

2020（令和2）年度 修士学位論文

複数の永久磁石の回転機構を用いた
非接触支持機構の開発

Development of non-contact suspension system
using rotation mechanism of multiple permanent magnet

2021 年 3 月 11 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1235094 山本 健太郎

指導教員 岡 宏一 教授 原田 明德 准教授

要旨

近年、機械製品の小型化やそれに伴う構成部品の精密化が進んでいる。そして、その生産過程では部品の精度保持が可能な搬送・組立て装置や、塵埃が発生しないクリーンルーム環境の需要が高まっている。現在それらの生産工程は、主にロボットアームや人の手によって行われているが、機械的接触のない非接触支持機構で部品の取扱いが可能となれば、接触による部品の変形や精度の低下を防止できる。

非接触支持機構には、空気圧、静電気、磁気力を利用した方法がある⁽¹⁾。中でも、磁気力は塵埃の発生なく大きな吸引力を発生させることが可能である。磁気力を利用した浮上機構には、永久磁石や電磁石、超伝導体の使用など様々な形式あげられる⁽²⁾⁽³⁾。永久磁石を用いる機構は、浮上体と永久磁石の空隙をアクチュエータによって制御するため、電磁石に比べて消費電力や発熱を小さくすることができる可能性がある。また、超伝導体のような外部環境の制限がない。

これまでの永久磁石を用いた浮上機構の研究では、リニアアクチュエータを使用した機構が数多く提案されてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾が、アクチュエータの駆動軸方向に大きな装置となってしまう。そこで本研究は、永久磁石と小型のロータリーアクチュエータを使用し、鉛直・水平方向に制御可能な非接触支持機構の実現を目的とする。

本稿では、非接触支持機構を新提案し、浮上原理、機構の設計過程を述べる。また、第一段階として鉛直方向のみの浮上体制御を目標としてモデル化を行った。そして、理論上の浮上の可能性の検討、試作機のシステム概要を紹介し、製作した試作機を使用して行った浮上実験について述べる。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 非接触浮上技術	2
1.3 磁気浮上機構	3
1.4 永久磁石を用いた磁気浮上	4
1.4.1 リニアアクチュエータによる懸垂型磁気浮上	4
1.4.2 ロータリーアクチュエータによる懸垂型磁気浮上	4
1.5 本研究の目的	5
第2章 回転機構を用いた非接触支持機構	6
2.1 支持原理	6
2.2 構成部品	6
第3章 試作機的设计	8
3.1 磁極組合せの検討	8
3.1.1 磁力の解析結果	8
3.1.2 磁束線の解析結果	9
3.1.3 考察	12
3.2 磁石間距離の検討	13
3.2.1 実験概要	13
3.2.2 実験結果	15
3.2.3 考察	16
3.2.4 同極対向の磁力	16
3.3 磁力の解析	18
3.3.1 実験結果との比較	18
3.3.2 鉛直・水平方向の磁力解析	19
第4章 1自由度支持機構	21
4.1 モデル化	21
4.1.1 運動方程式	21
4.1.2 浮上力のFEM解析と線形化	23
4.1.3 浮上力の反作用によるトルクのFEM解析と線形化	25
4.1.4 永久磁石間の磁力によるトルク	27
4.1.5 状態空間モデル	29
4.2 可制御性・可観測性	30
4.3 線形性を考えたフィードバックゲインの設計	31
4.4 数値シミュレーション	31
4.4.1 シミュレーション結果	31

4.4.2 考察	33
第 5 章 試作機	34
5.1 試作機の概要	34
5.2 制御システム	36
5.3 使用機器・部品	37
5.3.1 渦電流センサ	37
5.3.2 インクリメンタルエンコーダ	39
5.3.3 安定化電源	39
5.3.4 DPS	41
5.3.5 マイクロステージ	41
5.3.6 リニアレール	42
第 6 章 浮上実験	43
第 7 章 結論	44
7.1 まとめ	44
7.2 今後の課題	44
謝辞	45
参考文献	46

第 1 章 序論

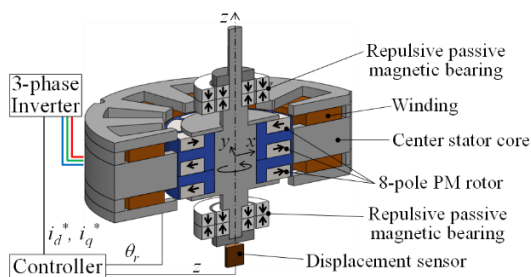
1.1 研究背景

近年、製造業におけるナノテクノロジーの進展は著しく、さまざまな機械製品の小型化が行われている。それに伴い、それらを構成する精密部品もさらなる小型化が進み、機械製品の製造現場では精密部品の搬送や組立て時における精度保持がより一層求められている。また、精密機器を取り扱う現場では、クリーン環境の管理レベルを高めることも課題のひとつとしてあげられる。

従来の製造現場では、人手による手作業だけでなくロボットアームやコンベアも用いられ、クリーン環境に配慮した工場も増えている。しかし、物理的な接触がある以上、部品の傷つきや変形、精度の低下が起こり得る。そして、今後更なる部品の小型化や要求精度の向上が進むと、現状のロボットなどを用いた搬送や組立てシステムでは対応しきれない可能性が考えられる。

非接触での精密部品の取扱いが可能となれば、物理的な接触に起因する部品の精度低下を防止することができる。また、摩擦がないことから高速な移動が可能で、潤滑油が不要なことから定期的なメンテナンスの低減やクリーンルーム環境への対応など、非接触での作業を増やすことでさまざまなメリットが見込めると考えられる。

最近では、非接触浮上技術に関する研究は様々な分野において行われている。産業機械の分野では磁気軸受（図 1-1）やベアリングレスモータ、輸送分野ではリニアモーターカー（図 1-2）などが有名で、実用化されているものも数多く存在している。



<http://www.chiba.ee.titech.ac.jp/research.html>

Fig.1-1 Magnetic bearing



<https://linear-chuo-shinkansen.jr-central.co.jp/gallery/>

Fig.1-2 Maglev train

1.2 非接触浮上技術

現在，研究や実用化されている非接触浮上技術にはさまざまな発生力が利用されており，代表的なものとして，空気力，静電気力，磁気力の利用が挙げられる．その特徴をまとめたものを表 1-1 に示す．

空気力を利用するものは，エアを噴出しその圧力で対象物を浮上させる．高圧で噴出させることにより大きな浮上力を発生させることが可能であるが，エア圧を受ける面積を有する必要がある，浮上の実現は対象物の形状に依存する．また他の問題点として，エアの噴出による塵埃の巻き上げが考えられ，クリーンルーム環境保持の妨げとなってしまう可能性がある．

静電気力を利用するものは，発生力が非常に弱いため，浮上対象はシリコンウエハのような軽量で広面積なものに限定されてしまう．また，静電気によって塵埃を収集するといった問題点もあり，クリーンルーム環境に不向きであると考えられる．

磁気力を利用するものは，浮上対象が磁性体に限定されるが，発生源次第で大きな浮上力を得ることができる．また磁気力を利用した浮上は，直接的に塵埃を発生させないことから，クリーンルーム環境への対応も可能であると考えられる．

本研究では，クリーンルーム環境に対応でき，大きな浮上力を発生させることができる磁気力を用いた非接触支持機構に注目をした．

Table 1-1 Features of non-contact levitation system principle

	発生力	浮上対象	問題点
空気圧	大きい	形状に依存	エアの噴出による塵埃の発生
静電気力	非常に弱い	軽量 広面積	静電気による塵埃の収集
磁気力	大きい	磁性体	—

1.3 磁気浮上機構

磁気浮上は、2つの物体間に作用する磁気力や電磁力を適正に操作することで成立し、一般に表 1-2 のような組み合わせが可能である⁽¹⁾。

電磁石を使用した機構は、コイルに流す電流を制御することで吸引力を調整することで浮上を実現し、一般に EMS(Electromagnetic suspension)システムと呼ばれている。この方式では、コイルに電流を流し続ける必要があるため消費電力や発熱の問題があり、磁気浮上機構の障害となっているといえる。

超伝導体、特に酸化物超伝導体と永久磁石もしくは強磁性体との組合せは、無制御で磁気浮上システムの実現が可能である⁽⁶⁾。しかし、超伝導状態になるには転移温度以下にしておく必要があるため、低温環境を維持しなければならない。また、磁気特性のばらつきやコスト面などから、現時点で実用性に課題がある。

永久磁石を使用した機構は、浮上体と永久磁石の空隙をアクチュエータによって制御することで浮上を実現する。このシステムは磁力を零にできないというデメリットはあるが、電磁石に比べて消費電力や発熱を小さくできる可能性があり、超伝導体のように外部環境の制限がない。そのため、本研究では製造現場での使用には最も適していると考えられる永久磁石を用いた非接触支持機構に着目した。

Table 1-2 Classification in principle of Maglev system

		物体 I		
		電磁石	永久磁石	超伝導体
物体 II	強磁性体	吸引力 *1	吸引力	吸引力
	金属導体	反発力 *1 横力 *2	反発力	反発力
	超伝導体	吸引力 *1	吸引力 反発力	吸引力 反発力
	超電導磁石	吸引力 *1	吸引力 反発力 *1*3	—
	永久磁石	吸引力 *1	吸引力 反発力 *3	—
	電磁石	吸引力 *1	—	—

*1 発生する力の大きさはコイル電流により調整可能

*2 発生する力の向きおよび大きさはコイル電流により調整可能

*3 吸引力か反発力は対抗する向きによる

1.4 永久磁石を用いた磁気浮上

1.4.1 リニアアクチュエータによる懸垂型磁気浮上

永久磁石を用いた磁気浮上機構は、現在までにリニアアクチュエータを用いた懸垂型磁気浮上機構が数多く提案されてきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。リニアアクチュエータの機構の浮上原理の 1 つとして、浮上体上部にリニアアクチュエータと永久磁石を配置することで 1 自由度の非接触支持が可能 (図 1-3) となる。さらに水平方向にリニアアクチュエータと永久磁石を配置することで多自由度の非接触支持も可能としている⁽⁷⁾。しかし、リニアアクチュエータは駆動軸方向に大きいため、これらの機構のほとんどは大掛かりな装置になってしまう問題点がある。

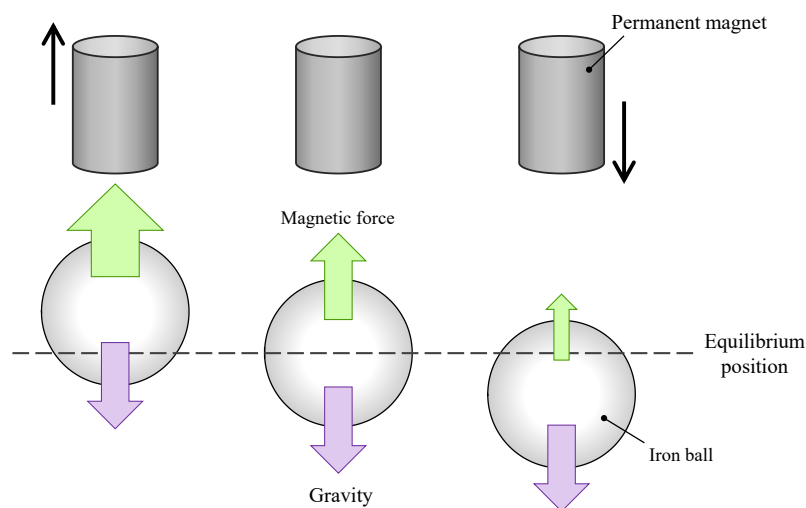


Fig.1-3 Magnetic levitation by linear actuator

1.4.2 ロータリーアクチュエータによる懸垂型磁気浮上

リニアアクチュエータを用いた機構よりも小型な装置で、ロータリーアクチュエータを用いた懸垂型磁気浮上機構が提案されている⁽⁸⁾。この機構は、図 4 に示すように円盤磁石と左右二つの F 字型の強磁性体コアと直方体の浮上体で構成されている。浮上方法は、図 1-4(a)のように円盤磁石の N 極が真上に、S 極が真下にあるとき、N 極から出た磁束は均等に左右のコアを通り S 極に面している部分から S 極に流れ込む。一方、図 1-4(b)のように円盤磁石が右に回転した場合、N 極から右側のコアに流れた磁束は二手に分かれる。一方の磁束は、(a)と同様に S 極に流れ込むが、もう一方は浮上体を通過して左側のコアから S 極に流れ込むため、コアと浮上体間に吸引力が発生する。この原理を利用して円盤磁石の角度を制

