

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電磁力駆動系における感温磁性体の応用と省エネルギー化
Title(English)	
著者(和文)	浜維志
Author(English)	Tadashi Hama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10866号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:進士 忠彦,初澤 毅,吉田 和弘,吉岡 勇人,只野 耕太郎,佐藤 海二
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10866号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

東京工業大学
平成二十九年 学位論文

電磁力駆動系における
感温磁性体の応用と省エネルギー化

メカノマイクロ工学専攻
浜 維志

目次

第1章 緒論	1
1.1 電磁アクチュエータの有用性.....	1
1.2 電磁力駆動系における課題.....	2
1.2.1 電磁力駆動系における高加速・高速運動とその高精度化.....	2
1.2.2 電磁力駆動系の高推力発生時の省エネルギー性能向上.....	3
1.3 本研究の目的.....	6
1.4 本論文の構成.....	6
第2章 高加速・高速電磁力駆動系の高精度制御	8
2.1 緒言.....	8
2.2 超高加速・高速リニアモータの基本構成と駆動原理.....	8
2.2.1 基本構成.....	8
2.2.2 駆動原理.....	10
2.2.3 駆動性能.....	10
2.3 高加速・高速運動制御系の課題.....	11
2.3.1 運動制御系で使用している制御器.....	12
2.3.2 運動制御系の問題点.....	14
2.4 学習制御器を用いた高加速・高速性能と高精度性能を両立する運動制御系.....	16
2.4.1 B-spline ネットワークを用いた学習制御器.....	16
2.4.2 学習制御系の構成.....	19
2.4.3 学習制御系の評価.....	20
2.4.4 高推力駆動時の消費電力.....	22
2.5 結言.....	23
第3章 感温磁性体を用いた小型省エネルギーアクチュエータ	24
3.1 緒言.....	24
3.2 感温磁性体のアクチュエータへの利用.....	24
3.3 駆動原理.....	26
3.3.1 推力発生原理.....	27

3.3.2	温度調節原理.....	28
3.4	アクチュエータの設計.....	28
3.4.1	永久磁石極数の決定.....	29
3.4.2	感温磁性体厚さの決定.....	30
3.4.3	ハルバッハ配列の採用と永久磁石幅の最終決定.....	31
3.5	試作装置.....	32
3.6	駆動特性.....	33
3.6.1	静特性.....	34
3.6.2	電磁アクチュエータとの性能比較.....	35
3.6.3	温度応答実験.....	36
3.6.4	温度応答モデル.....	37
3.7	位置制御性能.....	40
3.8	結言.....	42
第4章 静的推力発生時の省エネルギー化と高応答を両立するハイブリッド		
アクチュエータとその基本特性..... 44		
4.1	緒言.....	44
4.2	磁力を利用した可変バイアス要素と高応答要素との融合.....	44
4.3	駆動原理.....	46
4.3.1	ハイブリッド化の方法.....	46
4.3.2	円筒形状のハイブリッドアクチュエータ.....	47
4.3.3	アクチュエータの駆動方法.....	49
4.4	アクチュエータの設計.....	51
4.4.1	磁気回路設計.....	52
4.4.2	熱減磁を回避するための設計.....	55
4.4.3	コイルの定数設計.....	57
4.4.4	TSMC ユニット固定リングの強度計算.....	58
4.5	試作装置.....	60
4.5.1	試作アクチュエータの構成要素.....	60
4.5.2	試作アクチュエータの組み立て方法.....	63
4.6	駆動特性.....	64

4.6.1 推力特性.....	64
4.6.2 消費電力.....	66
4.6.3 電磁アクチュエータとの性能比較.....	68
4.6.4 温度応答特性.....	69
4.7 結言	70
第5章 ハイブリッドアクチュエータの制御性能	71
5.1 緒言	71
5.2 位置制御性能.....	71
5.3 制振制御性能.....	74
5.3.1 高機能鉛直制振メカニズムへの応用	74
5.3.2 制振制御実験.....	76
5.4 結言	78
第6章 結論.....	80
6.1 本論文のまとめ	80
6.2 今後の課題	82
参考文献	84

第1章 緒論

1.1 電磁アクチュエータの有用性

現在、様々な原理に基づくアクチュエータが実現、市販され、多様な用途のための運動メカニズムに組み込まれて利用されている。アクチュエータに利用される原理としては、電磁力や静電気力、空気圧や油圧、電歪効果、機能性材料の化学的・熱的変形などがある。アクチュエータはその基礎となる原理によって異なる特徴をもっており、目的に応じて適切な種類を選択する必要がある。

表 1.1 は、各アクチュエータの基本的な特性をまとめたものである。特別な工夫により改善可能な項目もあるが、ここでは考慮していない。また、高応答で精密微動が可能である場合は、制御性が高いことを意味している。静電アクチュエータは、材料の選択肢が広く簡単な構造であるため、小型化に適し、微細化や薄型化により単位体積当たりの発生力を増加させることが可能である。そのため特に MEMS 分野で活用されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾が、通常サイズで大きな発生力を得るには複雑な構造を必要とし、高電圧を印加する必要があるなどの欠点を持つ。空気圧・油圧アクチュエータは、体積当たりの出力が大きい特徴を有する^{(4),(5)}ため、大きな推力を必要とする建設機械やプレス装置によく利用されている。しかし、駆動要素とは別にコンプレッサ等の周辺機器が不可欠であり、表 1.1 では×と表示している。圧電素子は、応答性が高く精密微動が容易であり、固体アクチュエータとして構造が簡単である利点を活かし、精密位置決め用途に使用されている⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。一定の変位を保持するのに必要な電力は極めて小さいが、動的には低効率であると指摘されている⁽⁹⁾。さらに推力も大きい、ストロークが小さい欠点を持つ。超音波モータとして利用する場合、広い動作範囲が得られるが、推力は摩擦特性に制限され、応答性は駆動周波数に依存する。また、効

Table 1.1: Comparison of actuator's characteristics

	電磁	静電	油空圧	圧電	超音波
高推力	○	△	◎	◎	○
高応答	◎	◎	○	◎	△
精密微動	◎	◎	△	◎	◎
長ストローク	◎	×	○	×	◎
効率	○	○	△	△	△
単純構造	○	○	×	○	○

率は低いと言われている⁽²⁾。高分子アクチュエータや形状記憶合金アクチュエータなど、機能性材料の特性を活かしたアクチュエータは様々な利点が報告されている^{(2),(10)-(12)}が、実用上の課題が多く、表 1.1 に示すアクチュエータのように広く使用されるには至っていない。

一方、電磁アクチュエータは、高い応答性と運動精度に加え、比較的大推力で、必要な付加設備が比較的簡素、大きなストロークの実現が容易で、エネルギー効率も比較的良好といった特徴をもつ。すなわち、アクチュエータに求められる様々な特性に対し、多くの点で優位性を示す⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。そのため応用範囲が広く、精密位置決め分野においても大きな利用割合を占めている⁽¹⁶⁾。様々な仕様の電磁アクチュエータが市販され、周辺機器の選択肢も多く、利用環境が整っており、従来油空圧アクチュエータが利用されていた装置にも応用が広がっている。よって多くの原理に基づくアクチュエータの中で、今後とも大きな存在意義を保ち続けるものと考えられる。

しかし、アクチュエータに要求される性能は年々高くなるとともに、同時に満足すべき要求項目も増している。そのため主要位置を占める電磁アクチュエータの性能向上は重要な課題であり、その長所をさらに高めることは、産業界の進歩に大きく貢献するものと期待される。

1.2 電磁力駆動系における課題

自動化は現代社会の大きな流れであり、アクチュエータとその制御器を含む駆動系はその中で重要な役割を果たしている。駆動系の特性は、アクチュエータ特性で明確に制約されるが、電磁アクチュエータのように高い応答性と高い制御性を持つ場合には、コントローラによる特性改善が期待できる。その特徴を利用して、電磁力駆動系は生産効率に直結する高加速・高速性や、製品品質を大きく支配する位置・運動精度、駆動効率が求められる装置に利用されている⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾。しかし要求される性能は近年益々厳しくなっており、その向上が強く求められている。

その必要とされる代表的な特性が、加速・速度特性、位置・運動精度であり、駆動効率である。電磁アクチュエータの中でも、コア付電磁石と永久磁石の組合せは、単位電力あたりの推力が大きく、大ストロークの電磁アクチュエータでよく利用されている。しかし、大きな推力を必要とする場合、推力ゲインの非線形性や推力リップルといった非線形特性が高精度化を妨げる要因となる。また従来の電磁アクチュエータは、他のアクチュエータよりも駆動効率が高いが、熱による特性劣化、出力制限といった課題があり、定常推力を長期間発生する場面では不利になる。以上のように、単一のアクチュエータが複数の要求に応えることは難しい。以降では、加速・速度特性、位置・運動精度、駆動効率に着目し、電磁力駆動系における問題点とこれを解決するための課題について述べる。

1.2.1 電磁力駆動系における高加速・高速運動とその高精度化

加速・速度特性と位置・運動精度は、運動システムにおける代表的な性能指標である。

特に後者は製品の品質・性能に直結する指標である。したがって従来より重視されており、サブナノオーダーの位置決め結果が報告され⁽²⁰⁾、半導体露光装置ではさらなる高精度化が追求されている。しかし、多くの位置決めシステムの要求精度は、サブミクロンオーダー程度が多い。その一方で、生産効率に直結する高加速・高速性能の要求が顕在化してきており、年々高まっている⁽²¹⁾。

高加速・高速システムとして、ボールねじを用いて加速度 1.8 G、速度 1.8 m/s の性能を示す高速三次元測定機⁽²²⁾や、加速度約 50 m/s² の性能を有する空気圧機構⁽²³⁾が実現されている。しかし高加速・高速で高い運動精度を実現するためには、動力伝達要素の存在しない電磁リニアモータの使用が効果的であり、実際多くの高加速・高速システムで電磁リニアモータが採用されている⁽²⁴⁾。高精度でかつ高加速・高速性能を実現するものとして、加速度 40 G、最大速度 5 m/s、位置決め分解能 1 μm を実現する電磁リニアモータ⁽²⁵⁾が報告されている。さらに最大加速度 102 G、最大速度 12.2 m/s の性能を有する超高加速・高速リニアモータが製作され⁽²⁶⁾、同時に 500 nm 以下の位置決め性能が実現されている⁽²⁷⁾。

しかしながら、高推力化と引き換えに、非線形推力ゲインや推力リップルなどの顕著な非線形性を示し、ガイドで生じる摩擦特性も加わって、高速運動時に運動精度が大きく劣化する問題が生じている。構造・形状的に推力リップルを抑制する方法は数多く提案され⁽²⁸⁾、機構の無摩擦化により、非線形性を低減することは可能であるが、推力性能に影響を与え、コストが上昇するなど、適用は難しい。そのため制御系の改良による問題解決が望ましく、リニアモータの顕著な非線形性に対応できる制御系の構築が課題となっている。

1.2.2 電磁力駆動系の高推力発生時の省エネルギー性能向上

環境への負荷低減の必要性やエネルギーコストの上昇のため、近年省エネルギー化の重要性が高まっている。電磁リニアモータが体積に対して大きな推力を発生する際には、運動エネルギーに変換されないジュール損失が問題となる。これはアクチュエータの原理的な問題であるため、駆動方法などのソフトウェアによる低減はできず、根本的な対策が必要である。また、この損失はコイルの体積と発生推力に大きく依存し、既存の駆動原理を踏襲する以上、体積が制限される条件において、設計変更により損失低減を図ることも極めて困難と考えられる。

一般に、小さな消費電力で大きな推力を発生する手法として、電磁モータと減速機の組み合わせが知られ、様々な分野で広く用いられている⁽²⁹⁾。しかしながら、減速機の利用は速度や応答性の恒常的な低下を招き、推力の効率的発生と応答性はトレードオフの関係にある。もし、推力の効率的発生と高応答な性能の両立が実現すれば、鉛直荷重を効率的に支持し、高応答に駆動できる制振機構やロボットアーム、鉛直ステージなどへの応用が期待される。

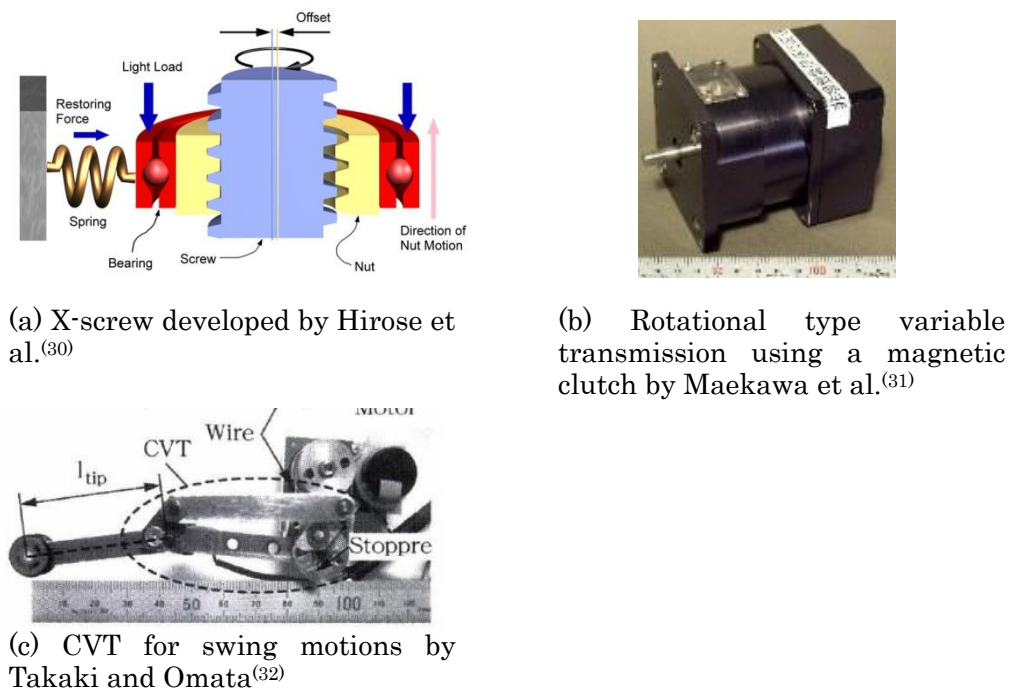


Fig. 1.1: Load-sensitive variable transmission



Fig. 1.2: Pneumatic rotary actuator system using an electromagnetic force by Shinno and Yoshioka⁽³³⁾

これまでに、推力の効率的発生と高応答性能の両立を目指し、複数の運動メカニズムが研究されている。広瀬らにより、図 1.1 に示す負荷に応じて自動的に減速比を変更できる直動型負荷感応無段変速機⁽³⁰⁾が提案され、前川らにより磁気クラッチを用いた回転型負荷感応変速機⁽³¹⁾、高木・小俣らにより揺動型負荷感応無段変速機⁽³²⁾が提案されている。これにより、ロボットのグリップなどで要求される、無負荷時の高速・高応答運動と負荷時の高推力生成の両立を、小型構造で実現している。しかしながら、これらは本質的に変速機であるため、高推力と高速・高応答性能を同時に両立することは不可能である。

これに対し、新野・吉岡らが図 1.2 に示す空気圧アクチュエータと電磁アクチュエータの

ハイブリッド構造⁽³³⁾を提案している。本構造は、減速機などの速度を低下させる要素を廃した上で、空気圧アクチュエータで鉛直荷重を支持し、電磁アクチュエータで高応答な運動を生成する方式を採用している。空気圧アクチュエータは鉛直荷重の支持自体にエネルギーを消費しないため、高速・高応答な性能に加え、高推力の効率的発生を実現できる点で理想的な構造である。しかしながら、空気圧アクチュエータを駆動するためには、コンプレッサやエアタンクなどの付属設備が複数必要で、システム全体が大型化してしまう問題がある。そこで、本研究においては、ポータブル化が可能な電力のみを用いたシステムに焦点を当てる。なお、高推力発生時に問題となる消費エネルギーの増大は、特に推力を連続的に発生する場合において顕著となる。そこで、以降では、推力を静的に発生させる場合の消費電力に着目し、高推力の効率的発生について議論する。

これまで述べてきたように、特性の異なる様々なアクチュエータが存在するが、単一のアクチュエータで高推力の効率的な発生と高応答性を両立させるのは難しい。そこで、図1.3のように、鉛直荷重の支持や一定の把持力発生などのために高推力を連続的かつ効率的に発生するための要素と、高応答な運動を発生する要素を組み合わせたハイブリッド構造により、両機能の両立を図ることを考える。前者は、バイアス力として定常推力を発生する必要があることから、「可変バイアス要素」、後者を「高応答要素」と呼ぶ。なお、本組み合わせは、参考文献(33)の空気圧アクチュエータと電磁アクチュエータのハイブリッド構造を一般化したものと捉えることができる。

可変バイアス要素は、高推力を連続的にかつ小さな消費電力で生成できることが求められる。また、併用する高応答要素との融合が可能で、小型構造で両者の組み合わせを実現できることが望ましい。一方で、電力を用いた高応答な運動生成が求められる高応答要素には、電磁駆動要素をダイレクトドライブ構造で採用することが相応しいと考えられる。すなわち可変バイアス要素は、ダイレクトドライブ電磁駆動要素との融合を可能とする構成を有することが望まれる。

