

# 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-

## Development of MC type magnetic levitation system using resonance type contactless power supply - Rotation control system -

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 1215003 小栗佑斗

### 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、摩擦、潤滑、塵埃などの問題を解決できる可能性があり、磁気浮上式列車、真空中やクリーンルームなど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が、ローレンツ力を利用した磁気浮上システムは浮上力を得ることが難しいため応用例が少ない。またローレンツ力を用いるためには浮上物に電流を供給する必要があるが、電線を用いて給電すると非接触にならない。この問題を解決するために非接触給電を用い、電力を供給することを考えた。

これまでに、鉛直方向の浮上実験と、鉛直方向と水平方向を合わせた浮上実験を行い、非接触給電を用いた電力を使って、浮上物を任意の点に浮上させることに成功している。<sup>(1)</sup>今回は非接触給電を用いた電力に基づいて、ローレンツ力を用いて回転制御を行う磁気浮上システムに着目し、非接触浮上実験を行う。また今回の磁気浮上システムは、磁石よりコイルの方が軽く、浮上が容易であるという点で MC(Moving Coil)型の磁気浮上システムを採用した。

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鉛直水平制御の装置部分を図 1、回転制御の装置部分を図 2、浮上体の三面図を図 3、非接触給電を図 4 に示す。図 1、図 2 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、鉛直制御用の電磁石を 3 個、水平制御用の電磁石を 2 個、回転制御用の電磁石を 3 個、透過型レーザーセンサを 2 個、反射型レーザーセンサを 2 個、浮上体、非接触給電で構成されている。また図 3 のように、浮上体は 3D プリンタで製作されたボビンに、コイルを巻き付けている。コイルは 3 箇所巻かれており、それぞれ下から鉛直制御用コイル、水平制御用コイル、回転制御用コイルに分かれている。非接触給電は図 4 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[kHz]であり、今回は電源電圧 35[V]をかける。

