

- 修士論文 -

生体の拮抗二関節筋を模擬する 電磁駆動系の開発と制御

平成19年2月2日提出

指導教員 古関 隆章助教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻

56406 福正 博之

内容梗概

今日、ヒューマノイドロボットの運動性能の向上のために生体の持つ拮抗二関節筋機構に注目し実装を目指した研究が進められている。

本論文では、拮抗二関節筋のためのコンパクトで大推力なリニア電磁アクチュエータを開発し、生体の滑らかな動きの実現のために粘弾性を電磁アクチュエータ単体の実装させる制御システムを提唱した。

開発したリニア電磁アクチュエータは永久磁石の Halbach 配列を用いた空心形のリニア同期アクチュエータであり、空心形の特徴である電流値の変化に応じて推力がリニアに変化する特性を実証した。また、提案した粘弾性を持つ制御システムは筋肉と同様に推力指令の制御システムであり、粘弾性のパラメータをソフトウェアによって容易に調整出来る。そのため実際のバネやダンパがなくともアクチュエータに粘弾性を持たせることが出来る。そして、実際のリニア同期モータに提案システムを実装し、解析とほぼ同じ特性を得ることを実証した。

目 次

第 1 章	序論	3
1.1	研究の背景と目的	3
1.2	ヒューマノイドロボットへの拮抗二関節筋機構の導入	3
1.2.1	従来のヒューマノイドロボットの機構	4
1.2.2	拮抗二関節筋の構造と役割	4
第 2 章	拮抗二関節筋用リニア電磁アクチュエータの開発	11
2.1	拮抗二関節筋用アクチュエータに求められる性能	11
2.2	数種類のアクチュエータの調査と選定	13
2.2.1	電磁アクチュエータとその他のアクチュエータの比較	13
2.2.2	リニア電磁アクチュエータの必要性	15
2.2.3	電磁アクチュエータの例 - 直接吸引型アクチュエータ -	16
2.2.4	電磁アクチュエータの例 - ボイスコイルモータ (VCM) -	19
2.3	永久磁石の Halbach 配列による空心形リニア同期アクチュエータの開発	20
2.3.1	特徴	20
2.3.2	基本性能評価 - 二次元有限要素法解析と実測との比較 -	22
2.4	製作した空心形リニア同期アクチュエータの問題点と検証	26
2.5	拮抗二関節筋駆動用としてのその他のリニア電磁アクチュエータ	27
2.5.1	鉄心を持つリニア同期アクチュエータ - トンネルアクチュエータ -	27
2.5.2	コンパクト化を目指した新たな電磁アクチュエータ	29
第 3 章	生物の粘弾性をリニア同期アクチュエータ単体の実装させる制御手法	30
3.1	リニア同期アクチュエータの基本的な制御手法	30
3.1.1	永久磁石型同期電動機の電圧方程式	32
3.1.2	リニア同期アクチュエータにおける扱い	32
3.2	生物の柔軟な動きを模擬するための制御手法	33
3.2.1	インピーダンス制御	33
3.2.2	コンプライアンス制御	34
3.3	外乱オブザーバとインピーダンス制御系を持つ位置制御系の設計	34
3.4	粘弾性を実装した力制御系システム	35
3.4.1	力制御形インピーダンス制御	35
3.4.2	二慣性系を考慮する必要性と一慣性系との違い	36
第 4 章	粘弾性を持つリニア同期アクチュエータの実現	40
4.1	サーボンプを用いた試験機の制御手法	41
4.2	試験機の特性と解析との比較・評価	41
4.2.1	条件 1 - 試験機に一定推力を加えて粘弾性を確かめる -	41
4.2.2	条件 2 - 条件 1 から試験機の摩擦を考慮した再シミュレーション -	45
4.2.3	条件 3 - 試験機を基準値に移動させる指令を与えて粘弾性を確かめる -	47
4.2.4	条件 4 - 条件 3 から試験機の摩擦を考慮した再シミュレーション -	51

第 5 章 結論	56
第 6 章 今後の課題	57
6.1 アクチュエータのコンパクト化	57
6.2 PC 側で制御することによる制御処理の短縮化	57
6.3 機器の持つ摩擦や粘性の影響を考慮した力制御システム	58
6.4 二関節筋機構を備えたロボットの総合的な制御	58
参考文献	59
発表文献	60
謝辞	61