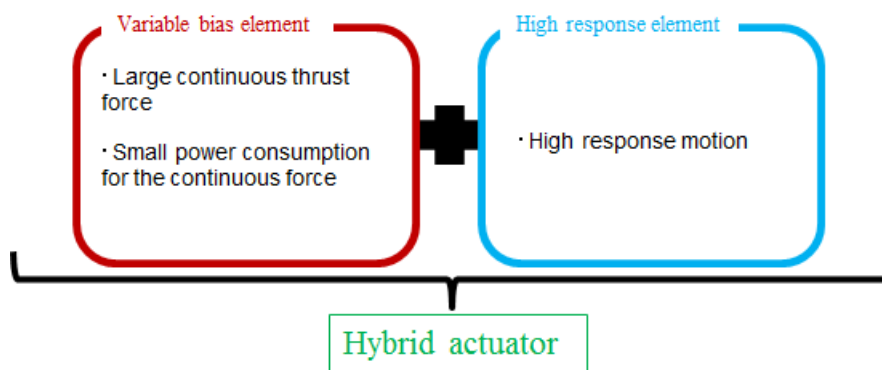


Fig. 1.3: Concept of the hybrid actuator

1.3 本研究の目的

本論文では、産業界で多く用いられている電磁力駆動系を対象に、高加速・高速性能と運動精度、省エネルギーに関する問題を明らかにし、その解決方法を提案し、有効性を実証することを目的としている。まず高加速・高速を追求した場合の機構上の問題について述べ、その解決が適した制御方法を適用することで可能になることを実証し、消費電力の増大問題を提議する。次に、消費電力の問題を解決するために、磁気特性を変化させる新たなアクチュエータを提案する。具体的には、静的ではあるが高推力を効率的に発生できる、感温磁性体と永久磁石を組み合わせたアクチュエータを提案・実現し、その効果を実証する。その上でそのアクチュエータを取り込み、効率的な高推力供給と高応答運動を両立する駆動系を提案し原理検証を行う。これにより、省エネルギー性能の高い電磁力駆動系を実現する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。また、フローチャートを図 1.4 に示す。

第2章「高加速・高速電磁駆動系の高精度化」では、電磁リニアモータの高加速・高速運動における課題を明らかにし、顕著な非線形性を示す電磁アクチュエータでも、適切な制御方法を適用することにより、高加速・高速運動と高い運動精度を両立できることを実証している。また、消費電力が増大する問題に着目し、その解決方針について議論している。

第3章「感温磁性体を用いた小型・高推力アクチュエータ」では、電磁リニアモータが高推力を発生する際に問題となる消費電力を取り上げ、これを解決する手段として、静的な高推力を効率的に生成できる可変バイアス要素を提案している。なお、可変バイアス要素は、電磁駆動要素により構成される高応答要素との融合を考慮し、感温磁性体を用いて熱により発生磁力を調整し駆動される方式としている。次に、可変バイアス要素のためのアクチュエータを設計・試作し、推力特性や温度応答性などの基本特性を明らかにした後、可変バイアス要素のみで駆動される場合の制御性能を検証している。

第4章「高応答と省エネルギーを両立するハイブリッドアクチュエータとその基本特性」では、第3章で提案した可変バイアス要素と高応答要素としての電磁アクチュエータとをハイブリッド化した、低消費電力で高推力を発生可能な高応答アクチュエータを提案している。さらに、提案アクチュエータを設計・試作し、推力特性や温度応答性をはじめとする基本特性について明らかにしている。

第5章「ハイブリッドアクチュエータの制御性能」では、第4章で提案したハイブリッドアクチュエータに運動制御や制振制御を適用し、制御性能を検証している。

第6章「結論」では、各章で得られた結果を述べ、今後の課題について述べている。

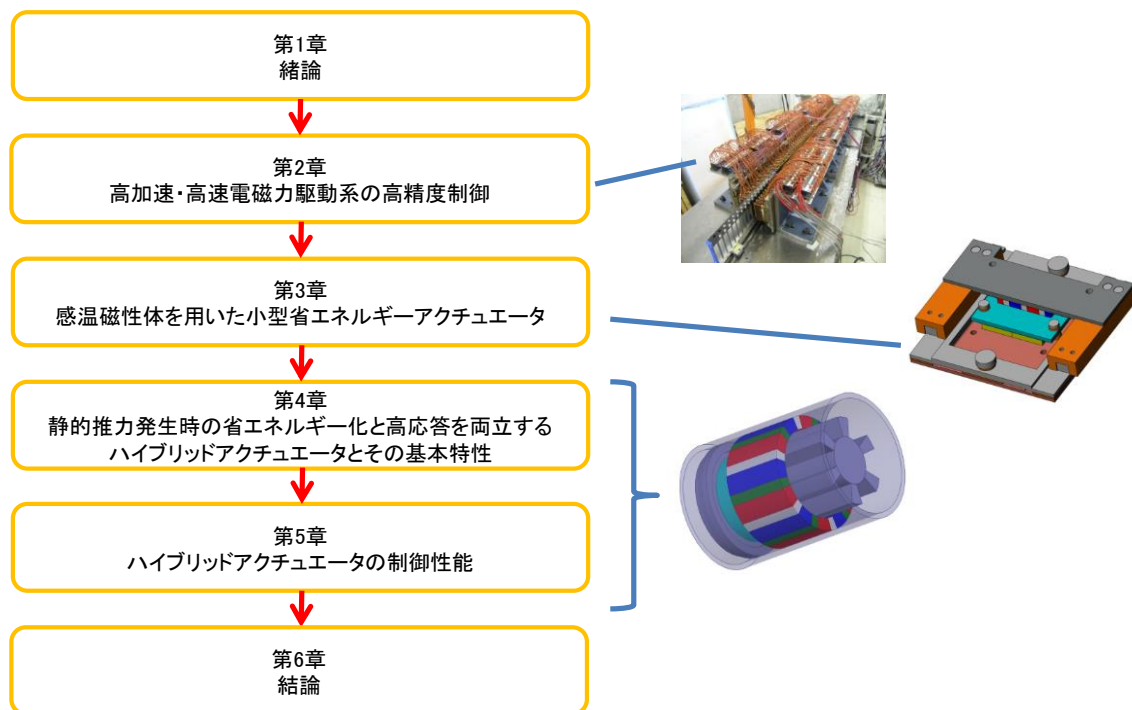


Fig. 1.4: Flow chart of this thesis

第2章 高加速・高速電磁力駆動系の高精度制御

2.1 緒言

電磁力駆動系には様々な長所があり、その長所を伸ばし追求することは重要である。高加速・高速性能は生産効率に直結する重要な性能で、運動精度は製品品質を左右する基本的な性能であり、長年多くの研究開発が行われている。サーボ機構において本質的な性能である両性能は、製造分野では近年ともに重要視され、高加速・高速性能による生産効率向上と精度性能維持・向上の両立が強く求められるようになってきている。

そのような過去・現在・将来にわたる要求に応えることを目的に、加速度 100 G、速度 10 m/s を超える超高加速・高速リニアモータが設計試作され、位置決め動作において 500 nm 以下の精度が実現されている⁽³⁴⁾。しかし、高い推力性能を実現する代償として複数の要因から生じる強い非線形性をもってしまい、加速度や速度の増加とともに運動精度が顕著に劣化する問題が生じ、その解決が重要な課題になっている。そこで本章では、顕著な非線形性を有している機構でも、その加速度・速度性能を活かし、精度劣化の要因を制御技術で解決可能であることを実証する。その上で、電磁力駆動系の残された課題であるエネルギー問題について議論する。

2.2 超高加速・高速リニアモータの基本構成と駆動原理

2.2.1 基本構成

本研究で用いる超高加速・高速リニアモータを含む実験装置の全体写真を図 2.1 に示す。本装置は、永久磁石を組み込んだ可動子が、電磁石である固定子の間を移動する構造を持つ永久磁石 (PM) 可動型同期モータである。ここでは、本装置の構成要素について詳述す

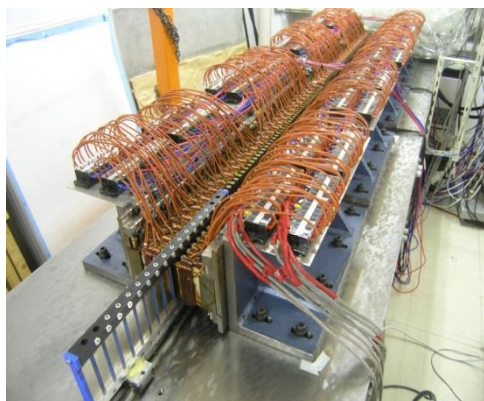


Fig. 2.1: Prototype ultrahigh acceleration and high velocity PM linear synchronous motor

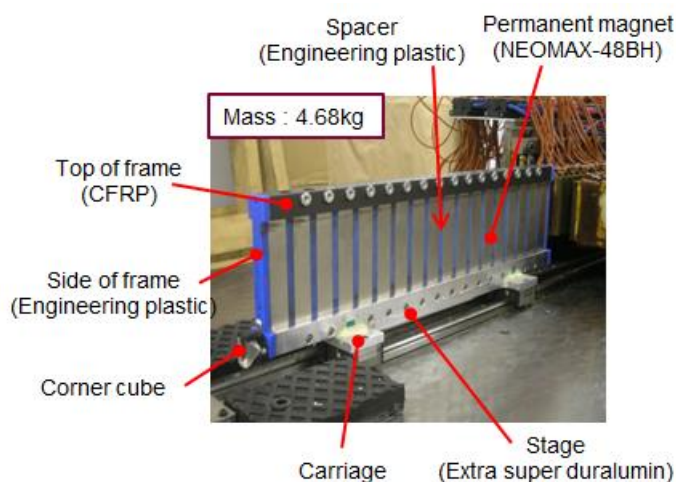


Fig. 2.2: Overview of the prototype mover

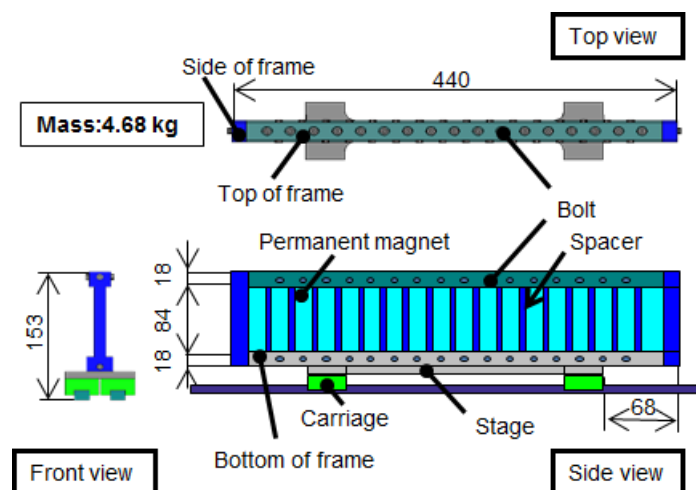


Fig. 2.3: Schematic of the experimental mover

る。

・可動子

可動子の写真を図 2.2 に、模式図を図 2.3 に示す。可動子の全長は 440 mm、定盤面からの高さは 153 mm、質量は 4.68 kg である。この可動子には、寸法 12 mm×18 mm×100 mm の永久磁石（NEOMAX 製 NEOMAX-48BH）が中心間距離 24 mm の間隔で 18 個組み込まれており、隣り合う永久磁石間で磁極の方向が反対になるように配置されている。永久磁石の間には、寸法 12 mm×6 mm×100 mm のエンジニアリングプラスチックをスペーサとして配置されている。これらが可動子上部に設けられた CFRP 製のフレームとねじで固定され、リニアガイドのキャリアを取り付けた超々ジュラルミン製のステージに設置されている。

・固定子

固定子の写真を図 2.4 に、模式図を図 2.5 に示す。固定子は、珪素鋼板のコア歯に 1 本あたり 100 回巻のコイルを取り付けた電磁石を 18 mm ピッチで配置したものであり、電磁石 56 本を 1 組としたとき、この電磁石 2 組を対向して設置している。固定子の全長は 1 m である。固定子の定盤面からの高さは 200 mm である。可動子と固定子との間隔（ギャップ）は、調節を容易にするために 3 mm としている。

・リニアガイド

リニアガイドは NSK 製 LS15CL（ボールガイド）を用いている。36 mm 間隔で 2 本配置された支持レールの上に、片側 2 個ずつ合計 4 個のキャリッジが取り付けられており、これらが可動子のステージに固定され、可動子の直線運動を可能にしている。キャリッジのベアリングボールが金属製である場合、鉄粉が磁力によりレールなどに付着してしまう可能

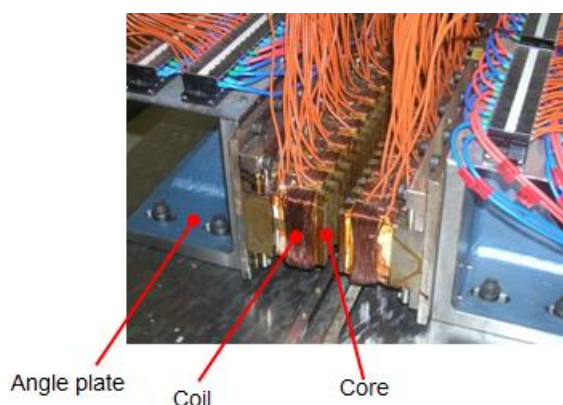


Fig. 2.4: Overview of the experimental stator

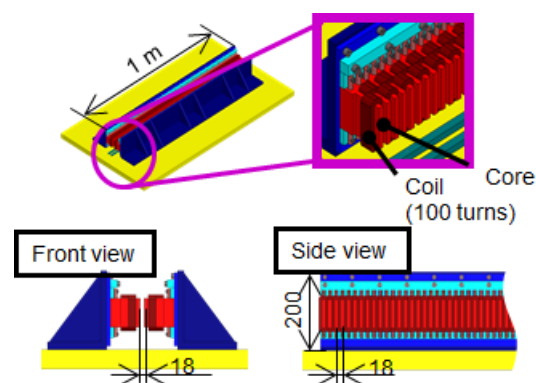


Fig. 2.5: Schematic of the experimental stator

性があるため、セラミックボールを使用している。

・変位測定装置

可動子の変位測定にはレーザ干渉計を使用している。レーザ干渉計の分解能は 79.1 nm である。光学系は、可動子の後端部に取り付けられたコーナキューブ、定盤に設置されたベンダミラーと、定盤側面に取り付けられたインターフェロメータで構成されている。レーザ干渉計のサンプリング周波数は 62.5 kHz である。

2.2.2 駆動原理

図 2.6 で示すように、本装置の電磁石は A 相, B 相, C 相, D 相と、印加する電流の正負が逆の \bar{A} 相, \bar{B} 相, \bar{C} 相, \bar{D} 相の 8 相で構成されている。図 2.7 は、各相に印加する電流の基本波形を示している。可動子位置に対して、各相の電流を図 2.7 のように切り替えると、コイルと可動子永久磁石との間に吸引・反発力が働き、可動子には正の向きに推力が発生する。可動子が 6 mm 進む毎に、各相に印加される電流の向きが順に切り替えられ、特定の相に注目すると電流は 48 mm 周期で切り替えられる。

2.2.3 駆動性能

現状の駆動性能は、最大加速度 79.4 G, 最大速度 11.1 m/s となっている⁽³⁵⁾。なお、固定子・可動子間のギャップを 1 mm にすると最大加速度 100 G, 最大速度 12 m/s の駆動性能を実現できる⁽³⁴⁾が、ギャップ調整を簡単化するため、ギャップを 3 mm としている。

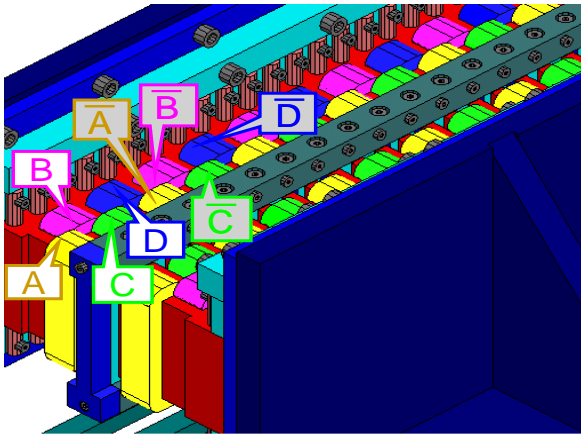


Fig. 2.6: Sequence arrangement of phases

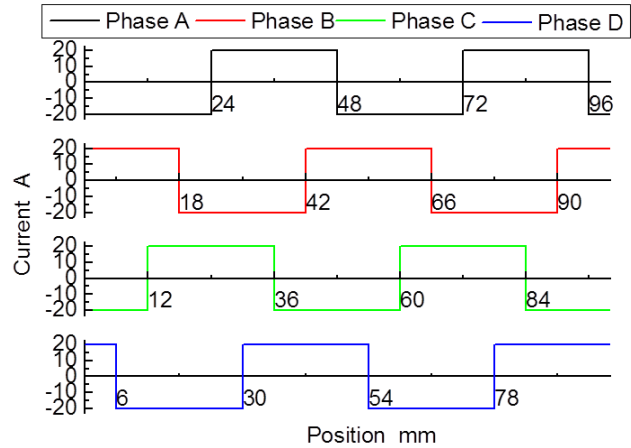


Fig. 2.7: Driving current command as the function of the mover's position

2.3 高加速・高速運動制御系の課題

本節では、超高加速・高速リニアモータのために設計された軌跡制御系について述べる。本研究で議論のたたき台となる基本の運動制御系は、PID 制御器を用いた一般的なフィードバック制御器に加え、高加速・高速運動に要求される高い応答性に対応するために、リニアモータの力学モデルを基礎としたフィードフォワード要素を備えている。さらに、補償器で除去しきれない誤差発生要素の影響を低減する目的で、外乱オブザーバが使用されている。

本リニアモータは、高推力化のために非線形性の強いコア付電磁石を使用している。そのため、コギング力や、磁気飽和に起因する非線形特性によって、運動性能の劣化が懸念され、摩擦力も作用する。これらの影響の低減が本制御系においては要である。そこで、コギング力補償のために専用のフィードフォワード要素を用い、磁気飽和の影響の補償のために、操作量を印加電流に変換する部分に、非線形推力ゲインを補償する線形化補償器を用いている。さらに急峻に変化する摩擦特性を補償するフィードフォワード要素を組み込んでいる。以上の制御器を含む制御系のブロック線図を図 2.8 に示す。以降では、本制御

