

共鳴形非接触給電を用いた MC 形磁気浮上システムの開発

Development of MC type magnetic levitation system using resonance type contactless power supply

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1180043 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、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、地上側より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ることにより電力を供給することを考えた。

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た磁気浮上システムに着目し、非接触浮上実験を行った。以下で、その機構、制御方法を示し、新機構での浮上実験を行う。

2 新機構の提案

2.1 既存の機構

これまでに試作した磁気浮上システムを図1に示す。非接触給電の受電部で得られた交流電流を整流回路で直流電流に変換し浮上コイルに電流を流す。浮上コイルの両側に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、コイルの浮上位置を安定化させるものとする。

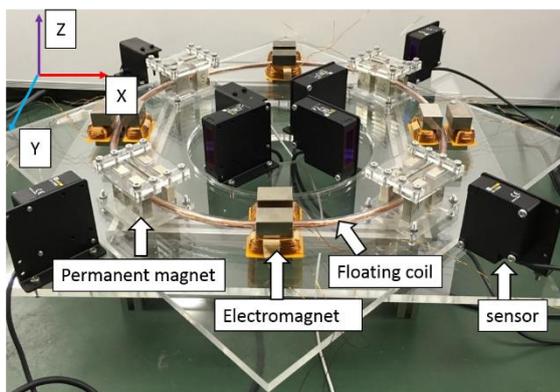


Fig.1 Existing magnetic levitation system

2.2 現在の問題点

現在、図1の機構により浮上制御が成功している。しかし、ローレンツ力を用いた完全な浮上機構を実現するためには、浮上コイルだけでなく給電装置全体も浮上させる必要がある。このため浮上コイルと受電部の一体化を図る。また、これまで行った鉛直方向の制御に加え水平方向の能動制御も加えることにより、浮上コイルの安定化を図る必要がある。現在の装置では新たにセンサなどを配置する十分なスペースがなく物理的な面から不可能である。このため新しい装置を設計した。

3 新機構の設計

3.1 新機構の開発

新機構では、図1の現在センサがある中央部分に非接触給電機構を取り付ける配置が対称性の面から望まれる。新たに必要となる装置は水平方向制御用電磁石、センサなどとなるが限られたスペースに配置する必要がある。そのため、磁石の必要個数およびそれらの位置について再検討した。

磁石の数については、浮上体の重量支持のための永久磁石は3個で十分であることが確認された。鉛直方向位置制御用電磁石も同数の3個とした。水平方向位置制御用電磁石は新たな設計となり、余裕を持たすために今回4個用いることにした。

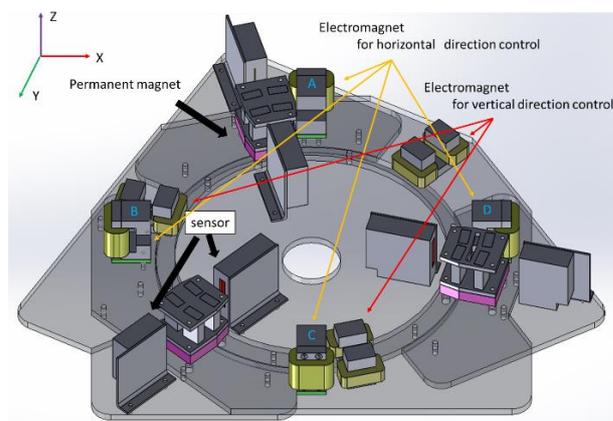


Fig.2 New mechanism model

3.2 電磁石の設計

磁石の配置は図2に示すように鉛直方向用磁石は120°毎に、水平方向用磁石は90°毎に配置した。

完全な非接触浮上のためには、水平方向と鉛直方向に能動的な位置決め制御が必要である。その制御のために、電磁石によるローレンツ力を用いる。図3に、水平方向と鉛直方向の電磁石の配置を示す。このような電磁石を浮上コイルの周囲に設置することにより、それぞれの方向の力を発生し、フィードバック制御により非接触浮上を実現する。

