

2019（令和元）年度 修士学位論文

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

2020 年 3 月 9 日

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

1225011 梶澤 勇亮

指導教員 岡 宏一 教授
原田 明德 講師

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 磁気浮上システムとは	1
1.3 非接触給電とは	1
1.4 研究概要	2
1.5 本論文の構成	2
第2章 先行研究からの改良	3
2.1 既存の磁気浮上システムの問題点	3
2.2 コイルの統合	3
2.3 電磁石の統合	5
第3章 既存の磁気浮上システム	6
3.1 機構の全体図と概要	6
3.2 構成部品	8
3.2.1 永久磁石	8
3.2.2 制御用電磁石	9
3.2.3 浮上コイル	11
3.2.4 非接触給電	11
3.2.5 鉛直方向用センサ	13
3.2.6 水平方向用センサ	14
3.2.7 機構の土台	15
3.3 制御原理	15
3.3.1 鉛直・水平方向	15
3.3.2 回転方向	16
3.4 センサの測定原理	16
3.5 制御システムの概要	17
3.6 実験装置の構成	18
3.6.1 直流電源（パワーアンプ用）	18
3.6.2 パワーアンプ（電磁石用）	19
3.6.3 ADコンバータ	20
3.6.4 コントローラ	20
3.6.5 直流電源（センサ用）	21
3.7 電磁石への入力	21
3.7.1 鉛直制御	21
3.7.2 水平制御	22
3.7.3 回転制御	22
3.8 統合実験	23
3.9 まとめ	24

第4章 新機構の提案	25
4.1 新機構の開発	25
4.2 変更した構成部品	26
4.2.1 制御用電磁石	26
4.2.2 浮上コイル	27
4.2.3 水平方向用センサ	28
4.2.4 機構の土台	28
4.3 制御原理	28
4.4 センサの測定原理	29
4.5 制御システムの概要	30
4.6 電磁石への入力	31
4.6.1 鉛直制御	32
4.6.2 水平制御	33
4.6.3 回転制御	34
第5章 新機構による浮上実験	34
5.1 鉛直・水平実験	34
5.2 回転実験 (FF 制御)	36
5.3 回転制御 (FB 制御)	37
5.3.1 FB 制御の方法	38
5.3.2 回転実験 (FB 制御)	38
第6章 結論	40
6.1 まとめ	40
6.2 今後の課題	40
謝辞	41
参考文献	41

第1章 序論

1.1 研究背景

一般的に用いられている運搬装置や支持機構には、ベアリングやレール等による滑り機構などがある。しかし、これらの機構は機械的な接触があり、摩擦や潤滑により塵埃等が発生する。そのため、真空中やクリーンルームなどの特殊環境下での使用には望ましくない。現在では、解決策として磁気浮上機構により、精密機器や半導体の製造工場内で磁気浮上運搬装置が一部で活躍している。また、特殊環境外においても、摩擦低減の面から、リニアモーターカーが開発され、超高速走行を実現している。しかし、一般的な磁気浮上機構は永久磁石の磁性や、電磁石の吸引力を利用したものである。つり合いの位置近傍での浮上制御を行うため、非線形性が強く、制御可能な範囲が狭くなる問題がある。

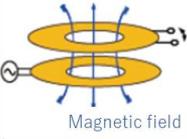
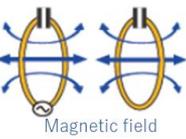
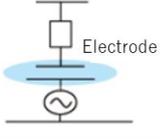
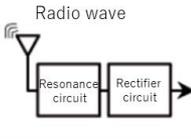
1.2 磁気浮上システムとは

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、機械的な接触がないため、摩擦、潤滑、塵埃等の問題を解決できる可能性がある。主に、磁気浮上搬送装置や、磁気浮上列車、真空中やクリーンルーム等の特殊環境で利用されている。現在、利用されている磁気浮上システムの原理は、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、先程も述べたように、これらの機構は、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。その問題を解決するシステムとして、ローレンツ力を用いるシステムがあげられる。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。ローレンツ力を用いるには、浮上体そのものに電流を供給する必要がある。有線による給電では塵埃等の発生を低減させる面を考慮すると、クリーンルーム等での使用には望ましくない。

1.3 非接触給電とは

現在では、有線接続を用いない給電方法として非接触給電がある。非接触給電とは、電源ケーブルを使わず、離れた位置からでも機器に電力を供給できる電力供給方法である。電力伝送や充電する際に、電源ケーブルが不要なため、断線のおそれや水、塵埃等から防ぐことも可能である。既にスマートフォンや電気自動車⁽¹⁾などの充電方式として実用化されている。また、電力供給方法として電磁誘導方式、磁界共鳴方式、電界結合方式、電波方式の4つの方式がある。その特徴を表1に示す。

Table.1.1 Power supply method⁽²⁾

method	Electronic induction system	Magnetic field resonance system	Electric field coupling system	Radio wave system
Overview				
Greater power	○	○	⊙	△
Efficiency	○(～90%)	△(～60%)	○(～90%)	×
Transmission distance	× (～Several centimeters)	○ (～Several meters)	× (～Several centimeters)	○ (～Several meters)

1.4 研究概要

磁気浮上システムの欠点とされている、制御可能な範囲の狭さを克服するため、ローレンツ力による磁気浮上システムの開発を行う。給電装置は、共鳴型である磁界共鳴方式を採用する。伝送効率の低下を抑えた電力伝送機能を浮上体に備えることで、新しい磁気浮上システムの開発を行う。このシステムを用いて、従来の永久磁石の磁性や、電磁石の吸引力を利用したシステムに比べ、制御可能範囲の大幅な拡大を目指す。

これまでの先行研究にて、第3章で示す磁気浮上システムは、鉛直方向と水平方向の制御を行うことで完全非接触状態での浮上を行い、回転方向の制御を可能にしている。本論文では、今後の実験において、モータとしての有用性を示すため、新機構を提案し、制御実験を行った。

1.5 本論文の構成

第2章では、既存の磁気浮上システムと新機構のシステムの主な変更点について説明し、改良によるメリットを示す。第3章では、既存の磁気浮上システム、第4章では新機構による磁気浮上システムについて詳細を示す。第5章では、新機構による浮上実験を示す。

第2章 先行研究からの改良

2.1 既存の磁気浮上システムの問題点

第3章で示す磁気浮上機構には、性能向上を図るうえでいくつかの問題点がある。1つは、回転制御を行うために浮上体に現状3つのコイルが巻かれている点である。これは、巻き数にもよるが浮上体の重量が増す原因にもなる。浮上体の重量が増すのと比例して、浮上体の浮上力を確保する必要があり、消費電力が増加する。2つ目は、それぞれの制御方向に対して別々に制御している点である。これにより、機構の装置も増え、機構と制御の複雑化の原因となる。今後の研究において、浮上体の小型化やモータとしての有用性を示すには、機構と制御面の簡素化は必然である。

2.2 コイルの統合

既存の磁気浮上システムのモデルを図2.1、新機構による磁気浮上システムのモデルを図2.2に示す。既存の磁気浮上システムでは、水平方向と回転方向の制御はそれぞれ別々のコイルで制御を行っていた。提案する磁気浮上システムでは、1つのコイルで水平方向と回転方向の制御を組み合わせて行う。その他にも、鉛直方向と水平方向の組み合わせや、鉛直方向と回転方向の組み合わせが考えられた。しかし、鉛直と水平方向の組み合わせは、給電装置との一体化の面において、物理的な観点から回転が難しくなる。鉛直と回転の組み合わせは、全て電磁石のみで制御する場合は可能であるが、浮上力の観点から永久磁石が必要であり、永久磁石は磁場を一定方向にしか発生させることができない。そのため、回転のためにコイル形状を変更できない。これらのことから本研究では、水平と回転方向の組み合わせを採用した。

コイルの統合により、既存の回転用のコイルと新機構の水平・回転用のコイルの形状を変更した。既存のコイルは、鉛直方向に上下させている。これにより発生するローレンツ力に円周方向の成分をもたせることができ、回転を可能にしている。新機構では、半径方向に上下させ、円周方向の力を発生させる。また、どちらの機構においても上下させる回数に差異はあるが、sin波的な形状をしている。力をより効率的に円周方向に発生させるには、矩形波的な形状をとる方が良いと考えられる。しかし、矩形波的な形状でコイルを制作するには、必要となる銅線が長くなり、浮上体の重量が大幅に増加してしまう。このことから、sin波的な形状によりコイルを制作し、より軽量の浮上体とする。

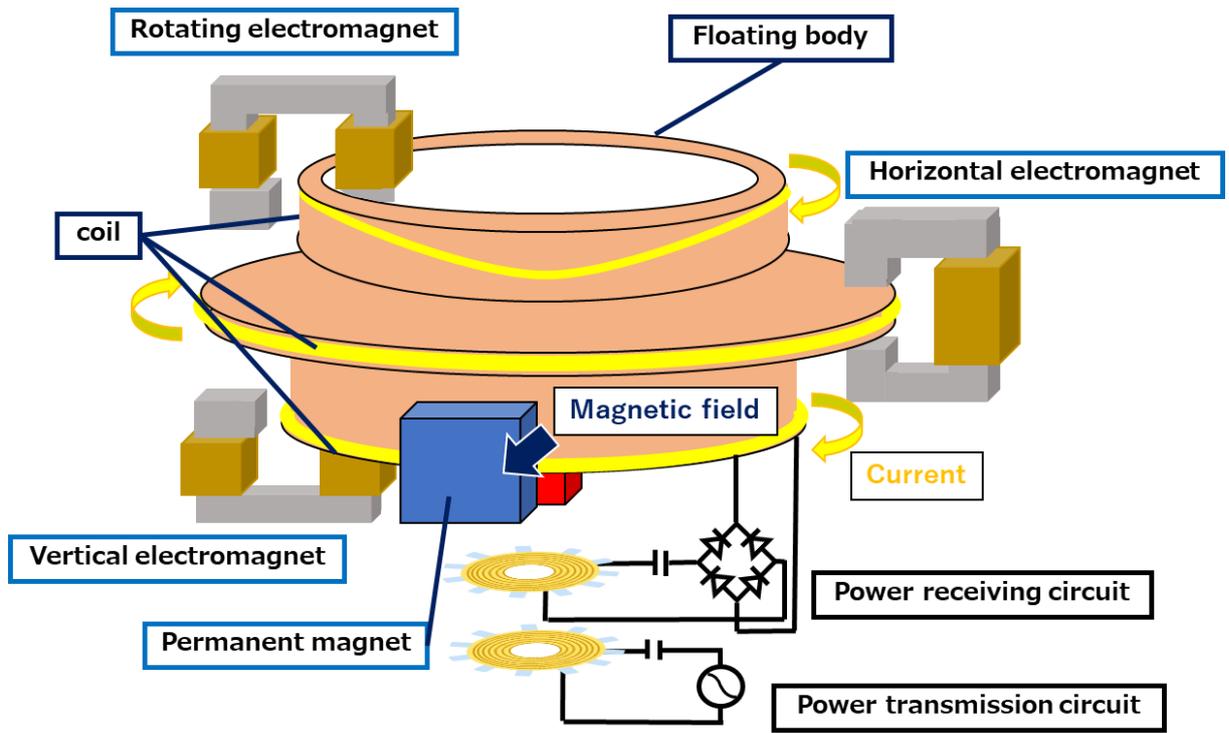


Fig.2.1 Existing control model

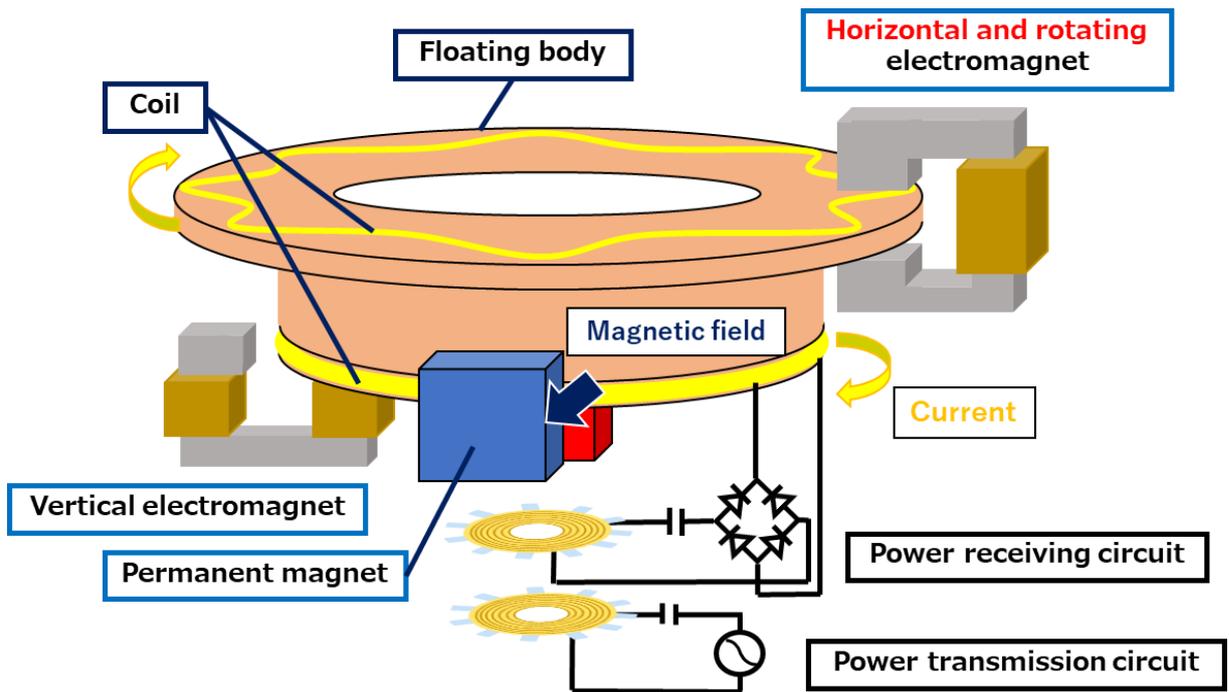


Fig.2.2 New mechanism control model

2.3 電磁石の統合

2.2 で説明したコイルの統合により、水平方向用電磁石と回転方向用電磁石を統合した。水平方向の制御において、電流値は理論上、目標値付近は外力が無い限り平均 $0[A]$ となり、偏差がある場合のみ電流が印加される。回転方向制御では、電流値は \sin 波を印加する。これらの電流値を足し合わせて、電磁石に印加することで、水平方向と回転方向の制御を同時に行う。

本論文では、水平制御時において半径方向に上下していることは無視し、円形のコイルとして制御を行う。より安定した制御を行う際には、コイル形状により発生する水平方向の力を分解し、浮上体の回転角から計算する必要がある。

既存の機構にて回転方向のトルク発生原理を図 2.3、新機構によるものを図 2.4 に示す。既存の機構での回転制御において、トルクを発生させる際に、鉛直方向の力の成分も発生する。従って、回転時に鉛直方向に振動する。これを抑制するには、鉛直方向の電磁石の制御において、入力する電流値を改良する必要があった。新機構での回転制御はトルクの発生に伴い、半径方向の力が発生する。しかし、電磁石をコイル中心に対して対面にも配置することにより、理論上は半径方向に発生した力を相殺することができる。従って、鉛直方向、水平方向の電流値を改良する必要がない。