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。

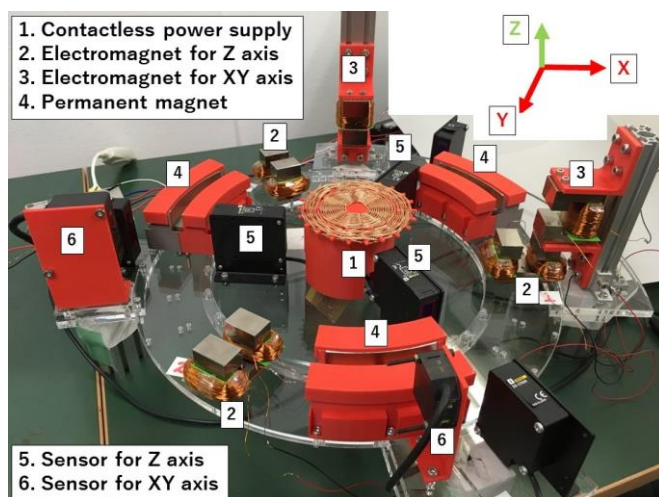


Fig.1 Photograph of prototype proposed structure

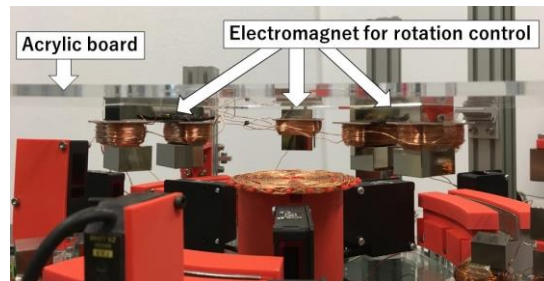


Fig.2 Photograph of prototype proposed structure

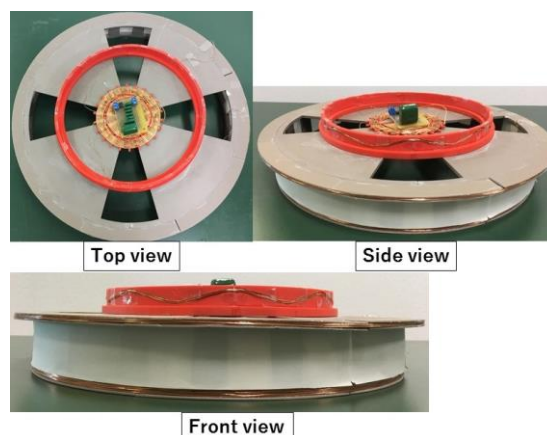


Fig.3 3-view drawing of prototype proposed object

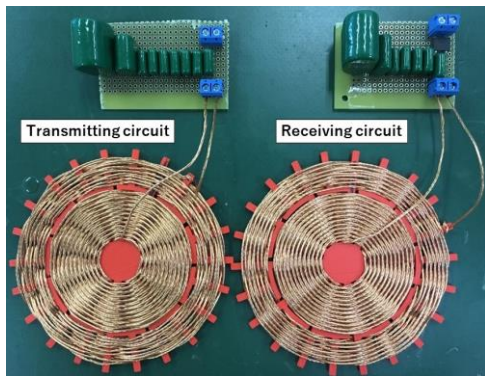


Fig.4 Photograph of prototype proposed contactless power supply

### 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つ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5に示す電磁石を用いて、鉛直方向および水平方向の安定化を行うものとする。また、回転方向の場合は図6のように、コイルを斜方向に巻くことによって、ローレンツ力を斜方向に働かせ、その力の横向き成分を利用して回転させる。

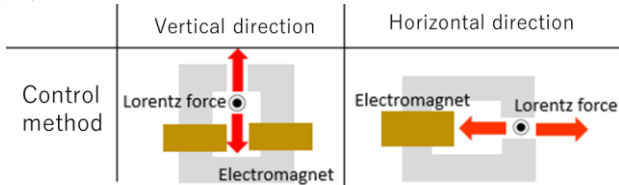


Fig.5 Control method for XYZ axis

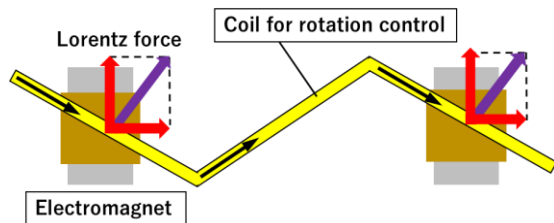


Fig.6 Control method for rotation direction

#### 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、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7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8のようにセンサと浮上コイルの距離を随時検知する。

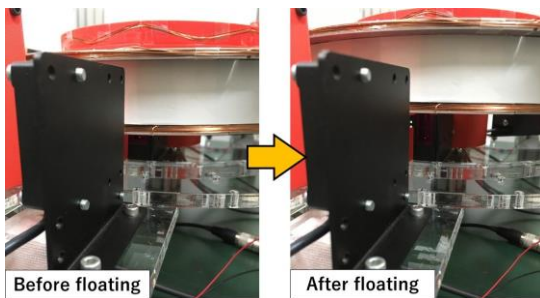


Fig.7 Summary of the vertical sensor

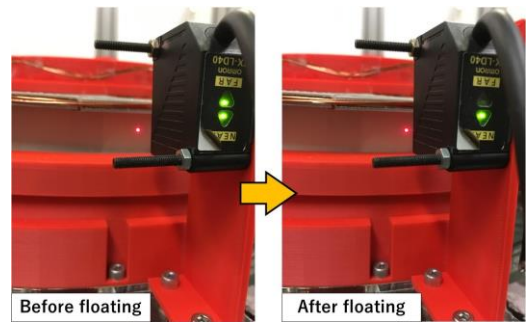


Fig.8 Summary of the horizontal sensor

#### 3.3 制御システム

鉛直水平制御のシステムを図9、回転制御のシステムを図10に示す。永久磁石付近の浮上コイルの浮上位置をセンサで計測する。各センサで計測された値は、A/Dコンバータでデジタル化され、DSPボードを介し、PCに取り込まれ、MATLAB/Simulinkのプログラムにより、計算処理される。計算処理された値はDSPボードを介し、アンプにより増幅された電流が各電磁石に供給される。回転制御は、コントローラから電磁石に直接電流を供給するフィードフォワード制御を行う。