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

今日、本田技研工業株式会社の ASIMO¹に代表されるようにヒューマノイドロボット (HRT) が著しく進化している。その背景にはコンピュータの処理能力の著しい向上が挙げられる。

HRT の四肢先端の動きに注目すると、従来の多くの HRT はこのコンピュータの高速な処理能力を用いて逆キネマティクス²を計算することで四肢先端の動きを実現している。ロボット工学の専門家は、機械工学の制御理論を適用して各関節のアクチュエータを独立に自由に制御するシステムを作り上げた。これらの HRT は人間と同じ環境で作業することや人間の手助けをすることが期待されているため、我々ヒトなどの生物と同程度の運動性能が最終目標とされる。

しかし、日常患者に向き合っているリハビリ臨床現場の理学療法士をはじめとする生物科学の専門家は、従来の運動学とヒト等の出力特性が異なっていることを肌で感じている。そのような背景から、ヒトや動物の機構および運動特性に注目し、ロボット制御に応用する試みが近年活発になされている。

従来のロボットと動物の四肢先端におけるアクチュエータの配列の違いに注目すると、従来のロボットは各関節に一つずつアクチュエータを配置して独立に制御するのが一般的であるが、動物はそれぞれの関節を駆動する関節 (一関節筋) に加えて二つの関節に跨って作用する関節 (二関節筋) というものが存在する。熊本, 大島, 藤川らの研究グループは、この二関節筋機構を HRT に導入することで姿勢制御などが非常に簡単になると考え、大学, 企業の研究者達と共に本格的な研究を始めている。

二関節筋機構を持った HRT の実現のためには、そのために用いるアクチュエータも重要となる。そして、アクチュエータの大推力化およびコンパクト化は非常に重要な課題である。本論文では、二関節筋機構を実現させるためのアクチュエータとして、コンパクトで大推力を発生できるリニア電磁アクチュエータの開発を目的とする。加えて、生体の筋肉のような柔軟性を再現するために、電磁アクチュエータ単体に粘弾性要素を実装させた制御を行う。

1.2 ヒューマノイドロボットへの拮抗二関節筋機構の導入

ヒトなどには隣り合った二つの関節に跨って着き、両端の関節を同時に駆動可能な筋、いわゆる二関節筋が存在する。解剖学的には古くから周知の筋であり (C.Galen, 131-201AD)、哺乳類から両棲類に至るまで極めて普遍的に存在し昆虫にさえ存在する。この二関節筋は特殊な筋ではなく、普通の一関節筋と収縮機能特性は同じである。研究の背景で述べたように、熊本, 大島, 藤川らによって拮抗二関節筋機構を HRT に装備させることで HRT の運動性能が向上すると提唱されている。そこで、初めにその二関節筋と呼ばれるものの構造と役割に関して、熊本, 大島, 藤川らが中心となって進めている研究成果と従来の HRT の機構を比較しながらまとめる [1][2][4][5]。

¹Advanced Step in Innovative Mobility: 予測運動制御によって重心やゼロモーメントポイント (ZMP) を制御して自在に歩くことができ、階段の上り下り, 旋回, ダンスなども可能 <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>

²ロボットアームの手先の位置・速度・加速度が与えられたときに各関節の角度・角速度・角加速度を求めること

1.2.1 従来のヒューマノイドロボットの機構

従来のロボットは、リンク先端の目標点に対して逆キネマティクスを計算することによって各関節角度を定め、その移動がヒトのように滑らかになるように加速度を調整し、急激な変化を与えないようにフィードバック制御を用いて運動している。

ヒトの運動に注目すると、直接四肢先端を脳で支配することが出来る。このため、ロボットも同じように考えられる傾向があるが、例えば歩行時の着床を考えると四肢先端が接触したという情報が脳に伝わるまでには約0.2秒の時間がかかる。つまり我々はコンピュータのような高速処理は出来ず、脚先端からの力情報に基づくフィードバック制御のみによって歩行中の体を支持することは不可能である。そこでロボットはフィードバック制御を含めた複合的な制御則を利用する必要がある。また、従来のロボットモーション制御では逆キネマティクスによるリンク姿勢の特異点を回避するためにロボット自身で可動範囲を狭めており、最も関節トルクを使用しない効果的な姿勢を活用できないでいる [1][4]。

