.1 magnetic levitation mechanism

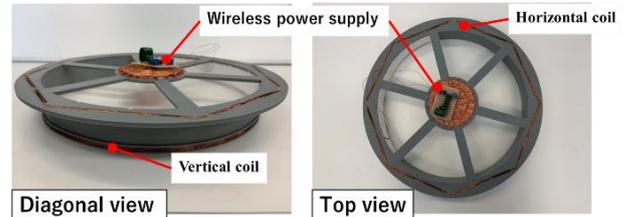


Fig.2 Levitation coil

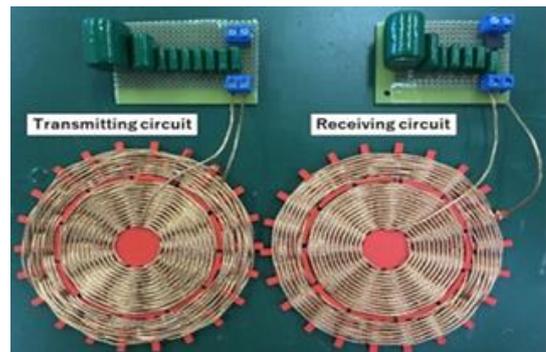


Fig.3 Wireless power supply

### 3. 制御方法

#### 3.1 電磁石

永久磁石間では、ローレンツ力は常に鉛直方向に働くため、浮上コイルの重力とローレンツ力が釣りあう位置でコイルの浮上位置が安定する。しかし、永久磁石の浮上力と重力だけでは能動制御ができないため、図4に示す電磁石を用いて、鉛直方向と水平方向の安定化を行うものとする。また、回転方向用のコイルは半径方向に上下した形状にしている。これにより、紙面に向かって垂直に磁場を発生させることで、円周方向のローレンツ力を発生させ、回転制御を行う。

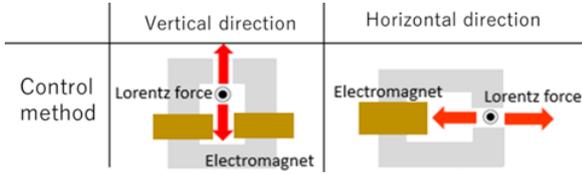


Fig.4 Control method for XYZ axis

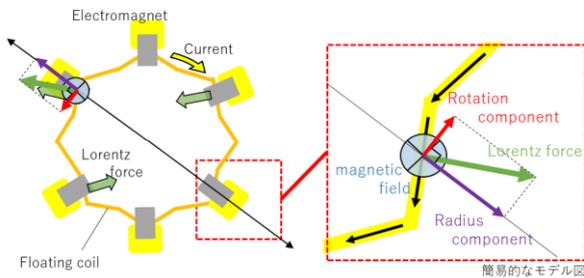


Fig.5 Control method for rotation direction

#### 3.2 センサの測定原理

鉛直方向の浮上位置の読み取りは透過型センサを用いている。これは受光量の変化によって位置を読み取る。測定原理としては、図6のように浮上体が上下に変化することによって、センサの受光量の変化を測定する。水平方向用センサは反射型センサを使用する。このセンサを用いることで、図7のようにセンサと浮上コイルの距離を随時検知する。

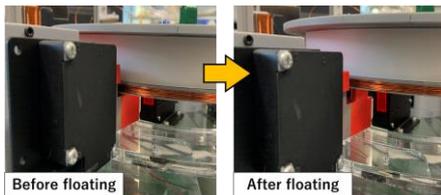


Fig.6 Summary of the vertical sensor

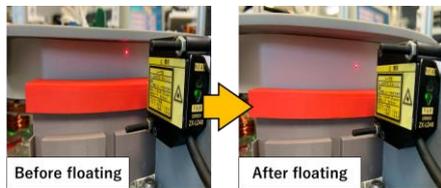


Fig.7 Summary of the horizontal sensor

### 4. 実験方法

#### 4.1 鉛直方向

鉛直方向用電磁石と鉛直方向の浮上位置を計測するセンサの位置関係を図8に示す。電磁石とセンサはそれぞれ120°毎に配置されており、それらの間は60°である。そのため、電磁石に供給される電流は、電磁石の左右に位置するセンサの出力値を、それぞれ足して2で割った値と目標値との偏差にPID補償をかけることで制御する。また、鉛直方向の浮上