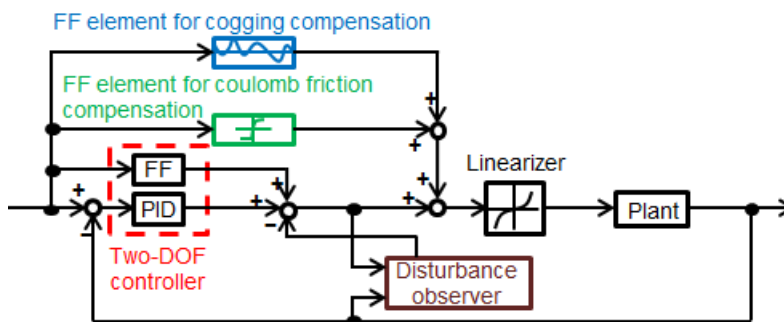


Fig. 2.8: Block diagram of the basic control system

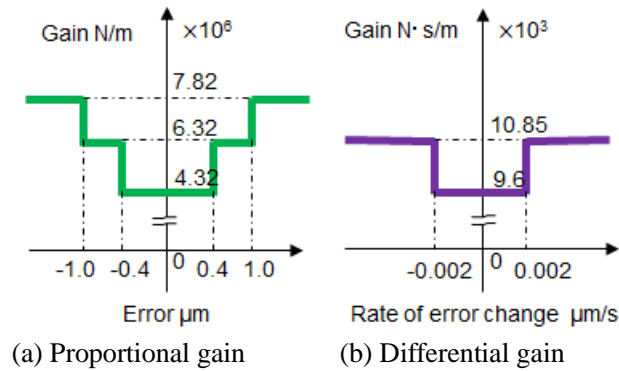


Fig. 2.9: Gain-scheduling functions

系で使用している各制御器の具体的な構成と、制御系の問題点について説明する。

2.3.1 運動制御系で使用している制御器

本制御系で使用している制御器とその機能は以下の通りである。なお、制御系のサンプリング周波数は 16 kHz である。

・PID 制御器

比例・積分・微分の各補償器を並列に接続した PID 制御器を用いている。積分器はワインドアップを防ぐために、条件付き積分器としている。積分値凍結条件を以下に示す。 u_i を積分値, Δu_i を積分値の変化量, e を誤差, u_o を比例値と微分値の和, u_s を制御入力 of 最大値とする。

$$\Delta u_i = \begin{cases} 0, & (|u_o + u_i| > u_s \text{ and } e \cdot u_i \geq 0) \\ e, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$

また、比例要素と微分要素については、再現性のない高周波振動を低減するためにゲインスケジューリングをおこなっている。比例ゲインは誤差に対して 3 段階、微分ゲインは誤差の時間変化に対して 2 段階に切り替えている。図 2.9 に使用したゲイン関数を示している。

・逆モデルに基づくフィードフォワード制御器

応答性向上を目的として、線形マス・ダンパモデルの逆関数により記述されるフィードフォワード制御器を用いている。制御対象の逆関数 P_{inv} は式(2.2)で表現され、 m は可動子の質量 ($m = 4.68\text{kg}$), c は粘性摩擦係数 ($c = 30\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$), T はサンプリング時間 ($T = 1/16000\text{s}$) である。なお、式(2.2)は後退差分法を用いて近似的に離散化されている。

$$P_{inv} = m \cdot \frac{(z-1)^2}{(T \cdot z)^2} + c \cdot \frac{z-1}{T \cdot z} \quad (2.2)$$

・クーロン摩擦補償器

可動子を駆動する際には駆動を妨げる向きに力が発生するが、本補償器はこれをすべて摩擦力とみなし、打ち消すための信号を発生する。この摩擦力は、駆動方向反転時に立ち上がりに遅れが生じ、正弦波応答時のクーロン摩擦力 F_c は式(2.3)のように近似的に表現される。

$$F_c = \begin{cases} -F_{cn} & (v < 0, a \geq 0) \\ F_{cp} - (F_{cn} + F_{cp}) \cdot \exp(k|v|) & (v \geq 0, a \geq 0) \\ F_{cp} & (v \geq 0, a < 0) \\ -\{F_{cn} - (F_{cn} + F_{cp}) \cdot \exp(k|v|)\} & (v < 0, a < 0) \end{cases} \quad (2.3)$$

ここで、 v は目標値の後退差分により求められる速度であり、 a はさらに後退差分をおこなって求められた加速度である。速度が正のときのクーロン摩擦力を $F_{cn} = 23.5 \text{ N}$ 、負のときのクーロン摩擦力を $F_{cp} = 31.5 \text{ N}$ としている。また、 f を入力周波数、 A を入力振幅としたとき、 k を次式のように表現する。

$$k = -\frac{3}{(2\pi f A)^{0.9}} - \frac{15}{f^{1.25}} \quad (2.4)$$

なお、速度－摩擦力特性を示す摩擦モデルを図 2.10 に示している。

・コギング補償器

本リニアモータでは、大推力化のためにコア付電磁石とネオジム磁石を使用しており、その組み合わせにより生じるコギング力が運動性能を大きく劣化させる。そこで、コギング力抑制用の補償器を追加している。本補償器は、コギング力の測定値を基に決定されている。コギング力を測定するために外乱オブザーバを使用し、駆動範囲全体を 1 周期としたオフライン学習を行い、補償器を設計している。

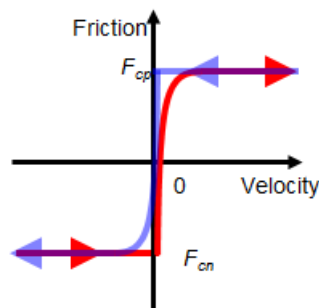


Fig. 2.10: Friction model for the coulomb friction compensator

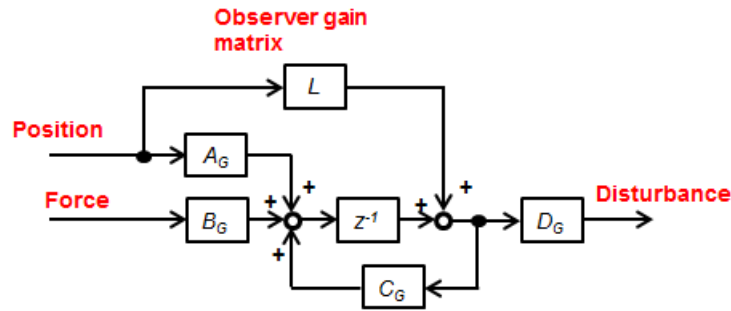


Fig. 2.11: Block diagram of the disturbance observer

・外乱オブザーバ

マス・ダンパモデルの状態空間表現を用い、制御対象に作用する外乱を観測し、影響を除去する機能を有する。逆モデルに基づくフィードフォワード補償器や摩擦補償器、コギング補償器で抑制しきれない誤差発生要素の影響を低減するために利用される。可動子に作用する推力と可動子位置を入力とし、外乱を出力する。外乱オブザーバのブロック線図は、図 2.11 に示す通りである。なお、図中の A_G 、 B_G 、 C_G 、 D_G は、制御対象を式(2.5)の状態方程式で外乱力 x_d を含めて表現した際に、式(2.6)で定義される値である。また、オブザーバゲイン行列を L とする。

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x_d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} \cdot u[k] \quad (2.5)$$

$$y = [1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x(k) \\ x_d(k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_G &= A_{bb} - LA_{ab}, & B_G &= B_b - LB_a, \\ C_G &= A_{ba} - LA_{aa}, & D_G &= [0 \quad 1] \end{aligned} \quad (2.6)$$

・線形化補償器

本リニアモータは、強力な永久磁石を用い大電流を通電することで大推力を発生させる。そのため、大推力発生時には非線形磁気特性の影響が顕著になり、コイルへの通電電流と推力との関係は非線形になる。そのため、推力ゲインの非線形性を除く目的で線形化補償器を挿入している。なお、線形化補償器は実機で測定した静推力特性に基づいて決定されている。

2.3.2 運動制御系の問題点

本運動制御系では、正弦波応答とランプ応答において、低速時に高い軌跡精度を実現している。周波数 0.5 Hz、2 Hz、振幅 10 mm、50 mm、100 mm の正弦波応答において、追従誤差は 1.74 μm 以下となった。一例として、周波数 2 Hz、振幅 50 mm の正弦波応答における追従誤差を図 2.12 に示す。また、図 2.13 に示すように、ランプ応答においては、速

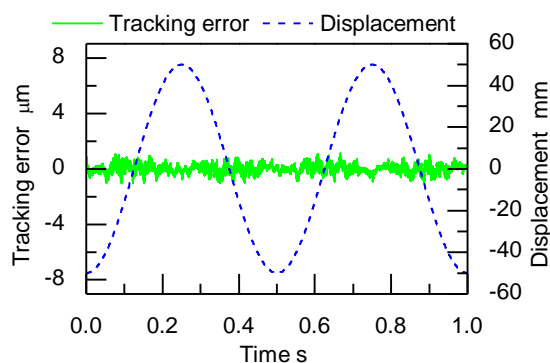


Fig. 2.12: Experimental tracking error for the sinusoidal reference motion with the control system in Fig. 2.8 (frequency: 2 Hz, amplitude: 50 mm)

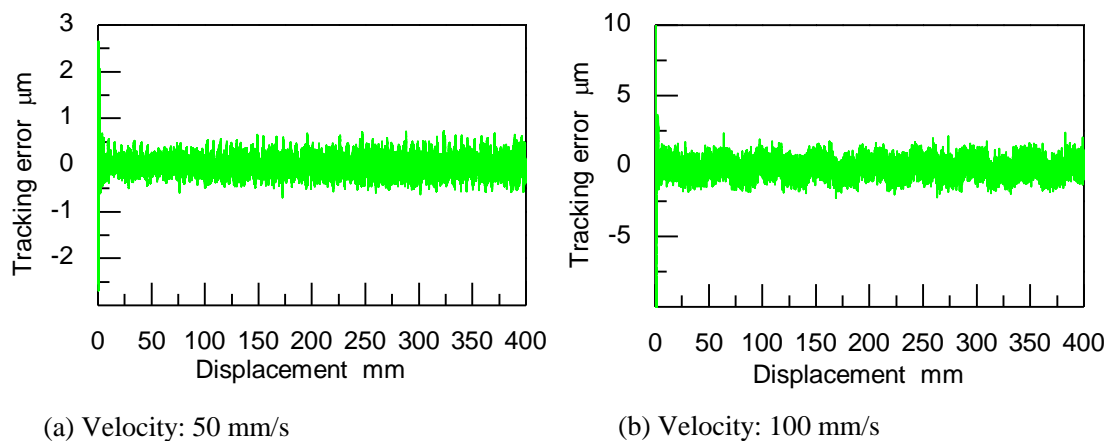


Fig. 2.13: Experimental tracking error for the ramp reference motion with the control system in Fig. 2.8

度 50 mm/s のときに追従誤差が $0.86 \mu\text{m}$ 以下, 速度 100 mm/s のときに追従誤差が $2.34 \mu\text{m}$ 以下であった.

しかし, 入力信号の振幅や周波数を増加させて高速運動させると誤差が増大し, 特に正弦波応答においては, 入力信号と同じ周波数の振動が見られ, 性能が大きく劣化した. 図 2.14 は, 周波数 20 Hz, 振幅 10 mm の正弦波応答における追従誤差を示しており, 加速度が大きい運動範囲の両端付近において, 特に追従誤差が大きくなっていることがわかる. 本制御系では, 超高加速・高速リニアモータで生じ得る磁気的な非線形性のうち, すでにコギング力と磁気飽和は補償されている. その一方で, 電流と可動子位置の両者に依存する推力リップルは補償されていない. また, 本リニアモータでは高推力化のために方形波通電を採用しており, 高速運動時には位相切り替え時の電流波形に遅れが生じることとなる. これらの影響により, 高加速・高速運動時には顕著な誤差が発生するものと考えられる.

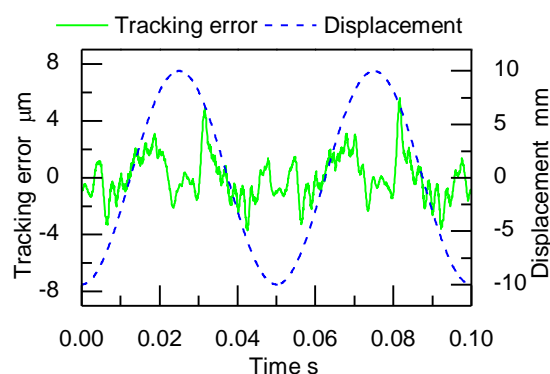


Fig. 2.14: Experimental tracking error for the sinusoidal reference motion with the control system in Fig. 2.8 (frequency: 20 Hz, amplitude: 10 mm)

2.4 学習制御器を用いた高加速・高速性能と高精度性能を両立する運動制御系

2.3節では、リニアモータの非線形性を個別に補償した基本的な運動制御系を用いて高加速・高速運動を行う場合において、運動精度が顕著に劣化する問題を示した。本節では、2.3節で説明した運動制御系の問題点を踏まえ、高加速・高速性能と高精度性能を両立できる学習制御を用いた運動制御系を構成し、その有効性を検証する。

2.4.1 B-spline ネットワークを用いた学習制御器

2.3節で説明した運動制御系では、高加速・高速運動時において運動精度が大きく劣化する問題が生じている。本リニアモータは、高推力化のためにコア付電磁石を使用しており、高い加速度を得るために大電流領域で駆動される。可動子位置のみに依存するコギング力や、磁気飽和に起因する電流・推力間の非線形ゲインは2.3節の運動制御系でも補償されていたが、推力リップルは可動子位置と電流の両者に依存し、なおかつ磁気飽和の影響も含まれる。そのため、それらが考慮されない不正確さが運動精度劣化の大きな原因になっていると考えられる。しかし正確なモデル化が困難で、得られるモデルは複雑になる⁽³⁶⁾ため、モデルベースの補償器設計は現実的でなく、問題解決には適さない。また、高速運動において運動精度を向上するためには高い応答性が必要であり、遅れ要素を含む外乱オブザーバでは誤差発生要因の変化に追従できない。その一方で、追従誤差には高い再現性が確認される。このような性質の問題解決には、学習制御の使用が有効と考えられる。

学習制御法には様々な方法が存在し⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁴⁾、その中でも既存の制御系に学習制御器を加えて性能を向上させる方法が、これまでに複数紹介されている⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁰⁾。運動精度劣化の要因となる外乱力は、運動目標値の周波数に伴って増大する。そこで、ここでは、高速運動に対する高い応答性を期待して、文献^{(37),(38)}で提案されている方法を採用した。この学習制御法は、学習機能を有するフィードフォワード制御器を用いることで、学習とともに制御器の出力を更新し、追従誤差を減少させる。図2.15に示すように、追従誤差をゼロに収束させ

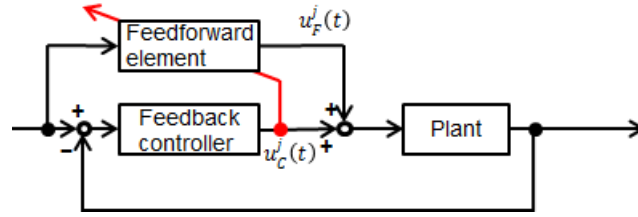


Fig. 2.15: Conceptual block diagram of the learning control system

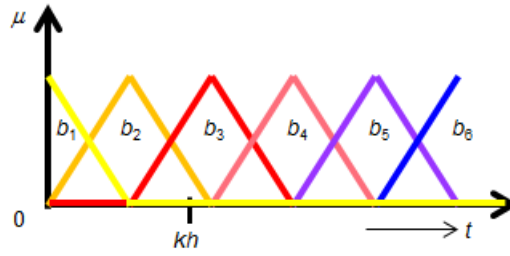


Fig. 2.16: Basis functions of the learning control

るために、フィードバック制御器の出力をゼロに収束させるよう学習を行う。また、フィードバック制御器の出力値に **B-spline** 補間を用いてフィルタリングすることで、高周波領域における安定性を確保している。

採用した学習アルゴリズムを具体的に説明する。本学習制御法は、所定の運動を繰り返し行うことで学習を進める。繰り返しおこなわれる運動の周期を、ここでは運動周期と呼ぶことにする。運動周期の現在の回数を j 、サンプリング時間を h 、現在の運動周期の始まりから数えた現在の時間までのサンプリング数を k 、学習制御の出力を $u_F^j(t)$ 、学習に基づいた値（後述）を $v^j(t)$ 、学習ゲインを γ とする。このとき、

$$u_F^j(kh) = u_F^{j-1}(kh) + \gamma v^{j-1}(kh) \quad (2.7)$$

となるように学習する。

次に、フィードバック制御器の出力に **B-spline** 補間を施し、 $v^j(t)$ を求める方法を説明する。まず、図 2.16 に示すように基底関数を考える。1 個の基底関数は三角に変化する部分を 1 箇所所有しており、残りの部分は全てゼロであると考え、1 つの運動周期には複数の基底関数が存在するが、三角形をなす部分が現れる順番により、運動周期の最初から b_1, b_2, \dots のように基底関数を定義する。基底関数は三角形をなす部分において、どれも隣の基底関数の三角形の部分と重複している。フィードバック制御器の出力を $u_C^j(t)$ 、基底関数 b_i の値を $\mu_i(t)$ とし、1 つの運動周期が N_p 個のサンプル時間で構成されているとすると、 $v^j(t)$ は

$$v^j(kh) = \sum_{i=1}^N \mu_i(kh) \frac{\sum_{l=0}^{N_p} \mu_i(lh) u_C^j(lh)}{\sum_{l=0}^{N_p} \mu_i(lh)} \quad (2.8)$$