1.2.2 拮抗二関節筋の構造と役割

例えば、ヒトがイスから立ち上がることを想定した場合、見た目では膝関節伸展トルクと股関節伸展トルクの合力で立ち上がっていると考えられている。しかし、拮抗して存在する二関節筋が両方の関節に同時に働くとき、その力は相殺されて外部出力にはならない。拮抗筋の出力和は剛性 (stiffness) となり外部出力とはならないのである。つまり、実際にイスから立ち上がるときの拮抗筋群が示す出力は、個別に計測された膝関節伸展トルクと股関節伸展の見かけの合力よりもはるかに小さくなる。このとき、拮抗筋の出力和は剛性となり下肢先端の出力方向制御を行う [1]。

このような拮抗二関節筋の役割がヒトや動物にとって非常に重要であると言われている。その詳しい例に関して、ヒトの上肢と下肢を例に取り上げて説明する。

ヒトの上肢における拮抗二関節筋の特徴

はじめに、ヒトの上肢における二関節筋の役割を説明する。図 1.1 はヒトの上肢を上から見た図である。肩関節、肘関節そして手先を結ぶ系では図 1.1 のように筋肉が配置されている。二関節筋は図 1.1 の e_3 , f_3 にあたり、隣り合った二つの関節に跨って着き両端の関節を同時に駆動させるだけでなく、両端の関節の一関節筋群と共に協調した活動をする筋である。この二関節筋は互いに拮抗動作をするという特徴を持ち、ヒトや動物特有の四肢先端における出力・剛性・軌道制御に貢献している。

これら 3 対 6 筋の実効筋 (e_i : f_i , $i=1, 2, 3$) の出力を直接計測することは出来ない。それは二関節筋が二つの関節に跨っているために、二関節筋が収縮するときには二つの関節を同時に駆動させることになるからである。ゆえに、ヒトや動物の運動における四肢先端の特性を明らかにするためには、二関節筋を含めた筋群の協調的な特性を明らかにすることが重要である。

実効筋が四肢 2 関節リンク機構の系先端の作業座標系に発揮出来る出力は計測可能である。[1] において、熊本らは系先端の作業座標系で計測可能な実効筋出力を機能別実効筋力 (FMS³) と定義した。個々の実効筋が系先端の作業座標系に発揮出来る個々の実効筋力 (F_{ei} : F_{fi} , $i=1, 2, 3$) は、図 1.1 中の関節 W から出発するベクトルによって示される。

また、3 対 6 筋の実効筋が系先端に最大出力を発揮するための協調活動パターンは理論的および実験的に求められており、それによって系先端に発揮される出力分布は幾何学的に描画可能で図 1.1 に示すように 6 角形となる。各頂点の出力の構成成分は A: ($f_1+e_2+e_3$), B: ($f_1+e_2+f_3$), C: ($f_1+f_2+f_3$), D: ($e_1+f_2+f_3$), E: ($e_1+f_2+e_3$), F: ($e_1+e_2+e_3$) となっている。これより、系先端 W から A-B およ

³FEMS : Functionally Different Effective Muscle Strengths

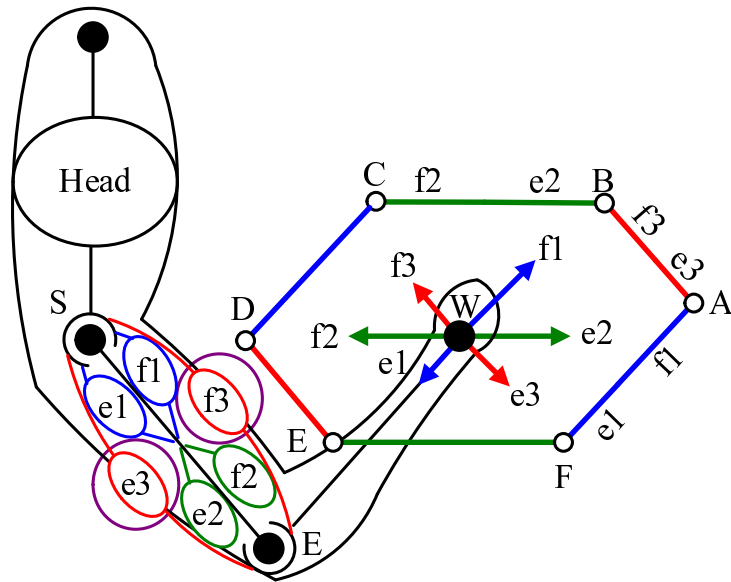


Fig. 1.1: 二関節筋を持つヒトの上肢における出力特性 [1].