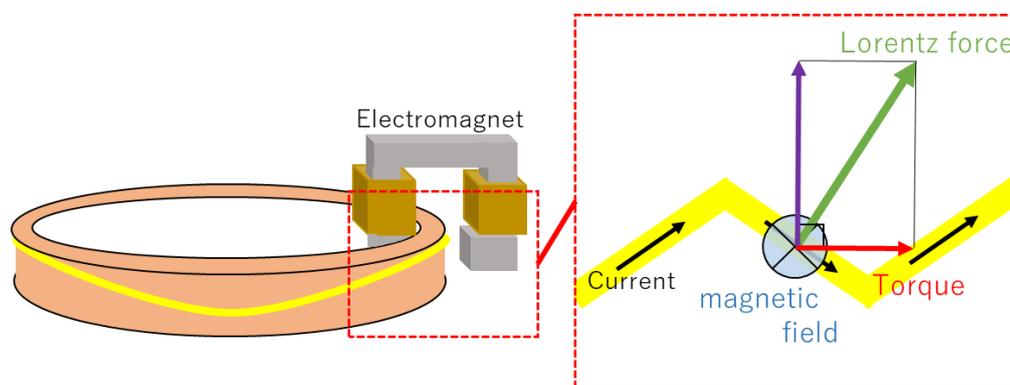


Fig.2.3 Existing rotation model

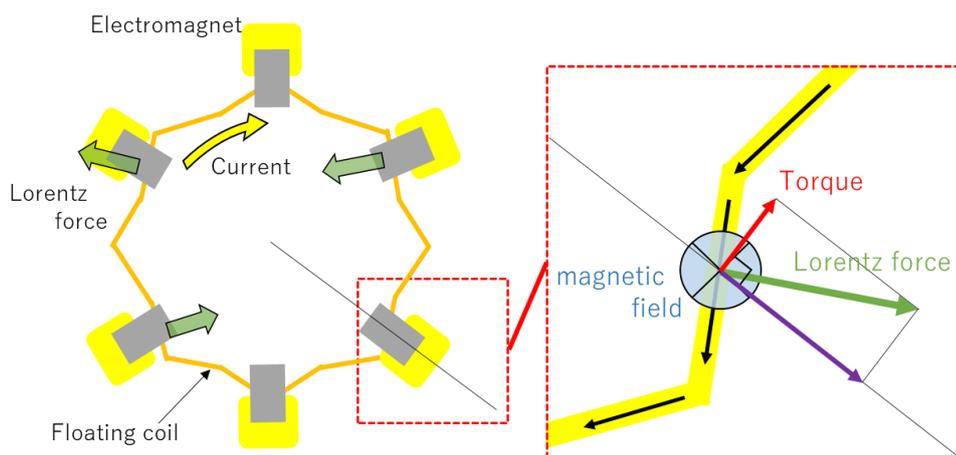


Fig.2.4 New rotation model

第3章 既存の磁気浮上システム

3.1 機構の全体図と概要

本研究にて作成した磁気浮上システムの全体図を図 3.1, 回転制御の装置部分を図 3.2, 浮上体を図 3.3, 給電装置を図 3.4 に示す. 図 3.1 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 3.1 の 4), 鉛直制御用の電磁石を 3 個 (図 3.1 の 2), 水平制御用の電磁石を 2 個 (図 3.1 の 3), 回転制御用の電磁石を 3 個 (図 3.2), 透過型レーザーセンサを 3 個 (図 3.1 の 5), 反射型レーザーセンサを 2 個 (図 3.1 の 6), 非接触給電機構 (図 3.1 の 1) で構成されている. また, 図 3.3 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 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. 非接触給電機構部は図 3.4 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[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.

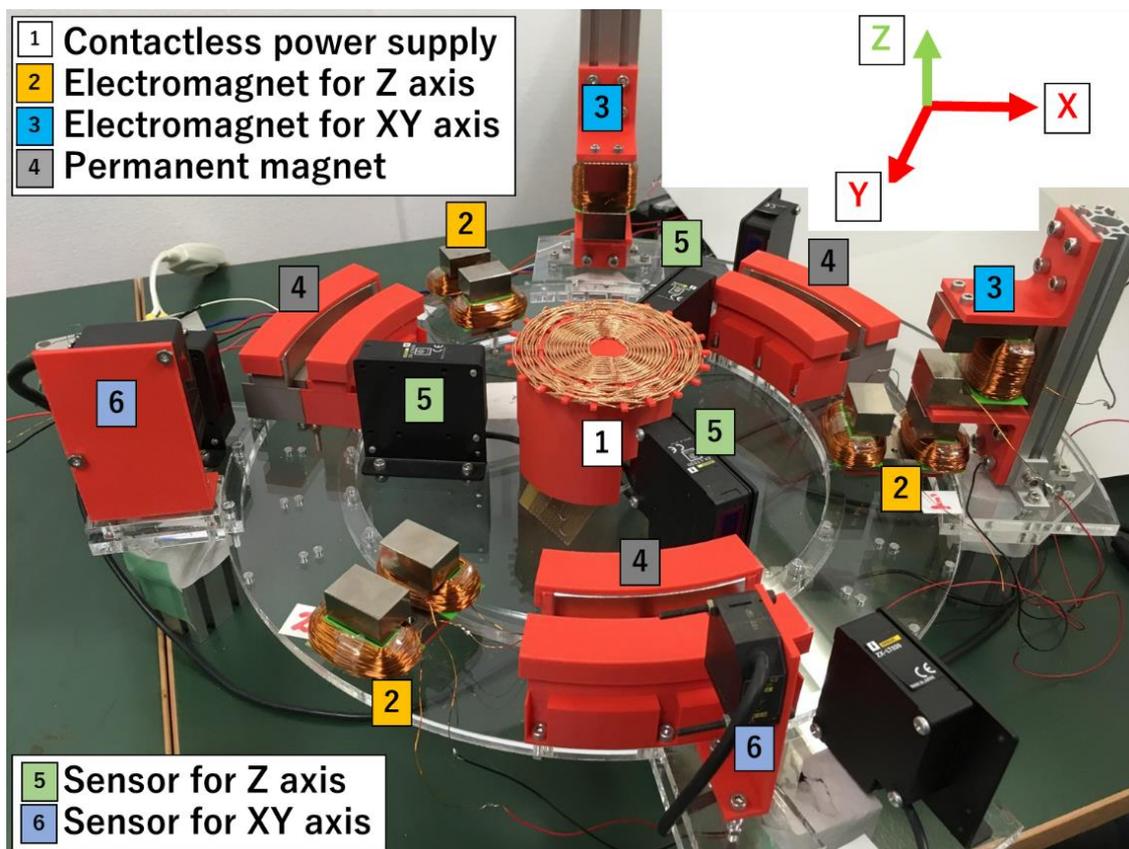


Fig.3.1 Existing magnetic levitation system

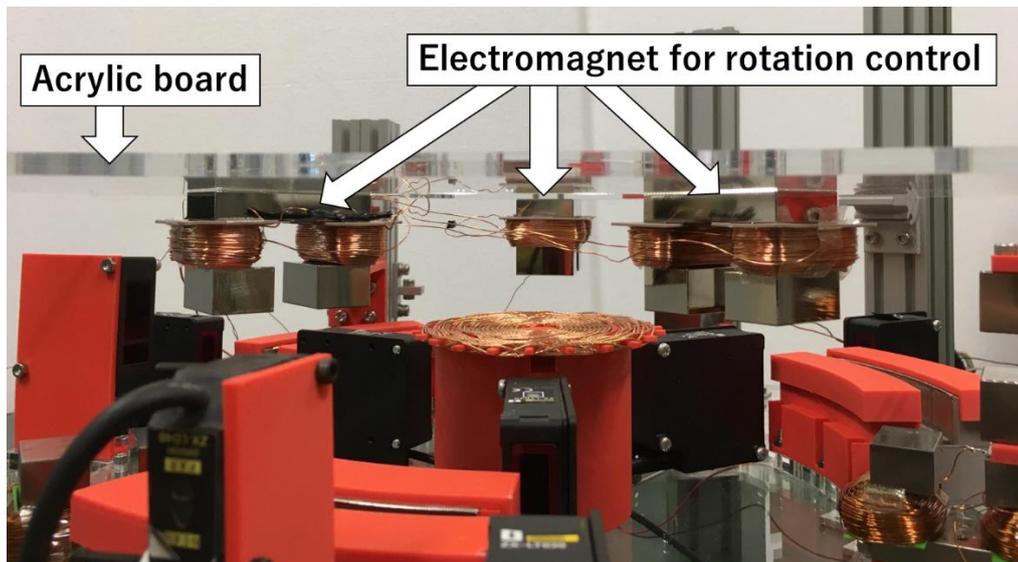


Fig.3.2 Photograph of prototype proposed structure

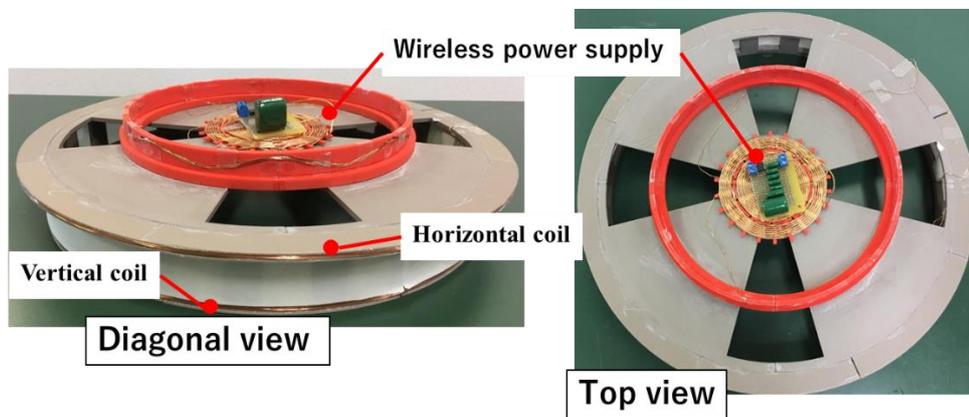


Fig.3.3 Levitation coil

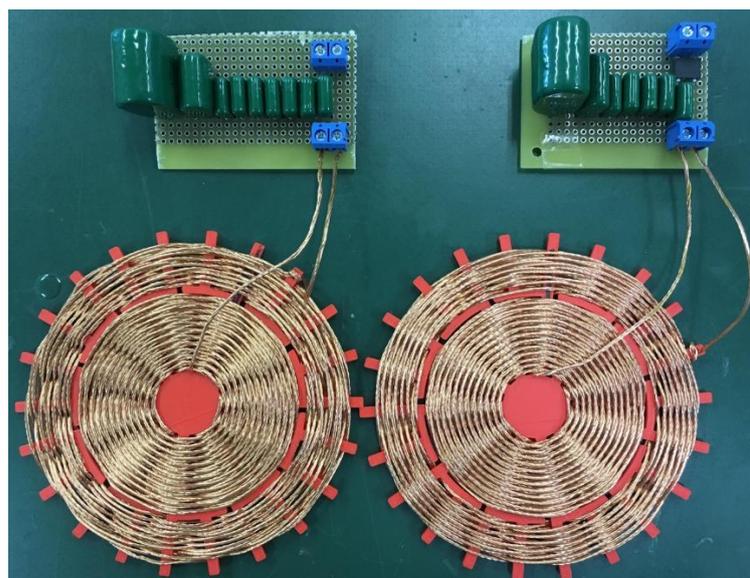


Fig.3.4 Wireless power supply

3.2 構成部品

3.2.1 永久磁石

製作した永久磁石を図 3.5、永久磁石の図面を図 3.6 に示す。永久磁石は内径 305[mm]×外形 325[mm]×高さ 20[mm]×中心角 30°の C 型ネオジム磁石を 3 個、内径 355[mm]×外形 375[mm]×高さ 20[mm]×中心角 30°の C 型ネオジム磁石を 3 個使用している。

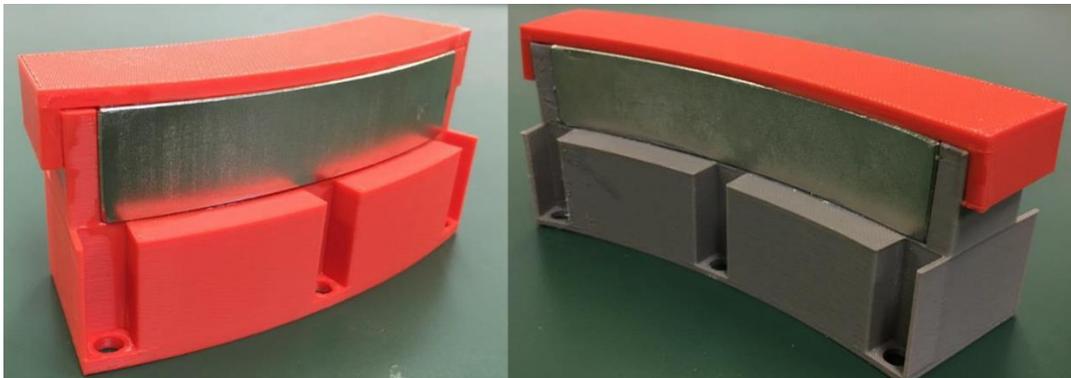


Fig.3.5 Permanent magnet

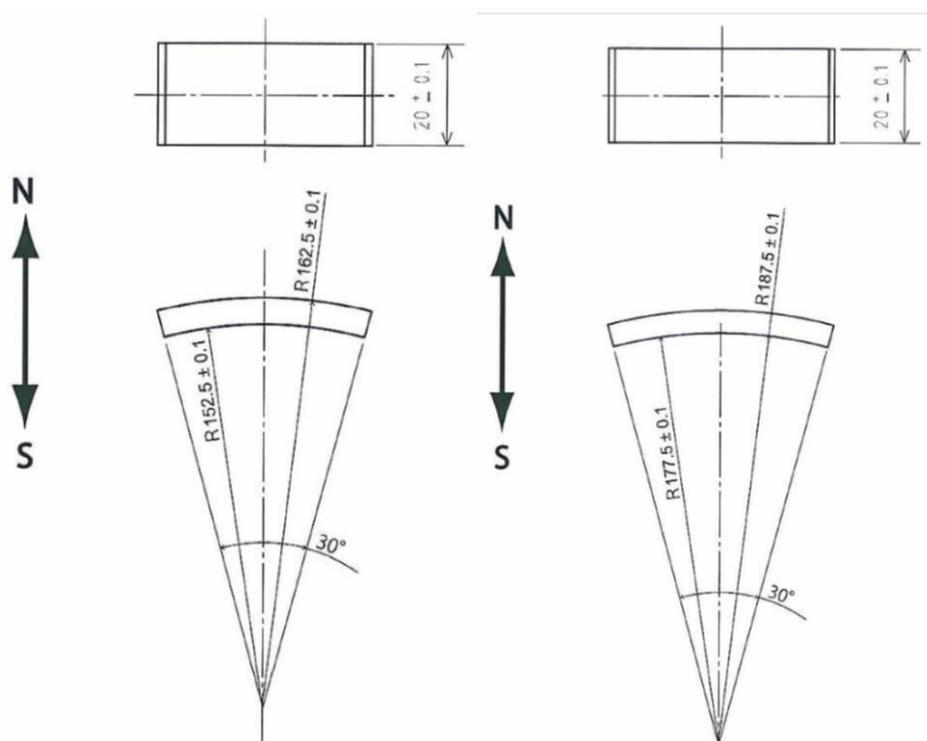


Fig.3.6 Drawing of permanent magnet

3.2.2 制御用電磁石

製作した鉛直、回転制御用電磁石と水平制御用電磁石を図3.7、電磁石の鉄心の図面を図3.8、図3.9に示す。各電磁石は、SS400で製作された鉄心に、3Dプリンタで製作されたボビンを2個組み合わせ、ボビンに銅線(PEW線、直径0.5[mm])を巻き付けている。鉛直、回転制御用電磁石は、コイルの巻き数250回巻を2箇所、水平制御用電磁石は、コイルの巻き数300回巻を1箇所取り付けている。