御することで、浮上体の支持を実現する。この機構は、永久磁石を使用しながらも吸引力を零にできるという利点があるが、浮上体が平板でなくてはならず、鉛直方向しか浮上制御できないといった問題点がある。

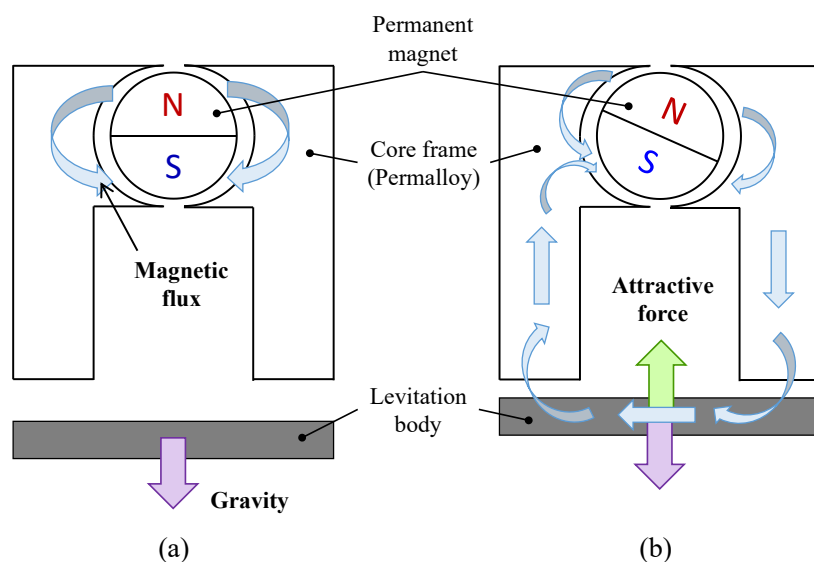


Fig.1-4 Magnetic levitation by rotary actuator

1.5 本研究の目的

本研究では、前節で示した従来の機構の課題である「機構の小型化」、「鉛直・水平方向の浮上体制御」を可能とするため、永久磁石を用いた懸垂型磁気浮上機構の新提案および開発を行う。角柱形状の永久磁石と小型のロータリーアクチュエータを複数使用し、浮上体を鉛直・水平方向に浮上制御可能な非接触支持機構の実現を目的とする。

その第一段階として、永久磁石とロータリーアクチュエータを2つずつ搭載した試作機の製作を行った。そして、浮上体を直径25 mmの鉄球として機構のモデル化を行った後、数値シミュレーションで最適な制御システムの構築を行った。

本論文では、試作機の最適な設計のために行った磁力の測定実験や磁力・磁束線の解析結果を示す。また、浮上実験のためのモデル化、数値シミュレーション、試作機による浮上実験の結果を示した。

第2章 回転機構を用いた非接触支持機構

2.1 支持原理

提案する非接触支持機構の浮上原理を図 2-1 に示す。本機構では、角柱形状の永久磁石とロータリーアクチュエータを 2 つずつ使用した。2 つの永久磁石をそれぞれの中心を軸にロータリーアクチュエータで回転させ、浮上体にはたらく重力と磁力が釣り合うように角度を制御し、鉛直方向の支持を行う。また、左右の永久磁石を異なる角度にすることで水平方向の制御も起こない、浮上体の x 軸方向および y 軸方向の制御を目標とする。

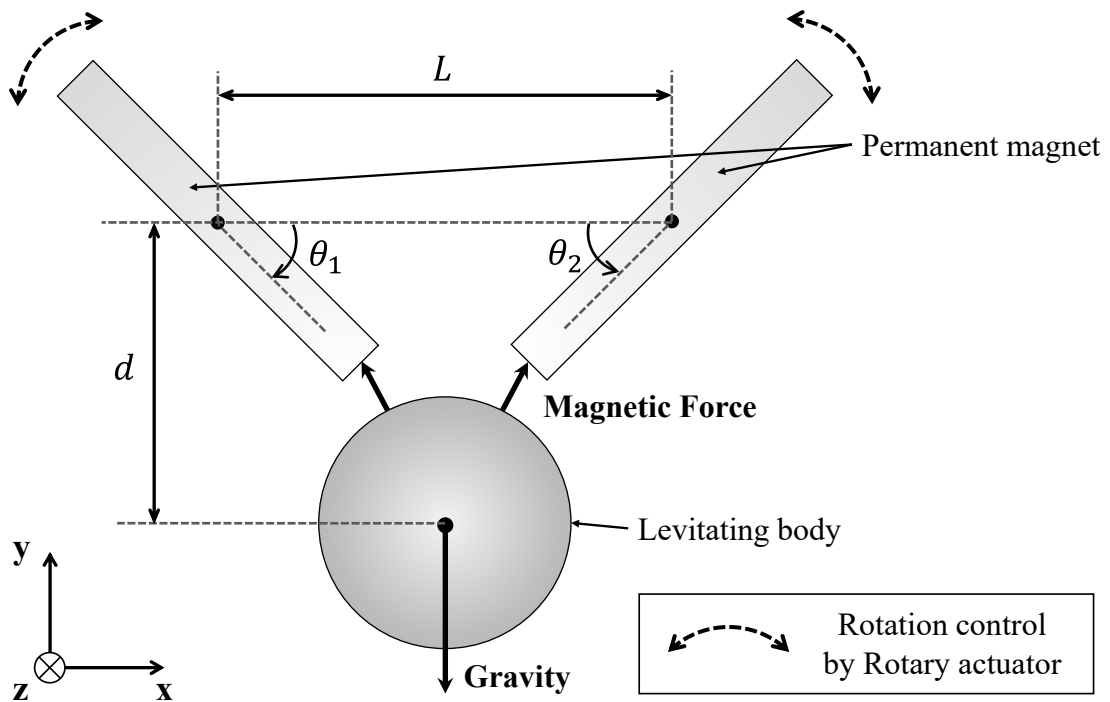


Fig.2-1 Levitation principle of the proposed mechanism

2.2 構成部品

本機構で使用する、永久磁石と浮上体の諸元を表 2-1 に示す。永久磁石を回転させるロータリーアクチュエータは、小型・高出力でバックラッシュが小さく、高分解能で位置決め精度に優れたハーモニックドライブ機構を用いた Harmonic Drive Systems Inc.製の DC サーボアクチュエータ(RH-5A8802, 図 2-2)を 2 つ使用する。諸元を表 2-2 に示す。

Table 2-1 Specification of component parts

	Permanent magnet	Levitating body
Material	Neodymium magnet	SS400
Dimensions (mm)	$5 \times 5 \times 40$	$\varnothing 25$
Mass (g)	7.4	64.2

Table 2-2 Specification of DC servo motor

Rated output (W)	1.5
Rated voltage (V)	12
Rated current (A)	0.5
Rated torque (Nm)	0.16
Instantaneous maximum torque (Nm)	0.39
Torque constant (Nm/A)	0.69
Moment of inertia (kgm^2)	6.3×10^{-4}
Reduction ratio (—)	50
Dimensions (mm)	$\varnothing 20 \times 89$
Mass (kg)	0.09



Fig.2-2 Rotary actuator

第 3 章 試作機的设计

3.1 磁極組合せの検討

本機構に最適な磁極の組合せを検討するため、電磁界解析ソフト JMAG-Designer19.1 を用いて磁場解析を行った。

3.1.1 磁力の解析結果

初めに、浮上体に近い側の磁極が異極対向（S 極 N 極対向，図 3-1）と同極対向（N 極 N 極対向，図 3-2）の場合に、浮上体にはたらく鉛直方向の磁力を解析した。解析範囲は 0 deg から 90 deg とし、1 deg 毎に解析を行った。尚、このとき左右の磁石の角度は同じとした。磁力の解析結果を図 3-3 に示す。

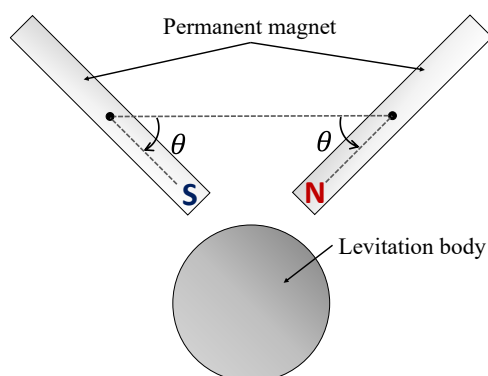


Fig.3-1 Opposite poles

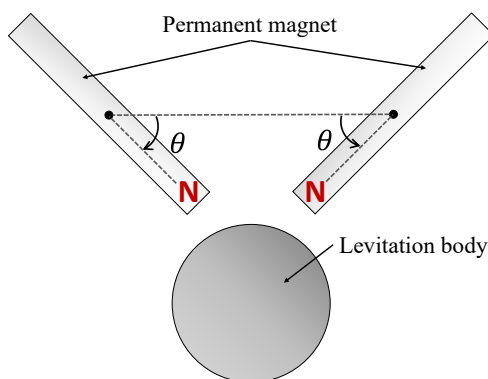


Fig.3-2 Same poles

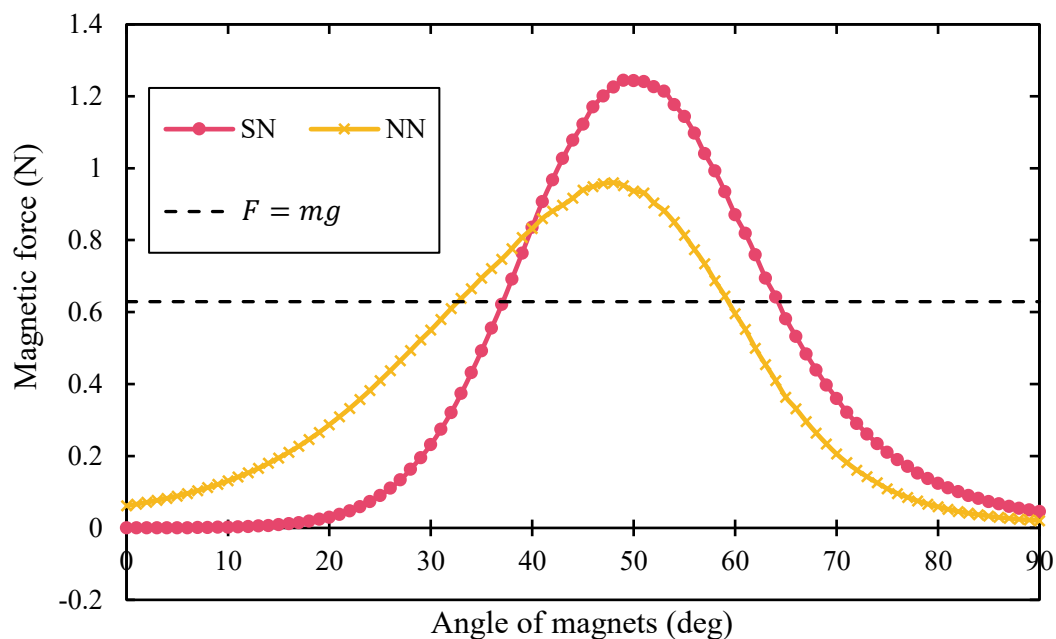


Fig.3-3 Magnetic force analysis results in vertical direction

浮上力と重力が釣り合う平衡位置は, 異極対向が約 37 deg, 同極対向が約 33 deg となり, 極対向の方が大きな角度で平衡位置となった. 磁力の最大値は, 異極対向が 52 deg のときで 1.23 N, 同極対向が 48 deg のときで 0.960 N となった. 39 deg までは同極対向の磁力が大きい, 40 deg 以降は異極対向の磁力が大きくなった.

それぞれの平衡位置に着目すると, 異極対向の方の傾きが大きくなることがわかった. したがって, 異極対向の方が小さな角度変化でより大きな磁力変化が得られることがわかった.

3.1.2 磁束線の解析結果

次に, 永久磁石の角度が左右共に 35 deg と 45 deg のときの, 異極対向の磁束線を図 3-4, 図 3-5 に, 同極対向の磁束線を図 3-6, 図 3-7 に示す. また, このとき鉄球にはたらく鉛直方向の磁力を表 3-1 にまとめた.