び D-E の方向領域, B-C および E-F の方向領域、さらに C-D および F-A の方向領域はそれぞれ (f3, e3), (f2, e2), (f1, e1) の各拮抗筋の出力比で出力方向が制御されている。対して、拮抗二関節筋 e3, f3 を持たない従来の HRT では系先端の出力分布は図 1.3(a) のように 4 角形となり、このことを考えただけでも従来の HRT の機構によって我々生物の動きを完全に模擬することは難しいと言える。

それに関して実際に二関節筋が一関節筋群と共にどのような協調活動を行っているのか、ヒトの上肢を対象にして動作筋電図学的な検証が行われている。実験姿勢はそれぞれ上肢をやや屈曲した姿勢、すなわち肩関節角度 $\theta_1 = 30^\circ$ 、肘関節角度 $\theta_2 = 120^\circ$ 、 $\theta_1 = 45^\circ$ 、 $\theta_2 = 90^\circ$ およびやや伸展した姿勢 $\theta_1 = 60^\circ$ 、 $\theta_2 = 60^\circ$ に保った状態で、手根関節部位に等尺的に最大努力で 360° 全方位にわたって力を発揮させた結果を記録した。その場合の筋電図は全ての姿勢においてほぼ同じ様な放電パターンを示した。そして、同一被験者の異なった姿勢で記録された筋電図記録や異なった被験者の筋電図記録を見ても、ほとんど同じ様な筋電パターンを示すことが確かめられた。また、電極貼付位置は変えていないにもかかわらず、水平面動作でも矢状面動作でも筋電図にほとんど差違は認められなかった。水平面動作中の筋電図から測定された各筋の出力レベルを理論的に計算したものが図 1.2 である。図の縦軸は機能別実効筋力 (%) を示し、それぞれの筋肉の筋力は異なっている。この図は理論計算によって作られているが、実際の測定結果と類似することが分かっている。

このように、ヒト四肢の筋配列は複雑であるが、図 1.1 のように 3 対 6 筋の実効筋概念を導入した HRT は、それぞれの筋肉の代替となるアクチュエータの出力を図 1.2 のように変化させるといった簡単な制御にて、ヒトのように俊敏で柔軟な運動が実現可能となる。アクチュエータの出力制御が簡単になることは HRT の動きを従来よりも俊敏にすることに直接関わるため、二関節筋機構を持つ 3 対 6 筋の実効筋概念を HRT に取り入れることは、簡単な制御で高い運動性能を実現するために非常に重要である。

また、ヒトや動物では拮抗する二関節筋を持つために、仮に一つの筋が機能しなくなっても他の筋の出力調整で全体の出力特性をカバーすることが出来る。図 1.3(b), (c) はそれぞれ e3, f3 の筋肉が機能しなくなった場合の出力分布であるが、特定方向への出力は半減するものの全方位にわたっての出力方向制御は可能である。これにより、ロボットにおいても 3 対 6 筋の拮抗筋群の動きを模擬出来れば、一つのアクチュエータが故障して出力が低下しても、他のアクチュエータの