と表現される。この式について説明をする。特定の基底関数に着目したとき、まずその基底関数全体でフィードバック制御器の出力値の重みつき平均をとる。次にその値と、現在

の時間における基底関数の値を掛け合わせ、 $v^j(kh)$ とする。式(2.7), 式(2.8)より, 学習制御のアルゴリズムは,

$$u_F^j(kh) = u_F^{j-1}(kh) + \gamma \sum_{i=1}^N \mu_i(kh) \frac{\sum_{l=0}^{N_p} \mu_i(lh) u_C^j(lh)}{\sum_{l=0}^{N_p} \mu_i(lh)} \quad (2.9)$$

となる。基底関数の広さを示す指標として m を考え, 基底関数の三角形をなす部分に $2m$ 個のサンプル点が存在するものとする。すなわち, m はフィルタリングの帯域を決定するパラメータであると言える。

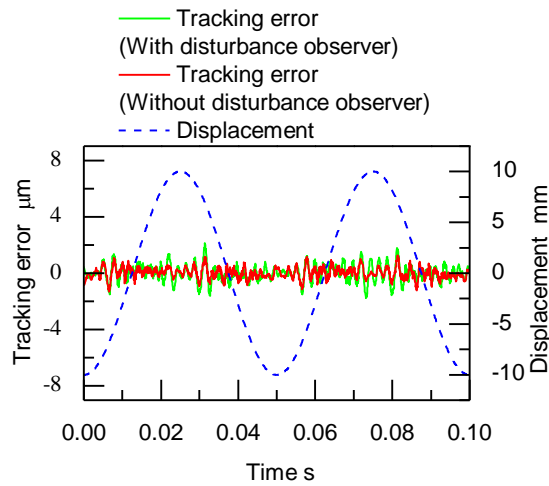


Fig. 2.17: Effect of the disturbance observer on the tracking error of the learning control system for the sinusoidal reference motion (frequency: 20 Hz, amplitude: 10 mm)

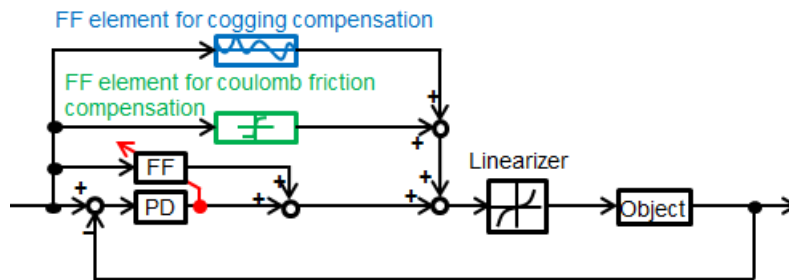


Fig. 2.18 : Block diagram of the learning control system

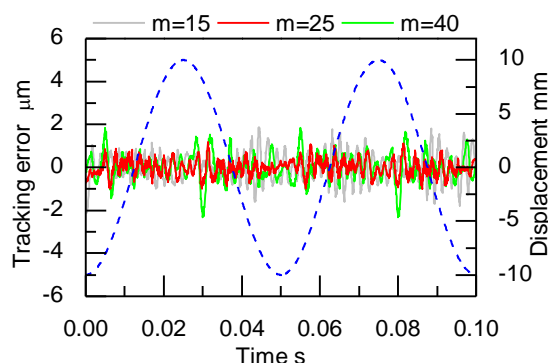


Fig. 2.19: Effect of the parameter m of the learning control element on the tracking error for the sinusoidal reference motion (frequency: 20 Hz, amplitude: 10 mm)

2.4.2 学習制御系の構成

本研究では、2.3節で述べた基本的な制御系に学習制御器を組み込んで新しい制御系（学習制御系）を構成する。本制御系は、高加速・高速運動を目的としている一方で、低周波成分まで学習を行うことが可能である。そのため、低周波領域の特性に寄与する制御器は不要になると考えられる。そこで、PID制御器の積分器を除去することにした。また、外乱オブザーバも低周波の外乱推定のために用いられる要素であるため、使用の意義やこれによる影響を実験的に調査した。図2.17は、周波数20Hz・振幅10mmの正弦波応答実験によって得られた追従誤差であり、学習によって追従誤差が十分小さくなり、以降の学習による改善が見られなくなった後の運動を示している。学習制御器と外乱オブザーバを併用した場合の追従誤差を緑線、外乱オブザーバを除去した制御系での追従誤差を赤線で示している。前者と比較し後者は振動が軽減されており、外乱オブザーバを除去した方が、性能が向上することがわかる。外乱オブザーバと学習制御の併用により振動が増えたと考え、外乱オブザーバを除去することにした。以上の議論を踏まえて構成した制御系を図2.18に示す。

本リニアモータはコイルに大きなインダクタンスを有しており、電流が指令値より若干遅れることが確認されている。この電流遅れにより生じる悪影響を低減するために、学習制御器の出力値を時間的に進めて出力している。実験により最適な進み時間を求めた結果、進み時間を6サンプル時間と決定した。

学習制御器には性能を決める重要なパラメータが2個存在し、基底関数の広さを示す m と、式(2.7)で示す学習ゲイン γ を適切に調節する必要がある。基底関数の広さを示す m は、B-spline補間によるフィルタリングの周波数帯域を決定する。 m が小さい場合は周波数の高い振動を含めて学習できることになるが、高周波振動に対する感度が上がり高周波振動に対する安定性が低下する。逆に m が大きい場合は高い安定性が期待できるものの、高周波振動に対する感度が低下し、高周波領域の外乱の影響を学習できない。そのため目標軌跡の

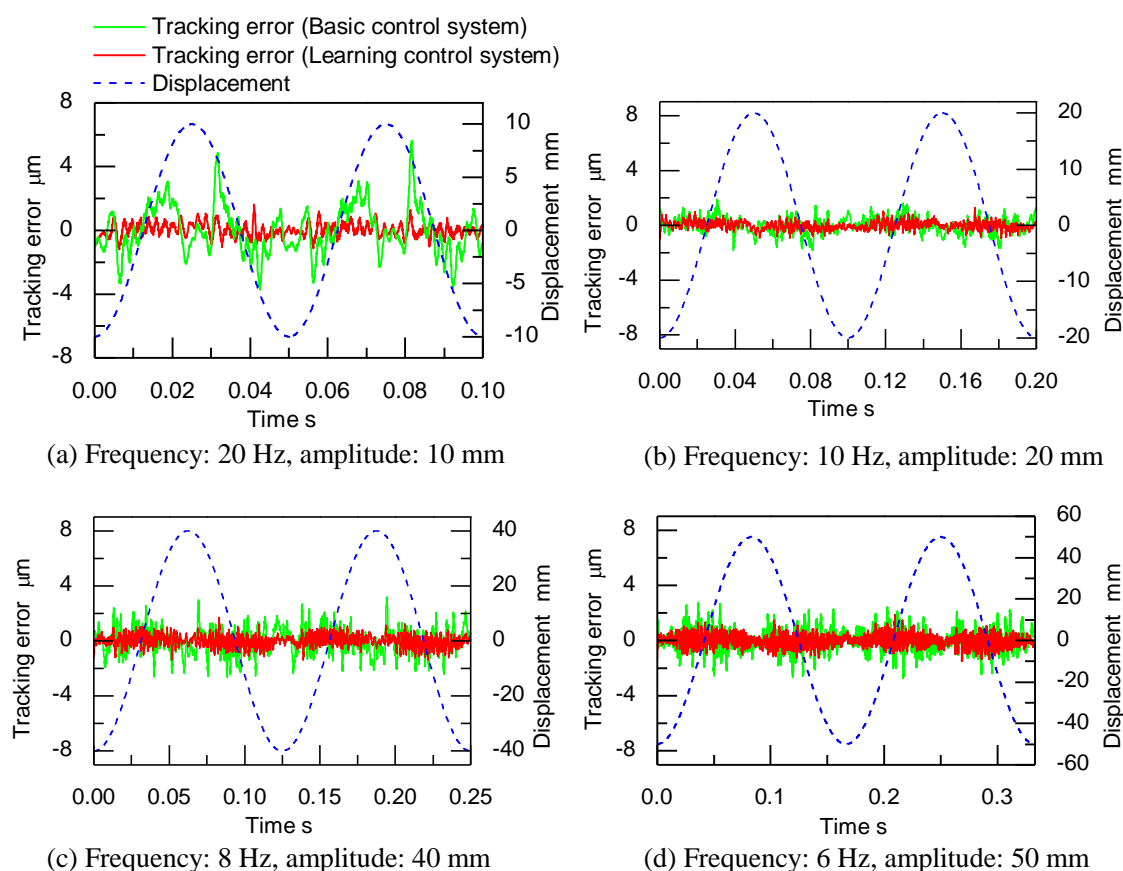


Fig. 2.20: Comparison of experimental tracking errors with the basic control system and the learning control system for sinusoidal reference motions

周波数が大きくなると誤差も増加する。図 2.19 は、周波数 20 Hz、振幅 10 mm の正弦波応答実験において m が誤差波形に与える影響を図示している。 m を小さく $m = 15$ とした場合は追従誤差が振動的になり、 m を大きく $m = 40$ とした場合は学習をしない場合に生じる高周波の誤差波形を抑制できていない。これらの実験により、最適な値として、 $m = 25$ と決定した。

学習ゲイン γ は、学習に必要な時間や制御の安定性に影響を与える。一般に、 γ を大きくすると学習に必要な時間は減少するが、制御の安定性は低くなる。実験的に、 $\gamma = 0.8$ と決定した。

2.4.3 学習制御系の評価

2.4.2 項で構成した学習制御器付運動制御系を用いて、正弦波入力やランプ入力を目標値とする軌跡制御実験を行った。その結果を 2.3 節図 2.8 の制御系を用いた結果と比較し、有効性を評価する。なお、誤差が十分収束し、学習をこれ以上繰り返しても誤差の低減が見られなくなった段階での運動周期の結果を、制御結果として使用する。また、再現性のない振動を含めて性能を議論するため、学習制御器の出力波形を同一にして同じ運動周期に

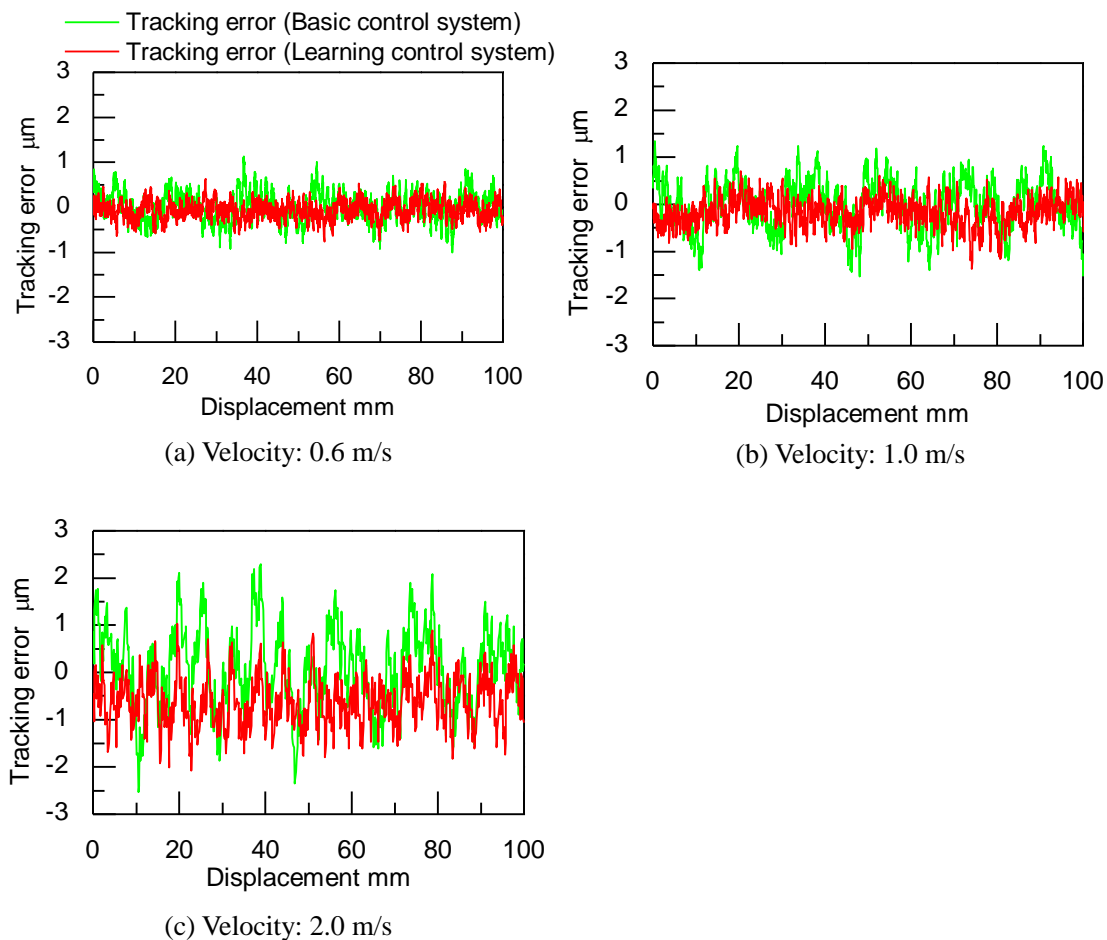


Fig. 2.21: Comparison of experimental tracking errors with the basic control system and the learning control system for ramp reference motions

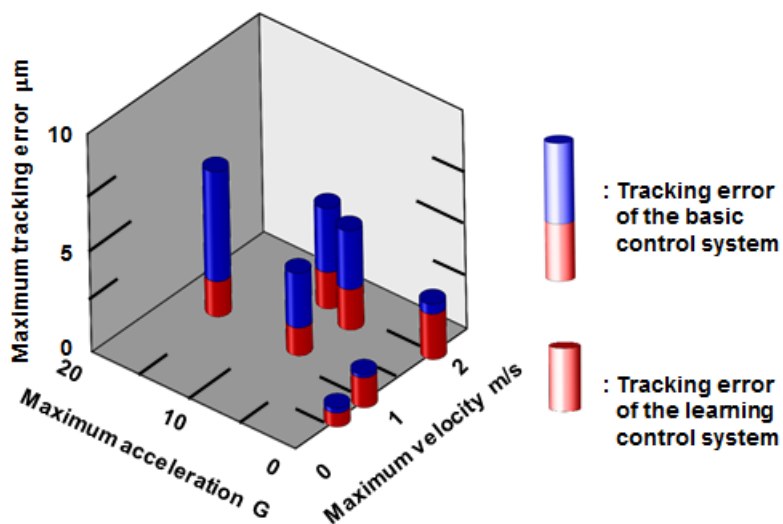


Fig. 2.22: Error reduction with the improvement of the control system

ついて複数回実験しており、その中で追従誤差が最大となる結果を表示している。

図 2.20 は、周波数 20 Hz・振幅 10 mm，周波数 10 Hz・振幅 20 mm，周波数 8 Hz・振

幅 40 mm, 周波数 6 Hz・振幅 50 mm の正弦波入力時における学習制御系の追従誤差をそれぞれ赤線で示しており, 2.3 節で説明した基本的な制御系の結果も緑線で合わせて示している. 制御系の改良により, 全ての場合で追従性能が向上しており, 問題となっていた入力波形と同じ周波数での振動を抑制できていることが確認できる.

学習制御系を用いてランプ応答実験を行い, 高速時の運動性能を評価した. 図 2.21 は, 速度 0.6 m/s, 1 m/s, 2 m/s のランプ応答実験における追従誤差をそれぞれ赤線で示しており, 2.3 節で説明した基本的な制御系の結果も緑線で合わせて示している. いずれの結果でも学習制御器による改善効果が観測され, 特に速度 0.6 m/s, 1 m/s では顕著に効果が現れている.

以上の実験結果をまとめ, 追従誤差と最大加速度・最大速度との関係を示したのが図 2.22 である. 図 2.8 に示す基本的な制御系における追従誤差の最大値を赤と青の円柱の合計高さにより表現し, 図 2.18 に示す学習制御系における追従誤差の最大値を赤の円柱の高さで表現している. なお, ランプ応答実験の結果は, 最大加速度がゼロの運動として記している. 最大加速度または最大速度が増加するにつれ, 学習制御系を用いることによる追従誤差の低減量が増加しており, 特に最大加速度が大きい場合において, 誤差の低減効果が顕著になることがわかる. 加速度が大きい場合は発生推力が大きく, これに伴う強い非線形性が主要な誤差発生要因になっていると考えられる. 2.3 節の基本的な運動制御系では運動精度向上のために外乱オブザーバを使用しているが, 学習制御系における学習制御器の方が高い周波数領域での高い誤差低減能力を有することがわかる.