この電磁石によって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。解析の電磁石のモデルを図3.10に示す、また解析条件を以下に示す。

- ・ 浮上コイルの電流：1[A]
- ・ 図3.10に示すZ=0[mm]のX軸上に0~40[mm]までの5[mm]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1[A]
- ・ 電磁石の磁極間距離：15[mm]と20[mm]の2種類

解析の結果を図3.11に示す。図3.11のように、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(20[mm])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となった。浮上支持力は永久磁石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。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15[mm]のものを採用している。

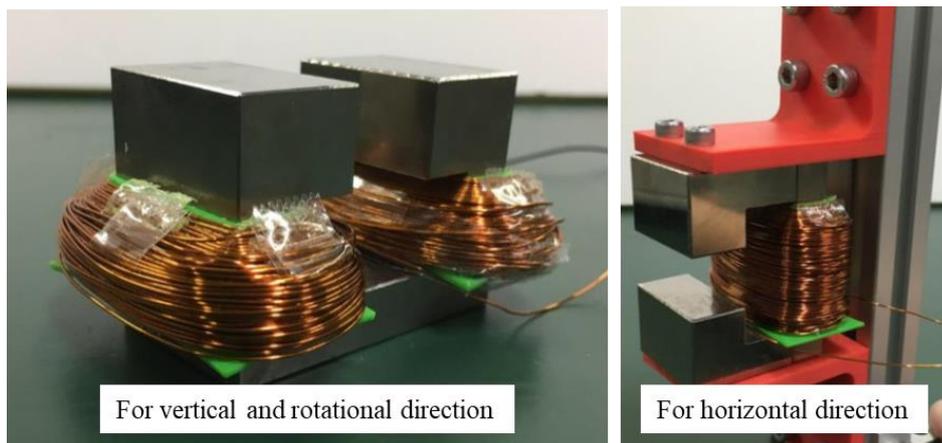


Fig.3.7 Electromagnet

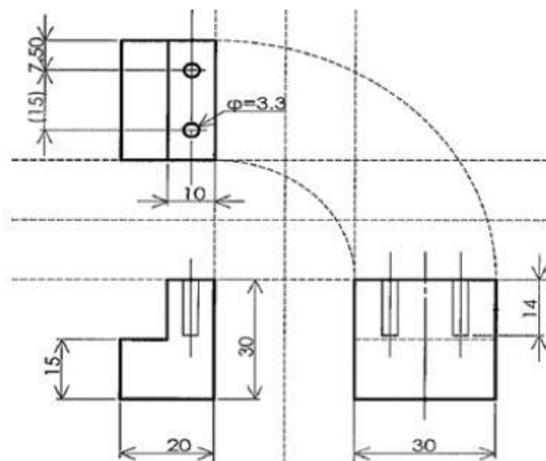


Fig.3.8 Drawing of Iron core.1

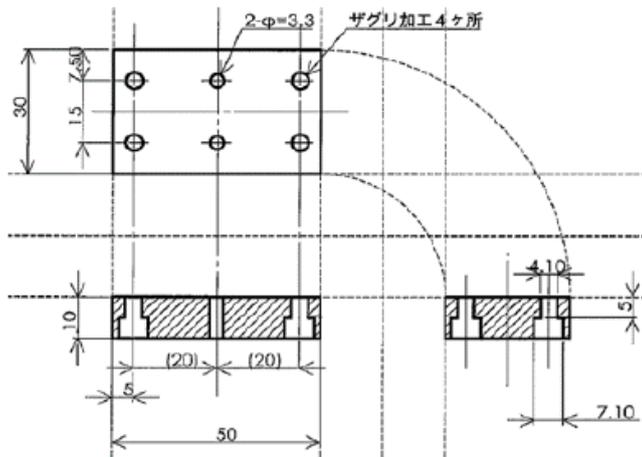


Fig.3.9 Drawing of Iron core.2

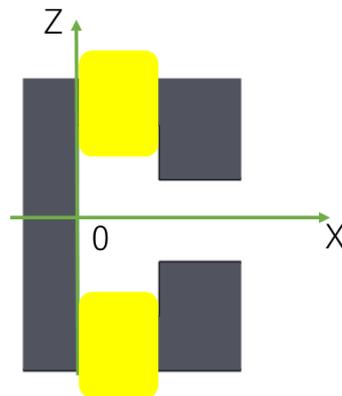


Fig.3.10 analysis model.

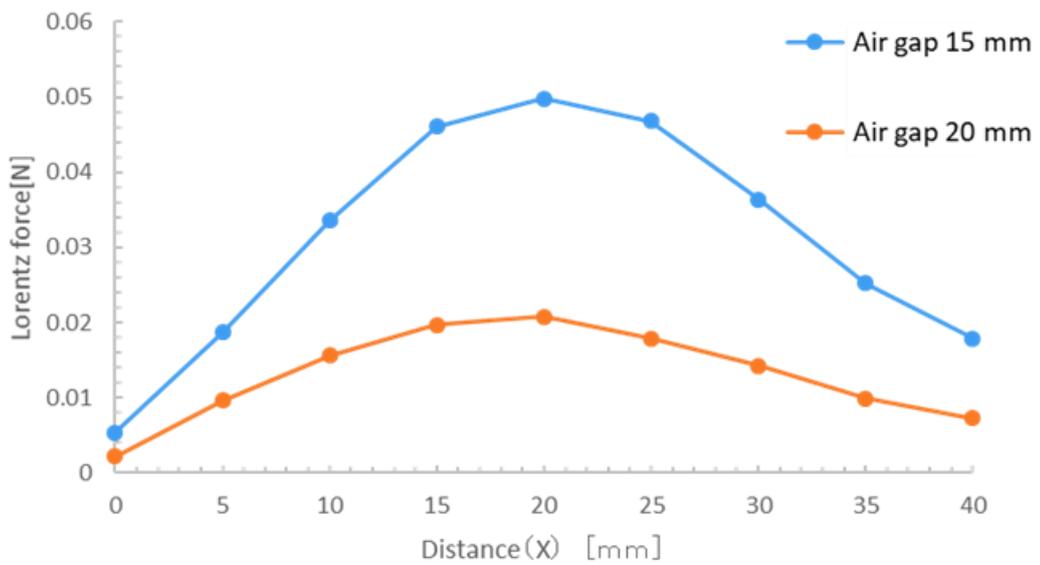


Fig.3.11 analysis result.

3.2.3 浮上コイル

図3.3に示された浮上コイルの詳細を説明する。浮上コイルは、直径は約350[mm]であり、3Dプリンタで製作したボビンに、銅線(PEW線、直径0.5[mm])を巻いている。このコイルを3箇所巻き、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けられている。それぞれの巻き数は50回、25回、25回となっている。ボビンの中央には、非接触給電の受電部を配置している。これにより、電力伝送機能を持った磁気浮上システムとして機能させることを可能にしている。

3.2.4 非接触給電

図3.4に示した給電装置の詳細を説明する。本研究の給電装置は、前述で示した通り、磁界共鳴方式を採用している。給電コイルは、3Dプリンタで製作したボビンに、リッツ線(0.3[mm]×7本撚り)をスパイダー巻で85回巻き付けており、送電側と受電側に分かれている。その際に用いた、ボビンの図面を図3.12に示す。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ており、受電部にはそれに加えて、ブリッジダイオードを組み込むことにより直流に変換している。これらの給電コイルを含めた回路を図3.13、各コイルのインダクタンス、コンデンサの容量を表3.1に示す。また、コンデンサはメタライズドポリプロピレンフィルムコンデンサ、ダイオードはショットキーバリアダイオードを用いている。

実際に製作した給電装置にて、給電距離と入力電圧が与える受電側の電流値の実験を行った。実験結果を表3.2に示す。実験結果の入力電圧42[V]の給電距離3[mm]以降は、over lode したため、計測できなかった。結果より、安定して1[A]を出力し、over lodeの可能性が低い入力電圧35[V]を採用している。

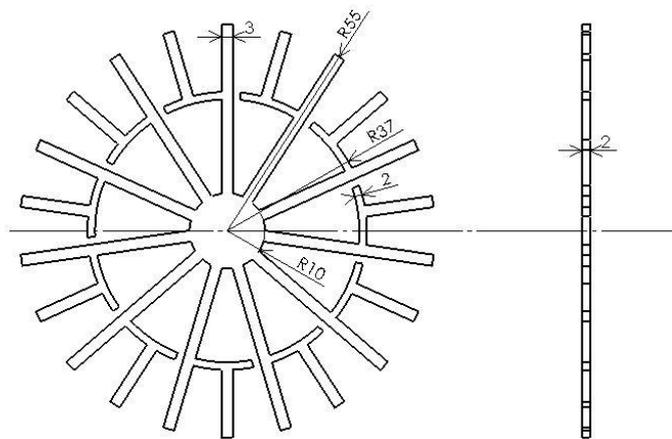


Fig.3.12 Drawing of bobbin.

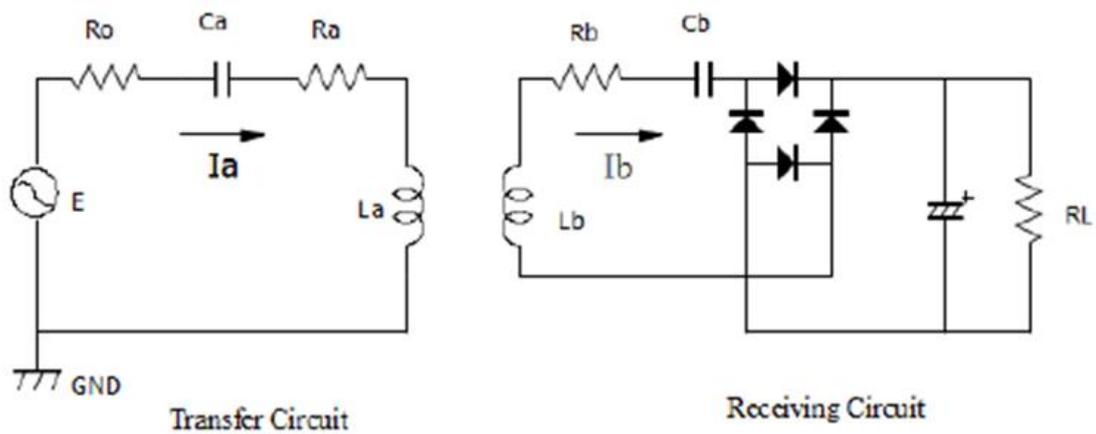


Fig.3.13 Magnetic levitation circuit

Table.3.1 Measured value

	Coil inductance [μH]	Capacitor capacity [μF]
Transmission side	195.76	1.29
Receiving side	219.98	1.15

Table.3.2 Receiving side current [A]

Input voltage \ distance	0[mm]	1[mm]	2[mm]	3[mm]	4[mm]	5[mm]	6[mm]	7[mm]
25[V]	0.875	0.891	0.917	0.950	0.986	1.020	1.055	1.080
35[V]	1.234	1.257	1.293	1.338	1.389	1.436	1.485	1.521
40[V]	1.404	1.436	1.478	1.528	1.588	1.647	1.702	1.742
42[V]	1.465	1.502	1.545	-	-	-	-	-

3.2.5 鉛直方向用センサ

鉛直方向の浮上位置の測定に使用しているセンサを図3.14に示す。鉛直方向の浮上位置の測定には、OMRON社の形ZX-LDA11-N スマートセンサを4つ、形ZX-LT030 透過型センサヘッドを4つ使用し、受光量の変化から浮上位置を読み取っている。仕様の詳細を表3.3に示す。

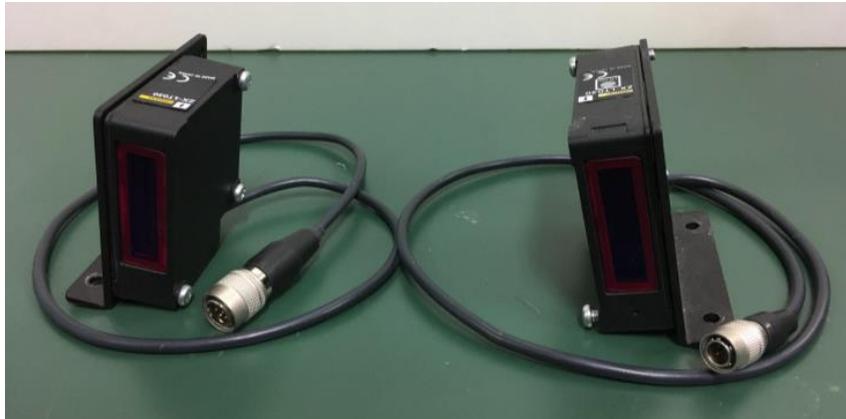


Fig.3.14 Transmission sensor

Table.3.3 Sensor and amplifier specifications

型番	センサユニット部		アンプユニット部
	ZX-LT030	ZX-LT-010	ZX-LDA11-N
電源電圧	DC12~24 ± 10%		
消費電力	3.4W 以下 (電源電圧 24V 時, 消費電流 140mA 以下)		
検出距離	0~500mm		-
検出幅	30mm	10mm	-
最小検出物体	φ=0.3mm 不透明物体	φ=0.1mm 不透明物体	-
質量	約 450g	約 220g	約 350g
分解能	12μm	4μm	
測定周期	150μs		
設定可能平均回数	1/2/4/8/16/32/64/128/256/512/1024/2048/4096 回		

3.2.6 水平方向用センサ

使用している反射型レーザーセンサを図3.15, 図3.16に示す. 反射型レーザーセンサは, OMRON社の形ZX-LD40 レーザー変位センサを1つ, KEYENCE社のセンサヘッドLB-040を1つ使用している. 仕様の詳細を表3.4に示す.