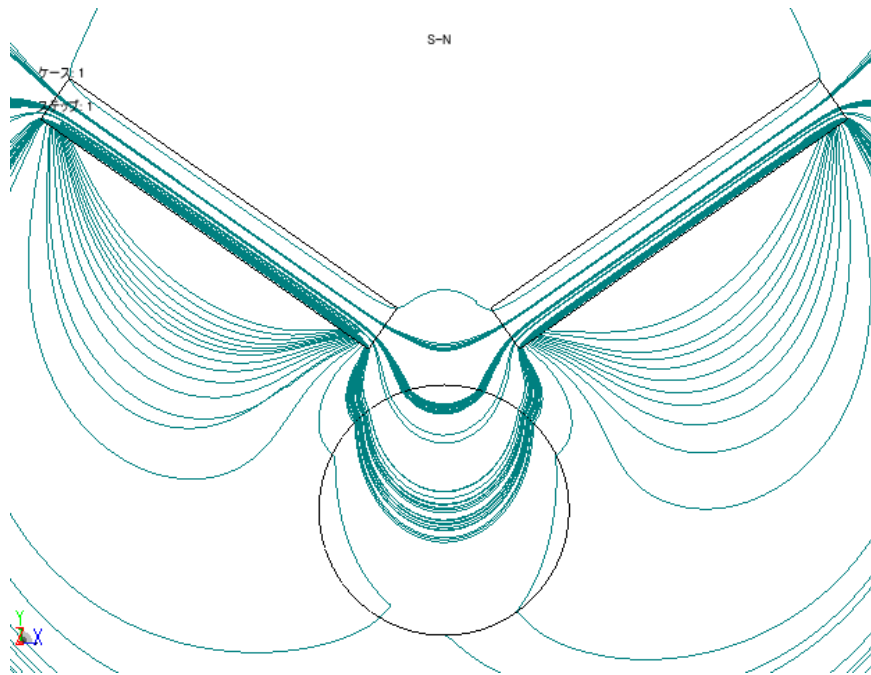


Fig.3-4 Magnetic flux lines in opposite poles (35 deg)

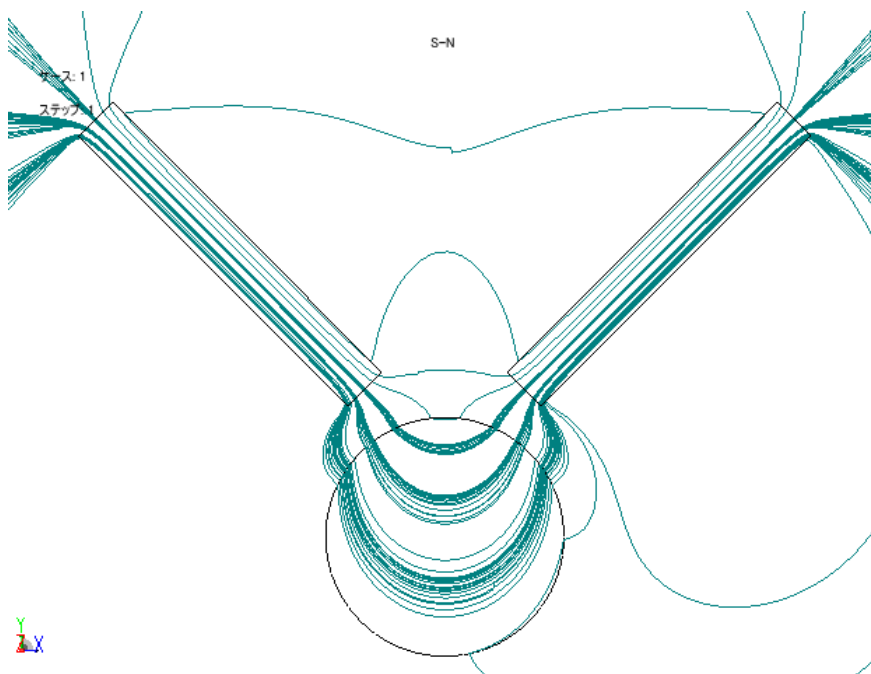


Fig.3-5 Magnetic flux lines in opposite poles (45 deg)

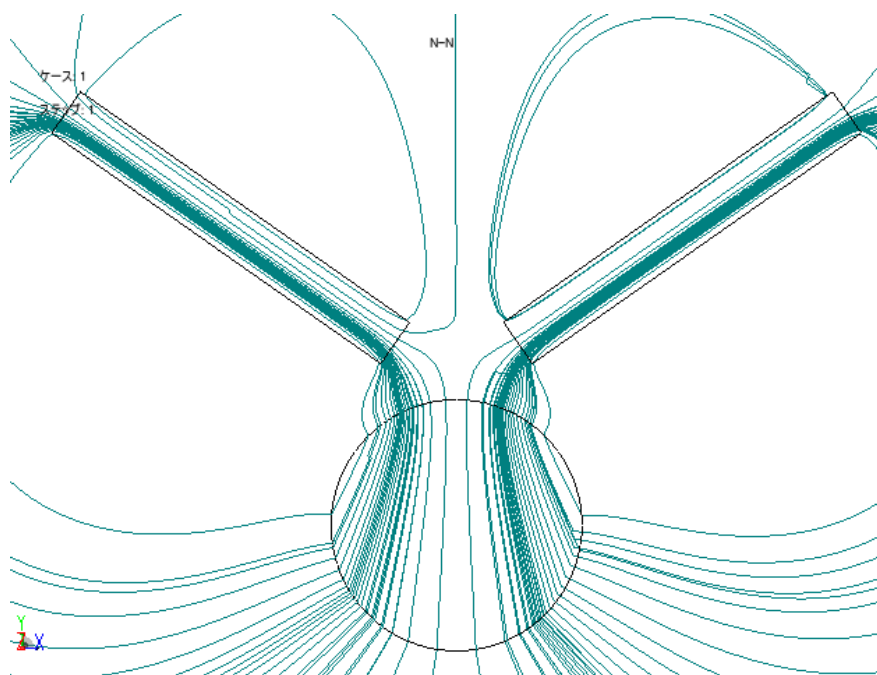


Fig.3-6 Magnetic flux lines in same poles(35 deg)

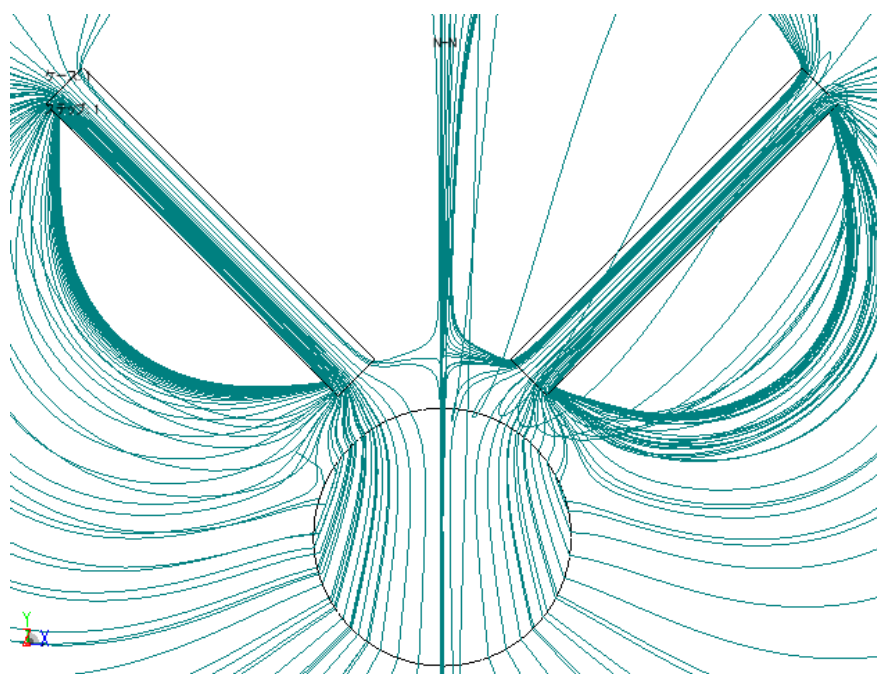


Fig.3-7 Magnetic flux lines in same poles(45 deg)

Table 3-1 Magnetic force analysis result

Angle of the magnets (deg)	Magnetic force (N)	
	Opposite poles	Same poles
35	0.492	0.695
45	1.12	0.940

磁石角度が 10 deg 変化したとき鉄球にはたらく鉛直方向の磁力変化は，異極対向が+0.628 N，同極対向が+0.245 N となった．

3.1.3 考察

図 3-3 および表 3-1 より，磁石角度が変化したときの磁力変化が同極対向より異極対向の方が大きかった理由について考察する．まず，異極対向の磁束線の解析結果，図 3-4，図 3-5 に着目すると，角度が大きくなることで鉄球内を通過する磁束線の量が多くなっていることがわかる．次に，同極対向の磁束線の解析結果，図 3-6，図 3-7 に着目すると，35 deg の時点で鉄球全体に磁束線が通過していて，角度を大きくしても磁束線の変化量としては少なかったと考えられる．磁束線の方に磁力ははたらくため，したがって，異極対向の方が大きな磁力変化を得られたと考えられる．

本機構では，磁石の回転による磁力変化が必要なため異極対向を採用することとした．

3.2 磁石間距離の検討

3.2.1 実験概要

本機構に最適な磁石間距離の検討のため、実際の機構で使用する永久磁石と鉄球を配置して鉛直方向にはたらく磁力の測定を行った。最適な磁石間距離の条件として以下の 2 つを設定した。

- (a) 永久磁石の回転によって浮上体にはたらく重力より大きな磁力と小さな磁力が得られること。
- (b) 安定した磁力変化が得られること。

実験方法を以下に示す。また、図 3-8 に示す左右の永久磁石の角度 θ_1 と θ_2 は同じ角度として実験を行った。

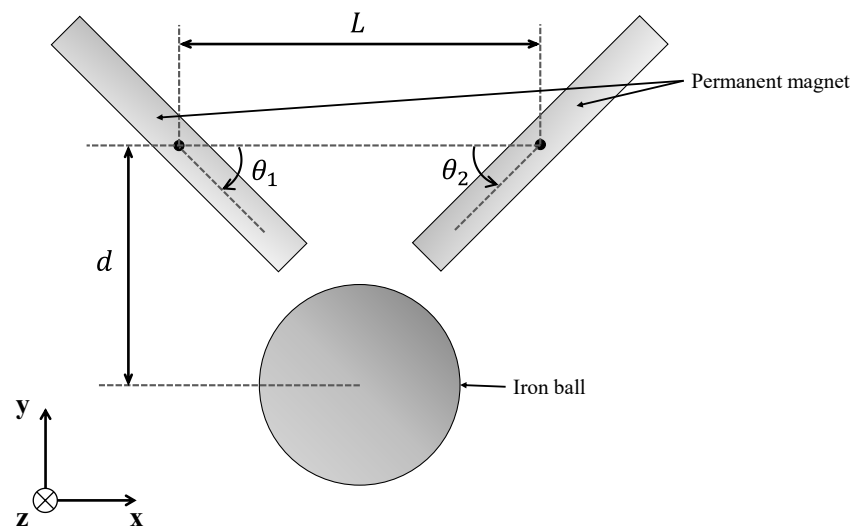


Fig.3-8 Schematic of the mechanism

磁石間距離 L は、40 mm から 2.5 mm 間隔で 50 mm まで設定した。永久磁石は異極対向で配置し、角度 30 deg から 5 deg 毎に 55 deg まで設定した。このときの鉄球にはたらく鉛直方向の磁力をロードセルで測定した。

磁力測定のための実験装置を図 3-9 に示す。磁力の測定には NEC San-ei Instruments 社製のロードセル (9E01-L35-5K, 定格荷重 50 N) を使用した。また、測定値の読み取りは NEC San-ei Instruments 社製のコントローラ (AS2103, 図 3-10) 上のモニターに表示される電圧を力に換算して行った。