2.4.4 高推力駆動時の消費電力

高加速運動のためには電磁リニアモータで高推力を発生させることが必要であり, そのコア付電磁石の強い非線形性により運動精度が顕著に劣化する問題とその解決策について, これまでに述べた. その一方で, 発生力は電流に比例するため, 高推力駆動時には消費電力の増加が新たな問題になると考えられる. 一例として, 図 2.20 (a)に示す周波数 20 Hz・振幅 10 mm の正弦波運動においては, コイルにおける平均損失は 51 W と計算され, 最大加速度を発生する推力 760 N 発生時の損失は 110 W と計算される. これらの値には, 運動エネルギーを生成するための電力は含まれていないため, 減速時のエネルギーを全て回収できない場合には, これより大きな消費電力が発生することになる. 可動子を毎秒 20 往復させるのに要求される単位時間当たりの運動エネルギーは 148 W であるため, 消費電力に対する損失の占める割合が大きいことがわかる. 電磁コイルを用いて駆動力を発生する以上, 損失の発生は避けられず, 小型化によりコイル体積が減少した場合には, さらなる消費電力の増大が見込まれる. 制御系や運動軌跡の修正により動的な消費電力を改善する例もあるが, 静的な消費電力を制御系の改良によって改善することは不可能であり, 用途によってはその影響は大きい. 今後, 省エネルギー化の重要性が高まっていくものと考えられ, 本問題を解決するための新たなアクチュエータの構成を検討する必要があると考えら

れる。

2.5 結言

本章では、電磁リニアモータによる高加速・高速運動と高精度運動に特に着目し、これらを両立する上で生じる課題を明らかにし、解決することを目的とした。まず、個別の非線形補償要素を含む基本的な運動制御系を超高加速・高速リニアモータに適用し、軌跡運動時の運動精度を検証した。低速運動時にはサブミクロンオーダーの軌跡精度が実現されたものの、加速度・速度を増加させるにつれ、運動精度の顕著な劣化が確認された。誤差は主に高推力駆動によって生ずる非線形性に起因すると考えられ、複雑な特性を示す一方、高い再現性を示している。

そこで、学習機能を有するフィードフォワード制御器を適用し、複雑なモデルを用いない運動制御系を設計し、評価した。その結果、高加速・高速運動時における運動誤差の大幅な低減に成功した。周波数 20 Hz・振幅 10 mm の正弦波運動においては、6.65 μm の追従誤差が 1.62 μm に低減された。特に、高加速度時の追従誤差が大幅に低減されており、高推力時における非線形性の悪影響が大幅に低減されたと考えられる。

一方で、高推力時には電力消費が大きく、その低減が課題として残されている。特に静的な電力消費は制御系による改善は不可能で、本リニアモータに限定せず広く電磁力駆動系の課題である。したがって、省エネルギー化の重要性が高まることを踏まえ、低消費電力での高推力駆動を可能とする新たなアクチュエータの実現が必要と考えられる。

第3章 感温磁性体を用いた 小型省エネルギーアクチュエータ

3.1 緒言

省エネルギー化が強く求められている現在、駆動効率の高い電磁アクチュエータを用いた駆動系は産業界において広く使用されており、省エネルギー性能のさらなる向上に向けて様々な努力がなされている^{(45),(46)}。しかし電磁アクチュエータは本質的に、高推力発生時に運動エネルギーに変換されないジュール損失が大きくなる問題がある。特に、高推力を連続的に発生する用途では、コイルの温度が顕著に上昇し、部材の許容温度の制約のため定格推力を小さくせざるを得ない。

小さな消費電力で高推力を発生する駆動系として、電磁モータと減速機の組み合わせが一般に用いられている。しかしながら、減速機を使用すると応答性が大きく低下してしまう。すなわち、推力の効率的発生と応答性にはトレードオフの関係が存在する。高推力の効率的発生と高応答性が両立できれば、高応答の鉛直荷重の支持機構が実現でき、鉛直制振機構やロボットアーム、鉛直ステージなどへの応用が期待される。例えば、凹凸のある路面を走行するロボット車両に姿勢制御装置が使用されることがある⁽⁴⁷⁾が、もし高応答な駆動が可能であれば、アクティブ制振メカニズムとして利用でき、ロボット車両を高性能な輸送装置として利用可能になる。また、報告されたワイヤ駆動機構を用いた重力補償装置⁽⁴⁸⁾では特定の荷重のみ補償が可能であり、もし任意の荷重を補償できれば、荷重に関係なく小さな消費電力でロボットアームを高応答に駆動できると考えられる。

そこで、鉛直荷重に応じた推力を連続的かつ効率的に発生するための要素「可変バイアス要素」と、高応答な運動を発生する要素「高応答要素」を組み合わせ、融合させたハイブリッド構造をもつアクチュエータにより、両機能の両立を図ることを考える。対象とするアクチュエータはさらに、小型化、取扱いの容易さを重視し、電気により駆動され、高応答要素として応答性の高いダイレクトドライブ電磁駆動要素を用いるものとする。

本章では、高推力の連続的・効率的発生に適した可変バイアス要素のためのアクチュエータの構成を提案し、試作機を用いて原理検証を行う。なお、本アクチュエータは、高応答要素と組み合わせて使用されるため、電磁力により駆動される高応答要素との融合性に配慮し、構成を検討する。

3.2 感温磁性体のアクチュエータへの利用

鉛直荷重に応じた推力を連続的かつ効率的に発生する方法として、これまでに様々な方法が提案・利用されている。高応答なアクチュエータをばねと併用すれば、鉛直荷重は全てばねにより支持されるため、アクチュエータは高応答運動の生成のためだけに機能し、

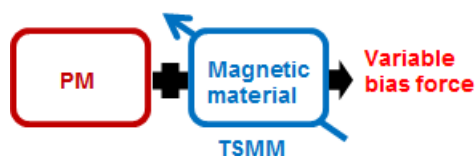


Fig. 3.1: Combination of PMs and TSMs as the variable bias element

荷重を支持するためにエネルギーを消費しない。本組み合わせは単純な構造で、鉛直制振メカニズムとして広く使用されている^{(49),(50)}。しかしながら、荷重とばね剛性で決定される位置が安定点となる。アクチュエータを他の位置に変位させる場合、ばねによる復元力に拮抗するだけの力を発生させるための余分なエネルギー消費が生じてしまう。よってこの組み合わせは、全駆動範囲に渡って一樣なバイアス力を発生することが望まれる可変バイアス要素には適さない。機械的なばねの代わりに永久磁石と電磁石の間に生じる負ばねを利用したゼロパワー磁気浮上系においても、同様の問題が存在する^{(51),(52)}。定荷重ばねを用いれば復元力の問題は生じないが、任意の荷重を支持できない。

一方で、全駆動範囲に渡って任意の鉛直荷重に拮抗する力を発生させる方法として、複数の方式の重力補償装置が提案されている。てことばねの組み合わせによる方式は、変位によらない一定荷重を作り出すことが可能で、ばねの向きによって荷重を変更できる⁽⁵³⁾。永久磁石により生じる負ばねと線形ばねを組み合わせた方式も一定荷重を生成でき、線形ばねの初期変位を調節することによって荷重を変更できる⁽⁵⁴⁾。しかしながら、これらのパッシブな重力補償装置は自律的に荷重調節を行うようになっていない。荷重調節を自動化するためには別途アクチュエータが必要で、高応答要素と組み合わせた際にシステムが複雑化、大型化する問題がある。

そこで、可変バイアス要素と高応答要素とを機能的、構造的に融合することにより、システムの小型化・簡略化を図る。そのためには、両要素が駆動要素を共有していることが必要である。そこで、どちらか一方の磁気特性が可変である永久磁石と磁性体の組み合わせにより力を生成する方式を可変バイアス要素に採用する。これにより、永久磁石や鉄ヨークなどの磁気駆動のための構成要素を、高応答要素として用いる電磁駆動アクチュエータと共用することが可能となり、小型・簡略なハイブリッド構造の実現を可能にすると考えられる。

永久磁石と磁性体の組み合わせは、永久磁石の大きなエネルギー密度を利用できるため、小型構造で大きな推力の発生が可能である。本研究では、図 3.1 のように、磁気特性を変化させることのできる磁性材料として、温度により特性が変化する感温磁性体 (TSM) の使用を検討する。感温磁性体は鉄とニッケルの合金であり、材料特性の詳細は公表されていないが、本論文では 36Ni-Fe の特性を参考に解析を行っている。また、永久磁石と感温磁性体を用いた可変バイアス要素は熱により駆動されるため、電磁アクチュエータで問題となるコイルからの発熱を感温磁性体の加熱に利用可能である。そしてその熱を有効利用

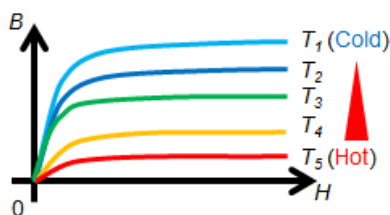


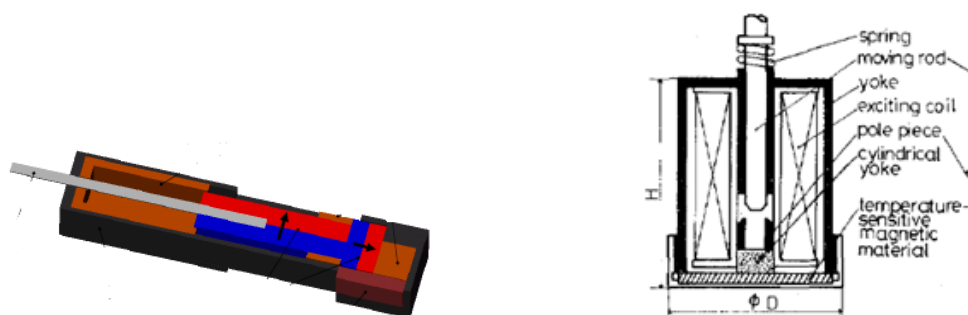
Fig. 3.2: Conceptual B-H curve of TSMMs

する構造的工夫により，アクチュエータ構造や駆動回路を簡略化できる可能性がある。

図 3.2 に感温磁性体の B-H カーブを示す．一般に，磁性体に印加する磁場とともに内部を通る磁束密度も増加するが，さらに増加させると磁束は飽和磁束密度で飽和する．これとは別に，感温磁性体の場合は，温度を増加させると飽和磁束密度が低下する特性を有する⁽⁵⁵⁾．すなわち，永久磁石と感温磁性体の組み合わせは，熱によって発生推力が変化する特性を示すため，アクチュエータとして利用できる．さらに，感温磁性体を周囲と断熱させることができれば，連続推力を発生するために必要となる温度保持の消費電力を大幅に低減することも可能となる．以上のことから本組み合わせは，可変バイアス要素を構成するアクチュエータとして相応しいものと考えられる．

3.3 駆動原理

感温磁性体と永久磁石の組み合わせにより駆動されるアクチュエータには，複数の研究例が存在する．図 3.3 に示すように，バッテリーの異常加熱を検出して回路を遮断するサーモスイッチ⁽⁵⁶⁾や，温度によって流量を調節するバルブアクチュエータ⁽⁵⁷⁾などが研究されている．前者は，一定以上の温度を検出した場合に作動するオン・オフ動作のみが可能であり，後者は，ソレノイドの構造を基本としているため変位によって発生推力が大きく変動する．いずれのアクチュエータも可変バイアス要素には適しておらず，適切なアクチュエータ構造を明らかにすることが必要である．



(a) Thermo switch for protecting a battery by Hirata et al.⁽⁵⁶⁾

(b) Valve actuator for controlling water temperature by Yamasawa⁽⁵⁷⁾

Fig. 3.3: Actuators driven by the combination of PMs and TSMMs

3.3.1 推力発生原理

ここでは、推力が温度のみに依存し、変位によらず一定の発生力を生成できる、可変バイアス要素に相応しいアクチュエータの構造を検討する。式(3.1)で表現されるように、エネルギー保存則より、永久磁石の磁気エネルギーにより駆動されるアクチュエータが位置 x から Δx だけ変位する際に生ずる力学的エネルギー ΔW は、永久磁石を含む磁気回路における全磁気エネルギー W_{mag} の減少分に等しい。

$$\Delta W = -\left(W_{mag}(x + \Delta x) - W_{mag}(x)\right) \quad (3.1)$$

また、発生力 F は力学的エネルギーを変位で微分した値に等しいため、式(3.1)を用い式(3.2)で表現される。

$$F = \frac{dW}{dx} = -\frac{dW_{mag}}{dx} \quad (3.2)$$

これより、発生力が変位によらず一定となるためには、磁気エネルギーの変化が変位に対して一定となるような構造を採用する必要があることが理解できる。

図 3.4 に、本研究で採用するアクチュエータの推力発生原理を示す。可動子に永久磁石が配置され、固定子側に固定された板状の感温磁性体と対向する構造となっている。可動子に配置された永久磁石は磁極の向きが交互になるよう面方向に配列されているため、永久磁石から生ずる磁束は、感温磁性体または鉄ヨークを通り、隣の永久磁石へ到達する。これにより、可動子と感温磁性体の間には、両者が重なり合う面積が増加する向きに力が発生する。永久磁石の感温磁性体と対向している部分から出る磁束は感温磁性体を通るが、対向していない部分から出る磁束は空気中を通ることになる。可動子と感温磁性体の対向面積が大きくなると、それに伴い感温磁性体を通る磁束が多くなり、空気中を通る磁束は少なくなるが、その変化量は可動子の変位によらず一定となる。よって、磁気エネルギーの変化は可動子変位によらず一定となり、式(3.2)より、発生推力も可動子変位によらず一定となる。

図 3.5 に示すように本アクチュエータでは、感温磁性体が長手方向に2枚配置されている。2枚の感温磁性体に温度差を発生させると、磁気的なアンバランスが生じ、可動子が駆動される。具体的には、可動子と2枚の感温磁性体との間に働く各々の吸引力の差により推力

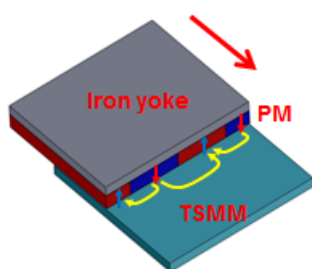


Fig. 3.4: Basic principle of the thrust generation

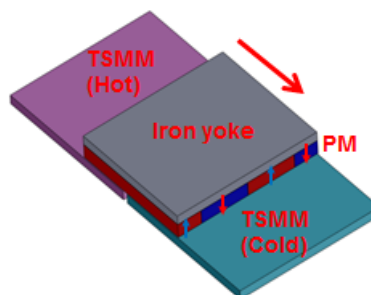


Fig. 3.5: Thrust generation by the temperature difference of two TSMC plates

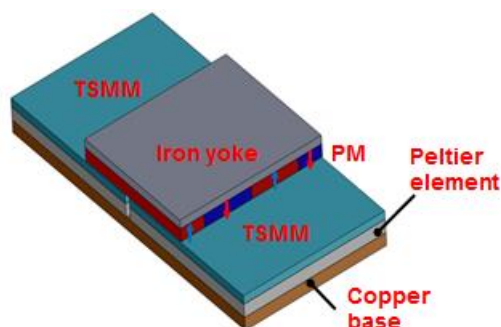


Fig. 3.6: Basic structure of the proposed actuator

が発生し、温度の低い感温磁性体側に可動子が移動する。

3.3.2 温度調節原理

本アクチュエータは感温磁性体の温度変化により推力を発生するため、温度調節が必要である。簡単な加熱方法としては、電線から発生するジュール熱を用いる方法がある。しかし能動的な冷却ができない。そのため熱抵抗を小さくし熱を散逸しやすくする構造が必要となるが、加熱や温度保持時には必要熱量が大きくなり、応答性や効率が低下してしまう。つまり、加熱・温度保持時の性能と冷却時の性能との間にトレードオフが生じてしまう。

本章では、冷却機能を有するペルチェ素子を使用することでこの問題を解決する。ペルチェ素子の成績係数が1より大きいことを考えると、投入する電力量に比べ操作する熱量が大きくなり、応答性や効率の面で有利になることが期待される。そこで本章では、熱源・冷熱源としてペルチェ素子を採用した。

図3.6に、温度調節機能をもつ提案アクチュエータの基本構成を示す。2枚の感温磁性体の下には、一対のペルチェ素子が配置され、温度調節を行う構成になっている。なお、ペルチェ素子の下面は銅製ベースに固定され、熱が散逸しやすくしている。

3.4 アクチュエータの設計

前節までに決定した構成要素とその配置を前提に、永久磁石厚さ、極数、感温磁性体厚さを決定する。本アクチュエータは、永久磁石の有する磁気エネルギーを感温磁性体の特性を用いて制御することで、駆動される。そのため設計では、まず磁気エネルギーの源である永久磁石の厚さを最初に決め、続いて永久磁石の極数や感温磁性体の厚さを決定した。後述のように、本アクチュエータの有効性を検証するために、同サイズの電磁アクチュエータの性能と比較する。そのため、試作アクチュエータが既存のアクチュエータと同程度の寸法となるように永久磁石の厚さを最初に3 mmと決定した。この条件で、以降、他のパラメータを決定する。

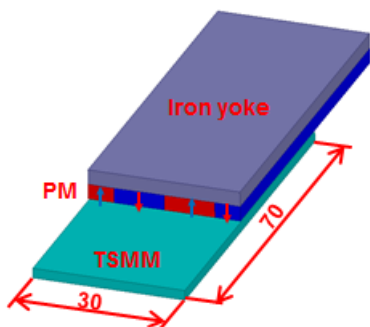


Fig. 3.7: Analytical model for the magnetic analysis

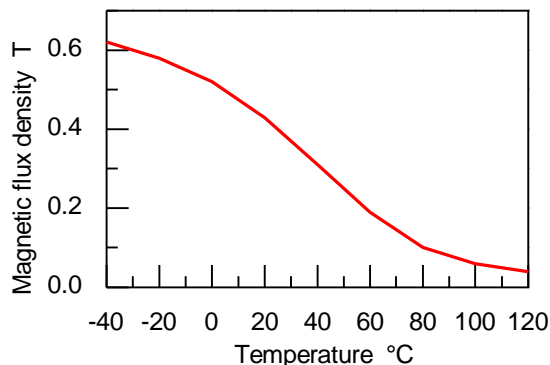


Fig. 3.8: Relationship between temperature and the saturation magnetic flux density of the TSM (MS-2)

残されたパラメータは磁場解析を用いて決定する. 図 3.7 は解析で用いる可動子・固定子モデルであり, 感温磁性体の温度が 22 °C と 82 °C の時に作用する推力を, 可動子位置ごとに求めた. 実際のアクチュエータでは, 永久磁石と 2 枚の感温磁性体の間に生じる各々の吸引力の差が影響すると思われるが, ここではそれらを見せず, 単純に 2 種類の温度の感温磁性体を用いて計算し求めた推力の差を解析結果として示す. また, 可動子が 22 °C の感温磁性体に完全に対向している変位を 0 mm とし, 82 °C の感温磁性体に向かう向きを正とする. 感温磁性体には日立金属ネオマテリアル社製 MS-2 を用いる. MS-2 の温度と飽和磁束密度との関係は図 3.8 の通りであり⁽⁵⁸⁾, 22 °C のときの飽和磁束密度は 0.45 T, 82 °C のときは 0.1 T である. また, 永久磁石は日立金属社製ネオジウム磁石 NEOMAX46BH とし, ヨークはケイ素鋼, 永久磁石・感温磁性体間のエアギャップは 0.3 mm とした. なお, 解析ソフトとして, ANSYS 社製の Maxwell® 3D 16.0 を用いた.