Fig.3.15 Reflective sensor (OMRON)



Fig.3.16 Reflective sensor (KEYENCE)

Table.3.4 Sensor specification

型番	OMRON 社	KEYENCE 社
	ZX-LD40	LB-040
検出距離	40mm	40mm
検出幅	±10mm	±5mm
分解能	2μm	2μm

3.2.7 機構の土台

機構の土台はアクリル板を使用している。アクリル板は、縦450[mm]、横450[mm]、厚さ8[mm]のアクリル板を、図3.17のようにレーザー加工し、土台を制作している。全長は約560[mm]である。この土台に形成された穴により、電磁石などの構成部品をボルトにより固定している。

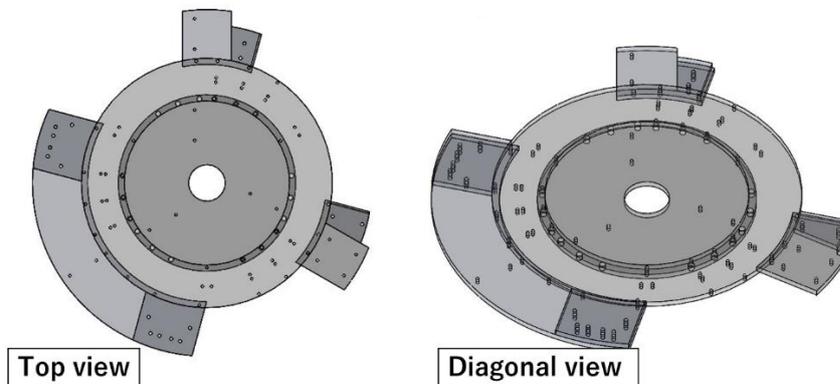


Fig.3.17 Mechanism foundation

3.3 制御原理

3.3.1 鉛直・水平方向

電磁石による制御方法と配置方向を図3.18、浮上コイルの制御モデルを図3.19に示す。鉛直方向の制御は図3.18の左側のように、水平方向から浮上コイルを挟みこむ形をとることで鉛直方向のローレンツ力を発生させる。水平方向の電磁石は図3.18の右側のように、浮上コイルに対して鉛直方向に挟み込むことにより、水平方向のローレンツ力を発生させる。これらの原理により電流値を調整することにより、制御を行っている。また、鉛直方向の制御は、永久磁石によるローレンツ力と浮上コイルの重力を釣り合わせるにより、少ない電力で鉛直方向の制御を可能にしている。

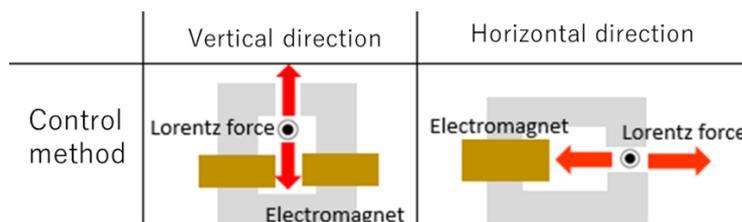


Fig.3.18 Electromagnet for vertical and horizontal control

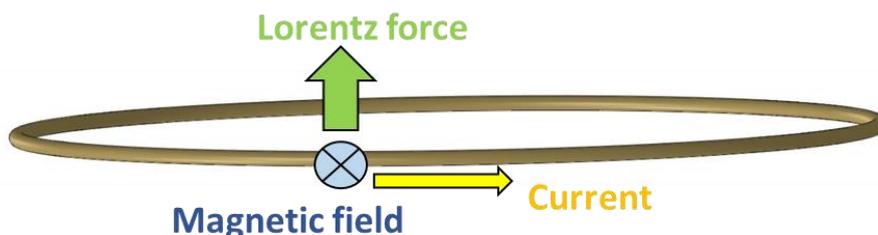


Fig.3.19 Control method for XYZ axis

3.3.2 回転方向

電磁石と浮上コイルの配置方向を図3.20, 浮上コイルの制御モデルを図3.21に示す. 浮上コイルに対して電磁石を鉛直方向の制御時と同様に, 水平方向から挟みこむように配置する. それにより, 浮上コイルを図3.21に示すように浮上コイルを鉛直方向に上下させることで斜め方向にローレンツ力を発生させ, トルクを発生させる. これにより回転制御を行う.

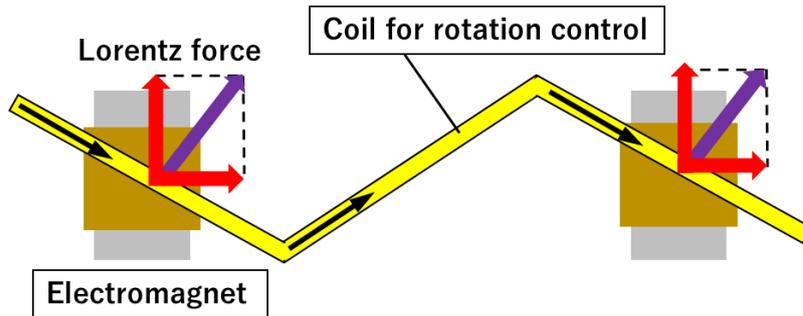


Fig.3.20 Electromagnet for rotation control

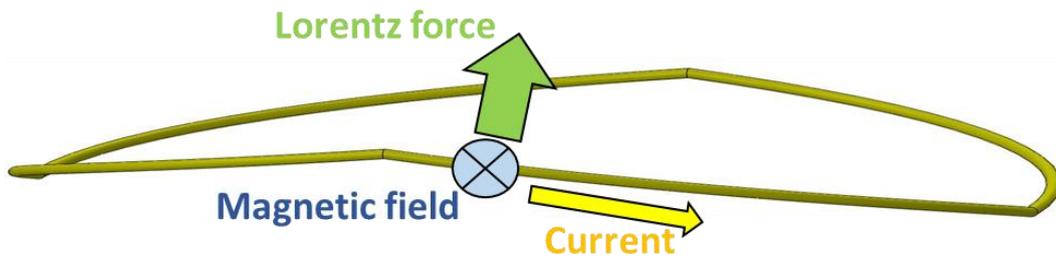


Fig.3.21 Control method for rotation direction

3.4 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 3.22 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 3.23 のようにセンサと浮上コイルの距離を随時検知する.

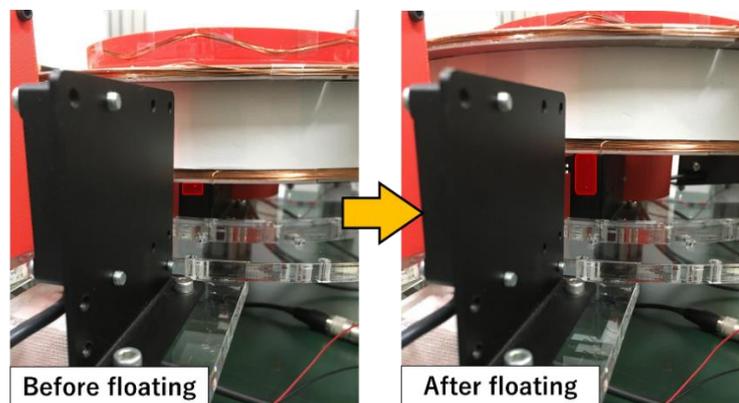


Fig.3.22 Summary of the vertical sensor

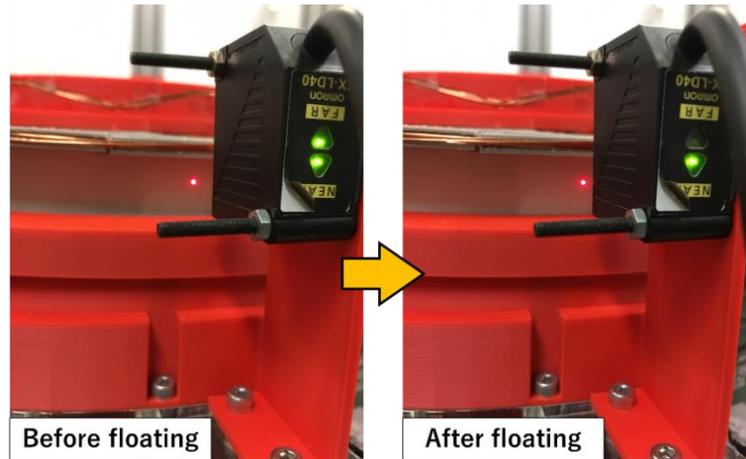


Fig.3.23 Summary of the horizontal sensor

3.5 制御システムの概要

鉛直・水平制御のシステムを図3.24，回転制御のシステムを図3.25に示す．鉛直・水平制御はフィードバック制御を行う．3つの透過型センサで鉛直方向，2つの反射型センサで水平方向の浮上位置を計測する．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内のMATLABのプログラムにより，計算処理される．計算後の値はDSP ボードを介し，アンプにより増幅され，各電磁石に電流が供給される．

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．

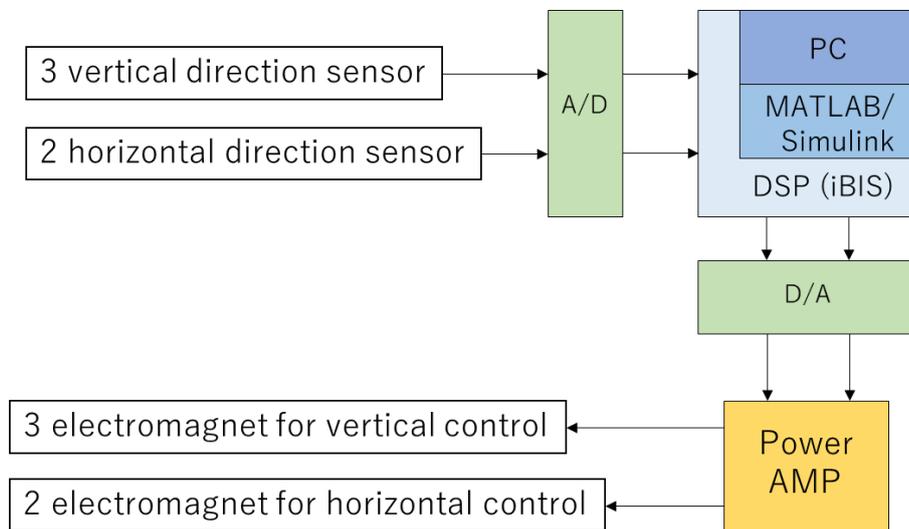


Fig.3.24 Control system for vertical and horizontal

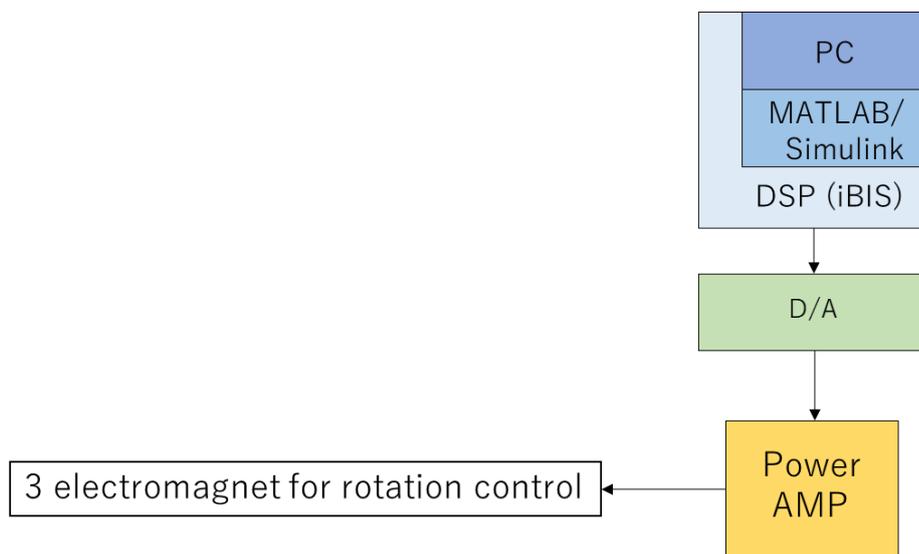


Fig.3.25 Control system for rotation

3.6 実験装置の構成

2.6.1 直流電源 (パワーアンプ用)

パワーアンプ(Motor Controller(ADS50/10・ADS50/5))の直流電源にはAND社のAD-8722Dを使用する。その写真を図3.26に示す。



Fig.3.26 DC Power Source

3.6.2 パワーアンプ（電磁石用）

鉛直制御用電磁石に電流を供給するパワーアンプとして、Maxon社のMotorController (ADS50/10・ADS50/5)を電流制御モードに設定し使用する。その写真を図3.27に示す。水平制御用電磁石に電流を供給するパワーアンプとして、株式会社高砂製作所の多機能4象限バイポーラ電源BSP120-5を使用する。その写真を図3.28に示す。

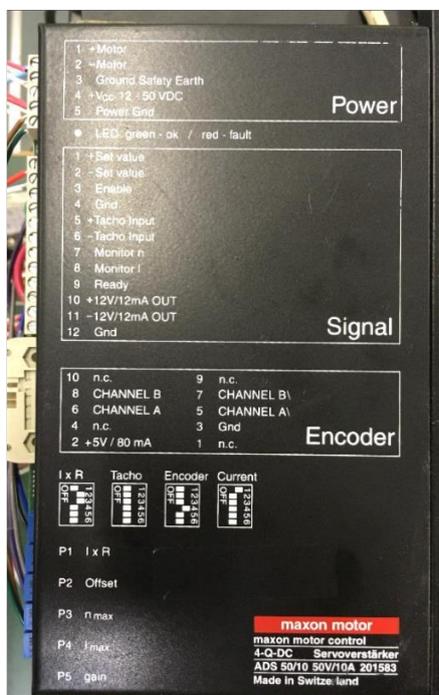


Fig.3.27 Power Amplifier 1



Fig.3.28 Power Amplifier 2

3.6.3 ADコンバータ

センサで読み取った値をデジタル信号、PCから出力された値をアナログ信号に変換するADコンバータとして、エムティティ株式会社のTB-37を2つ使用する。その写真を図3.29に示す。



Fig.3.29 AD Converter

3.6.4 コントローラ

コントローラとして、Mis社のiBIS 型式DSP7101A を使用する。その写真を図3.30に示す。コントローラの計算にはMathWorks 社のMATLAB(2016)のSimulink を使用する。



Fig.3.30 Controller (Mis)

3.6.5 直流電源（センサ用）

センサの直流電源にはTKD-Lambda 社のHWS30A-12A を使用する。その写真を図3.31に示す。この直流電源は、各センサの電源として使用する。



Fig.3.31 DC Power Source

3.7 電磁石への入力

3.7.1 鉛直制御

鉛直電磁石と鉛直方向の浮上位置測定用のセンサ配置を図3.32に示す。電磁石と鉛直方向を計測するセンサはそれぞれ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PD補償(P : 1, D : 0.3)をかけることで制御する。I制御を加えていないのは、回転制御にて発生したローレンツ力が鉛直方向の浮上位置に影響を及ぼすため、誤差の蓄積をしないPD補償のみで制御を行う。また、浮上コイルの浮上位置は図3.11の結果から、ローレンツ力が最も発生しやすい位置の目標値4.5[mm]とした。