可能な位置は最大10[mm]である。

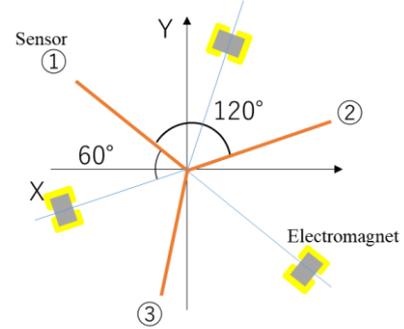
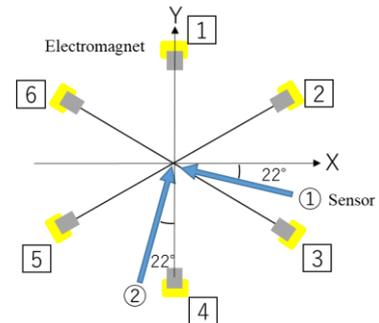


Fig.8 Position relation

#### 4.2 水平方向

図9に水平方向の制御用に取り付けた反射型センサ①、センサ②とXY平面上に配置された水平・回転制御用電磁石との位置関係を示す。制御方法は、図9のようにセンサ①②の出力値をそれぞれX軸、Y軸上における値に変換し、60°毎に配置された電磁石に出力する。また、Y軸方向の制御はY軸上の電磁石2個(図9の1,4)、X軸方向の制御はそれ以外の4個(図9の2,3,5,6)の電磁石で制御するものとしている。水平方向の制御可能範囲は最大6[mm]である。



$$X: (-1) \times \cos 22^\circ + 2 \times \sin 22^\circ$$

$$Y: 1 \times \sin 22^\circ + 2 \times \cos 22^\circ$$

Fig.9 Position relation

#### 4.3 回転方向

回転方向は、水平方向の電磁石と同様の物を利用して、制御を行う。そのため、電磁石は60°毎に配置されている。また、浮上体上面には、図10のように白と黒の色分けを行い、回転に必要な磁場の向きを白黒で分ける。これを図11のように設置された反射型フォトセンサを用いて、フィードバックすることで回転制御を行う。

同じ電磁石で水平方向と回転方向の制御を同時に行う。そのため、水平方向の制御において、出力されている電流に、足し合わせて、回転制御用の電流を出力することにより、同時制御を行う。

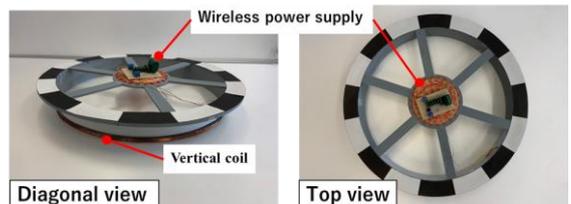


Fig.10 Analysis model

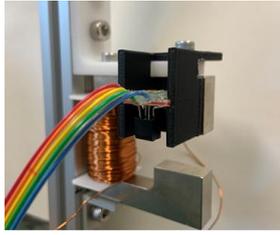


Fig.11 Analysis result

## 5. 実験

### 5.1 鉛直・水平実験

鉛直方向と水平方向の統合実験を行った。実験内容は、鉛直方向の目標値 4.5[mm]を維持し、水平方向の制御位置を 2[mm]から 4[mm]、Y 軸方向と X 軸方向のそれぞれ移動させる実験を行った。図 12 に Y 軸方向の移動実験、図 13 に X 軸方向の移動実験の結果を示す。図 12、図 13 の h1, h2, h3 は鉛直方向の浮上位置を示している。記録は、鉛直・水平方向の制御を開始してから始めた。

実験結果から水平方向の目標値を変更した際に、変更した軸の浮上位置は、目標値を追従している。しかし、水平方向の目標値は中心位置 3[mm]からずれると偏差が 0.1[mm]程、残る結果となった。これは、水平方向の制御は PD 制御であり、I 制御を加えていないことが原因と考えられる。