3.4.1 永久磁石極数の決定

最適な永久磁石極数を求めるために, 図 3.9 に示すように極数の異なる複数モデルを用い

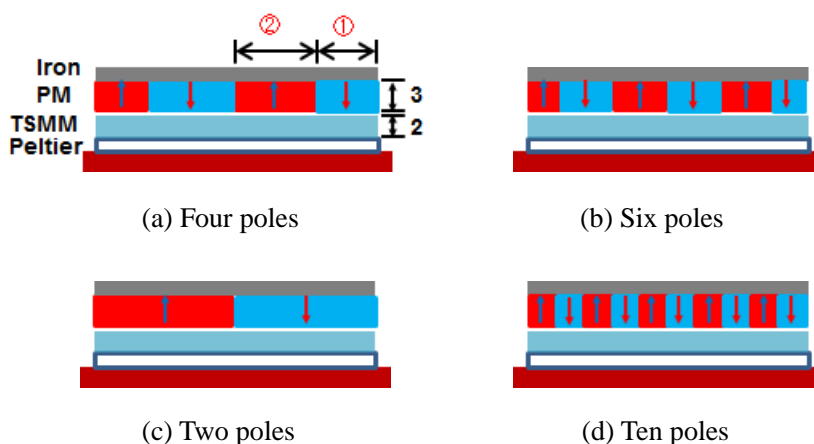


Fig. 3.9: Analytical models for deciding the optimal number of poles

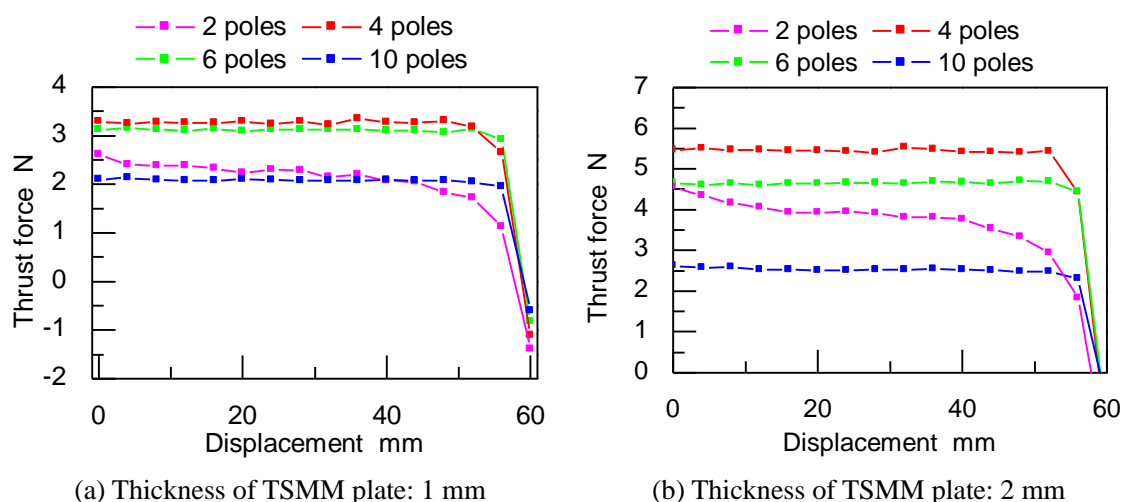


Fig. 3.10: Comparison of analytical thrust forces with respect to the number of PM poles

て磁場解析し，推力特性を調べた．利用した永久磁石の極数は，2 極，4 極，6 極，10 極の 4 種類である．なお，4 極，6 極のモデルに関しては，磁束の漏れを無くすために，両端の永久磁石の幅を他の半分とした．

まだ感温磁性体厚さが決定されていないため，感温磁性体厚さ 1 mm と 2 mm の 2 種類の結果を基礎に永久磁石極数を決定し，これ以降での厚さ変更の余地が残るようにした．図 3.10 が可動子変位に対する発生力の解析結果で，図 3.10 (a)は感温磁性体厚さが 1 mm の場合である．2 極の場合は磁束の広がり起因すると考えられる端効果がみられるが，それ以外では長い変位に渡ってほぼ一定の推力が得られている．長い変位に渡りほぼ一定となる推力をアクチュエータの最大推力と考え比較すると，4 極の場合に推力が最も大きくなる．感温磁性体厚さが 2 mm の場合は図 3.10 (b)のようになり，同様に 4 極の場合に推力最大となっている．そこで，永久磁石の極数を 4 極に決定した．

3.4.2 感温磁性体厚さの決定

本アクチュエータでは，感温磁性体の温度応答が推力応答に直結するため，応答性の観点からは感温磁性体は薄いほうが望ましい．しかし薄くすると最大推力が低下するため，

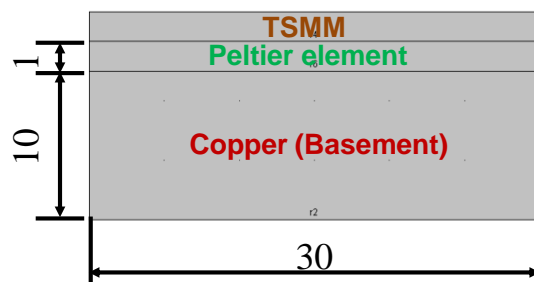


Fig. 3.11: Model for the thermal analysis

Table 3.1: Thrust force generated by the maximum current of 6 A applied for 1.4 s

Thickness of TSM	1 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm
Thrust force	3.3 N	3.3 N	3.1 N	2.7 N

単位時間当たりの推力変化が減少する可能性もある。そこで、これまでに決定した条件のもとで感温磁性体の厚さを変化させ、単位時間当たりの推力変化を基礎に厚さを決定する。

感温磁性体の温度応答を求めるために COMSOL Multiphysics® 4.0 を用いて熱解析を行った。使用する熱解析モデルを図 3.11 に示す。厚さ 10 mm の銅製ベースの上にペルチェ素子を配置し、その上に感温磁性体が配置されている。ペルチェ素子の熱抵抗は Z-MAX 社製の FPH1-3106NC のカタログより 0.18 W/K の値を用い、熱伝導率 0.82 W/m・K の材料として取り扱うものとした。感温磁性体の物性は、組成の近い 36Ni-Fe と同等とみなし、熱伝導率を 12 W/m・K、密度を 8070 kg/m³、比熱を 452 J/kg・K とした。空気の影響は考慮しないものとした。

まず、感温磁性体厚さが 1 mm の場合において最大電流 6 A で加熱する条件で解析を行った。結果として、感温磁性体中心部の温度が 80 °C になるまでの時間は 1.4 秒であった。次に、感温磁性体の厚さが 2 mm, 2.5 mm, 3 mm の場合において最大電流を同一時間 (1.4 秒) 通電したときの推力を求めた。最大電流で加熱した場合、温度収束値は 80 °C よりもさらに高く、1.4 秒では温度が直線的に増加しているため、1.4 秒における推力の比較により、応答性の比較が可能であると考えられる。なお、感温磁性体の上面と下面では温度が異なるため、感温磁性体を厚さ方向に 3 分割し、それぞれの層の中心部の温度を求め、それらの温度に対応する飽和磁束密度を計算した。磁場解析においても感温磁性体を 3 層に分割し、求めた飽和磁束密度をそれぞれの層に適用して推力を求めた。

以上の結果をまとめた結果が表 3.1 である。感温磁性体の厚さが 1 mm の場合は 3.3 N, 2 mm の場合は 3.3 N, 2.5 mm の場合は 3.1 N, 3 mm の場合は 2.7 N となった。1 mm の場合と 2 mm の場合の応答性は同じで、それより厚い場合は減少に転じている。一方で、図 3.10 から明らかなように、最大推力は感温磁性体が厚い方が大きい。そこで、最大推力と応答性の観点から、感温磁性体厚さを 2 mm に決定した。

3.4.3 ハルバッハ配列の採用と永久磁石幅の最終決定

本アクチュエータでは、可動子の永久磁石が発生する磁束のうち、磁石配列の片面のみが利用され、そのような場合ハルバッハ配列が効果的であることが知られている⁽⁵⁹⁾。そこで、本アクチュエータにおけるハルバッハ配列の有効性を検討する。入手できる磁石サイズの条件を考慮して、磁石幅は図 3.12 に示す寸法に決定し、全体幅を 26.6 mm とした。こ

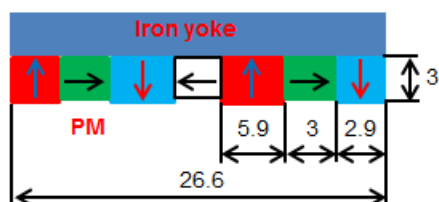


Fig. 3.12: Size of PMs in Halbach array

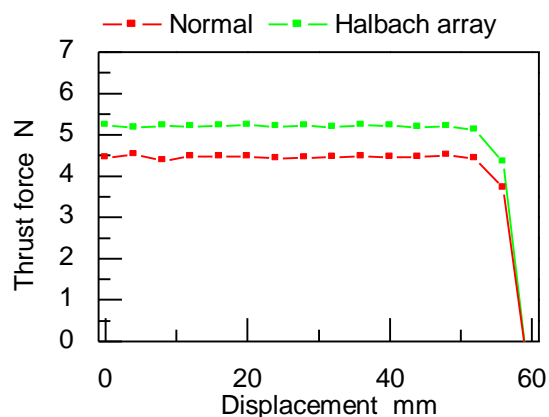


Fig. 3.13: Effect of Halbach array on thrust force

の寸法でハルバツハ配列の効果を磁場解析で調べた結果を図 3.13 に示している. なお, 永久磁石には実際に使用する NeoMag 社製の N48H を, ヨークには鋼鉄を解析で用いた. ハルバツハ配列を使用した磁石配列は, 使用しない場合よりも最大推力が 0.7 N 大きく, 5.2 N となった. そこで以降ではハルバツハ配列を採用し, この値を本アクチュエータの理論上の最大推力とする.

3.5 試作装置

試作したアクチュエータの全体構造を図 3.14 に, 可動子を含む断面図を図 3.15 に示す. また, 構成する部品を図 3.16 に示す. 全長が 74 mm, 幅が 80 mm, 厚さが 14 mm の小型扁平な構造となっている. 放熱と熱の拡散を容易にするため, 3 mm 厚の銅板をベースとして用い, この上に 15 mm 四方で厚さ 3.1 mm のペルチェ素子が 2 組合計 4 個配置されている. 大きな熱流束を発生させるため, ペルチェ素子には Z-MAX 社製の FPH1-3106NC を選んだ. 1 組 2 個のペルチェ素子は直列に接続されており, 同一の感温磁性体を加熱・冷却

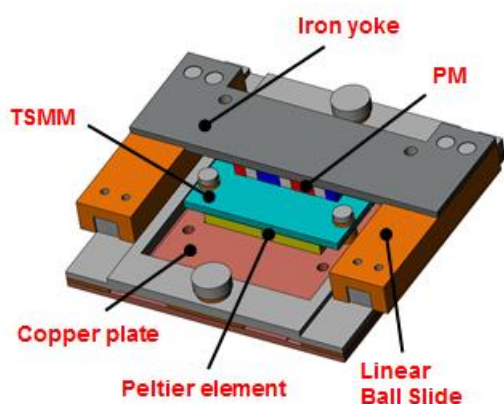


Fig. 3.14: Overall structure of the proposed actuator

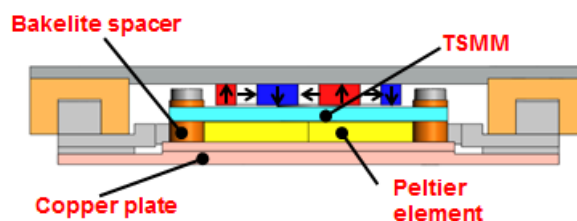


Fig. 3.15: Cross-section view of the proposed actuator

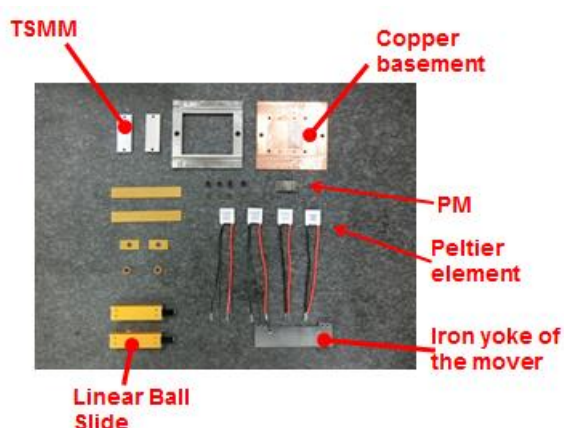


Fig. 3.16: Component parts of the prototype actuator

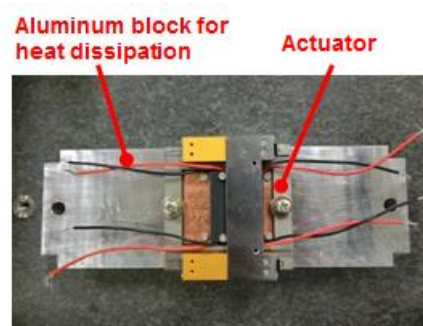


Fig. 3.17: Top view of the fabricated actuator

するのに用いられる。ペルチェ素子の上には幅 15 mm，長さ 40 mm の感温磁性体がそれぞれ 1 枚，計 2 枚配置されている。使用温度領域の下限を室温とし，十分な温度域を確保する観点から，感温磁性体には日立金属ネオマテリアル製の MS-2 を選んだ。感温磁性体は断熱のためベークライトスペーサにより支持され，ねじによって固定されている。なお，ペルチェ素子の下面は硬化型シリコンにより銅板に固定され，上面はシリコンコンパウンドによって感温磁性体と熱的に接続されている。

可動子は摩擦係数の小さい有限ストロークの THK 製リニアボールスライドにより支持されている。また，可動子には 2.5 mm 厚の鉄板 (S50C) を用い，永久磁石を接着剤により固定している。永久磁石には NeoMag 社製の N48H を使用した。これは，耐熱温度が 120 °C で本アクチュエータの最高使用温度よりも高く，公称値の残留磁束密度は 1360~1430 mT，保磁力 H_{cb} は 907 kA/m 以上である。永久磁石と感温磁性体間のギャップは 300 μm とした。なお，アクチュエータのストロークは永久磁石の長さに等しい 10 mm である。

図 3.17 は，試作アクチュエータの全体写真を示している。アクチュエータは，高さ 30 mm，長さ 220 mm，幅 56 mm の放熱用アルミブロックの上に設置され，ベースの温度上昇を防いでいる。

3.6 駆動特性

本アクチュエータは，2 枚の感温磁性体間の温度差により生じる磁気的なアンバランスによって推力を発生する。そこでまず，感温磁性体温度と推力，推力と消費電力間の静特性を実験的に明らかにし，既存の電磁アクチュエータとの性能比較を行う。次に，アクチュエータの応答性を決定する温度応答特性を明らかにし，温度応答特性を表現する熱回路モデルを導出して，その有効性を検証する。なお，推力はロードセル (共和電業製 LTS-1KA)，感温磁性体温度は放射温度計 (ジャパンセンサー製 TMHX-CN0500) により測定している。放射温度計を使用するため，感温磁性体表面には黒体放射スプレーを塗布している。雰囲気温度は 22 °C としている。