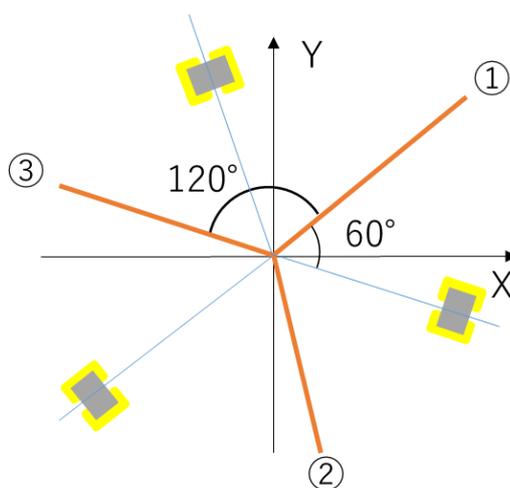


Fig.3.32 Position relation 1

3.7.2 水平制御

図 3.33 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，式 (1)，式 (2) ようにセンサ①②の出力値にそれぞれ $\sin 15^\circ$ ， $\cos 15^\circ$ をかけることにより，任意の X 軸，Y 軸上の浮上位置を測定する．測定した値に PD 補償(P : 1，D : 0.3)をかけ，水平方向の電磁石に出力する．これにより X 軸，Y 軸上における目標値との偏差を読み取り，フィードバック制御を可能にする．

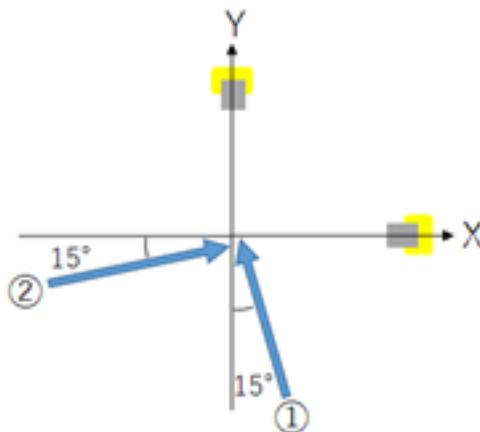


Fig.3.33 Position relation 2

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

$$Y: ① \times \sin 15^\circ + ② \times \sin 15^\circ \quad (2)$$

3.7.3 回転制御

回転制御用の電磁石は図3.2のように，浮上コイルに対して上から配置する形で3つの電磁石を 120° 毎に配置している．この3つの電磁石を用いて最大 $\pm 4[\text{A}]$ ，位相 120° の三相交流を流し，フィードフォワード制御を行う．回転制御は，鉛直・水平制御を開始し，浮上位置が安定した完全非接触状態で開始する．

3.8 統合実験

鉛直・水平・回転の統合制御実験を行った。実験結果を図 3.34 に示す。図 3.34 の上のグラフが鉛直方向の浮上位置、下のグラフが水平方向の浮上位置を示している。この実験時の目標値は鉛直方向 4.5 [mm]、Y 方向、X 方向それぞれ 4 [mm] に設定した。

実験は、記録開始後約 3 秒後に浮上コイルに給電を開始し、鉛直・水平制御を同時に約 8 秒付近で開始した。浮上位置が安定し、完全非接触状態になった記録開始後約 17 秒後に、回転制御を開始した。回転制御開始直後は、円周方向に振り子運動をするような挙動を見せた。回転制御開始後約 10 秒後浮上コイルが一定方向に回転を始めた。

実験結果から水平方向の Y 軸方向は目標値を 0.1 [mm] 程の偏差があるが、鉛直・水平制御をかけることにより、浮上位置が安定していることがわかる。しかし、回転制御開始直後から鉛直方向の浮上位置が振動した。これは、「3.3.2 回転方向」で述べたように、回転制御にて発生した円周方向に対して、斜め方向に発生したローレンツ力の影響を受けているためであり、グラフからも三層交流の波形がはっきり見える。回転が始まると鉛直方向、水平方向ともに小さな振動が激しくなっている。これはセンサのノイズもあるが浮上コイルの表面的な粗さによる影響が大きいと考えられる。浮上コイルは製作の都合 8 つに分けて 3D プリンタで製作し、組み合わせている。そのため、歪みやたわみが発生し、回転時にセンサの振動として発生しているのだと考えられる。

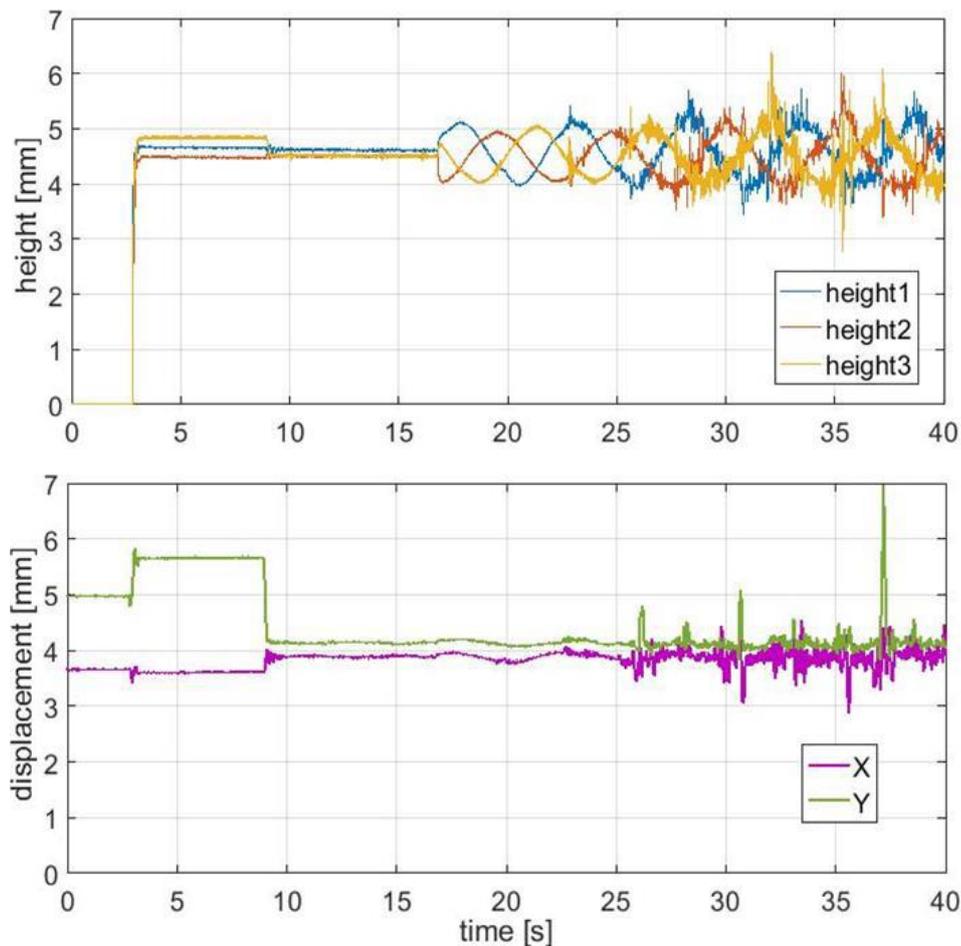


Fig.3.34 Integration experiment results

3.9 まとめ

第3章では、既存の磁気浮上システムの概要と、構成部品、制御方法、実験結果を示した。実験結果より、非接触給電と組み合わせることにより非接触状態で浮上コイルに電力を供給し、鉛直・水平制御を行うことで、完全非接触状態から回転制御をかけることにより、浮上体を回転させることが出来た。しかし、既存の磁気浮上システムでは、機構が複雑であり、今後の研究において、モータとしての有用性を示すことができない。このことより、第5章では、制御方法から見直すことで浮上体と機構の簡素化を図った。

第4章 新機構の提案

4.1 新機構の開発

製作した回転制御機構の全体を図4.1, 浮上体を図4.2に示す. 非接触給電はこれまでと同様の図3.4で示すものを使用する. 図4.1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4.1の4), 鉛直制御用の電磁石を3個 (図4.1の2), 水平・回転制御用の電磁石を6個 (図4.1の3), 透過型レーザーセンサを3個 (図4.1の5), 反射型レーザーセンサを2個 (図4.1の6), 非接触給電機構 (図4.1の1) で構成されている. また, 図4.2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. 給電装置の回路も既存のものと同様であり, 共振点は10[KH]である.

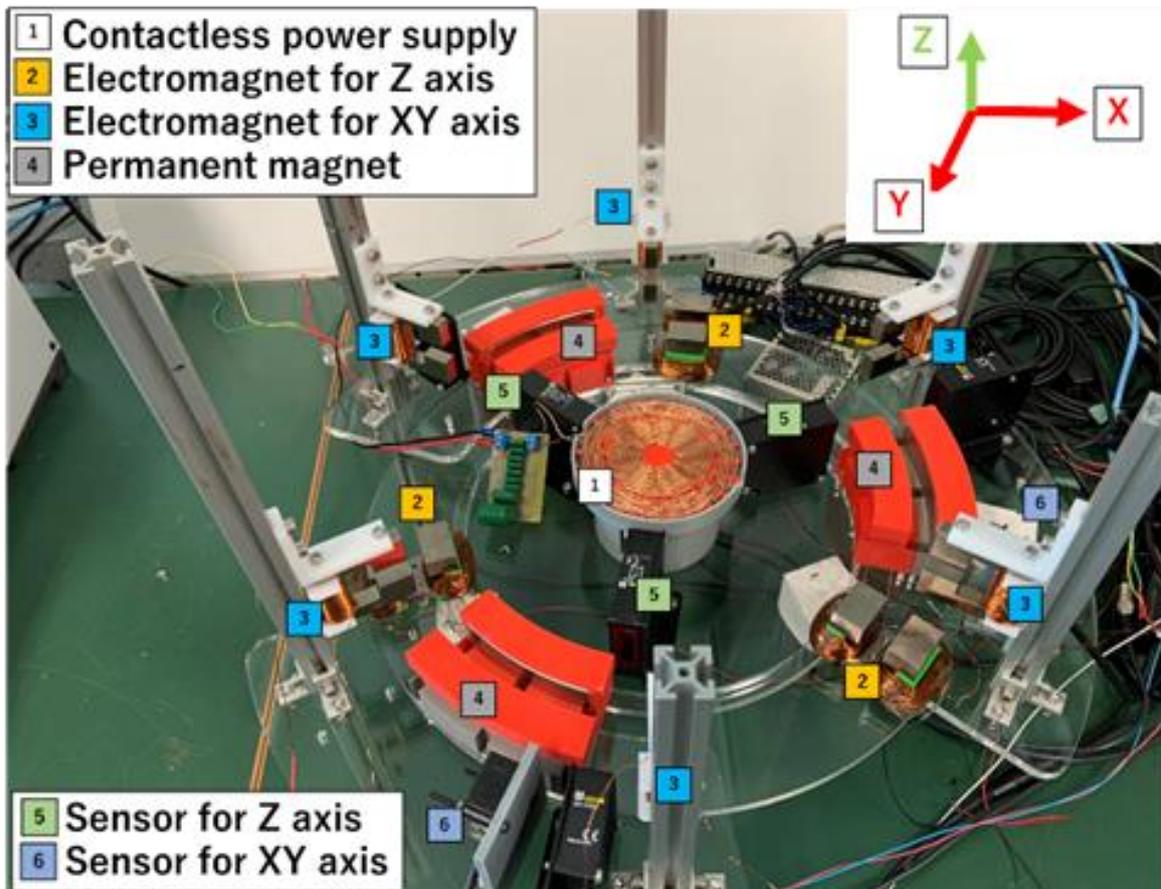


Fig.4.1 New magnetic levitation mechanism

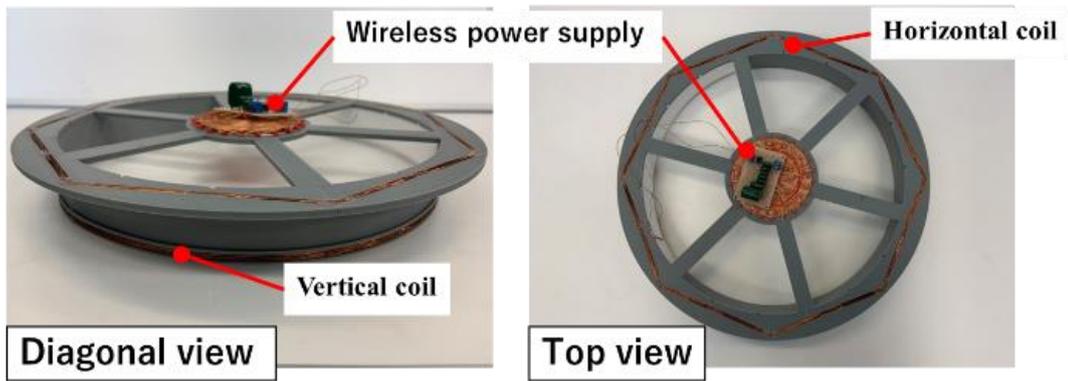


Fig.4.2 New levitation coil

4.2 変更した構成部品

4.2.1 制御用電磁石

鉛直方向用の電磁石は既存の電磁石と同様のものを使用しているが水平・回転方向の電磁石を変更した。変更した電磁石を図4.3, 図面を図4.4に示す。鋼材はこれまでと同様のSS400である。コイルには直径0.5[mm]のPEW線を使用し、300回巻きにしている。

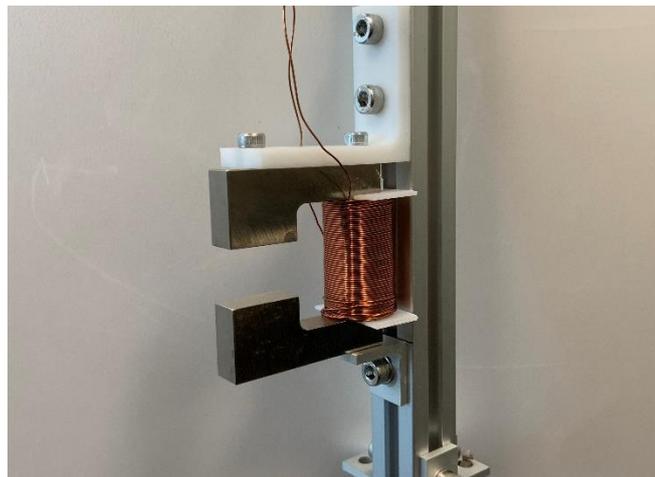


Fig.4.3 Electromagnet for horizontal and rotation control

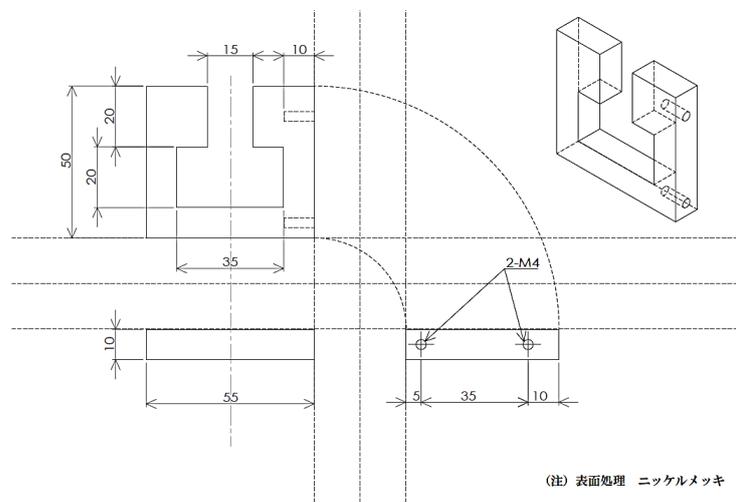


Fig.4.4 Drawing of Iron core

4.2.2 浮上コイル

新しく製作した浮上コイルの図面を図4.5に示す。浮上コイルの骨格は3Dプリンタで作成し、図4.2に示すように浮上体の下部には鉛直方向用のコイル、上面に形成された溝には水平・回転方向用のコイルを巻き付けている。鉛直方向は50回、水平・回転方向は30回巻きである。既存のものとの大きな違いは、制御方向に合わせて鉛直、水平、回転用のコイルを別々にしていたが、今回は水平と回転を1つのコイルにしている点である。これにより、浮上体の軽量化を可能にした。