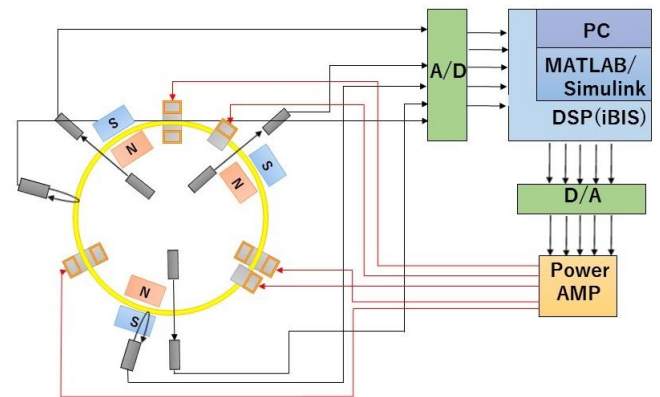


Fig.9 Control system for XYZ control

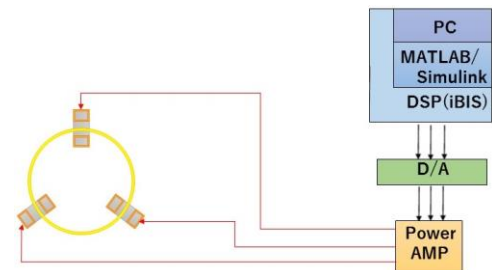


Fig.10 Control system for rotation control

## 4 実験方法

### 4.1 鉛直方向

図11のように、電磁石と鉛直方向を計測するセンサはそれぞれ120度毎に配置されており、それらの間は60度である。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永久磁石付近の浮上位置を測定してい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(P:1, I:0.3, D:0.3)をかけることで制御される。鉛直方向の浮上可能な位置は最大6[mm]であったため、今回は目標値を4[mm]とした。

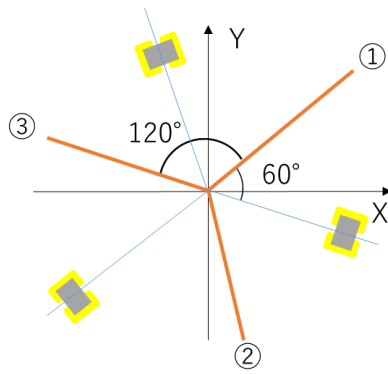
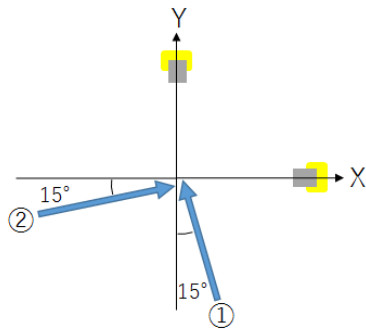


Fig.11 Position relation

#### 4.2 水平方向

図 12 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 軸上に配置された水平制御用電磁石との位置関係を示す。制御方法は、図 12 のようにセンサ①②の出力値にそれぞれ  $\sin 15^\circ$ 、 $\cos 15^\circ$  をかけた値に PID 補償 (P:1, I:0.3, D:0.3) をかけ、水平方向の電磁石に出力する。これにより図 7 に示す XY 軸上における目標値との偏差を読み取ることを可能としている。水平方向の変動可能な位置は最大 6[mm]であったため、今回は Y 方向の目標値を 2.5[mm], X 方向の目標値を 1.5[mm]とした。



$$X: (-①) \times \sin 15^\circ + ② \times \cos 15^\circ$$

$$Y: ① \times \cos 15^\circ + ② \times \sin 15^\circ$$

Fig.12 Position relation

#### 4.3 回転方向

120° 毎に配置されている回転制御用電磁石に、三相交流を流す。最大 3[A]で、位相は 120 度である。回転制御は、鉛直制御と水平制御を行い、完全に非接触になった状態で行う。