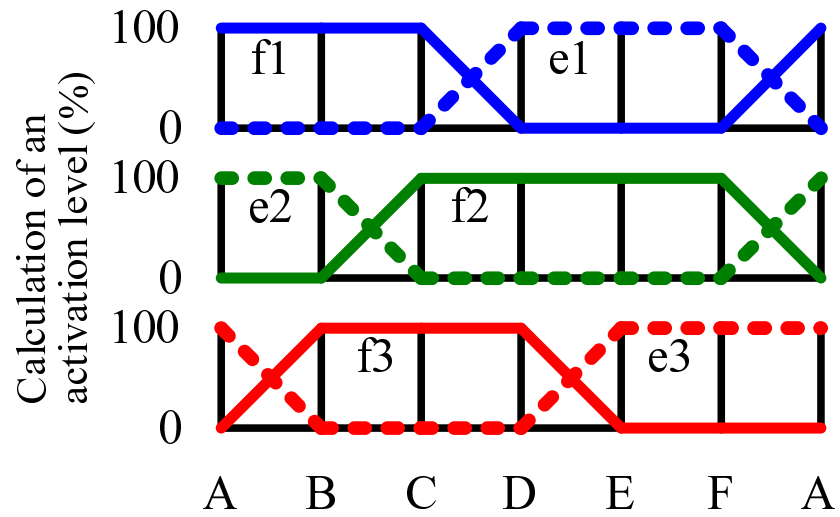
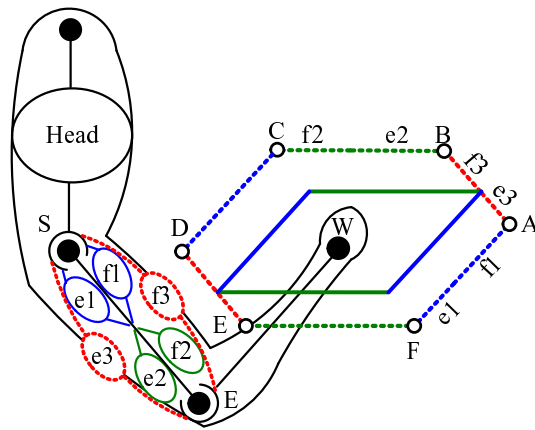
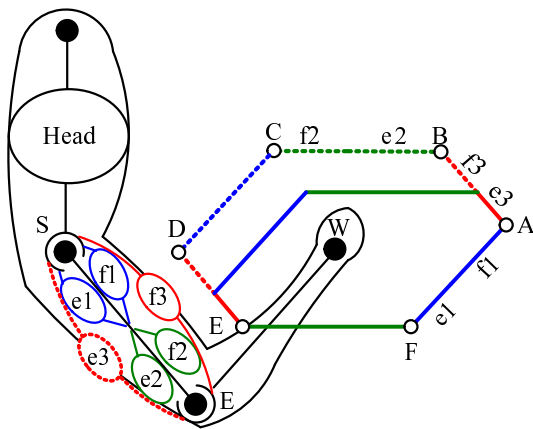


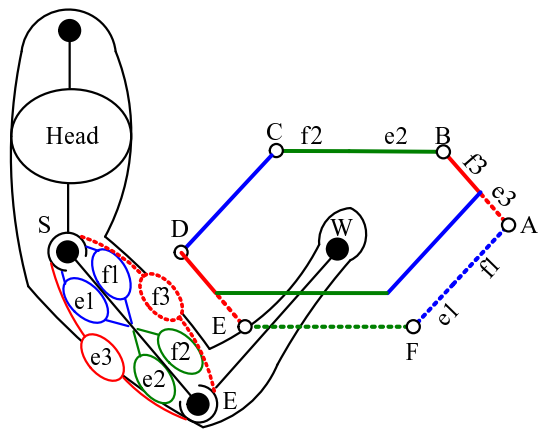
Fig. 1.2: 筋電図計測から確立された6つのアクチュエータの出力制御手法 [1][2].



(a) e3, f3ともに欠いた場合



(b) e3を欠いた場合



(c) e3を欠いた場合

Fig. 1.3: 二関節筋が正常に動作しない場合の上肢の出力分布 [1].

出力調整で全体の出力分布特性を維持出来るようになる。このように、生体の持つ冗長性を人工物にも組み込んでおくことは極限環境作業ロボットなどに適すると考えられ、これもまた二関節筋機構を HRT に取り入れることによる大きな特長と言える [1]。

ヒトの下肢における拮抗二関節筋の特徴

次に、ヒトの下肢における二関節筋による協調制御モデルに関して説明する。図 1.4, 1.5 はヒトの下肢の筋配列をモデル化し、横から見た図である。股関節 (H), 膝関節 (K) そして足関節 (A) を結ぶ系では図 1.5 のように筋肉が配置されている。ここでも二関節筋は大腿部位とふくらはぎに配置されており、上肢同様アクチュエータの簡単な制御によって下肢部分を動かすことに貢献すると考えられている。