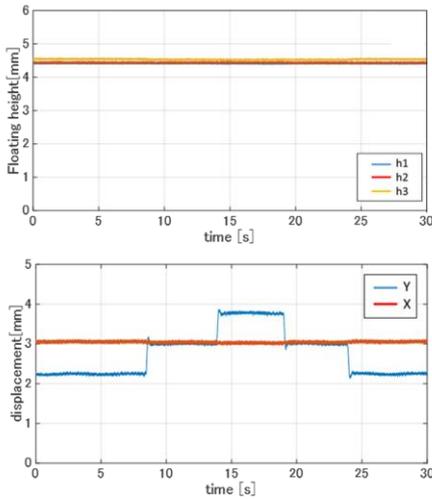


Fig.12 Y-axis movement experiment

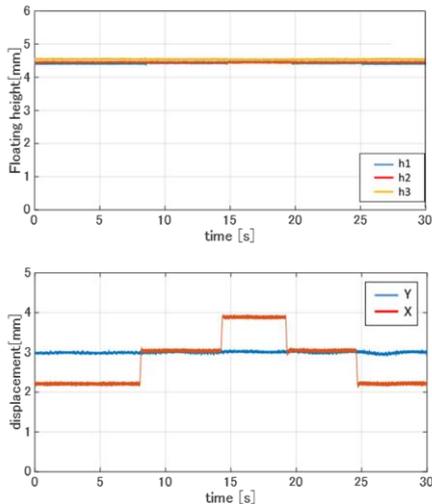


Fig.13 X-axis movement experiment

### 5.2 回転実験

実験結果を図 14 に示す。実験手順は、給電装置にて浮上体に電流を印加し、鉛直制御を目標値 4.5[mm]に収束した状態から記録を開始した。記録開始後、約 7 秒後に水平制御を目標値 2.5[mm]で制御を開始した。鉛直水平制御で完全非接触状態を実現した 14 秒付近から、回転制御を開始した。また、回転制御時の電流値は $\pm 2$ [A]とし、白と黒でスイッチングを行った。

目視での制御結果は、回転制御開始後すぐに回転せず、制御開始後約 5 秒で回転をはじめ、その後は止まることなく回転を続けた。図 14 の結果から鉛直水平制御は、それぞれの目標値にほとんど誤差なく収束していることがわかる。しかし、回転制御開始後、ある程度目標値を追従しているが、振動的になった。振動の原因は、浮上体表面粗さと機構の水平面のずれが考えられる。

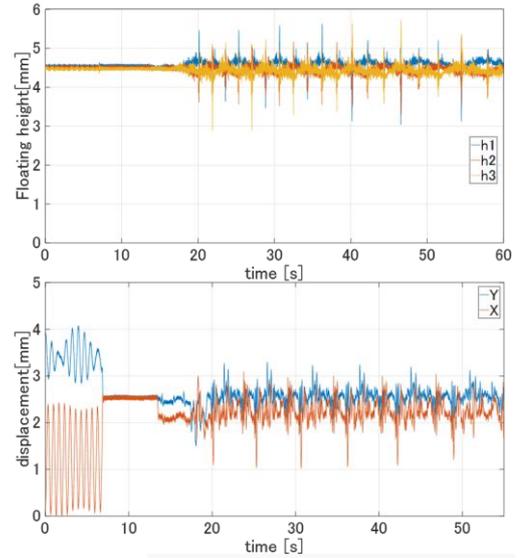


Fig.14 Results of rotation control experiment

## 6. 結言

一般的な磁気浮上システムの可制御域の狭さを克服する、ローレンツ力による磁気浮上システムを提案した。機構を簡素化した、新しい磁気浮上システムを製作した。この機構を用いた鉛直、水平制御を行うことにより、任意の位置で完全非接触状態の浮上を実現した。また、中心位置での回転制御を統合することができた。

### 参考文献

- (1) 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-”, 高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻 知能機械システム工学コース修士論文, 2019
- (2) 田中雅子, 岡宏一, 原田明德, “非接触給電を用いた磁気浮上機構の開発”, 高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻 知能機械システム工学コース修士論文, 2018
- (3) 篠原述史, “電磁界結合による非接触電力伝送の原理について”, 電気学会論文誌 D, Vol.131, No.5, pp.708-713