鉛直方向の制御を行う電磁石の詳細を図4に示す。電磁石が発生するローレンツ力を磁界解析ソフト JMAG を用いて解析した。解析条件を以下に示す。

- 浮上コイル電流：1A
- 図4に示す Z=0mm の X 軸上に 0~40mm までの 5mm 間隔で解析を行う。
- 電磁石のコイルおよびコイルの電流：150 回巻 1A
- 電磁石の磁極間距離：15mm と 30mm の 2 種類

JMAG による解析の結果を図5に示す。図に示すように発生するローレンツ力は比較的小さいものであり、発生力は磁極の中心部で最も大きくなった。よって、この部分を浮上の平衡位置に設定することが適切であると考えられる。浮上支持力は永久磁石とのローレンツ力で発生させ、電磁石の発生力は、浮上制御のためだけに用いる。このことを考えると、これらの発生力は十分であると考えられる。しかし、制御性能の向上を考慮し、より発生力が大きい磁極の空隙距離が 15mm のものを採用した。

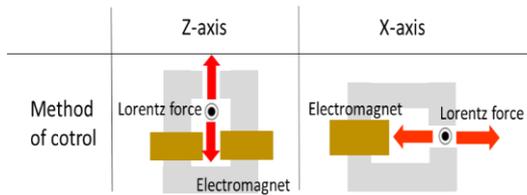


Fig.3 Control method

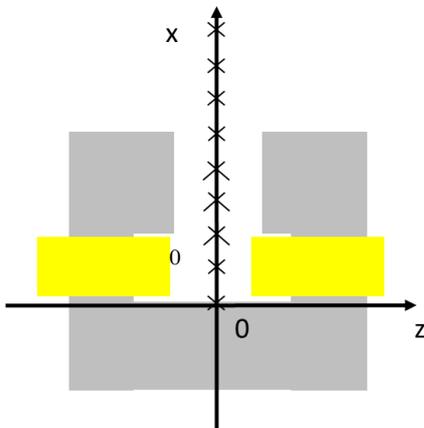


Fig.4 Vertical electromagnet

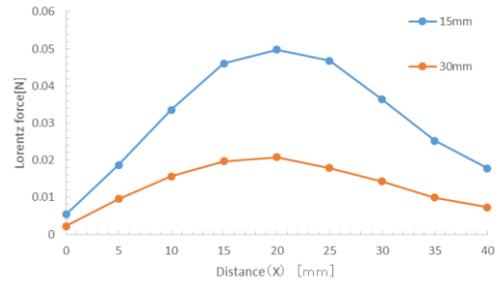


Fig.5 Magnetic field air gap distance and Lorentz force

4 制御実験

4.1 鉛直方向の制御

今回は位置制御を行っていく上で基礎実験として PID 制御で実験を行った。図3のようにローレンツ力が Z 軸方向に働くように電磁石の向きを配置することで、鉛直方向の浮上位置の制御する。出力として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間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 補償をかけることで制御される。

実験結果を図6に示す。実験は、浮上コイルに永久磁石のみで十分浮上できる電流を浮上コイルに流し、後に目標とする浮上位置を 4mm とし鉛直方向の制御を開始した。図が示すように制御が開始されてから 4mm の位置に収束しており実験は成功したといえる。

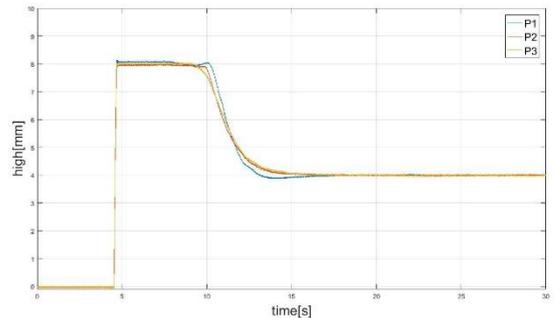


Fig.6 Vertical control

4.2 水平方向の制御

図7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方向制御用電磁石との位置関係を示す。制御方法は、センサ①②の出力値にそれぞれ $\sin 45^\circ$ 、 $\cos 15^\circ$ をかけた値に PID をし、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れることを可能としている。

実験結果を図8に示す。操作手順として 4.1 の実験後に XY 方向ともに目標値 4mm とし鉛直方向と水平方向の実験を行った。図から水平方向の制御の直後に浮上コイルが約 1mm 程度上下方向にも動いているがその後は目標値に収束しているため鉛直方向および水平方向の同時制御が成功したといえる。上下に振動した理由として図2における水平方向電磁石が上下方向用電磁石に数 mm 程度しか間隔がなくお互いが発生させる磁場が影響しあったのではないかと考える。また、この実験を行った際、図2に示す水平方向用電磁