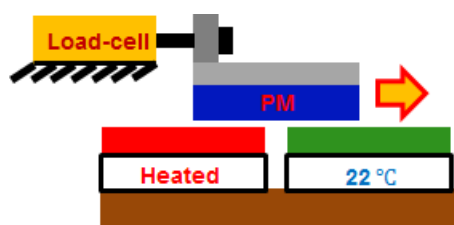


Fig. 3.18: Schematic of the experimental setup for measuring the thrust force

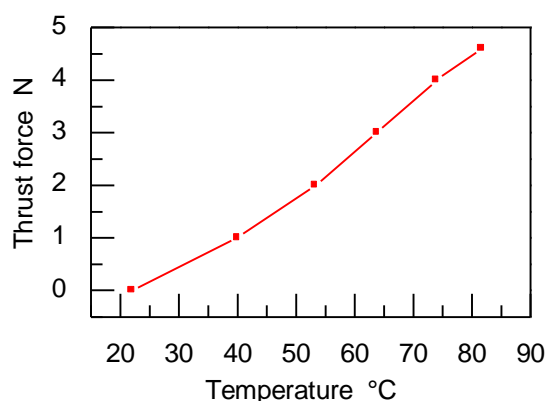


Fig. 3.19: Relationship between the TSMC temperature and the thrust force

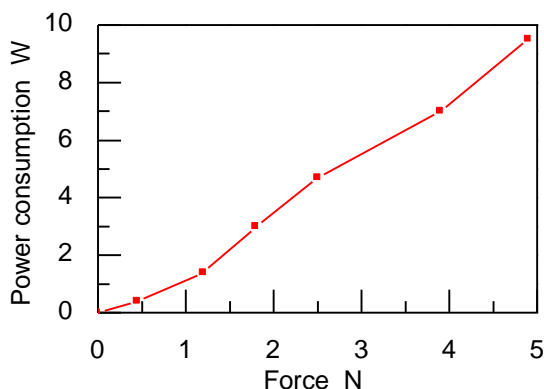


Fig. 3.20: Schematic of the experimental setup for measuring the thrust force

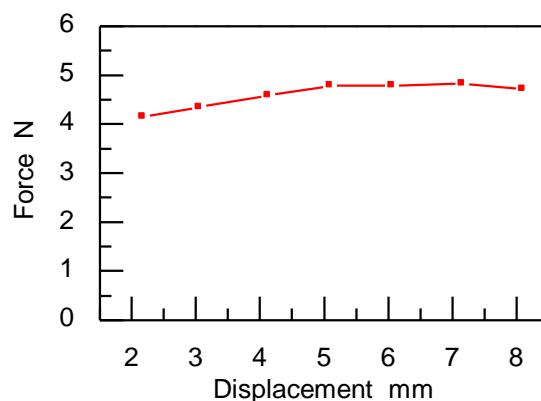


Fig. 3.21: Displacement dependency of the thrust force with the maximum TSMC temperature

3.6.1 静特性

推力測定では、図 3.18 のように、2 枚の感温磁性体のうち片方は室温のまま変化させず、もう一方の温度を変化させて推力を発生させた。また、可動子はロードセルにより可動範囲の中央部（変位 5 mm）に固定した。定常状態における温度と推力との関係を測定するため、推力測定値を制御出力としたフィードバック制御系を構成し、任意推力の維持を可能とした。推力と感温磁性体中央部の温度との関係を図 3.19 に示す。最高温度 82 °C の場合の発生推力（最大推力）は 4.6 N であった。摩擦力の測定結果は 0.4 N であり、摩擦の影響を除去した推力は 5.0 N と計算される。この値は、磁場解析により計算された推力 5.2 N に近く、解析は妥当であるといえる。一方、最大推力 4.6 N を維持する際の消費電力は 8.2 W となった。また、図 3.20 に示すように、消費電力は発生推力にほぼ比例していることがわかる。

本アクチュエータは可変バイアス要素として使用される際、推力が温度のみに依存し

置によらず一定の推力を生成する特性が求められる。そこで、推力の位置依存性を明らかにするため、一方の感温磁性体温度を最高温度 82 °C で維持し、可動子に接続されたロードセルを変位させて位置ごとの推力を測定した。結果を図 3.21 に示す。推力の位置依存性は、測定した変位内で発生推力の 15 % 以下であり、位置依存性は小さく、可変バイアス要素に相応しい特性を有すると判断している。

3.6.2 電磁アクチュエータとの性能比較

本アクチュエータの性能を既存のアクチュエータと比較し、その長所を明らかにする。ここでは、高応答要素として使用されるダイレクトドライブ電磁リニアモータを比較対象とし、試作アクチュエータの構成要素を可変バイアス要素として高応答要素と組み合わせ使用することの有効性を検証する。

比較対象の電磁リニアモータとして、高さ 14 mm、長さ 100 mm、幅 60 mm の安川電機製リニアモータ Σ -Track- μ SGTMM01-030AM20A を選択した。試作アクチュエータと比較し、高さは同一、長さと同程度である。なお、実際の使用時には、アクチュエータを支持する構造部材を放熱に利用できると考え、放熱用のアルミブロックの体積は考慮していない。

比較対象の電磁リニアモータは、連続定格推力が 3.5 N、最大推力が 10 N である⁽⁶⁰⁾。一方で、試作アクチュエータの最大推力は感温磁性体温度が 85 °C のときの 4.6 N で、連続的に出力可能である。そこでこれを連続定格推力と見なせば、試作アクチュエータは最大推力では劣るものの、連続定格推力では電磁リニアモータよりも優れていると言える。電磁リニアモータの連続定格推力は、連続駆動時にコイルの温度が耐熱限界温度になる値であり⁽⁶¹⁾、コイルの発熱は推力の 2 乗で増加する。したがって、耐熱温度の向上に対して連続定格推力の向上は 2 分の 1 乗で増加すると考えられる。一方で、図 3.19 で示す実験結果から理解できるように、本アクチュエータの発生推力は感温磁性体温度にほぼ比例しており、耐熱温度の向上によって推力性能に関する優位性がさらに向上する可能性がある。

比較対象の電磁リニアモータの発生推力を、消費電力の平方根で除したモータ定数のカタログ値は $1.26 \text{ N}/\sqrt{\text{W}}$ である⁽⁶⁰⁾。これより、試作アクチュエータの最大推力に等しい 4.6 N

Table 3.2: Comparison of the actuator's performance

	Electromagnetic linear motor	Proposed actuator
Rated thrust force	3.5 N	4.6 N
Maximum thrust force	10 N	4.6 N
Power consumption with the force of 4.6 N	13.3 W	8.2 W

を出力した際の消費電力を計算することができ、その値は 13.3 W となる。一方で、試作アクチュエータの消費電力は 8.2 W であることから、高推力を定常的に発生する際の消費電力は電磁リニアモータに比べ勝っていると言える。また、感温磁性体の断熱性能を向上することで、さらなる消費電力の削減が可能と考えられる。

以上の比較結果を表 3.2 にまとめた。連続定格推力と定常時の消費電力の両者において電磁リニアモータに対する優位性が確認され、様々な改良により優位性がさらに向上する可能性をもっている。これまでの静特性に関する議論を踏まえると、高推力を連続的かつ効率的に発生することが求められる用途において、電磁リニアモータを単独で使用するよりも、試作アクチュエータの構成要素と電磁リニアモータを同一体積内で組み合わせた方が高い性能が得られ、感温磁性体と永久磁石によって構成される可変バイアス要素と高応答要素である電磁力アクチュエータとの組み合わせは、高い潜在能力を持つと考えられる。

3.6.3 温度応答実験

本アクチュエータでは、感温磁性体の温度応答性がアクチュエータの応答性を大きく支配する。そこで、温度応答性を実験的に調べた。

(1) 加熱と自然放熱を行う実験

6 種類の大きさの電流を 6 秒間通電し、その後電流 0 A として自然放熱を行わせた。得られた温度応答を図 3.22 (a) に示す。最大電流である 6 A で加熱した場合、温度が 22 °C から 82 °C に上昇するまでの時間は 6.6 秒であった。

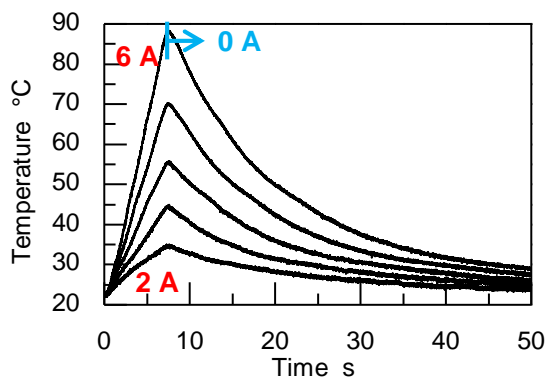
(2) 加熱と冷却を行う実験

電流 6 A を 6 秒間通電した後、極性を反転させ、様々な電流値で冷却する実験を行った。得られた温度応答を図 3.22 (b) に示す。電流 6 A で冷却した場合、温度が 82 °C から 22 °C へ低下するまでの時間は 12.4 秒であった。

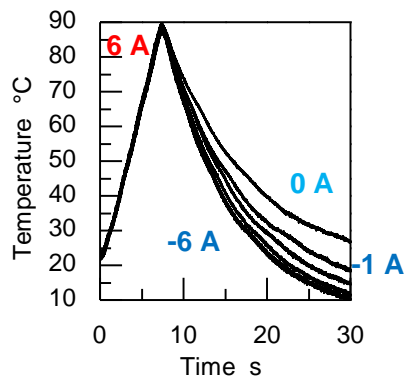
(3) 様々な電流に対して定常状態を測定する実験

一定の電流を通電し続けるとある温度に収束するが、その通電電流と温度との関係を実験により調べた。なお、温度が収束するまでには長い時間を要するため、あらかじめ定常温度近くまで温度を上昇させた。得られた実験結果を図 3.22 (c) に示す。7 秒で入力を切り替えており、温度応答波形の傾きが急峻に変化している。その後、温度が増減している部分が存在するが、この原因については 3.6.4 項で説明する。

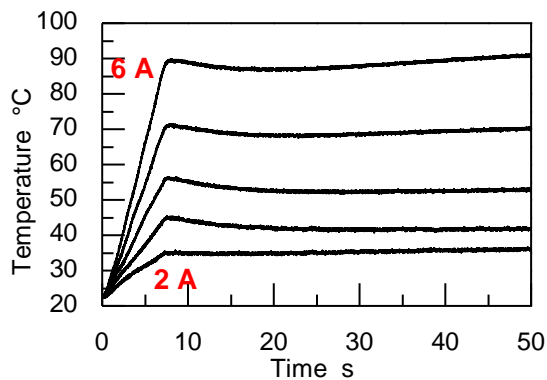
ペルチェ素子への通電により、加熱・冷却の両温度変化を得られることが確認された。冷却に要する時間は加熱に要する時間よりも長い。これは、加熱時・冷却時を問わず電流の通電により発生するジュール熱が、加熱に寄与することによると考えられる。



(a) Heating and naturally dissipating



(b) Heating and cooling



(c) Maintaining temperature

Fig. 3.22: Temperature responses

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

第4章 静的推力発生時の省エネルギー化と高応答を両立するハイブリッドアクチュエータとその基本特性

4.1 緒言

第3章では、静的な高推力の効率的発生と高い応答性を両立できる構成として、荷重の補償等に利用可能な一定推力を、連続的かつ効率的に発生するための可変バイアス要素と、高応答な運動を発生するための高応答要素の組み合わせを説明し、可変バイアス要素に適したアクチュエータの提案と原理検証を行った。第3章で提案した感温磁性体と永久磁石からなるアクチュエータは、ダイレクトドライブ電磁アクチュエータである高応答要素と磁気回路を共有でき、両要素の高い融合性が期待される。そこで本章では、両者を融合し、小型構造で高推力の効率的発生と応答性を両立できるハイブリッドアクチュエータの実現を目指す。

まず、第3章で提案した可変バイアス要素を基礎に、高推力の効率的発生と高い応答性を両立する構造を示し、その原理を説明する。それらを基礎に、可変バイアス要素の発生力と高応答要素の発生力を組み合わせて、鉛直荷重の支持と運動制御を両立する方法を説明する。次に、磁場解析を用いてアクチュエータの詳細設計を行い、試作アクチュエータの具体的構成を説明する。最後に、試作アクチュエータの基本的特性を実験的に明らかにし、既存のアクチュエータとの比較検討を行う。

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

第5章 ハイブリッドアクチュエータの制御性能

5.1 緒言

第4章では、高い静推力の効率的発生と高い応答性を両立できるハイブリッドアクチュエータを提案し、試作機を用いてその基本的な特性を明らかにした。本章ではハイブリッドアクチュエータの応用を想定して運動制御系を構成し、その有効性を実験的に検証する。ハイブリッドアクチュエータでは、コイルに通電される電流が、電磁力の発生に加え感温磁性体の温度上昇による可変バイアス力の変化にも寄与する。つまり、電流と発生推力との関係は、通常の電磁アクチュエータの場合とは一致しない。しかし可変バイアス力と電磁力の応答性には大きな開きがあり、ダイナミクスが大きな影響を与える制御系設計においては、可変バイアス力の影響は無視でき、近似的に通常の電磁アクチュエータと同様に扱うことが可能と考えられる。

ここではまず、基本的な制御性能として位置制御性能を実験的に明らかにする。ロボットアームや鉛直ステージでの利用を考えた場合、高精度位置制御は重要である。また、位置制御機能に加えて高い応答性を有するハイブリッドアクチュエータは、鉛直制振メカニズムの機能向上に貢献することが期待される。そこで次に、ハイブリッドアクチュエータを鉛直制振メカニズムに使用することで生ずる長所を述べた上で、ハイブリッドアクチュエータのための制振制御系を構成し、その制振性能を実験的に明らかにする。

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

未公表部

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、様々な長所のために産業界で広く使用され、これからも大きな存在であり続けると考えられる電磁アクチュエータに着目し、その長所をさらに高める方法に取り組んだ。電磁アクチュエータは、応答性や制御性が高く、比較的高い推力で、エネルギー効率も比較的良好など、多くの点で優位性を有している。そのため求められる性能は年々厳しくなるとともに、要求項目も増加している。本研究では、高加速・高速性能、位置・運動精度、駆動効率を、特に重要な性能であると位置づけ、これらの性能向上を図る上で生じる課題を明らかにし、その解決法を提示し、有効性を検証した。

第2章「高加速・高速電磁力駆動系の高精度制御」では、生産効率に直結する高加速・高速性能と製品品質を支配する位置・運動精度に特に着目し、これらを両立する電磁力駆動系の実現を目指した。両性能は、サーボ機構における本質的な性能であり、両性能に対する要求に応えることを目的に、加速度 100 G、速度 10 m/s を超える超高加速・高速リアモータが試作され、位置決め動作においては 500 nm 以下の精度が実現された。しかしながら、高い推力性能を得るために強い非線形性を有する構造が使用されており、加速度や速度の増加に伴って運動精度が顕著に劣化する問題が生じ、その解決が重要な課題となっていた。

そこでこれまでの駆動設計の成果を活かせるように、制御技術により問題の解決を図った。一般に、制御対象の逆モデルを必要とするモデルベースの補償器設計が運動性能向上に有効であるが、強い非線形性を有する本制御対象の場合、その実現は困難であった。一方、運動誤差には高い再現性があることから、学習機能を有するフィードフォワード制御器を組み込み、問題解決を図った。その結果、高加速・高速運動時において運動誤差を大幅に低減することに成功し、周波数 20 Hz・振幅 10 mm の正弦波運動においては、6.65 μm の追従誤差が 1.62 μm に低減された。

その一方で、高推力が要求される運動においては、コイルで生じるジュール損失が大きくなり、小型化によりコイル体積が減少した場合には、消費電力のさらなる増大が懸念される。特に静的な高い推力を維持する必要がある場合、消費電力の増大、発熱による出力制限が問題となりやすい上、消費電力を制御系の改良によって低減することは不可能である。この問題解決のためには、新たな構成を有するアクチュエータが必要である。

そこで第3章「感温磁性体を用いた小型省エネルギーアクチュエータ」では、荷重に応じた推力の連続的かつ効率的な発生と高応答な運動の生成を両立できる小型アクチュエータとして、静推力を効率的に発生できる「可変バイアス要素」と高応答な運動を生成できる「高応答要素」を組み合わせ、融合したハイブリッドアクチュエータの概念を提案した。ハイブリッドアクチュエータを実現するために、まず、可変バイアス要素の構成について

検討した。本研究では、電磁アクチュエータを用いた高応答要素との機能的、構造的な融合を可能とするために、永久磁石と感温磁性体を組み合わせて磁力を発生する構成を採用し、可変バイアス要素に適した特性を有する基本構造を明らかにし、磁場解析・熱解析を用いた詳細設計を行った。

次に、設計したアクチュエータの駆動特性を実験的に調べ、連続定格推力と連続推力発生時の消費電力の両者において、従来の電磁リニアモータに対する優位性を明らかにした。また、温度応答特性を実験的に調べ、これをモデル化するとともに、そのモデルを利用して位置制御系を構成し、アクチュエータを単独で使用した場合の性能を実験的に調べた。アクチュエータに安定性向上を目的としたばねを設置することにより、10 秒の間に 7 mm の目標値を変位させる位置決め実験において、定常偏差を 20 μm 以下にすることができた。但し、この改良は、本来可変バイアス要素に求められる位置無依存性が失われる欠点を持っている。

未公表部

未公表部

6.2 今後の課題

(1) 消費電力削減のための真空封止構造の実装

未公表部

(2) 電磁力連動式熱回路切り替え機構の採用

未公表部

未公表部

(3) 実機におけるハイブリッドアクチュエータの有効性検証

未公表部

(4) 目的に応じたハイブリッドアクチュエータの最適設計法の検討

未公表部

(5) 熱を蓄積しにくくする仕組みの検討

未公表部

参考文献

- (1) 山本晃生, 静電アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 727-730 (2003).
- (2) 鈴森康一, 川原伸章, マイクロアクチュエータ, 電気学会論文誌 E, Vol. 122, No. 12, pp. 555-559 (2002).
- (3) 樋口俊郎, アクチュエータの研究と手法, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 1, pp. 16-19 (1994).
- (4) 則次俊郎, 空気圧アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 43-47 (1997).
- (5) 中野和夫, 油圧による運動制御, 精密機械, Vol. 44, No. 7, pp. 22-26 (1978).
- (6) 古谷克司, 圧電アクチュエータ—精密位置決めへの応用, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 4, pp. 449-452 (2006).
- (7) 岡本康弘, 吉田龍一, 圧電リニアアクチュエータの開発, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J-80A, No. 7, pp. 1751-1756 (1997).
- (8) 小林忠彦, 酒井勲, 超磁歪材料とアクチュエータへの応用, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 12, pp. 1695-1698 (1994).
- (9) 樋口俊郎, 第4節 アクチュエータ [2] 固体アクチュエータ, 次世代精密位置決め技術, フジ・テクノシステム, pp. 387-396 (2000).
- (10) 安積欣志, 高分子アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 708-712 (2003)
- (11) 安積欣志, 人工筋肉へのソフトマテリアルの応用—電気駆動ソフトアクチュエータ—, Vol. 31, No. 5, pp. 448-451 (2013).
- (12) 栗林勝利, 新アクチュエータのエネルギー変換特性の比較, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 5, pp. 35-45, (1989).
- (13) 山田一, 海老原大樹, 脇若弘之, 川西利昌, 実用化が進むリニア電磁アクチュエータ, 電気学会雑誌, Vol. 106, No. 8, pp. 35-42 (1986).
- (14) 岡崎祐一, 高速工具サーボ, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 4, pp. 422-426 (2006).
- (15) 中川孝幸, 三宅英孝, 今井祥人, 戸倉和, 磁気支持型アクチュエータによる高速微細放電加工モジュールの開発, 精密工学会誌, Vol. 72, No. 6, pp. 677-680 (2006)
- (16) 大岩孝彰, 勝木雅英, 高偉, 佐藤海二, 古谷克司, 牧野内進: 超精密位置決めアンケート報告書, 精密工学会 超精密位置決め専門委員会アンケート小委員会, (2015).
- (17) 日本ムーグ株式会社 カタログ, 高性能リニアサーボモータ 4020, 5020
- (18) 下河辺明, 佐藤海二, 変位センサと超精密位置決め, Vol. 61, No. 12, pp. 1661-1665 (1995).