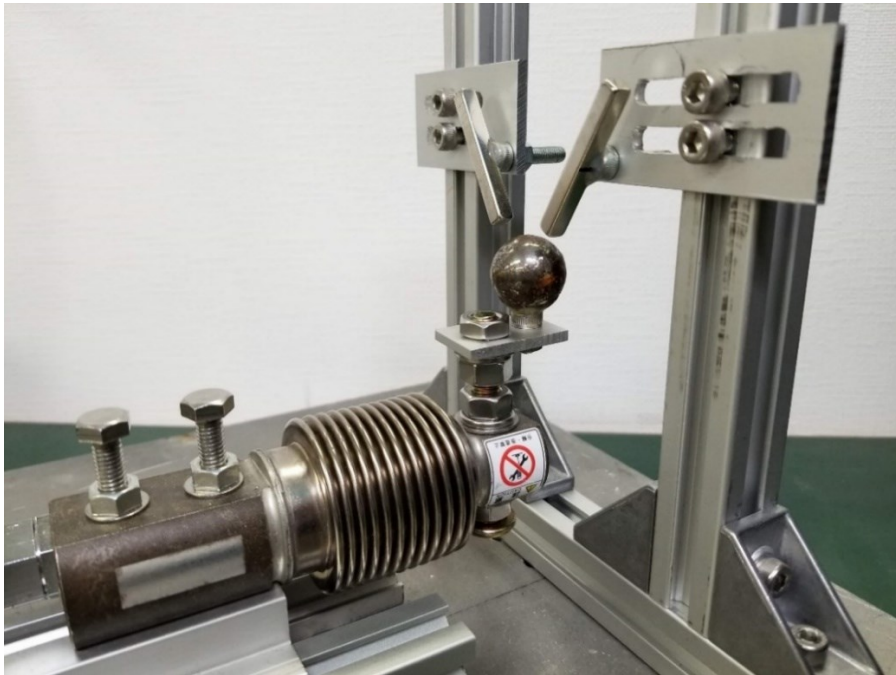


Fig.3-9 Overall view of the experimental device



Fig.3-10 Controller for load cell

3.2.2 実験結果

実験結果を表 3-2 および図 3-11 に示す。

Table 3-2 Experimental results of magnetic force measurement

Angle of the magnets (deg)	Magnetic force (N)				
	40 mm	42.5 mm	45 mm	47.5 mm	50 mm
30	0.051	0.205	0.359	0.512	0.512
35	0.102	0.359	0.564	0.769	0.871
40	0.205	0.410	0.769	0.820	1.08
45	0.666	0.769	1.03	1.03	0.974
50	0.922	0.922	1.03	0.922	0.820
55	0.922	1.08	0.974	0.820	0.615

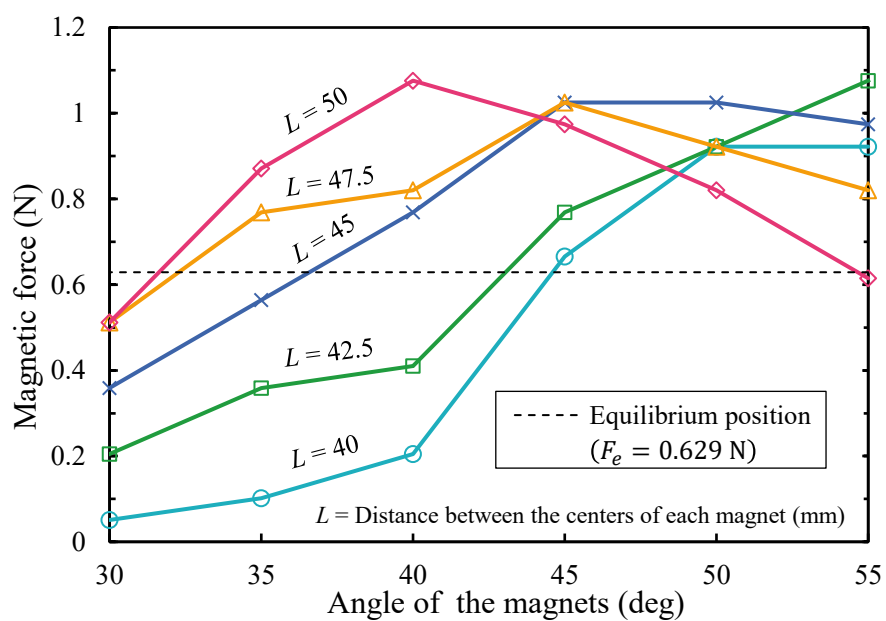


Fig.3-11 Relationship between angle and magnetic force of distance between magnets

3.2.3 考察

「3.2.1 実験概要」で示した最適な磁石間距離の2つの条件について考察する。条件(a)に関しては、実験したすべての磁石間距離において、平衡位置より大きな磁力と小さな磁力が永久磁石の回転によって得られることが確認できた。次に、条件(b)に関しては、平衡位置付近に着目すると、磁石間距離が45 mmのときに最も線形的な磁力の上昇がみられた。したがって、最適な磁石間距離は45 mmであると考えた。

3.2.4 同極対向の磁力

磁石間距離45 mmで、N極の同極対向の場合も同様に磁力の測定実験を行った。結果を表3-3、図3-12に示す。

「3.1 磁極組合せの検討」の解析結果と同じく、永久磁石の回転で得られる磁力変化は、同極対向より異極対向の方が大きいことが確認でき、異極対向の方が線形的な磁力変化が得られた。

Table 3-3 Results of magnetic force measurement

Angle of the magnets (deg)	Magnetic force (N)	
	Opposite poles	Same poles
30	0.359	0.615
35	0.564	0.820
40	0.769	0.871
45	1.03	0.871
50	1.03	0.922
55	0.974	0.717

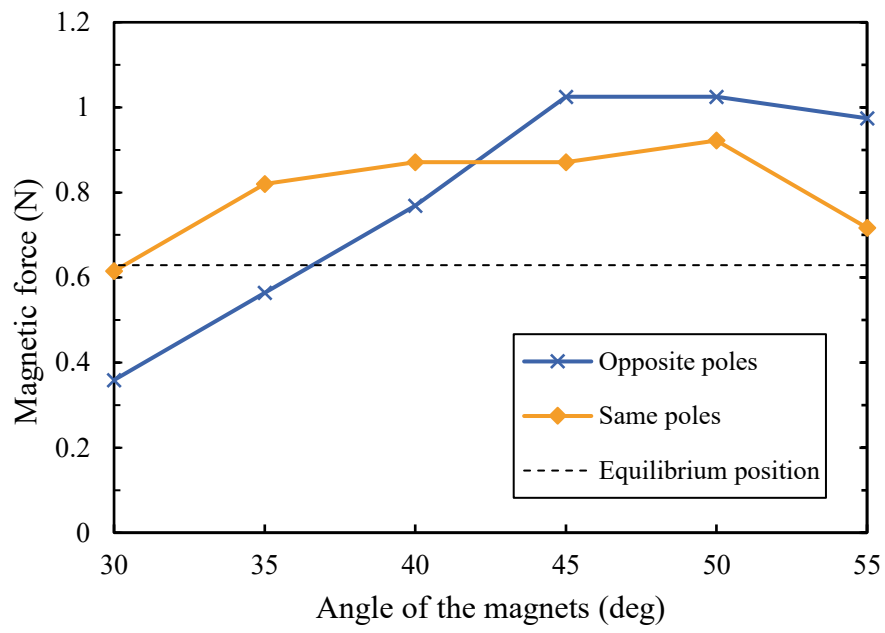


Fig.3-12 Relationship between angle and magnetic force

3.3 磁力の解析

3.3.1 実験結果との比較

異極対向, $L = 45 \text{ mm}$ のときの実験結果と, 同条件での JMAG-Designer19.1 による解析結果を図 3-13 に示す.

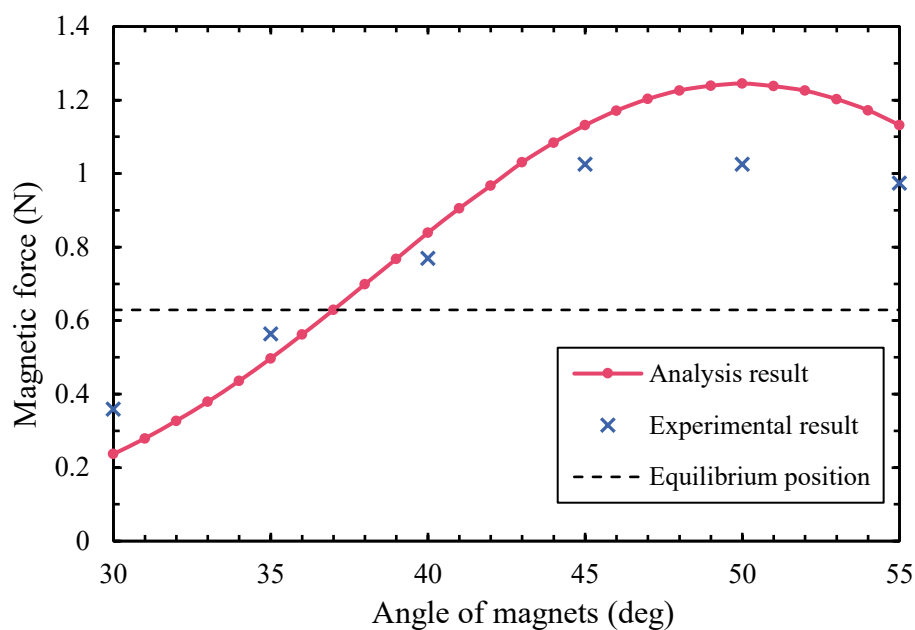


Fig.3-13 Comparison of experimental and analytical results

30 度, 35 度では実験結果の方が大きな磁力を示したが, 平衡位置を境に解析結果が実験結果の磁力を上回る結果となった. プロットデータの一致はないものの, 平衡位置付近に着目すると, 近い値となっていると推測できる. したがって, 解析データは信頼できるものであるとして今後の実験を進めていく. また 45 度から 55 度付近で差が大きくなった理由としては, 実験で角度を大きくしたときに, 周囲の磁性体に磁力がはたらいってしまったことが影響して, 鉄球にはたらく磁力が低下したからだと考えられる.

3.3.2 鉛直・水平方向の磁力解析

$\theta_1 = \theta_2$ のとき永久磁石の回転範囲を広げて、鉛直方向および水平方向にはたらく磁力の解析を行った。結果を図 3-14 に示す。また、図 3-14 において平衡位置と重なった 37 度を中心に、磁石を同方向に回転させ解析を行った結果を図 3-15 に示す。

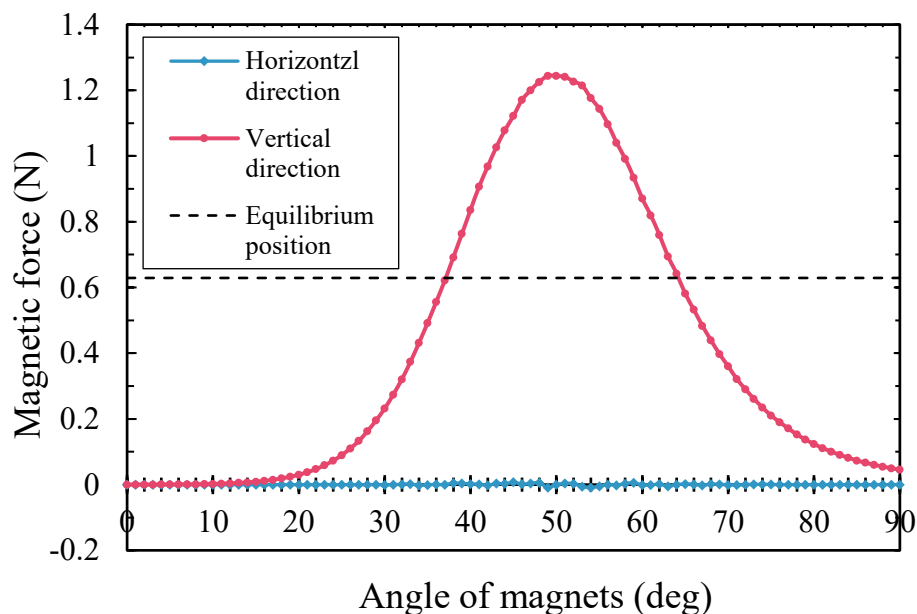


Fig.3-14 Magnetic force at the same magnet angles

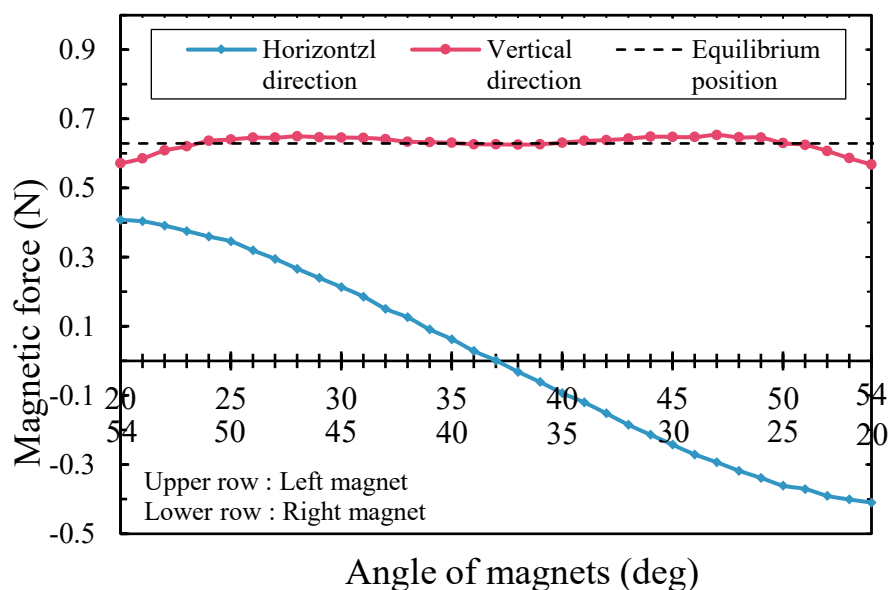


Fig.3-15 Magnetic force at the different magnet angles

鉛直方向の磁力は最大で 1.24 N となった．平衡位置の浮上力は 0.629 N であるため，浮上体の支持には十分な磁力が得られると考えられる．

水平方向にも磁力がはたらいっていることがわかり，同方向の回転も用いることで浮上体の水平方向の制御を行うこととする．

第4章 1自由度支持機構

4.1 モデル化

4.1.1 運動方程式

まずは鉛直方向のみの浮上システムの構築を考える．したがって， $\theta_1 = \theta_2 := \theta$ として浮上体と永久磁石の運動方程式を立て，モデル化を行った．提案する磁気浮上システムのモデルを図4-1に示す．