石 A,D が永久磁石の影響を受け磁気を帯びたためこの実験では取り外して制御を行っている。

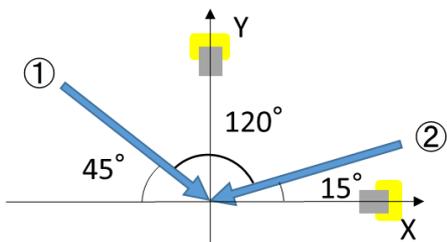


Fig.7 Position relation

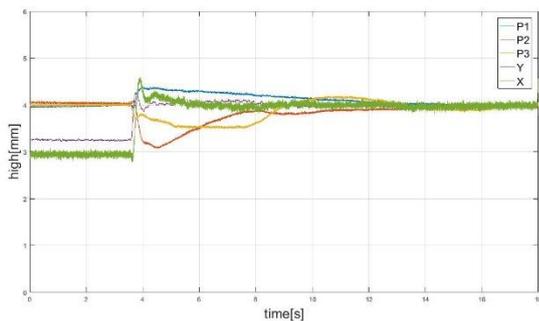


Fig.8 Horizontal control experiment

5 給電装置の性能向上の検討

5.1 給電コイル

先行研究にて、給電装置に使われているリッツ線および回路については試作段階の物であり、伝送効率など性能性についての検討が行われていない。そこで図9. 図10. 図11 に示す3種類のリッツ線を使った50回巻きのコイルを用意し、またそれらに2種類の回路を試作することで伝送効率の比較および検討を行った。



Fig.9 $\phi=0.08\text{mm}$ 30 twisted ritz wire coils

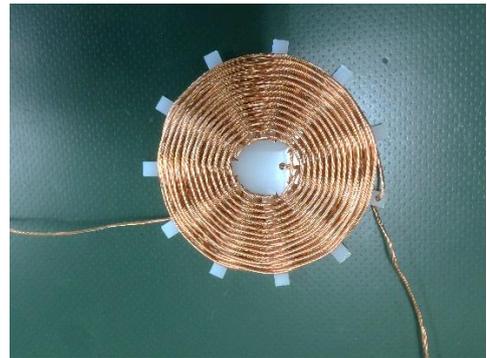


Fig.10 $\phi=0.3\text{mm}$ 7 twisted ritz wire coils

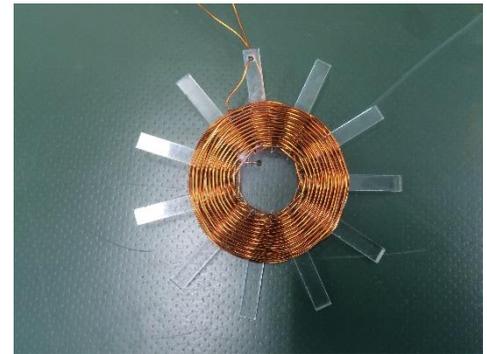


Fig.11 $\phi=0.5\text{mm}$ PEW wire coil

5.2 回路の試作方法

回路は2種類試作する。手順は下記の(1), (2)に示す。2つの回路の差異は、コンデンサの求め方である。前者は非接触給電用コイルの自己インダクタンスを基にコンデンサの理論値を求めているが、後者は仮定した共振周波数を基に、コンデンサの理論値を求めている。

- (1)

 - ① 浮上コイルの抵抗 R_L を測定
 - ② 非接触給電のコイルのインダクタンス L を求める
 - ③ $\sqrt{\frac{L}{C}} = R_L$ から必要なコンデンサ C を求める
 - ④ $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ より共振周波数 f を求める
- (2)

 - ① $f=10\text{k [Hz]}$ と条件をつける
 - ② 非接触給電コイルのインダクタンス L を求める
 - ③ $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ よりコンデンサ C を求める

5.3 コンデンサの導出

LCRメータにより自己インダクタンス L を測定した結果を表1. 表2. 表3に示す。また、LCRメータのはさみ方により数値が増減したため、5回の平均を使用した。測定した自己インダクタンスからコンデンサ C をそれぞれの手順により求めた結果を表4に示す。