制御方法については後の章で説明するが、今回の水平・回転方向用コイルは、半径方向に対して上下させている。上下させる幅は、図4.3に示す電磁石の挟み込む幅に合わせて20[mm]とし、45°毎に同じパターンを刻む。

給電装置は前回と同様、中央に配置し、給電装置と一体化している。

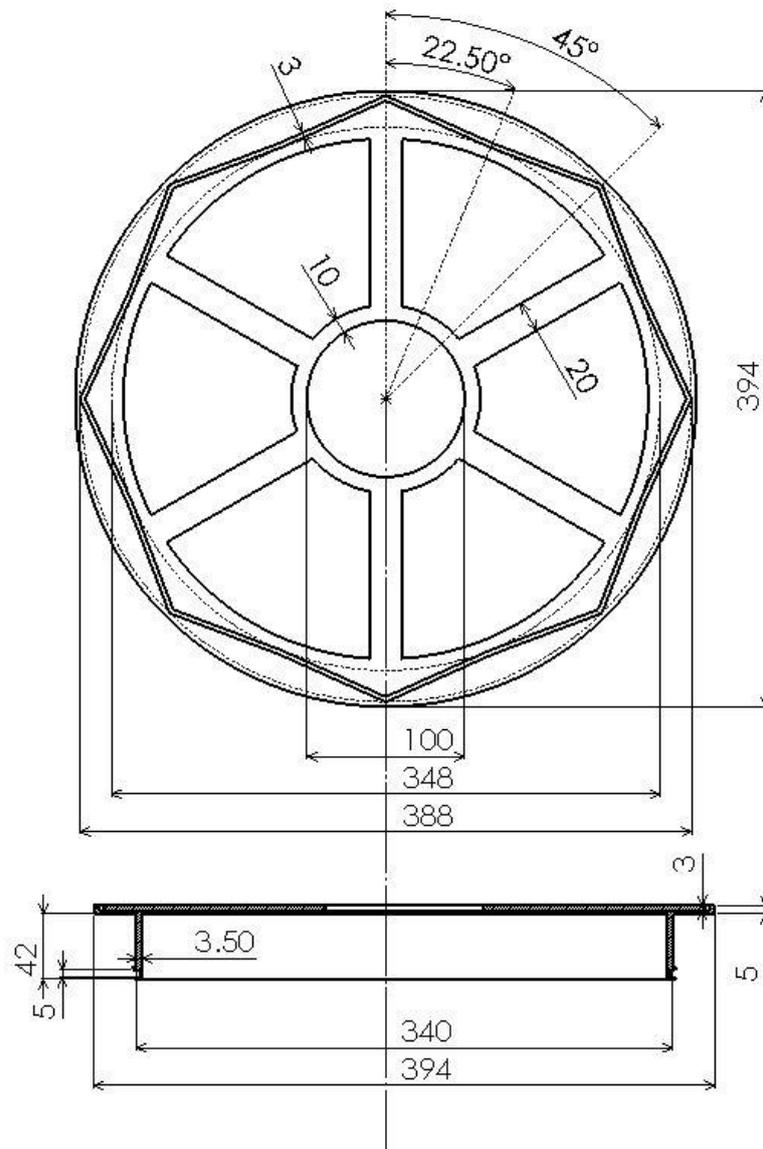


Fig.4.5 Drawing of levitation coil

4.2.3 水平方向用センサ

新機構では、センサのサンプリング時間の差異を無くすためにKEYENCE社のセンサヘッドLB-040を変更し、OMRON社の形ZX-LDL40のレーザー変位センサにした。センサヘッドの変更により、アンプユニットをOMRON社の形ZX-LDA11-Nに共通化することで、すべてのセンサのサンプリング時間を0.0006秒に変更し、4回の測定平均をとるようにした。

4.2.4 機構の土台

機構の土台は既存のものと同様のアクリル板を使用している。アクリル板は、縦450[mm]、横450[mm]、厚さ8[mm]のアクリル板を、今回は図4.6のようにレーザー加工し、土台を制作している。全長も同様の約560[mm]である。また、今回は安全面を考慮し、機構に角がない設計をしている。

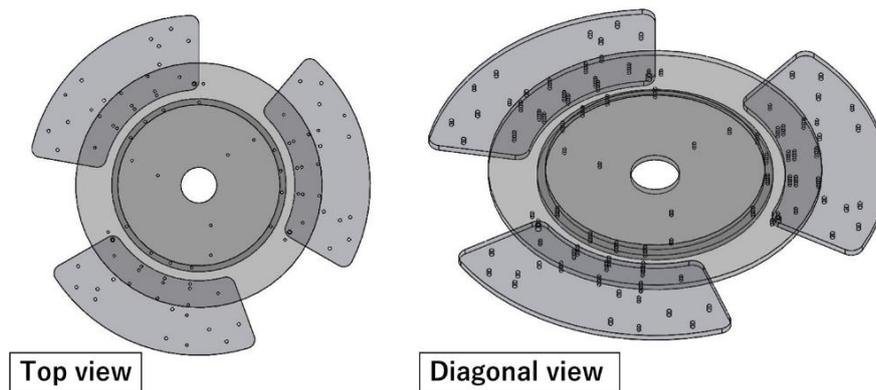


Fig.4.6 Mechanism foundation

4.3 制御原理

鉛直方向と水平方向の制御方法は既存の機構と同じ方法で行う。回転方向の制御時のモデルを図4.7に示す。図の左側に示すように、回転方向の制御用電磁石は、鉛直方向から挟みこむ形をとる。これにより、図の右側のように磁場を紙面に向かって奥側に発生させることができ、半径方向に対して斜め方向にローレンツ力を発生させ、トルクに変換する。各電磁石の磁場の向きは、浮上コイルの回転角に依存し、適切な位置で磁場を増減させることにより、回転を可能にする。

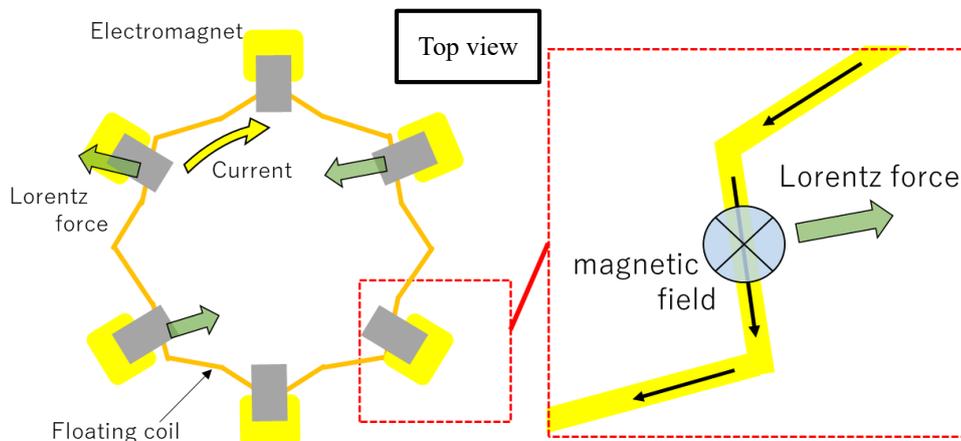


Fig.4.7 Control new method for rotation direction

4.4 センサの測定原理

鉛直・水平方向の浮上位置は3章で説明したものと同様であり，透過型センサで鉛直，反射型センサで水平方向の浮上位置を測定する．測定時の写真を図4.8，図4.9に示す．

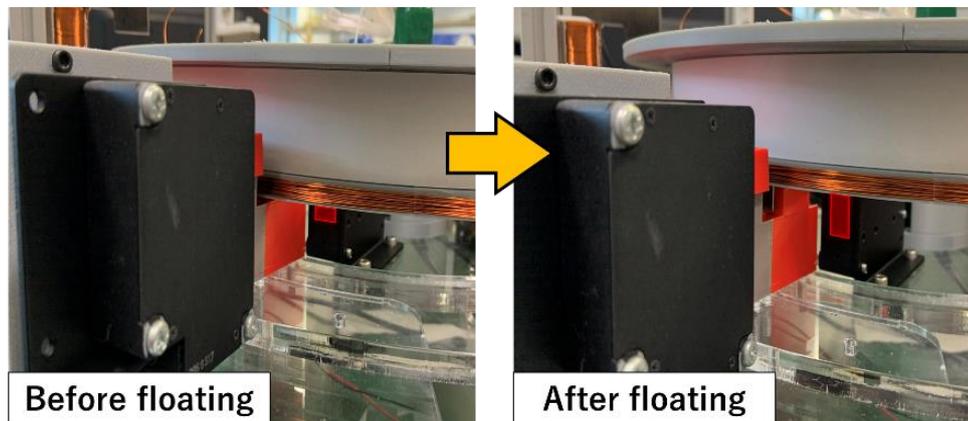


Fig.4.8 Summary of the vertical sensor

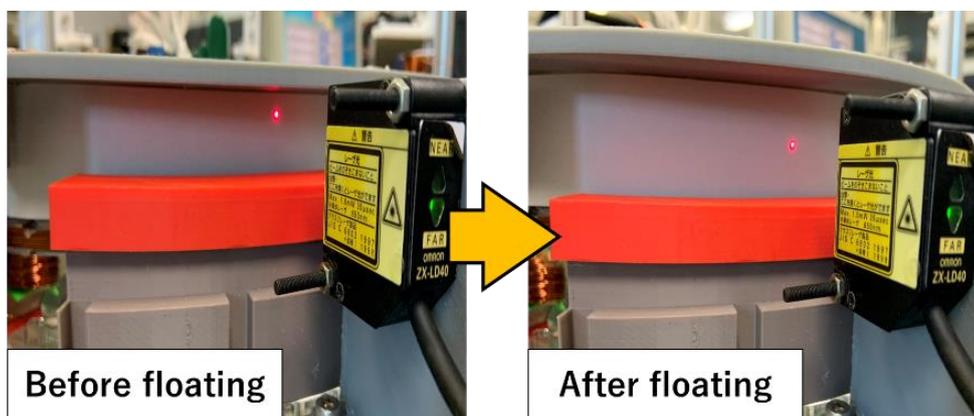


Fig.4.9 Summary of the horizontal sensor

4.5 制御システムの概要

制御システムの概要を図4.10に示す。システムの基本的な流れに変更は無いが、出力するチャンネル数の関係から、鉛直方向の制御を別のPCとコントローラを用いている。新しく導入した dSPACE 社のMicroLabBoxを図4.11に示す。

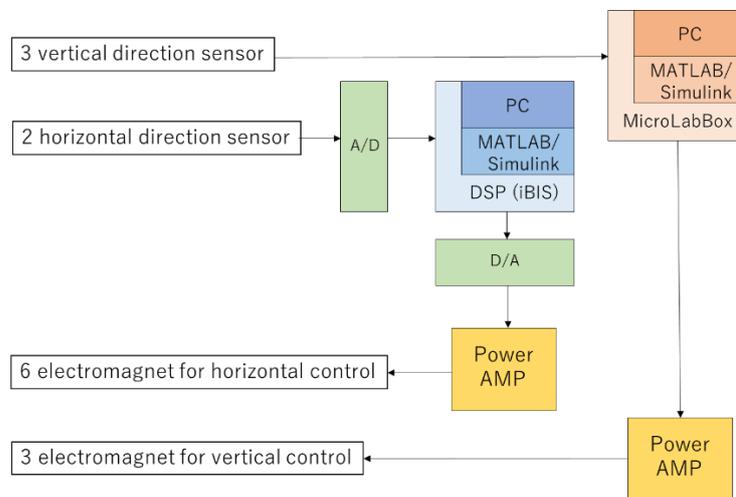


Fig.4.10 Control system for vertical and horizontal



Fig.4.11 Controller (dSPACE)

4.6 電磁石への入力

4.6.1 鉛直制御

鉛直方向のセンサと制御用電磁石の位置関係を図4.12に示す。鉛直方向の制御は3章で説明した制御方法と同じであり、各センサの中間地点に各電磁石を配置している。そのため、フィードバックする浮上位置の偏差は、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で割った値である。これにPD補償をかけることで制御を行う。鉛直方向の目標値は図3.11の結果から、最も力が発生する5[mm]とする。

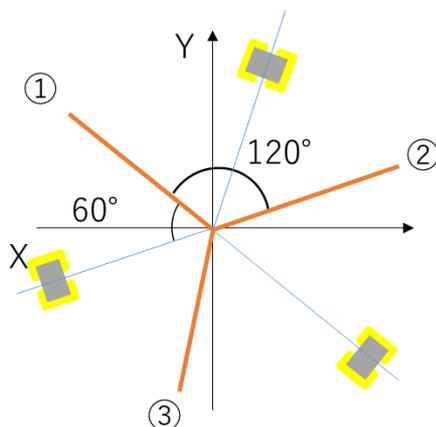


Fig.4.12 Position relation 1

4.6.2 水平制御

水平方向のセンサと水平・回転用電磁石の位置関係を図4.13に示す。X軸、Y軸の浮上位置は2つのセンサを用いる。式(1)、式(2)に示すように各センサの出力値にそれぞれ $\sin 22^\circ$ 、 $\cos 22^\circ$ をかけることにより、任意のX軸、Y軸上の浮上位置を測定する。Y軸の制御は、Y軸上に配置された電磁石1と4を使用し、制御する。X軸の制御は、電磁石2、3、5、6の4つを使用し、それぞれ0.5774倍することで制御を行う。また、水平制御も鉛直方向と同様に、フィードバック制御を行う。

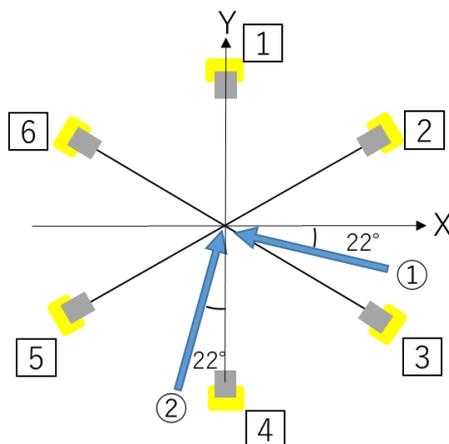


Fig.4.13 Position relation 2

$$X: (-①) \times \cos 22^\circ + ② \times \sin 22^\circ \quad (3)$$

$$Y: ① \times \sin 22^\circ + ② \times \cos 22^\circ \quad (4)$$

4.6.3 回転制御

回転制御は、水平方向制御時に使用している電磁石に、電流値を足し合わせて同時に制御を行う。図4.13で示した電磁石の番号1と4, 2と5, 3と6の電磁石をそれぞれ1つの組とし、3つに分ける。分けられた電磁石に最大 ± 3 [A], 位相 120° の三相交流を流し、フィードフォワードにて回転制御を行う。