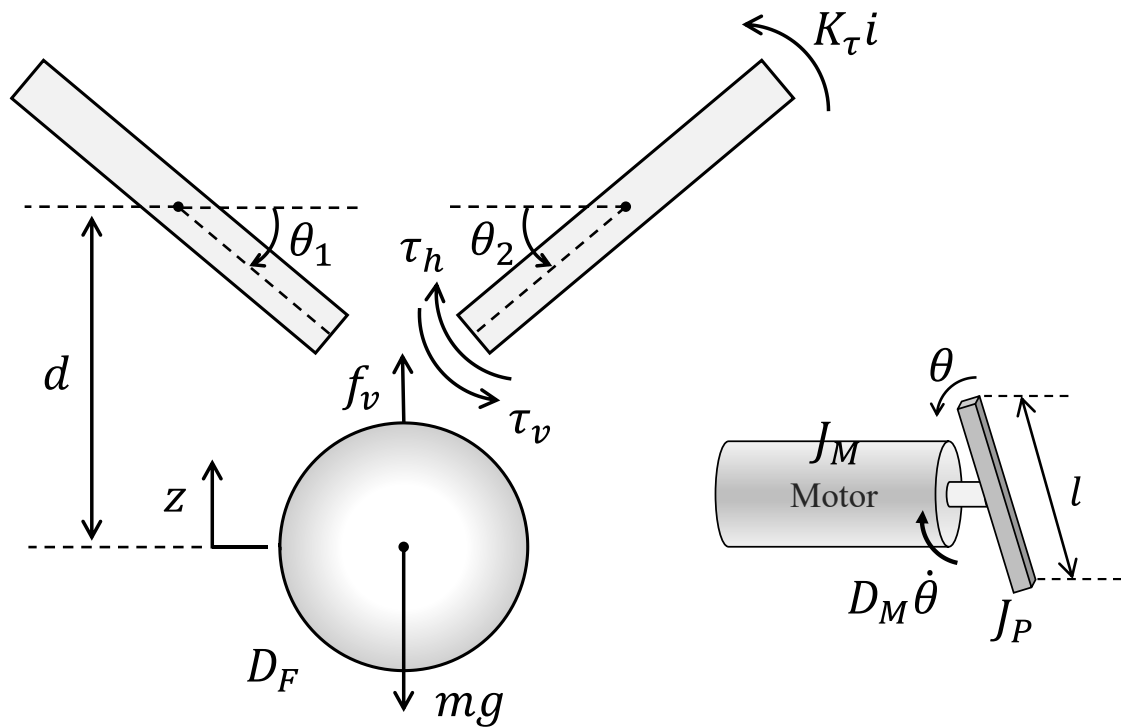


Fig.4-1 Model of the suspension system

m : 浮上体質量
 l : 永久磁石全長
 z : 浮上体位置
 d : 永久磁石と浮上体の中心間距離
 θ : 永久磁石角度
 f_v : 浮上力
 τ_v : 浮上力の反作用によるトルク
 τ_h : 永久磁石間の磁力によるトルク
 K_τ : モータのトルク定数
 i : モータ電流
 J_M : モータ内部の慣性モーメント
 J_P : モータ回転部の慣性モーメント
 D_M : モータ内部の粘性係数
 D_F : 空気抵抗などの粘性係数

浮上体および右側の永久磁石の運動方程式は,

$$m\ddot{z} + D_F\dot{z} = f_v - mg \quad (4.1)$$

$$(J_M + J_P)\ddot{\theta} + D_M\dot{\theta} = K_\tau i + \tau_h + \tau_v \quad (4.2)$$

と表すことができる．ここで，浮上体にはたらく浮上力 f_v ，永久磁石にはたらく浮上力の反作用によるトルク τ_v ，永久磁石間の磁力によるトルク τ_h は非線形要素となり，制御システム構築のため線形化を行う．

4.1.2 浮上力の FEM 解析と線形化

初めに，浮上力 f_v の線形化について考える．浮上力 f_v (N)は，永久磁石角度 θ (rad)と浮上体位置 d (m)の2変数で，電磁界解析ソフトJMAG-Designer19.1を用いて磁力解析を行った．磁力の解析結果を図 4-2 に示す．

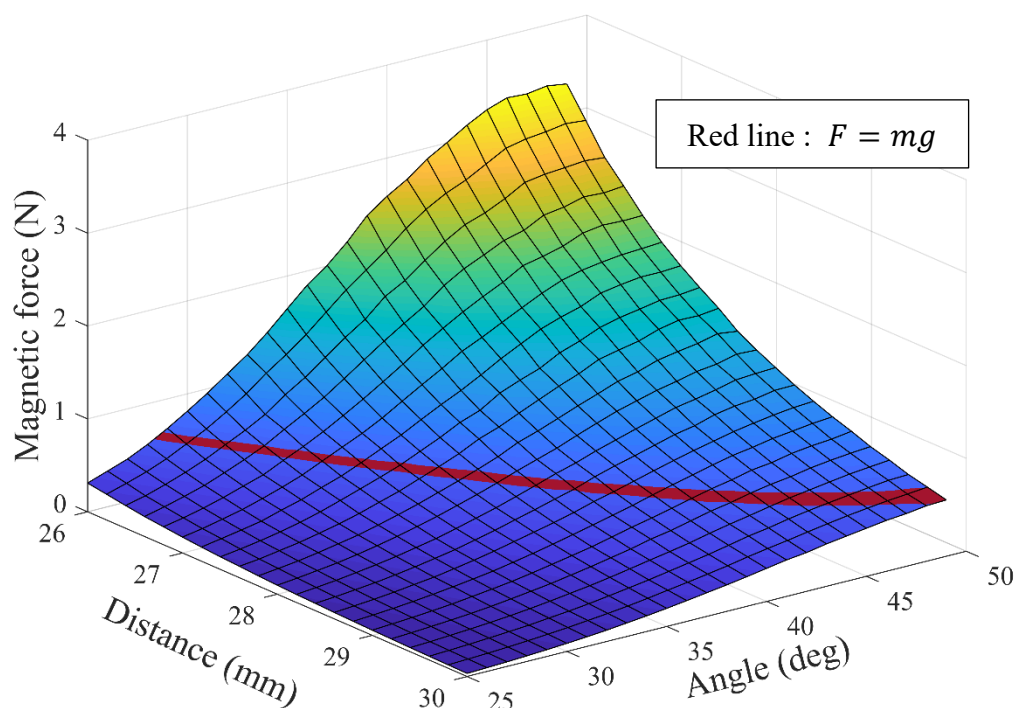


Fig.4-2 Analysis result of levitation force

次に，その関係性を数式化するため， d (m)と θ (rad)の2変数3次近似曲面を作成し，以下の式でおいた．

$$f_v = k_9 d^3 + k_8 \theta^3 + k_7 d^2 \theta + k_6 d \theta^2 + k_5 d^2 + k_4 \theta^2 + k_3 d \theta + k_2 d + k_1 \theta + k_0 \quad (4.3)$$

いま，重力と釣り合う浮上力（図 4-2，赤線）上の1点，平衡位置 (d_0, θ_0) で釣り合っているときの浮上力を f_{v0} とする．その平衡位置から微小偏差 δd_0 ， $\delta \theta_0$ だけ変化した浮上力 $f_{v0} + \delta f_v$ を考えると，

$$\begin{aligned}
f_{v0} + \delta f_v &= k_9(d_0 + \delta d)^3 + k_8(\theta_0 + \delta\theta)^3 + k_7(d_0 + \delta d)^2(\theta_0 + \delta\theta) \\
&\quad + k_6(d_0 + \delta d)(\theta_0 + \delta\theta)^2 + k_5(d_0 + \delta d)^2 + k_4(\theta_0 + \delta\theta)^2 \\
&\quad + k_3(d_0 + \delta d)(\theta_0 + \delta\theta) + k_2(d_0 + \delta d) + k_1(\theta_0 + \delta\theta) + k_0
\end{aligned} \tag{4.4}$$

となる． δd_0 , $\delta\theta_0$ は微小であるので，その2条以上の項を無視すると，

$$\begin{aligned}
f_{v0} + \delta f_v &= k_9\theta_0^3 + k_8d_0^3 + k_7\theta_0^2d_0 + k_6\theta_0d_0^2 + k_5\theta_0^2 + k_4d_0^2 + k_3\theta_0d_0 + k_2\theta_0 + k_1d_0 + k_0 \\
&\quad + (3k_9d_0^2 + 2k_7d_0\theta_0 + k_6\theta_0^2 + 2k_5d_0 + k_3\theta_0 + k_2)\delta d \\
&\quad + (3k_8\theta_0^2 + k_7d_0^2 + 2k_6d_0\theta_0 + 2k_4\theta_0 + k_3d_0 + k_1)\delta\theta
\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$= f_{v0} + k_z\delta d + k_\theta\delta\theta \tag{4.6}$$

となり，平衡位置からの微小偏差だけを考えると，

$$\delta f_v = k_z\delta d + k_\theta\delta\theta = -k_z\delta z + k_\theta\delta\theta \tag{4.7}$$

となり平衡位置(d_0, θ_0)での線形化を行った．ここで， k_θ, k_z は定数であり MATLAB を用いた解析結果を用いると， $k_\theta = 4.33 \text{ N/rad}$, $k_z = -331 \text{ N/m}$ となった．

4.1.3 浮上力の反作用によるトルクの FEM 解析と線形化

浮上力の反作用によるトルク τ_v は, d (m) と θ (rad) の 2 変数で電磁界解析ソフト JMAG-Designer19.1 を用いて磁力解析した浮上力 f_v を, 以下の式(4.8)でトルク換算した. その後, 3 次で近似曲面を作成した. 近似曲面とトルクの解析結果を図 4-3 に示す.

$$\tau_v = \frac{l}{4} f_v \cos \theta \quad (4.8)$$

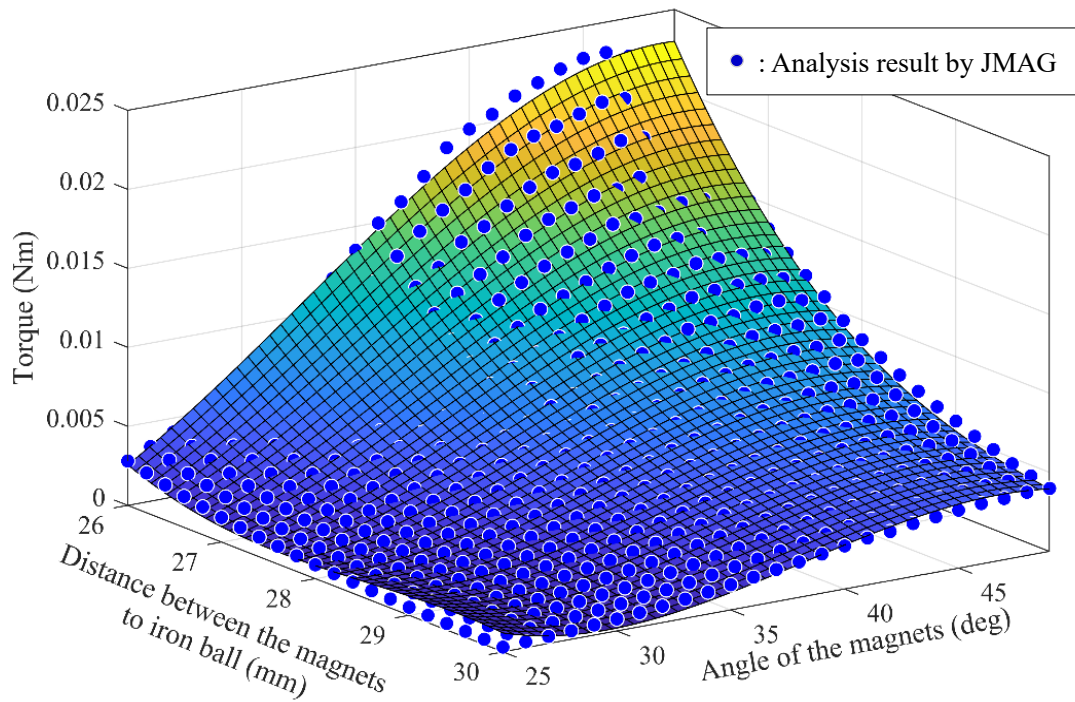


Fig.4-3 Cubic approximated surface of torque

作成した 2 変数 3 次近似曲面を以下の式でおく.