### 5 実験結果

実験結果を図 13 に示す。まず電源よりステップ入力が印加されると同時に鉛直方向の制御を開始した。鉛直方向の高さが 30 秒付近で目標値の 4[mm]に収束しているのがわかる。次に約 40 秒付近で水平方向の制御が開始され、60 秒付近で目標値の X 方向 1.5[mm], Y 方向 2.5[mm]に収束している。最後に 82 秒付近で回転方向の制御を開始した。回転方向の力により、30 度程回転したのが確認できたが、それ以降大きく傾いた。また図 13 より、値が振動していることから、鉛

直方向、水平方向の制御がそれぞれできなくなっていることがわかる。これは、図 6 のような回転制御用コイルに働くローレンツ力の鉛直成分によって浮上体が大きく傾いたからだと考える。これを解決するためには、回転制御用コイルに働くローレンツ力の鉛直成分と釣り合うだけの、鉛直方向の電磁石を増やす必要がある。また、回転制御用のコイルの傾きを大きくすることで、回転制御用コイルに働くローレンツ力の鉛直成分が小さくなる。さらに、鉛直制御と、水平制御用のコイルの巻き数を増やすことによって、ローレンツ力をそれぞれ大きくし、回転制御によって発生する外乱要素を消すことができると考える。つまり、これらのような機構の再設計が必要になると考える。

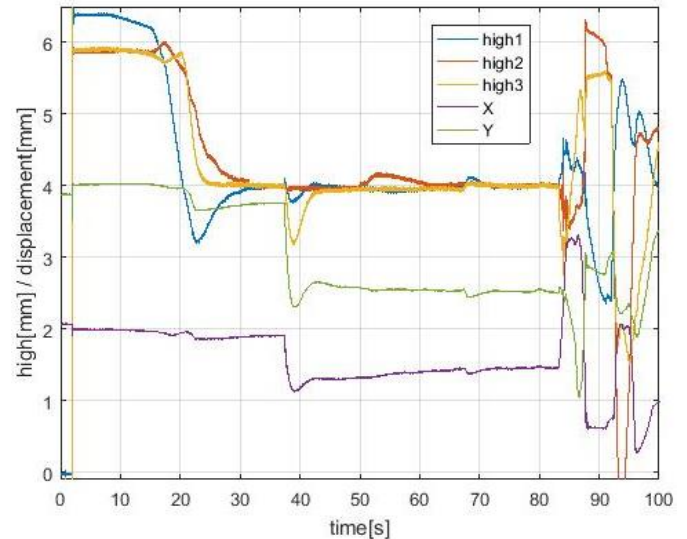


Fig.13 Result of experiment

### 6 結言

回転制御機構の概要とその制御方法、実験方法、実験結果を示した。実験結果より、鉛直方向、水平方向の制御は成功したが、回転方向の制御は、回転制御用コイルに働くローレンツ力の鉛直成分によって制御できなくなったと考える。そのため、機構の再設計が必要であると考えられる。

### 文献

- (1) Yuto Oguri, Yusuke Kajisawa, Koichi Oka and Akinori Harada, "Development of MC Type Magnetic Levitation System Using Resonance Type Contactless Power Supply", The 16th International symposium on magnetic bearings (ISMB16), <http://www.magneticbearings.org/publications/>
- (2) 田中雅子, 岡宏一, 原田明徳, "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