- (19) 小川晋, 三相誘導電動機のトップランナー基準 (案) 紹介, 電機, No. 762 (2013).
- (20) 水本洋, 近未来技術展望「超精密工作機械の位置決め技術について」, NACHI-BUSINESS news, Vol. 4, (2004).
- (21) 大岩孝彰・勝木雅英, 超精密位置決めにおけるアンケート調査—精密メカトロニクスと精密計測に関するアンケート調査—, 精密工学会誌, Vol.81, No. 10, pp. 904-910 (2015).
- (22) 株式会社ミットヨ カタログ, MACH シリーズ, Catalog No. 4284
- (23) 張志城・香川利春・藤田壽憲・大隈雄三郎, 静圧軸受機構を利用した高速・精密位置決め用エアサーボテーブルの開発, 油圧と空気圧, Vol. 28, No. 4, pp.451-457 (1997).
- (24) 佐藤海二, 高速サーボメカニズムの動向, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 861-862 (2006).
- (25) 高加速度直線駆動装置「トンネルアクチュエータ」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 29, No. 3, pp.199-204 (2005).
- (26) Kaiji Sato, Masato Katori, and Akira Shimokohbe, Ultrahigh-Acceleration Moving-Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor With a Long Working Range, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 1, pp. 307-315 (2013).
- (27) 佐藤海二, 湯浅浩章, 100G を超える超高加速リニアモータとその精密位置決め, 2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 859-860 (2006).
- (28) 例えば, 次の文献の参考文献 : Kaiji Sato, Thrust Ripple Reduction in Ultrahigh-Acceleration Moving-Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.48, No.12, pp.4866-4873 (2012).
- (29) 青木金正, 電気式アクチュエータ, 精密機械, Vol. 40, No. 1, pp. 89-93 (1974).
- (30) Shigeo Hirose, Craig Tibbetts, and Tetsuo Hagiwara, Development of X-screw: A Load-Sensitive Actuator Incorporating a Variable Transmission, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 193-199 (1999).
- (31) Hitoshi Maekawa and Kiyoshi Komoriya, Development and Evaluation of a Passively Operating Load-responsive Transmission, Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, 2004, pp. 31-32 (2004).
- (32) 高木健, 小俣透, ロボットハンドのための負荷感応無段変速機, ロボット学会誌, Vol. 23, No. 2, pp. 238-244 (2005).
- (33) H. Shinno, H. Yoshioka, and M. Hayashi, A High Performance Tilting Platform Driven by Hybrid Actuator, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 58, No. 1, pp. 363-366 (2009).

- (34) Kaiji Sato, High-precision and high-speed positioning of 100 G linear synchronous motor, *Precision Engineering*, Vol. 39, pp. 31-37 (2015).
- (35) 田口達也, 高加速・高速直動メカニズム, 東京工業大学 制御システム工学科 卒業論文 (2009).
- (36) 浜維志, 超高加速・高速リニアモータの動特性と制御, 東京工業大学 機械知能システム学科 卒業論文 (2013).
- (37) YangQuan Chen, , Kevin L. Moore, and Vikas Bahl, Learning Feedforward Control Using a Dilated B-Spline Network: Frequency Domain Analysis and Design, *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 15, No. 2, pp. 355-366 (2004).
- (38) YangQuan Chen, Kevin L. Moore, and Vikas Bahl, Improved Path Following of USU ODIS by Learning Feedforward Controller Using Dilated B-Spline Network, *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics Automation (IEEE CIRA 2001)*, pp.59-64 (2001).
- (39) G. Otten, Theo J. A. de Vries, Job van Amerongen, Abrian M. Rankers, and Erik W. Gaal, Linear Motor Motion Control Using a Learning Feedforward Controller,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2, pp. 179-187 (1997).
- (40) Kok Kiong Tan, and Shao Zhao, “Precision Motion Control with a High Gain Disturbance Compensator for Linear Motors, *ISA Transactions* 43, pp. 399-412 (2004).
- (41) Samer S. Saab, William G. Vogt, and Marlin H. Mickle, Theory of P-type Learning Control with Implication for the Robot Manipulator, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 665-671 (1993).
- (42) Xing-Gang Yan, I-Ming Chen, and James Lam, D-Type Learning Control for Nonlinear Time-varying Systems with Unknown Initial States and Inputs, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 23, No. 2, pp. 69-82 (2001).
- (43) Ying-Chung Wang and Chiang-Ju Chien, An Observer Based Adaptive Iterative Learning Control for Robotic Systems, *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)*, pp. 2876-2881 (2011).
- (44) Jian-Xin Xu and Rui Yan, Iterative Learning Control Design without a Priori Knowledge of the Control Direction, *Automatica*, Vol. 40, No. 10, pp.

- 1803-1809 (2004).
- (45) 堺和人, 萩原敬三, 平野恭男, ハイブリッド自動車用高出力・高効率の永久磁石リラクタンスモータ, 東芝レビュー, Vol. 60, No. 11, pp. 41-44 (2005).
- (46) 杉浦賢治, 八十原正浩, ブラシレスモータ用 低騒音高効率 正弦波駆動 IC, パナソニック技報, Vol. 55, No. 3, pp. 22-26 (2009).
- (47) Dongkyu Choi, Youngsoo Kim, Seungmin Jung, Jongwon Kim, and Hwa Soo Kim, "A New Mobile Platform (RH_yMo) for Smooth Movement on Rugged Terrain," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 3, pp. 1303-1314 (2016).
- (48) DongGyu Lee and TaeWon Seo, "Lightweight Multi-DOF Manipulator with Wire-Driven Gravity Compensation Mechanism," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 22, No. 3, pp. 1308-1314 (2017).
- (49) Kyihwan Park, Dongyoub Choi, Abdullah Ozer, Sangyoo Kim, Yongkwan Lee, and Dongik Joo, "A Voice Coil Actuator Driven Active Vibration Isolation System with the Consideration of Flexible Modes," Review of Scientific Instruments, Vol. 79, No. 6 (2008).
- (50) 五百井清, 須田敦, 山本昌彦, 低衝撃低振動台車を実現する能動制振キャストの研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 79, No. 808, pp. 329-340 (2013).
- (51) 水野毅, 吉富亮一, ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置の開発 (第1報, 基本原理と基礎実験), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 68, No. 673, pp. 83-88 (2002).
- (52) 石野裕二, 水野毅, 磁気浮上系の局所電流フィードバックによる負のバネ剛性制御, 第49回自動制御連合講演会講演論文集 (2006).
- (53) Boudewijn M. Wisse, Wouter D. van Dorsser, Rogier Barents, and Just L. Herder, "Energy-Free Adjustment of Gravity Equilibrators Using the Virtual Spring Concept," in Proceedings of 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 742-750 (2007).
- (54) Etsunori Fujita, Noritoshi Nakagawa, Yumi Ogura, and Shigeyuki Kojima, "Vibration Characteristics of Vertical Suspension Using Magneto-Spring," SAE Technical Paper, pp. 1003-1017 (1999).
- (55) 加藤哲男, 富岡達也, Fe-Ni 整磁合金について, 電気製鋼, Vol. 35, No. 6, pp. 277-286 (1964).
- (56) 平田勝弘, 神崎泰典, 太田智浩, 山口忠, 河瀬順洋, 感温磁性リニアアクチュエータの応答性改善に関する考察, 電気学会論文誌, Vol. 127, No. 10, pp. 1103-1108 (2007).
- (57) Kiyohito Yamasawa, Performance of Temperature-Sensitive Magnetic

- Actuators, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-21, No. 6, pp. 2652-2656 (1985).
- (58) 株式会社日立金属ネオマテリアル, スピードメータ用整磁合金 (<http://www.hitachi-metals-neomaterial.co.jp/product/liv/08.html>)
- (59) Shaopeng Wu, Shumei Cui, and Weiduo Zhao, Design of Halbach Hybrid Excitation Compulsator, 2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, pp. 1-4 (2014).
- (60) 安川電機 AC サーボドライブ Σ -V シリーズ 総合カタログ 2014 年 5 月 23 日掲載
- (61) 柿原正伸, 星俊行, 鹿山透, 大戸基道, 高推力密度コア付きリニアモータの開発, 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No. 4, pp. 480-486 (2012).
- (62) 矢野智昭, 「ニューアクチュエータ」特集について, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, p. 1 (1997).
- (63) 森山茂夫, 原田達男, 高梨明紘, 圧電素子アクチュエータ微動機構を備えた超精密 X-Y 移動台, 精密機械, Vol. 50, No. 4, pp. 80-85 (1984).
- (64) 佐藤海二, 今田滋彦, 村山禎恒, 下河辺明, 機能化送りねじ機構 (第 1 報, 原理と試作機構の諸特性), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 59, No. 558, pp. 84-91 (1993).
- (65) 徳山享大, 藤本博志, 弓座大輔, 佐伯和明, 粗微動間の連結分離機構を有するステージの高速高精度制御系の提案, 電気学会研究会資料. IIC, 産業計測制御研究会, Vol. 12, pp. 71-76 (2012).
- (66) Ali Kirecci, L. Canan Dulger, A Study on a Hybrid Actuator, Mechanism and Machine Theory, Vol. 35, pp. 1141-1149 (2000).
- (67) 肥後寛, 桜井康雄, 田中和博, 中田毅, 電空ハイブリッドアクチュエータのシステムモデルとその動特性解析, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 39, No. 6, pp. 103-109 (2008).
- (68) 藤本浩志, 滝田久芳, 有田道生, 小金沢鋼一, 加藤一郎, 電気=油圧ハイブリッドアクチュエータを搭載した階段昇降可能な大腿義足, Vol. 9, pp. 241-251 (1988).
- (69) Y. Le Gall, Christian Bolzmacher, Design and characterization of a multi-stable magnetic shape memory alloy hybrid actuator, Microsystem Technologies, Vol. 20, No. 4-5, pp. 533-543 (2014).
- (70) 宝野和博, Dy を使わない Nd-Fe-B 磁石の開発動向, まてりあ, Vol. 54, No. 7, pp. 351-355 (2015).
- (71) 日立金属株式会社カタログ, Nd-Fe-B 系磁石 NEOMAX[®] 磁気特性曲線, (2017).
- (72) 安達三郎, 大貫繁雄, 基礎電気・電子工学シリーズ 電気磁気学 [第 2 版], 森北

- 出版株式会社 (2012).
- (73) 柴田俊忍, 大谷隆一, 駒井謙治郎, 井上達雄, 材料力学の基礎, 培風館 (2010).
- (74) 長谷川正義, ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社 (1973).
- (75) JISG4304, 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯, 日本工業標準調査会 (2015).
- (76) 加藤仁, 松林恒雄, 案内面の摩擦特性とスティックスリップ現象, 精密機械, Vol. 39, No. 12, pp. 12-20 (1973).
- (77) 岡村健二郎, 松原十三生, 工作機械しゅう動面のしゅう動特性の研究 —しゅう動面固有値と摩擦振動発生限界の関係—, 精密機械, Vol. 35, No. 9, pp. 11-16 (1969).
- (78) 加藤英晃, 長谷川真也, 押野谷康雄, ボイスコイルモータを用いた超小型車両用シーアの制御 (悪路走行時における制御性能の検討), Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 37, No. 3-1, pp. 95-101 (2013).
- (79) 岩田義明, 大塩真, 鈴木登, 内田公夫, 唐沢好一, 精密除振装置のアクティブコントロール, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 57, No. 534, pp. 179-184 (1991).
- (80) 涌井伸二, 浅田克己, 復元した位置信号を使った空気ばね式除振装置の制御, 精密工学会誌, Vol. 63, No. 5, pp. 704-705 (1997).
- (81) 明立精機株式会社, 空気圧制御式アクティブ除振システム MAPS シリーズ (<http://www.meiritz.jp/product/vibration-isolation/maps.html>)
- (82) 森下明平, 小豆沢照男, 常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 108, No. 5, pp. 447-454 (1988).
- (83) Youn Hyun. Kim, Kwang Min. Kim, and Ju. Lee, Zero Power Control with Load Observer in Controlled-PM Levitation, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 2851-2854 (2001).
- (84) 川地佑也, 石野裕二, 高崎正也, 水野毅, ユニット型ゼロパワー磁気浮上式除振装置の開発 ~荷重支持機構を備えた除振ユニットの開発~, 第48回自動制御連合講演会講演論文集, pp. 465-468 (2005).
- (85) 水野毅, 木下大輔, 高崎正也, 石野裕二, ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置の開発 (第2報, 荷重支持機構の導入), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 72, No. 715, pp. 32-40 (2006).
- (86) 永井正夫, アクティブサスペンションの制御と制御理論, 計測と制御, Vol. 32, No. 4, pp. 290-295 (1993).
- (87) 島宗亮平, 谷藤克也, 坂上俊雄, 鉄道車両のアクティブサスペンションにおける油圧アクチュエータの適用性 (LQG 制御則を適用した模型実験装置による検討), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 61, No. 586, pp. 146-153 (1995).
- (88) 谷藤克也, 永江哲哉, 鉄道車両のアクティブ制振における制振性能の改善 (H。制御則を適用した模型実験装置による検討), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 62,

- No. 602, pp. 206-212 (1996).
- (89) 大作覚, 三平満司, 清水悦郎, 富田晃一, 非線形 H_∞ 制御によるセミアクティブサスペンション, 計測と制御, Vol. 39, No. 2, pp. 126-129 (2000).

謝辞

6年の長きに渡りご指導いただき、また、度々丁寧にディスカッションや論文添削に応じていただいた佐藤海二先生に深く感謝いたします。今思えば、学部4年で研究室に配属となった時のことが遠い過去のものと感じられる一方で、研究テーマの設定からその展開、アクチュエータの設計・製作、その評価、発表、論文の執筆などが、ひとかたまりの有意義な時間の流れの中に蘇ってまいります。これまでに、研究の方向性を左右する転換点が何度かありましたが、先生はその度に、私の意見を尊重しつつ適切な助言を与えてくださいました。また、遠方で連絡を取り合いながら部品の詳細な寸法を決定し発注してくださるなど、研究の遂行を全力で支えていただいたことに、敬意と感謝の意を表します。社会人になってからも、先生に教わった発表や論文執筆の方法を忘れずに、研究者として邁進してまいります。

本論文の主査を務めていただいた進士忠彦先生には、特に最後の1年においてお世話になりました。特殊な事情の中、私の研究について様々なご指導・ご支援をいただいたことについて感謝しております。また、お忙しい中、佐藤海二先生と緊密な連携を取るなど、様々な形でお気遣いくださいまして、ありがとうございました。佐藤海二先生との学生時代からの関係に関するお話など、楽しく聞かせていただきました。

大同特殊鋼株式会社、多湖雄一郎様、高野剛次様、齋藤章彦様には、感温磁性体の製作に関して、多大な御協力をいただきました。私の研究に強く関心を持っていただき、様々な成分比の材料を好意的に製作してくださるなど、どうもありがとうございました。

技術部すずかけ台設計工作部門、長峯靖之様、杉原輝哉様をはじめとする工場の方々には、複雑な構造を有する部品を多数製作いただきました。アクチュエータが完成したのは、皆様方のおかげです。図面を見ただけで、構造や加工法などがすぐに思い浮かぶ能力にはただただ感心させられました。

補佐員の無量林直子様には、旅費の精算など、事務手続きで度々お世話になりました。私の方に手続き上の間違いなどが多く、その度に丁寧に対応していただき、ありがとうございました。

一緒に博士課程に在籍したナズミン・ビン・マスラン様とは、研究内容について頻繁に英語でディスカッションしました。私の英語力向上はひとえに彼のおかげだと言っても過言ではありません。津野田君とは、最後の1年間楽しく過ごさせていただきました。研究関連の内容や海外出張に関する相談に快く乗っていただけました。

博士課程在籍中に学生でいた桃井大輔君、辻澤優太君、柴田将希君、篠田直毅君と過ごした日々は、佐藤海二研時代の良い思い出となっています。M2の鈴木雄大君、田畑大輔君、酒井大樹君、吾妻範栄君、柳樂佳樹君、清水大輔君、M1の明野晃希君、山本凌君、徐立仁君、楊仁君、B4の西田莉那さん、最後の1年は14人の大所帯で楽しく過ごすことができました。皆さん、どうもありがとうございます。

OBの藤原良元様には、よく飲みにご招待いただき、多くの楽しい思い出があります。森本貴景様、入社後もよろしく願いいたします。

最後に、私の研究を支えてくださった全ての方々に、深く感謝いたします。

平成30年2月20日

浜 維 志