$$\tau_v = n_9 d^3 + n_8 \theta^3 + n_7 d^2 \theta + n_6 d \theta^2 + n_5 d^2 + n_4 \theta^2 + n_3 d \theta + n_2 d + n_1 \theta + n_0 \quad (4.9)$$

ここで, 前章と同様の平衡位置 (d_0, θ_0) で釣り合っているときの浮上力の反作用によるトルクを τ_{v0} とする. その平衡位置から, 微小偏差 $\delta d_0, \delta \theta_0$ だけ変化したトルク $\tau_{v0} + \delta \tau_v$ を考えると,

$$\begin{aligned}
\tau_{v0} + \delta\tau_v = & n_9(d_0 + \delta d)^3 + n_8(\theta_0 + \delta\theta)^3 + n_7(d_0 + \delta d)^2(\theta_0 + \delta\theta) \\
& + n_6(d_0 + \delta d)(\theta_0 + \delta\theta)^2 + n_5(d_0 + \delta d)^2 + n_4(\theta_0 + \delta\theta)^2 \\
& + n_3(d_0 + \delta d)(\theta_0 + \delta\theta) + n_2(d_0 + \delta d) + n_1(\theta_0 + \delta\theta) + n_0
\end{aligned} \quad (4.10)$$

となる． δd_0 , $\delta\theta_0$ は微小であるので，その2条以上の項を無視すると，

$$\begin{aligned}
\tau_{v0} + \delta\tau_v = & n_9\theta_0^3 + n_8d_0^3 + n_7\theta_0^2d_0 + n_6\theta_0d_0^2 + n_5\theta_0^2 + n_4d_0^2 + n_3\theta_0d_0 + n_2\theta_0 + n_1d_0 + n_0 \\
& + (3n_9d_0^2 + 2n_7d_0\theta_0 + n_6\theta_0^2 + 2n_5d_0 + n_3\theta_0 + n_2)\delta d \\
& + (3n_8\theta_0^2 + n_7d_0^2 + 2n_6d_0\theta_0 + 2n_4\theta_0 + n_3d_0 + n_1)\delta\theta
\end{aligned} \quad (4.11)$$

$$= \tau_{v0} + k_{vz}\delta d + k_{v\theta}\delta\theta \quad (4.12)$$

となり，平衡位置からの微小偏差だけを考えると，

$$\delta\tau_v = k_{vz}\delta d + k_{v\theta}\delta\theta = -k_{vz}\delta z + k_{v\theta}\delta\theta \quad (4.13)$$

とな平衡位置(d_0, θ_0)での線形化を行った．ここで， $k_{v\theta}, k_{vz}$ は定数であり MATLAB を用いた解析結果を用いると， $k_{v\theta} = 0.0280 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{rad})$, $k_{vz} = -2.97 \text{ N}/\text{m}^2$ となった．

4.1.4 永久磁石間の磁力によるトルク

永久磁石間の磁力によるトルク τ_h は、電磁界解析ソフト JMAG-Designer19.1 を使用して θ (rad)の1変数で解析を行った。その後、5次近似を行い、前章と同様の平衡位置 θ_0 で線形化を行った。解析結果と近似曲線を図4-4に示す。

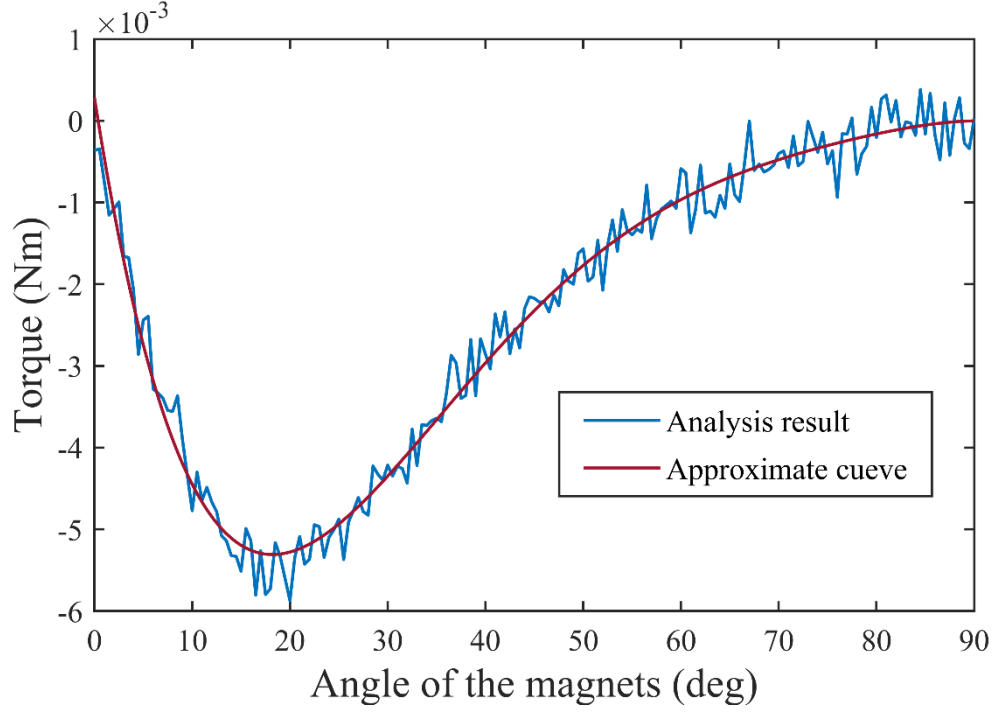


Fig.4-4 Approximate curve of torque

作成した近似曲線を以下の式でおく。

$$\tau_h = l_5\theta^5 + l_4\theta^4 + l_3\theta^3 + l_2\theta^2 + l_1\theta + l_0 \quad (4.14)$$

前章と同様の平衡位置 θ_0 で釣り合っているときの永久磁石間の磁力によるトルクを τ_{h0} とする。その平衡位置から微小偏差 $\delta\theta_0$ だけ変化したトルク $\tau_{h0} + \delta\tau_h$ を考えると、

$$\begin{aligned} \tau_{h0} + \delta\tau_h = & l_5(\theta_0 + \delta\theta)^5 + l_4(\theta_0 + \delta\theta)^4 + l_3(\theta_0 + \delta\theta)^3 \\ & + l_2(\theta_0 + \delta\theta)^2 + l_1(\theta_0 + \delta\theta) + l_0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。 $\delta\theta_0$ は微小であるので、その2条以上の項を無視すると、

$$\begin{aligned}\tau_{h0} + \delta\tau_h = & l_5\theta_0^5 + l_4\theta_0^4 + l_3\theta_0^3 + l_3\theta_0^3 + l_2\theta_0^2 + l_1\theta_0 + l_0 \\ & + (5l_5\theta_0^4 + 4l_4\theta_0^3 + 3l_3\theta_0^2 + 2l_2\theta_0 + l_1)\delta\theta\end{aligned}\quad (4.16)$$

$$= \tau_{h0} + k_h\delta\theta \quad (4.17)$$

となり，平衡位置からの微小偏差だけを考えると，

$$\delta\tau_h = k_h\delta\theta \quad (4.18)$$

となり平衡位置 θ_0 での線形化を行った．ここで， k_h は定数であり解析結果を用いると， $k_h = 0.0086 \text{ N/(m} \cdot \text{rad)}$ となった．

4.1.5 状態空間モデル

浮上体の運動方程式(4.1)は、式(4.7)より、

$$m\ddot{z} + D_F\dot{z} = f_{v0} + \delta f_v - mg = k_\theta\delta\theta - k_z\delta z \quad (4.19)$$

となる。次に、右側の永久磁石の運動方程式(4.2)は、式(4.13)および式(4.18)より、

$$(J_M + J_P)\ddot{\theta} + D_M\dot{\theta} = K_\tau(i_0 + \delta i) + (\tau_{h0} + \delta\tau_h) + (\tau_{v0} + \delta\tau_v) \quad (4.20)$$

$$= K_\tau\delta i + (k_h + k_{v\theta})\delta\theta - k_{vz}\delta z \quad (4.21)$$

したがって、入力 $u = i$ 、出力 $y = z$ として、浮上システムは次のような状態空間モデルで表される。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.22)$$

$$y = Cx \quad (4.23)$$

ここで、

$$x = [\theta \quad z \quad \dot{\theta} \quad \dot{z}]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_h + k_{v\theta}}{J_M + J_P} & -\frac{k_{vz}}{J_M + J_P} & -\frac{D_M}{J_M + J_P} & 0 \\ \frac{k_\theta}{m} & -\frac{k_z}{m} & 0 & -\frac{D_F}{m} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_\tau}{J_M + J_P} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

である。

4.2 可制御性・可観測性

可制御行列 \mathbf{V}_c および可観測行列 \mathbf{V}_o の行列式を計算すると,

$$\det \mathbf{V}_c = -\frac{k_\theta^2 K_\tau^4}{m^2 (J_M + J_P)^4} \quad (4.24)$$

$$\det \mathbf{V}_o = -\frac{k_\theta^2}{m^2} \quad (4.25)$$

となった. これらは 0 ではないため可制御性, 可観測性が確認され, 理論的に浮上可能であることが示された.

4.3 線形性を考えたフィードバックゲインの設計

浮上システムの安定化のための制御は、浮上体位置 z 、永久磁石角度 θ に基づいて、モータの入力電流を左右独立して PD 制御するものとする。具体的には、 $K_{p\theta}, K_{d\theta}, K_{pz}, K_{dz}$ をゲインとして以下の制御則に従うものとする。ここで、 i_L, i_R は左および右のモータの入力電流、 i_0 は平衡位置の電流とする。

$$i_L = K_{p\theta}\theta_1 + K_{d\theta}\dot{\theta}_1 + K_{pz}z + K_{dz}\dot{z} + i_0 \quad (4.26)$$

$$i_R = K_{p\theta}\theta_2 + K_{d\theta}\dot{\theta}_2 + K_{pz}z + K_{dz}\dot{z} + i_0 \quad (4.27)$$

フィードバックゲインは、MATLAB を用いて最適レギュレータにより導出した。最適レギュレータの評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (4.28)$$

に対して、重み行列を以下のように定義した。

$$Q = \text{diag}(50 \ 10000 \ 0.001 \ 0.1), \quad R = 1$$

導出したフィードバックゲインを表 4-1 に示す。

Table 4-1 Feedback gain

$K_{p\theta}$	-33.67
K_{pz}	-3128
$K_{d\theta}$	-0.2502
K_{dz}	-43.48

4.4 数値シミュレーション

4.4.1 シミュレーション結果

前項で導出したフィードバックゲインで、MATLAB を用いて数値シミュレーションを行った。平衡位置の永久磁石角度 θ_0 は、37 deg(0.6458 rad)、浮上体位置 d_0 は、0.02812 m とした。

シミュレーションは、初期位置は平衡位置とし 0.1 s 後に-0.2 mm のステップ外乱を 0.3 s 入力したときの電流値(A)、永久磁石角度(deg)、浮上体位置(m)の応答を調べた。実際の制御は左右独立してモータを動作させるが、シミュレーションは左右同じ角度として行った。それぞれのシミュレーション結果を図 4-5、図 4-6、図 4-7 に示す。