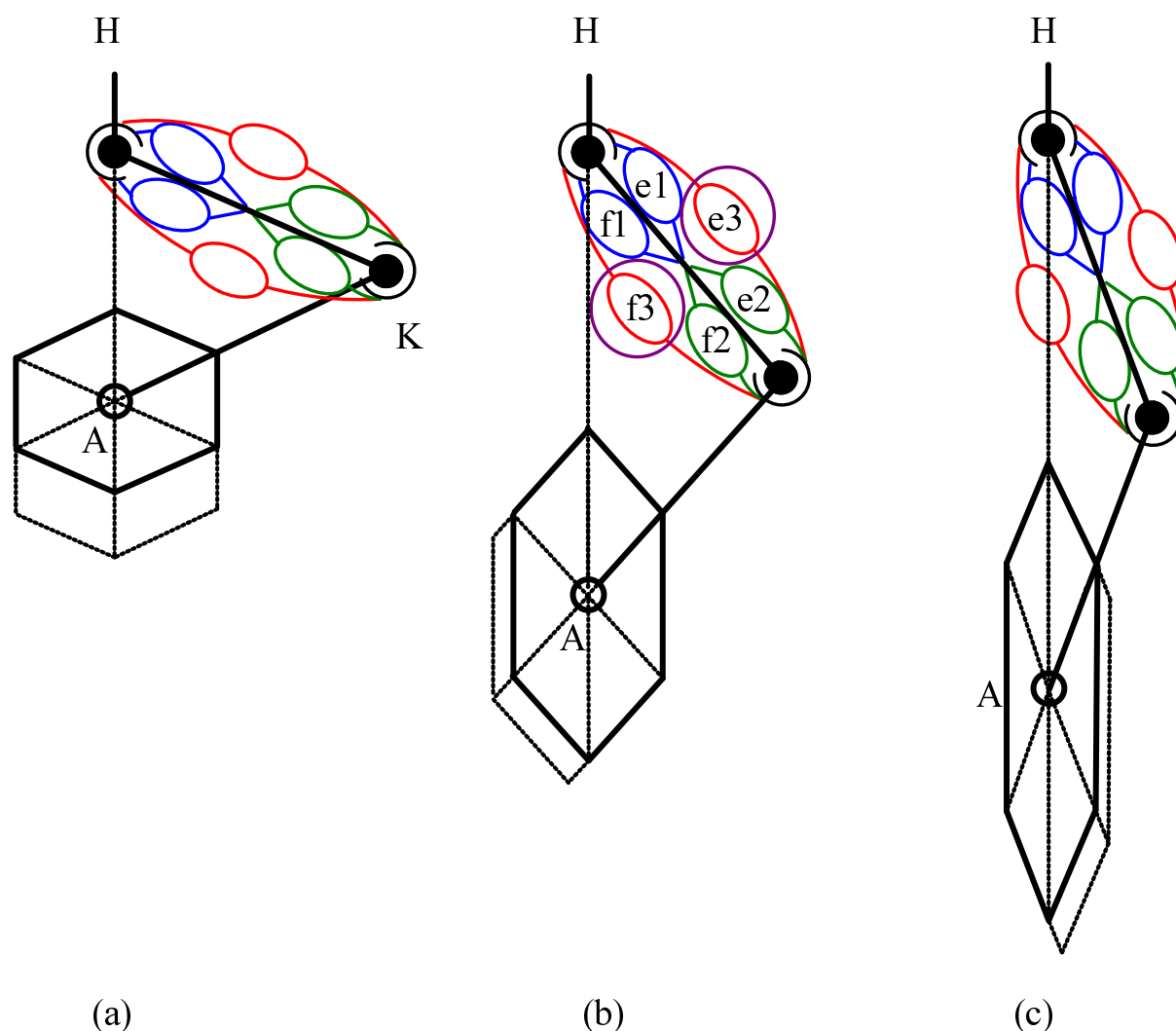


Fig. 1.4: 下肢の姿勢変化による出力分布の変化 [1][5].

図 1.2 のような単純な力発生 の 分担制御を前提とした場合の足関節である関節 A における出力分布は、各リンク長と各筋が作用する関節半径が等しい場合は足関節 A 上が 0 となり、足関節 A から離れるほどその方向に対して大きな力を発生出来ることを示している。また、実線の 6 角形は 3 対 6 筋の筋収縮力がすべて等しい場合の出力分布であり、点線の 6 角形はある 1 つの筋肉の収縮力が大きくなった場合を示している。図 1.4(a) は膝関節 K の一関節伸筋 e2 が 2 倍の筋収縮