この方法で発生するトルクを磁界解析ソフトJMAGを用いて解析した。解析条件を以下に示し、解析モデルを図4.14に示す。

- ・ 浮上コイルの電流：1[A]
- ・ 三相交流の位相： $0^\circ \sim 360^\circ$ (10° 刻み)
- ・ 浮上コイルの回転角： $0^\circ \sim 90^\circ$ (10° 刻み)
- ・ 浮上位置：電磁石の中心部

解析の結果を図4.15に示す。全体的なトルクは最大で 6×10^{-3} [N]と比較的小さい値となった。しかし、完全非接触状態での回転には、理論上、負荷がかかることが無いため、力の大きさに問題は無いと考える。次に安定点について考察する。トルクが正の値を示す際には、浮上コイルが正の方向に回転するトルクが発生し、負の値の際は逆回転のトルクを意味する。このことから安定点を見やすくしたものを図4.16に示す。図中の赤線は安定点を示し、電流の位相が進むにつれて、浮上コイルの回転角が上昇しているのがわかる。この結果から三相交流にて回転が可能であることがわかる。

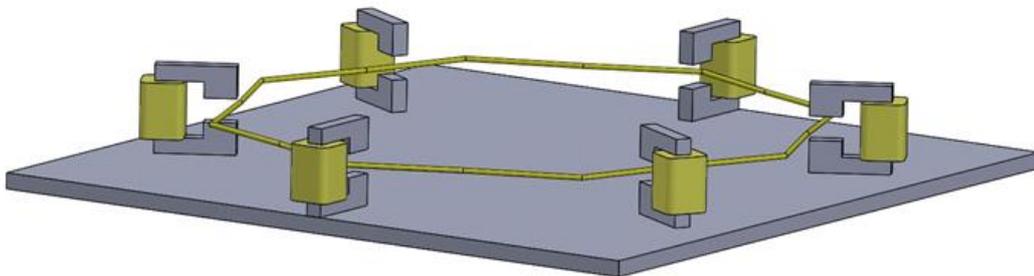


Fig.4.14 analysis model

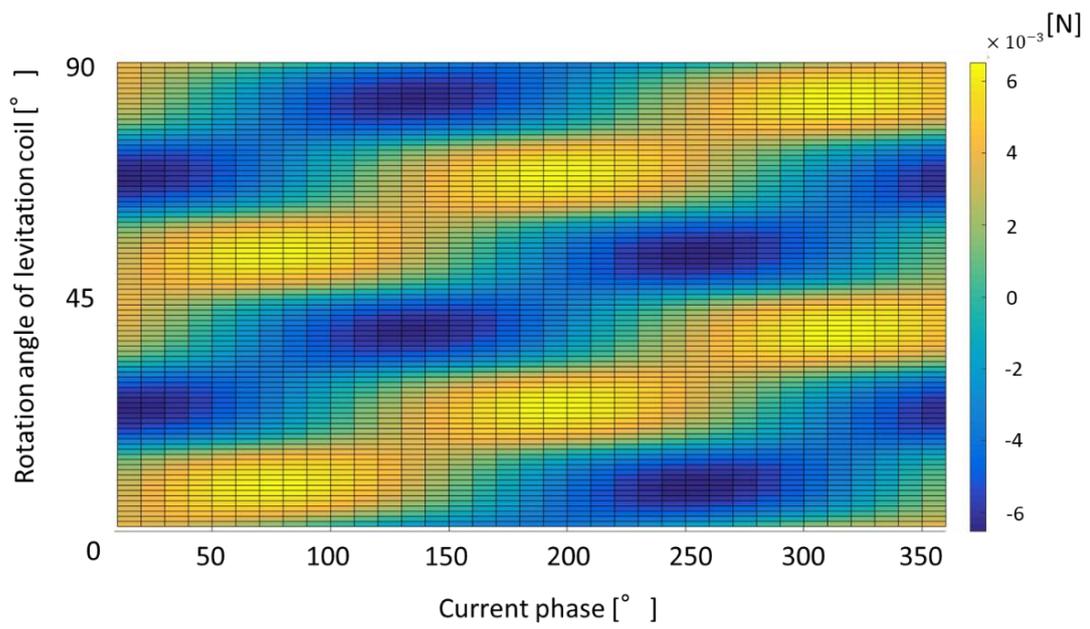


Fig.4.15 Analysis result of torque

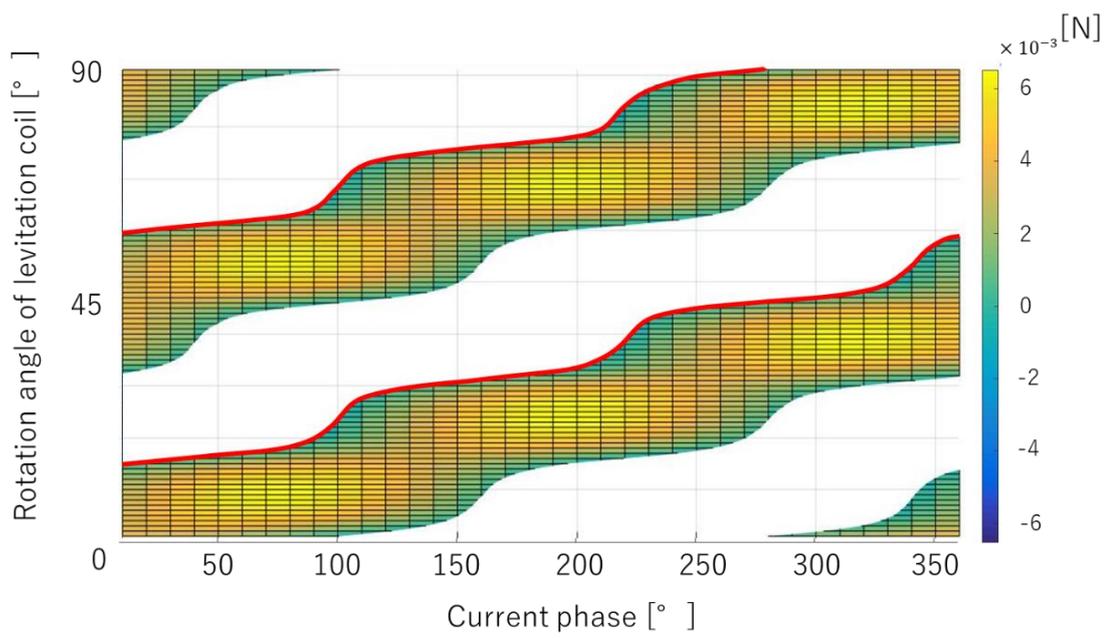


Fig.4.16 Stable point

第5章 新機構での浮上実験

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 5.1 に Y 軸方向の移動実験、図 5.2 に X 軸方向の移動実験の結果を示す。図 5.1、図 5.2 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。

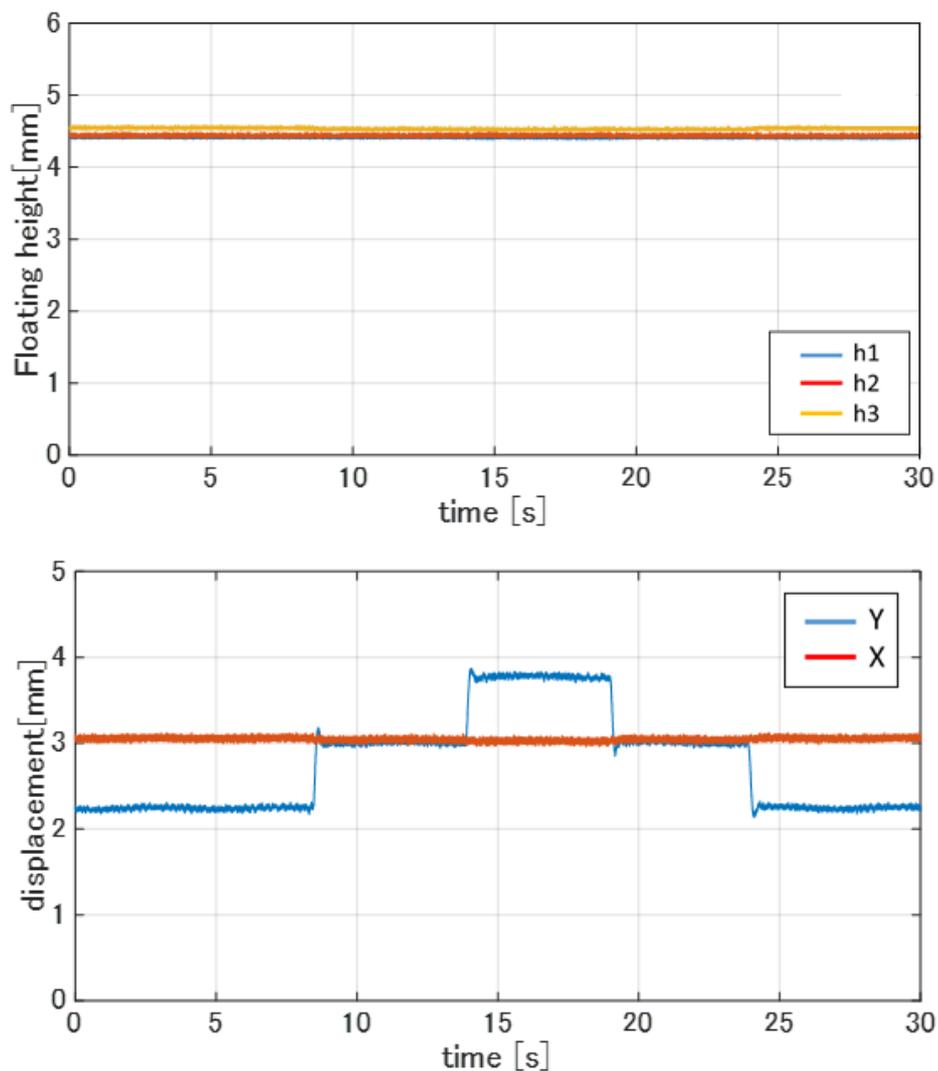


Fig.5.1 Y-axis movement experiment

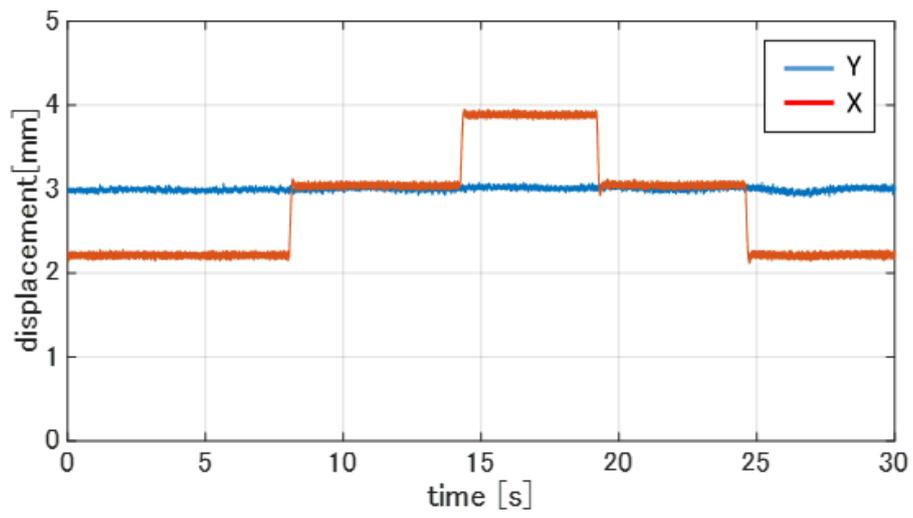
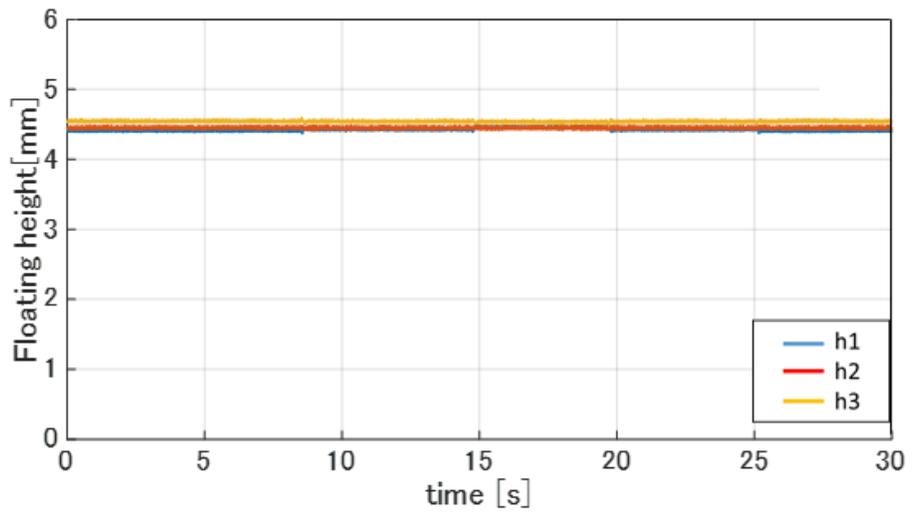


Fig.5.2 X-axis movement experiment

5.2 回転実験 (FF制御)

5.1の実験内容を踏まえ、回転方向の制御を追加し実験を行った。実験結果を図5.3に示す。また、回転方向は、FF制御にて三相交流 (最大 ± 3 [A], 3 [rad/s]) を印加し、制御した。

実験内容は、鉛直方向の目標値を 4.5 [mm]、水平方向の目標値をX軸, Y軸 2.5 [mm]とし完全非接触状態にしてから、回転方向の制御を始めた。図中のh1, h2, h3は鉛直方向の浮上位置, Y,Xは水平方向の浮上位置を示している。

鉛直方向の浮上位置が安定した、記録開始後約3秒後に水平方向の制御を開始した。その際に鉛直, 水平方向の制御は、それぞれの目標に収束した。回転制御は、実験開始後約10秒後に開始した。しかし、制御開始後すぐに回転を始めることはなく、時計回りと反時計回りを繰り返しながら三相交流の周期に、回転周期が一致すると回転を開始した。今回の実験では35秒付近から回転を始めた。

実験結果から三相交流の周期と浮上体の回転周期が一致しない限り、回転を始めることができないことがわかった。これは、発生トルクが小さいことが原因であり、慣性力に対して十分なトルクが発生させることができれば、4.6.3章で述べた安定点にいち早く収束し、三相交流の位相に追従した回転角を保つことができると考える。しかし、今回の機構では発生トルクは小さく、回転を始めるのに約25秒と時間を要した。このことから回転制御をFF制御にて安定した回転を実現するには、難しいことがわかった。そのため5.3章では、浮上体の回転角をFBし、常に一定方向に回転トルク発生させる方法を提案し、実験を行った。