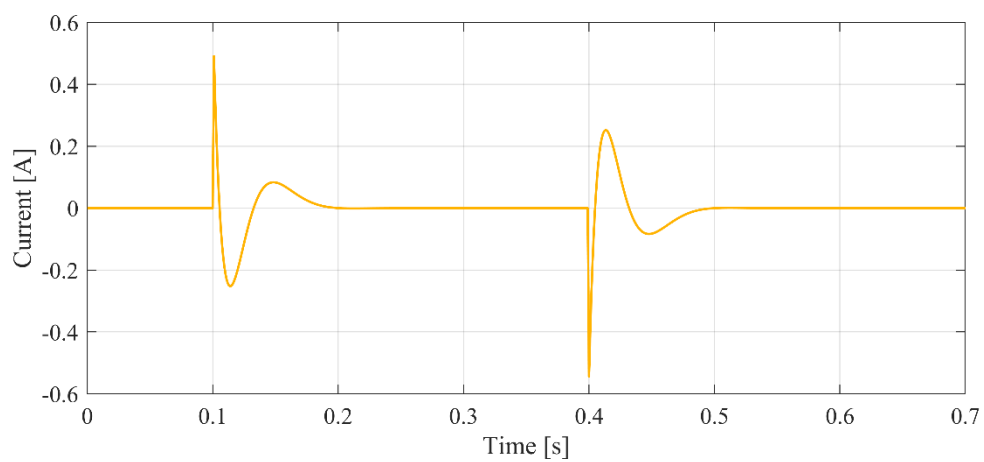


Fig.4-5 Numerical simulation result of current value

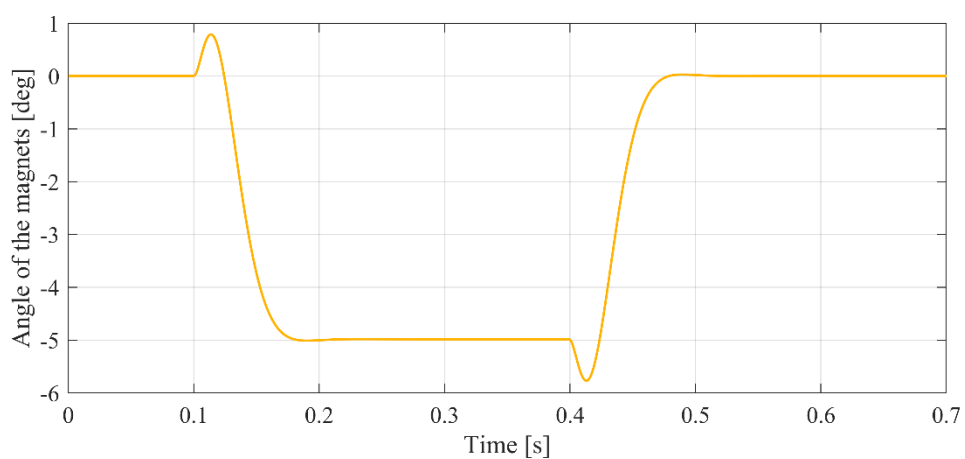


Fig.4-6 Numerical simulation result of angle

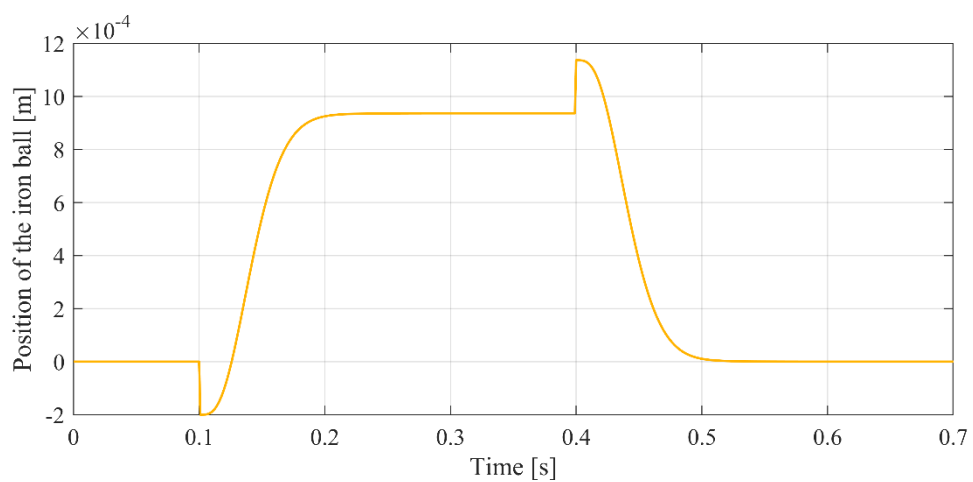


Fig.4-7 Numerical simulation result of position

4.4.2 考察

電流値(A)，永久磁石角度(deg)，浮上体位置(m)の応答は，外乱が加わった後，0.1 s 程である値に収束することがわかった．また，電流値の応答について，モータの定格電流が ± 0.5 A であるのに対し，図 4-5 より定格電流内に収まっていることがわかる．

浮上体位置は外乱が加わると，平衡位置から+0.936 mm 付近で収束した．その後，外乱がなくなり最大で平衡位置から+1.13 mm まで移動したが，これはセンサの検出範囲内である．したがって，理論上では鉛直方向の浮上制御が可能であることが確認できた．

第 5 章 試作機

5.1 試作機の概要

図 5-1 に試作機のシステムの概要を，図 5-2 に製作した試作機を示す．

浮上体位置は，浮上体の鉛直方向には常に重力がはたらいているため，検出に高い精度と応答性能が要求される．したがって，浮上体位置検出のセンサは，非接触で金属の微小変位を測定でき，小型で応答速度が高い渦電流変位センサを使用する．渦電流変位センサは浮上体下部に設置し，マイクロステージによって正確な位置調整が可能となっている．永久磁石の角度検出は，DC サーボモータに付属しているインクリメンタルエンコーダを使用し，左右独立してパルスのカウント行う．システム全般の演算を行う DPS は，エムアイエス株式会社製の sBOX II を使用する．また，鉄球の動きを鉛直方向のみに制限できるようにリニアレールを取り付た．

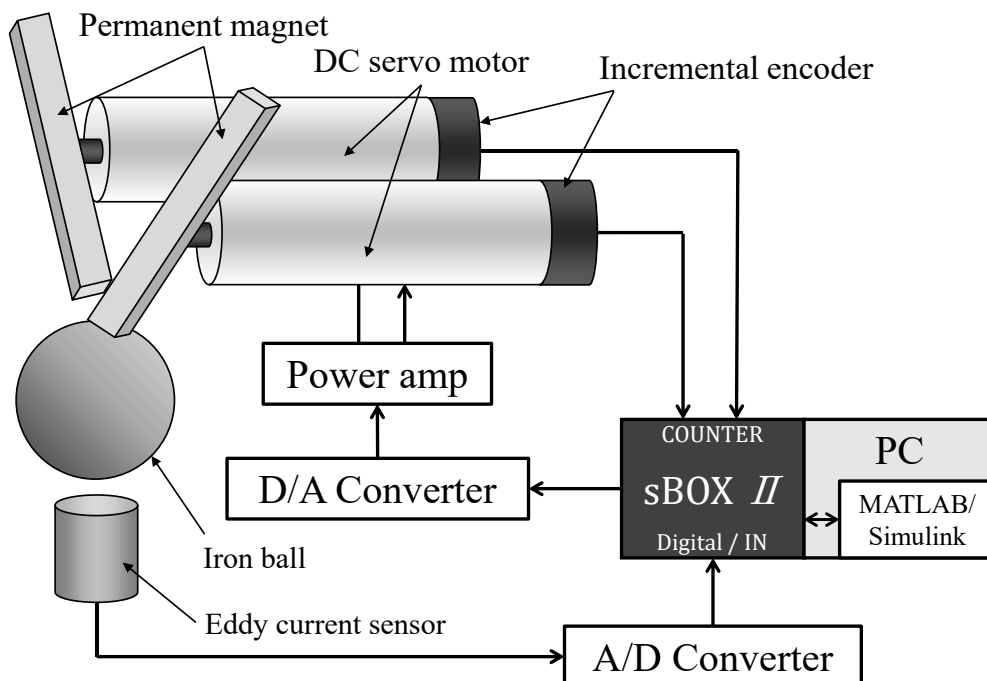


Fig.5-1 Overview of the prototype system

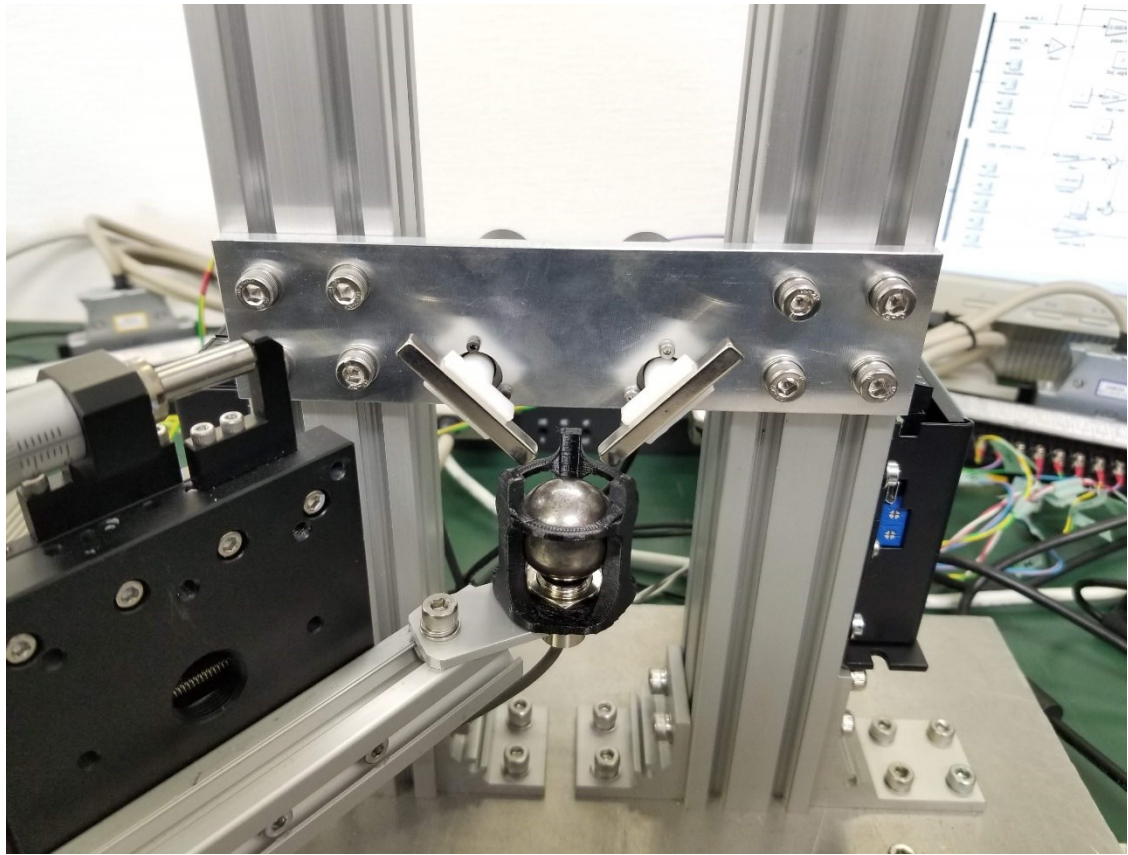


Fig.5-2 Overview of the prototype

5.2 制御システム

制御システムの概略図を図 5-3 に示す。図に示す通り，左右の永久磁石角度の目標値 Ref_{angle} と浮上体位置の目標値 $Ref_{position}$ の 3 つの目標値をもったシステムである。それぞれの目標値に対して PD 補償の 3 つのループがあり，補償された結果を加算した信号が，左右のモータに電流値として入力される。尚，プログラムは MATLAB/Simulink にて作成した。

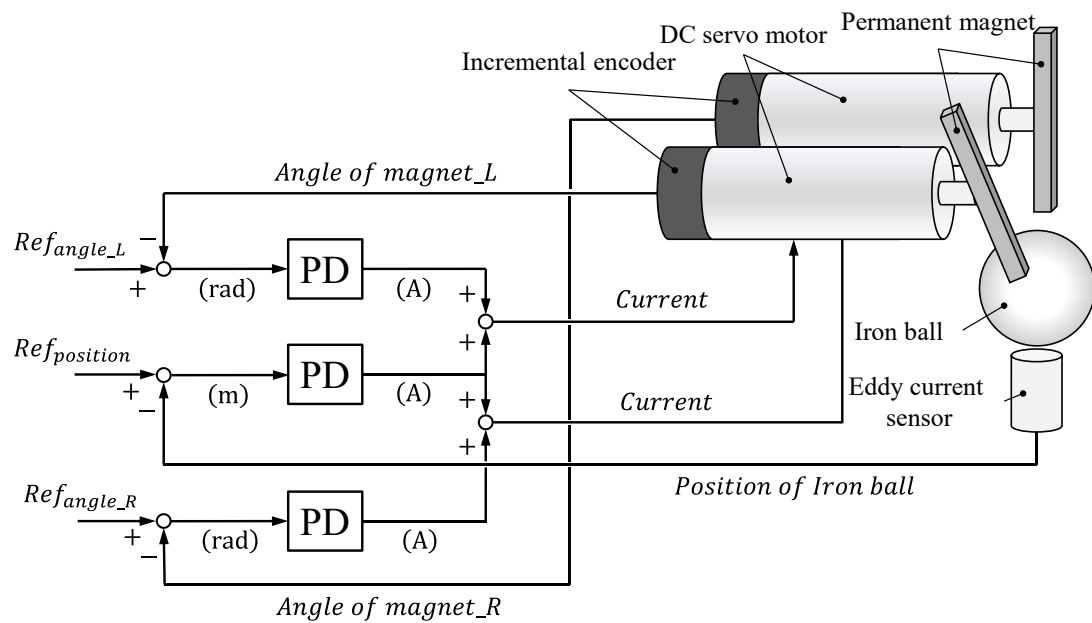


Fig.5-3 Schematic diagram of the control system

5.3 使用機器・部品

5.3.1 渦電流センサ

鉄球の鉛直方向の位置検出には SENTEC 社製の渦電流センサ HA-225S (センサヘッド) および, LS-500-4A (コントローラ) を使用する. 図 5-4 に渦電流センサのセンサヘッドを, 図 5-5 にコントローラを示す. また, 諸元を表 5-1 に示す.