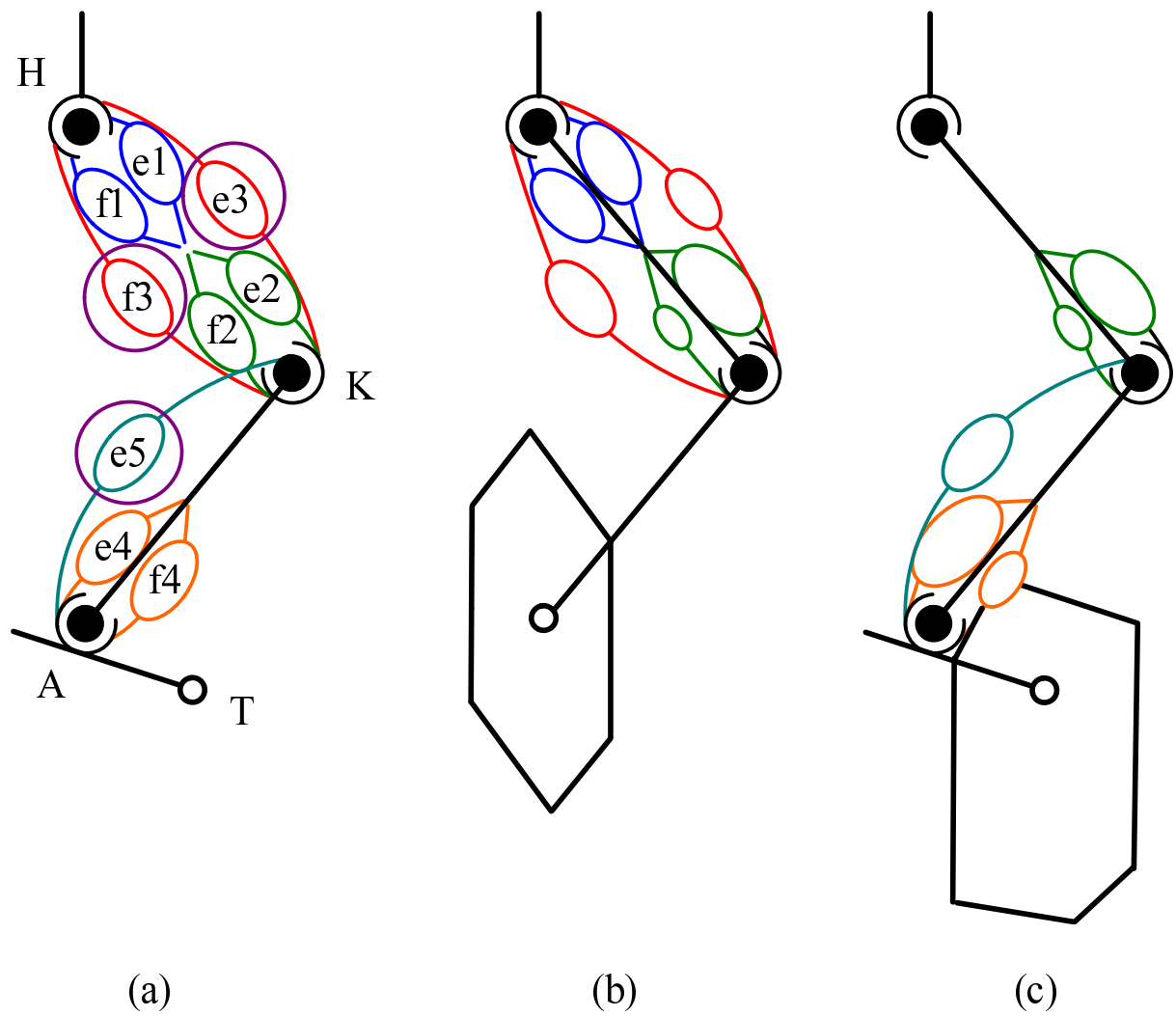


Fig. 1.5: 下肢における出力分布の特徴 [1][5].

力、(b)は股関節Hの一関節伸筋f1が2倍の筋収縮力、(c)は関節H、Kの前面の二関節筋e3が2倍の筋収縮力となった場合である。これから、同じ筋収縮力を発生させてもリンク全体が伸びるにつれて上下方向に出力分布が大きくなり、前後方向には小さくなることが見てとれる。