Table.1 30 twisted ritz wire coils

	$\phi=0.08\text{mm}$ Ritz wire 30 twists 50 turns [μH]					average
	1time	2time	3time	4time	5time	
A	78.57	80.00	79.96	80.76	80.59	79.98
B	76.19	76.47	76.44	76.24	76.23	76.31

Table.2 7 twisted ritz wire coils

$\phi = 0.3\text{mm}$ Ritz wire 7 twists 50 turns [μH]						
	1time	2time	3time	4time	5time	average
A	103.20	103.30	103.60	102.20	102.80	103.02
B	101.00	101.20	101.60	101.80	101.80	101.48

Table.3 PEW wire coil

$\phi = 0.5\text{mm}$ PEW wire 50 turns [μH]						
	1time	2time	3time	4time	5time	average
A	77.84	77.93	77.88	77.96	77.98	77.92
B	78.68	78.70	78.63	78.60	78.57	78.64

Table.4 Deriving capacitor

		A	B
(1)	Ritz wire 30 twists	2.49 [μF]	2.37 [μF]
	Ritz wire 7 twists	3.20 [μF]	3.16 [μF]
	PEW wire	2.42 [μF]	2.45 [μF]
(2)	Ritz wire 30 twists	3.17 [μF]	3.32 [μF]
	Ritz wire 7 twists	2.46 [μF]	2.50 [μF]
	PEW wire	3.25 [μF]	3.22 [μF]

5.4 伝送効率実験

5.3 により導出したコンデンサを回路に組み込み受電側にかかる電圧を調べることで伝送効率の比較を行った。結果を回路の試作方法により分け手順 (1) により作成した回路を使った場合を図 12 に示し、手順 (2) によるものを図 13 に示す。またこの時の電源電圧は1[V]とした。

図 12, 13 より実験結果はどちらの手順においてもコイル直径 $\phi = 0.3\text{mm}$ の 7 本然りリッツ線を使用したコイルの伝送効率が良いことがわかった。またそれぞれの共振周波数は、8600Hz, 9800Hz であることがわかった。

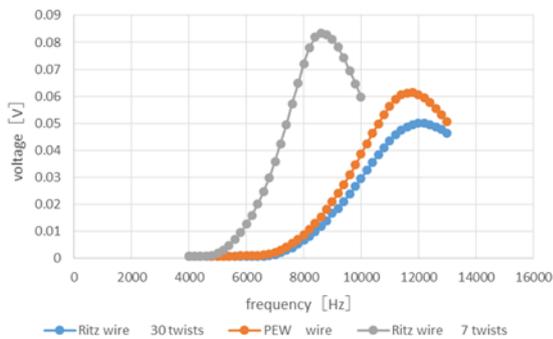


Fig.12 (1)Transmission efficiency

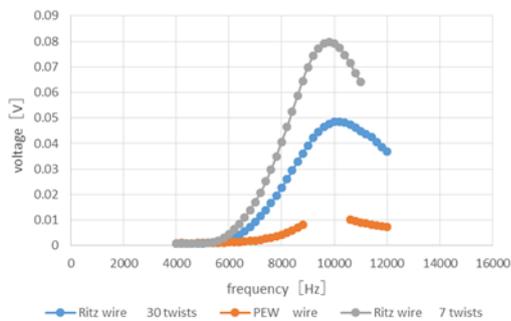


Fig.13 (2)Transmission efficiency

結言

新機構の磁気浮上システムを提案し、既存の装置の問題点を改善するよう設計を行った。浮上実験により鉛直方向と水平方向の同時制御に成功した。

謝辞

(B) 25289052 の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) 荻原述史 電磁結合による非接触電力伝送の原理について 電磁学会論文誌 D (産業応用部問誌) vol. 131 No. 5 p703-713
- (2) 小栗佑斗, 岡宏一 非接触給電を用いた磁気浮上システムの開発 日本機械学会 第 15 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoVic2017) プログラム A21
- (3) 梶澤勇亮 共鳴形非接触給電を用いた MC 形磁気浮上システム 計測自動制御学会四国支部学術講演会, (2017)