Table 5-1 Specifications of Eddy current sensor

Range of measurement (mm)	0-3.5
Output voltage range (V)	0-3.5
Straightness	$\pm 1\%$ of F.S
Resolution	0.03% of F.S
Output impedance (Ω)	52
Power-supply voltage (V)	DC 12-24 $\pm 15\%$



Fig.5-4 Eddy current sensor



Fig.5-5 Controller for Eddy current sensor

渦電流センサの実際の性能を知るために、次の実験を行った。渦電流センサ上部に鉄球を配置し、ギャップを 0 mm から 14 mm まで 0.5 mm 刻みでセンサの出力値を読み取った。なお、コントローラの設定は、ギャップが 0 mm のときにセンサの出力値 0 V とし、スパン調整を最大の 1.3 倍とした。測定結果を図 5-6 に示す。

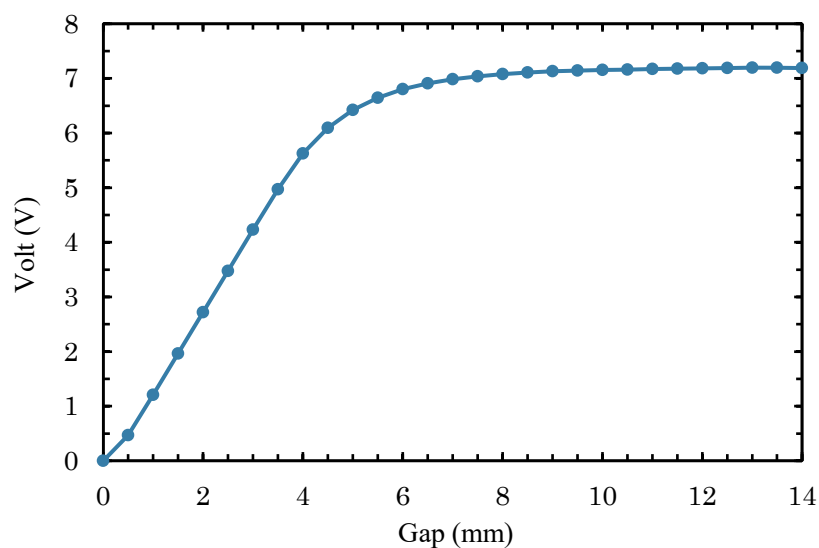


Fig.5-6 Measurement result of output value of Eddy current sensor

ギャップが 0 mm から 4 mm の範囲で線形性がみられた。したがって、本機構での鉛直方向の制御範囲は 4 mm とした。また、ギャップ 0 mm から 4 mm の範囲の近似線の傾きは 1452 V/m となった。したがって、センサの出力値(V)から浮上体位置(m)への変換は、 $\frac{1}{1452}$ m/V のゲインを掛けたものを使用する。

5.3.2 インクリメンタルエンコーダ

永久磁石の角度のパルス検出は DC サーボアクチュエータに付属しているインクリメンタルエンコーダを使用する。緒言を表 5-2 に示す。

Table 5-2 Specifications of Incremental encoder

Output circuit	Line driver
Resolution (pulse / rotation)	360
Power-supply voltage (V)	DC 5 \pm 5%
Current consumption (mA)	170 max.
Response frequency (kHz)	100

5.3.3 安定化電源

DC サーボモータおよび渦電流センサの電源供給は株式会社カスタム製の CPS-3030 (図 5-7) を、インクリメンタルエンコーダの電源供給は Sunhayato Corp.製の DK-801 (図 5-8) を使用した。



Fig.5-7 DC power supply (DC servo motor, Eddy current sensor)



Fig.5-8 DC power supply (Incremental encoder)

5.3.4 DPS

DPS にはエムアイエス株式会社製の sBOX II (図 5-9) を 1 つ使用する. sBOX II 使用する端子は, アナログ端子から渦電流センサの値を入力し, カウンター端子でインクリメンタルエンコーダのパルスをカウントする. また, プログラミングは MATLAB/Simulink で行った.



Fig.5-9 sBOX II

5.3.5 マイクロステージ

渦電流センサは図 5-10 に示すマイクロステージに取り付け, 鉛直方向および水平方向に微小な位置調節が可能である.

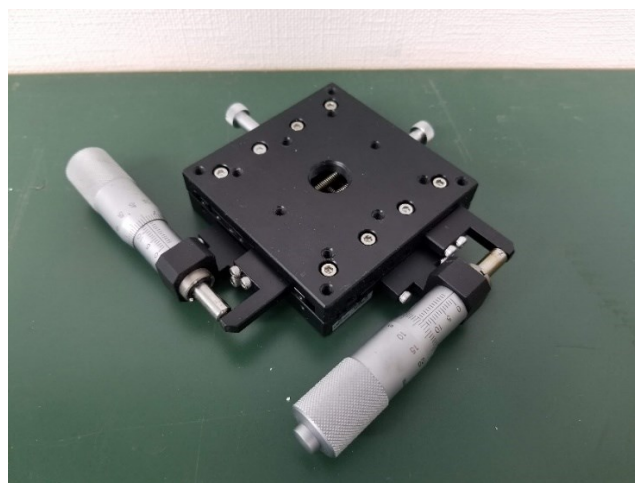


Fig.5-10 Micro stage

5.3.6 リニアレール

本試作機では, 浮上体の動きを鉛直方向のみにするため, 水平方向の動きを制限できるようにリニアレールを 3D プリンタで製作した.



Fig.5-11 Linear rail

第 6 章 浮上実験

製作した試作機で行った浮上実験の結果を図 6-2 に示す．実験は浮上体を手で支えながら行った．

浮上体は徐々に振動が大きくなり最終的に永久磁石に吸着して制御不能となった．図 6-2 の永久磁石の角度と浮上体位置に着目する．浮上体位置が下がると永久磁石の角度が大きくなり，浮上体に永久磁石が追従していることがわかる．

本実験で浮上の実現には至らなかった．しかし，浮上体に永久磁石が追従して浮上体に対して復元力がはたらいているため，ゲインを再調整し減衰要素を大きくすることで浮上実現の可能性はあると考えられる．

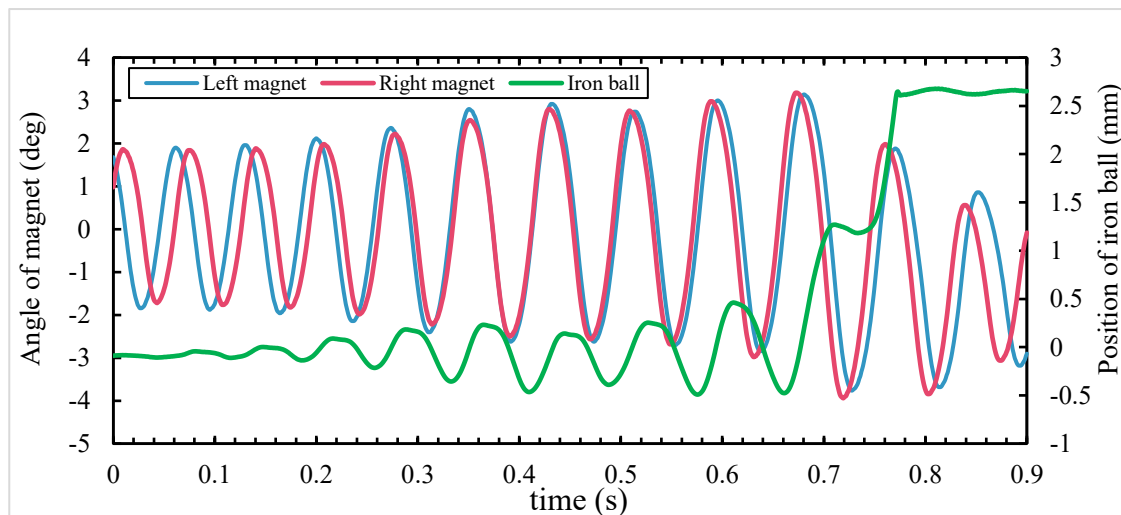


Fig.6-1 Results of levitation experiment

第 7 章 結論

7.1 まとめ

本稿では、角柱形状の永久磁石と小型のロータリーアクチュエータを 2 つずつ使用した非接触支持機構の新提案を行った。本機構の設計にあたり、磁力および磁束線の解析、磁力の測定実験を行い、最適な磁極の組合せと磁石間距離を導出することができた。そして、その結果を基に試作機を製作した。

浮上システム実現の第一段階として、鉛直方向のみの制御を考えたシステムのモデル化を行い、可制御性および可観測性が確認できたため、理論上浮上可能であることを示すことができた。

試作機を用いて浮上実験を行った。今回の実験では浮上の実現には至らなかったものの、浮上体に復元力がはたらいっていることが確認でき、ゲインの調整次第では浮上できる可能性があることがわかった。

7.2 今後の課題

今後は、ゲインを再調整して浮上実験を行う。そして、鉛直方向の浮上体制御が実現したら、リニアレールを取り外して完全に非接触で浮上体の支持を試みる。そのためには、鉛直方向の浮上制御に加えて水平方向の制御も同時に行う必要がある。そこで、浮上体にはたらく水平方向の力も考慮したモデル化を行い、浮上実験を行う予定である。

謝辞

本研究に取り組むにあたり，終始丁寧にご指導を頂きました岡宏一教授，原田明德准教授にお礼申し上げます．また，日頃から研究活動を共にし，たくさんの助言を頂きました機械・航空システム制御研究室の皆様に感謝いたします．

そして，6年間大学に通わせて頂き大学生生活を支えて下さった両親に，心から感謝いたします．

参考文献

- (1) 一般社団法人電気学会磁気浮上技術調査専門委員会編, 磁気浮上技術の原理と応用, 科学情報出版株式会社(2018)
- (2) B. V. Jayawant: Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques , Edward Arnold Ltd. (1981)
- (3) 磁気浮上方式と関連技術, 電気学会技術報告 (II 部) 第 353 号, 電気学会, (1990)
- (4) 岡宏一, 樋口俊郎, 永久磁石とアクチュエータを用いた 3 自由度平板浮上システム, 電気学会論文 Vol115D No.3(1995)
- (5) 岡宏一, 樋口俊郎, 白石卓也, 永久磁石の運動制御による懸垂形磁気浮上機構, 電気学会論文誌D, 119 巻 3 号(1999)
- (6) 小豆澤照男, 磁気浮上を利用した搬送技術, 精密工学会誌 Vol.63 No.7(1997)
- (7) 政木 慶次, 永久磁石の運動制御を用いた 2 自由度磁気浮上装置の開発, 高知工科大学, 修士論文(2002)
- (8) Feng SUN, Magnetic Suspension Systems Using Permanent Magnet, Kochi University of Technology, Doctorate thesis(2010)