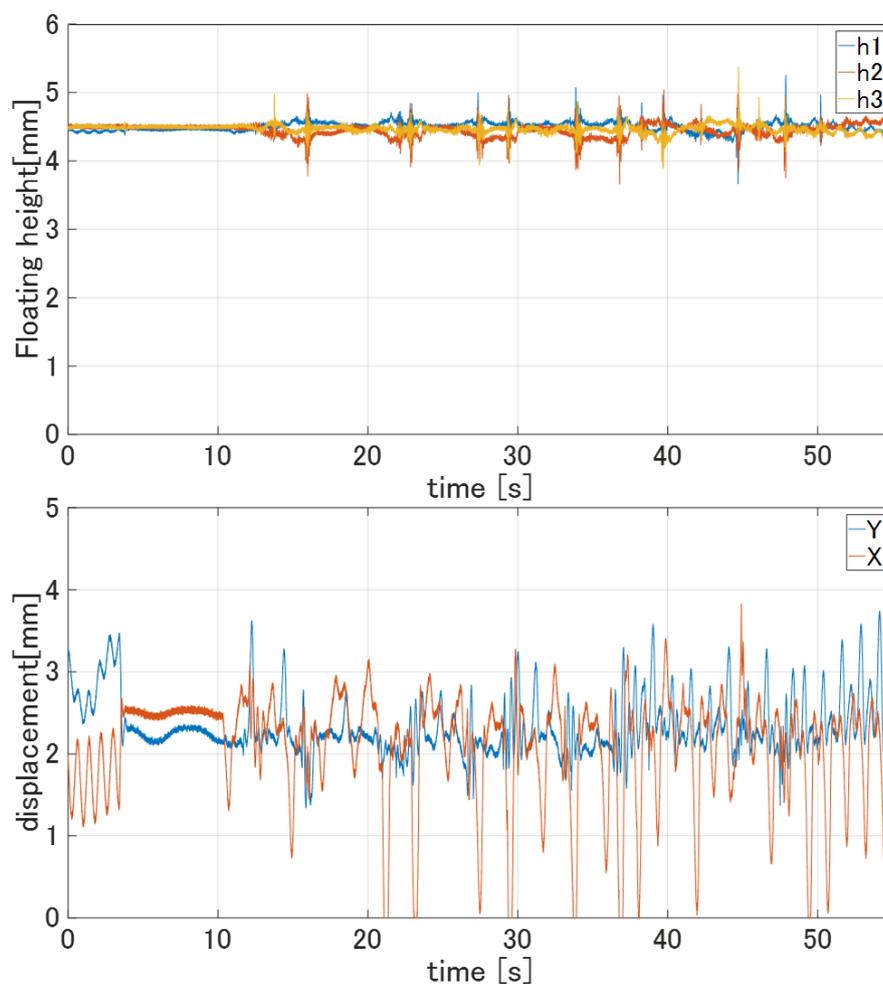


Fig.5.3 Results of rotation control experiment (FF)

5.3 回転制御 (FB 制御)

5.3.1 FB 制御の方法

回転制御において必要なことは、浮上体に巻き付けられたコイルに対して適切な方向に磁場を発生させることである。よって、浮上体に図 5.4 のように白と黒の紙を張り付け、必要な磁場の向きごとに分けた。分けた白と黒の位置をフィードバックするために、図 5.5 の反射型フォトセンサを図 5.6 のように電磁石に一体化させた。センサの値から白と黒を検出し、電磁石に適切な電流を印加することにより、安定した回転制御を行う。

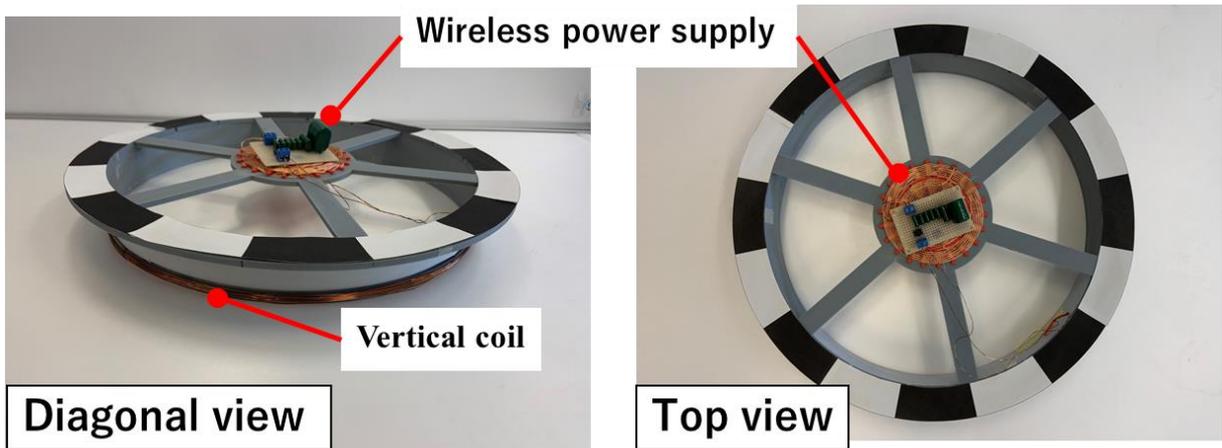


Fig.5.4 Floating body

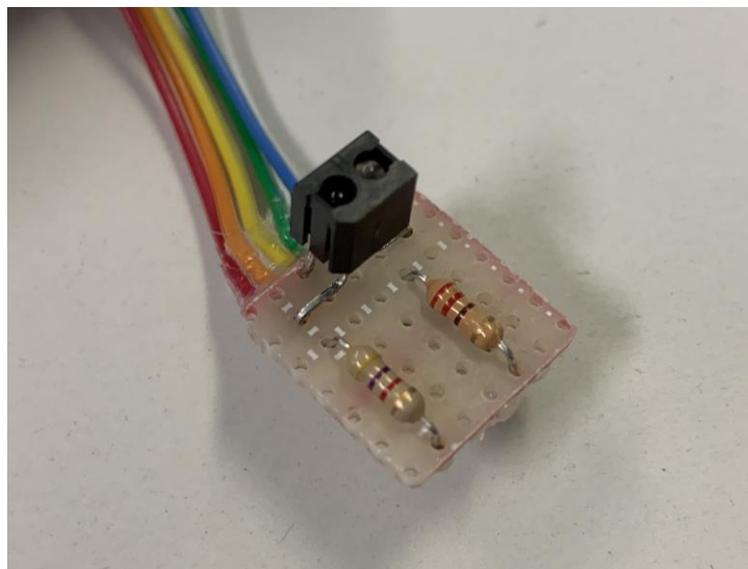


Fig.5.5 Reflective photo sensor

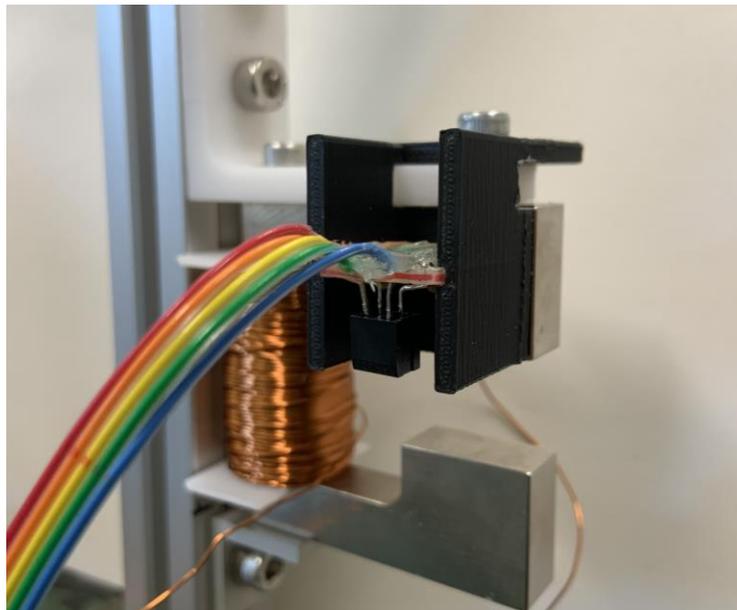


Fig.5.6 Sensor location

5.3.2 回転実験(FB 制御)

実験結果を図 5.7 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 ± 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ができなかったが制御開始後約 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 5.7 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。

5.2 の実験結果に比べ、センサを用いることにより、回転方向の安定化を実現することができた。鉛直方向の制御位置が振動的になる理由は、浮上体の表面粗さと機構の水平面のずれが考えられる。浮上体は 3D プリンタにて 6 つのパーツに分け、製作している。そのため、パーツのひずみや接合部分のずれがセンサの値に影響を与えたと考えられる。また、鉛直制御のみの 0 秒から 8 秒までの間に水平方向に振動していることがわかる。これは、鉛直方向用コイルが電磁石により発生している磁場に対して垂直でないことが考えられる結果である。このことから機構の水平面のずれ、または浮上体にひずみが発生している可能性があることを示している。水平方向の振動は、これらによる鉛直方向の振動による影響に加え、回転制御による影響も考えられる。理論上は、「2.3 章 電磁石の統合」で記述したように、対面する電磁石により、回転制御時に発生した半径方向の力は、対面する電磁石によって相殺される。しかし、中心位置から少しでもずれると相殺することなく水平方向への力として残ってしまう。このことから回転制御開始後に水平方向の浮上位置が振動したと考えられる。

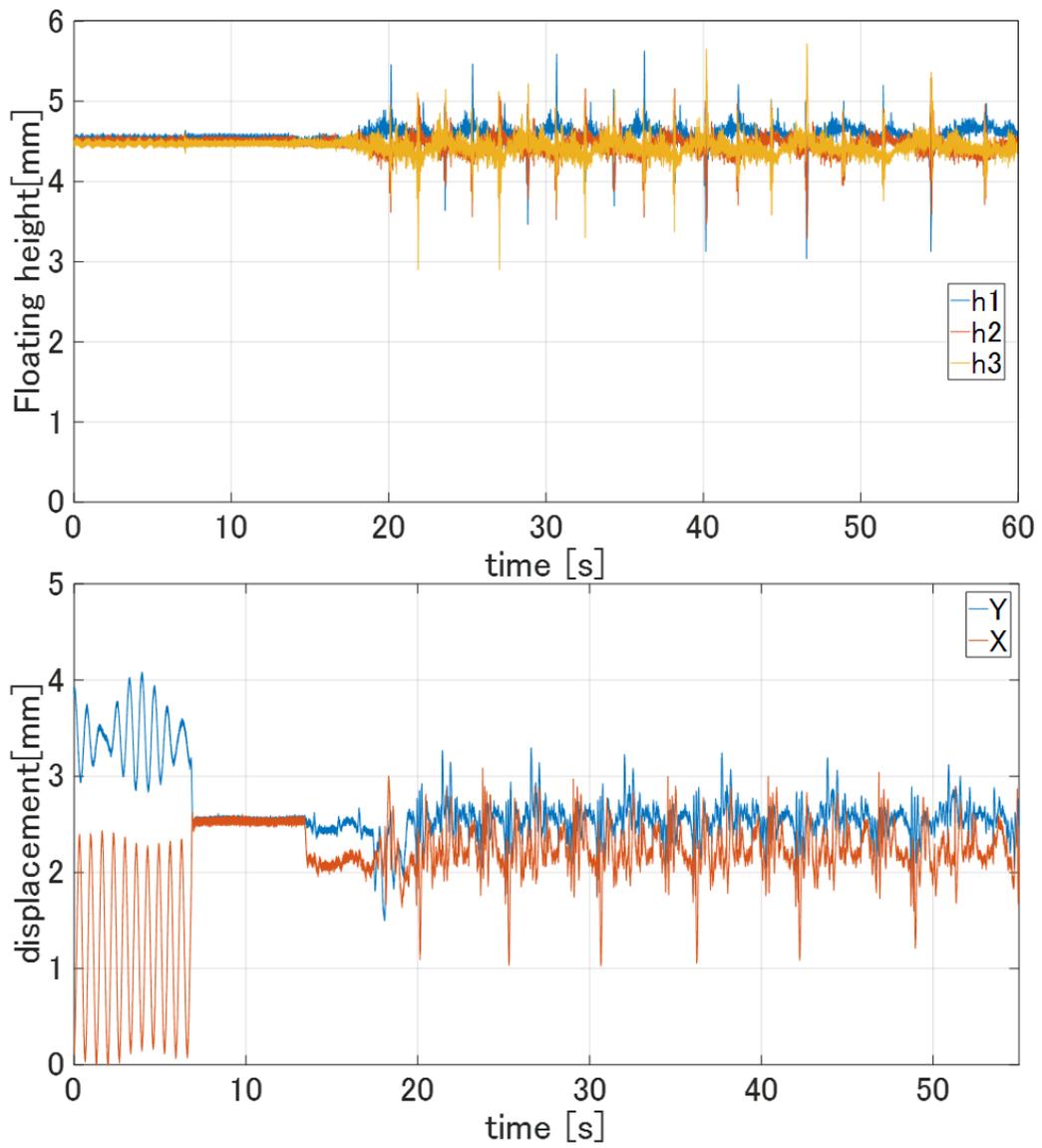


Fig.5.7 Results of rotation control experiment (FB)

第6章 結論

6.1 まとめ

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．先行研究にて製作された，既存の磁気浮上システムについて問題点を示し，改善できる新しい磁気浮上システムを提案し，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．

6.2 今後の展望

新機構による鉛直，水平，回転制御を達成することができたが，今回の実験結果から浮上体の回転時に鉛直・水平方向の浮上位置が振動的になっている．これが5.3.2章で述べたことが起因するのか，検証するため，浮上体の材質や製作方法の再検討が必要であると考え．

振動が改善された際には，モータとしての性能向上を図る．これにより，ローレンツ力による磁気浮上システムの具体的な有用性を示す．現在の機構は直径約280[mm]であり，有用性を示す上では好ましくない．従って小型化を図る必要がある．また，回転トルクにも問題がある．これまでの研究では，回転方向の制御が可能かどうかを検討してきた．そのため，トルクの大小を問わなかった．しかし，モータとして運用するには，何らかの負荷がかかるため，トルクは検討すべき項目であると考え．本機構においてトルクの発生力に一番関係するのは，浮上体に巻き付けられたコイルである．そのため，回転方向用に巻き付けられたコイルの巻き数，形状を再検討する必要があると考える．

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始ご指導してくださいました岡宏一教授，原田明德講師に心から感謝いたします。また，助言や励ましのお言葉をいただいた機械・航空システム制御研究室の皆さまに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 株式会社ビー・アンド・プラス：ワイヤレス給電の仕組み
https://www.b-plus-kk.jp/BPLUS_wireless/wireless_principle.html (2019/2/10)
- (2) ローム株式会社：ワイヤレス給電とは
https://www.rohm.co.jp/electronics-basics/wireless-charging/wireless-charging_what2 (2019/2/10)
- (3) 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
- (4) 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/>
- (5) 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
- (6) 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