次に、霊長類であるヒトの下肢の主な動作に注目する。霊長類は足底歩行であるため着床が踵、離床が爪先となる。二つの二関節リンクモデルに分けて図中Aの足関節と図中Tの指先における出力分布を求めると、図1.5(b)が足関節(足首)における出力分布となり、図1.5(c)が指先における出力分布となる。大腿部には二関節筋を持つ3対6筋の筋群が存在するため、足関節(A)における出力分布は6角形となり、発生する力の方向制御と剛性制御に有効に働き、踵における着床の力を膝関節(K)を曲げるなどの効果で吸収出来ることが分かる。しかし、下腿部には図中の筋e5に対する拮抗筋がヒトには存在しないため、指先(T)における剛性制御に制約を生じ、出力分布は全ての方向に出力が可能な歪んだ6角形となる。また、ヒトの足底歩行に必要な抗重力方向の出力が非常に大きくなっていることが分かる。これは膝関節の一関節伸筋(e2)と足関節の一関節伸筋(e4)がそれぞれ突出した強さを持っていることに起因する。これより、足底歩行であるヒトの筋配列は着床時の踵部において衝撃力を含む抗重力に対応し、指先で蹴り出す機構であることが分かる。

また、有蹄類であるウマなどの下肢の筋配列をヒトと同じようにモデル化すると、ヒトに存在しなかった筋e5の拮抗筋となる筋f5が存在することが分かっている。これにより有蹄類の主な動作である指先歩行が行われている。指先歩行とは、足底歩行と違い蹄のみを着床させる歩行である。

さらに、詳細は参考文献[1][5]を参照して頂きたいが、カエルにおいては霊長類や有蹄類とはまた違った下肢の筋配列を持っている。跳躍動物であるカエルの筋配列は足先部および足関節部を正確に制御することよりも跳躍および遊泳に適した大きな力を発生させるための機構を持っている。

このように、霊長類であるヒトと有蹄類そしてカエルなどは進化の過程においてその生き方や主な動作に適した進化を遂げているものの、いずれも二関節筋を持っており、従来のロボット工学の視点ではロボットを動かす際に考慮する必要がないと考えられていた二関節筋が生体のモーション制御では重要な役割を果たしていることが証明されつつある。

加えて、拮抗二関節筋があるおかげで外乱に対する姿勢安定化制御の機能を持つことが出来ると考えられている。ヒトや動物は情報の伝達や演算処理に百 msec オーダの時間がかかる。例えば、スキーマのエアリアルで着地するとき、足底からの感覚情報を得てフィードバック制御をする時間的余裕がなくとも、二関節筋を備えた3対6筋の拮抗筋群で制御された脚があれば、少々雪面が凸凹していても安定した姿勢制御が可能となる。このように、拮抗二関節筋があること自体が一義的にオープンループ制御で素早い動作を可能にすることに役立っている。実際に、3対6筋の実効筋概念を取り入れたロボットレッグは、ジャンプして着地するときアクチュエータの制御なしにその構造だけで転ばずに着地するといった動作を実現している[1][3]。

以上より、拮抗二関節筋をHRTに搭載させることの利点に関して、工学的視点から簡単にまとめると次のようになる。

1. アクチュエータの出力制御の簡略化

図1.1に示されたような拮抗二関節筋を持つ3対6筋の実効筋をHRTに搭載させることにより、各アクチュエータの出力を図1.2のように制御させるといった簡単な制御にてヒトのように俊敏で繊細な動きが実現可能となる。

2. 拮抗二関節筋機構そのものが外乱に対する姿勢制御を実現

拮抗二関節筋機構が存在することで一義的にオープンループ制御で素早い動作が可能になる。

3. 二関節筋を含めた駆動機構システムの多様性

一関節筋と二関節筋の配置を変えることで様々な生体の動きを模擬できる。

4. 故障しても全体の出力特性をカバー

一つのアクチュエータが故障して出力が低下しても、他のアクチュエータの出力調整で全体の出力分布特性を維持出来る。

本論文の第 3, 4 章で述べるように、応答の速い電磁アクチュエータに生物の粘弾性を模擬する制御を行うことで、従来よりも簡単で分散的な制御手法でロボットの動きを生物に近づけることが出来る。拮抗二関節筋を模擬できるアクチュエータ配置とアクチュエータ自身の粘弾性の設計・実験を通し、様々な生体の動きを模擬する HRT の実現を可能にすることを本研究は目指している。

第2章 拮抗二関節筋用リニア電磁アクチュエータの開発

従来のロボットというものは、工場内での作業ロボットや救助ロボットなどのヒトよりも大きなサイズで重たいものを運ぶものやヒトより高い生産効率を持ち危険な場所でその力を発揮するものと、展示会等でその俊敏性や機能性などが話題となり今後我々ヒトと同じような動きが期待される小型なヒューマノイドロボットに大きく分けられる。

本論文で目標としているのは後者の HRT であるが、従来の HRT に注目するとヒトよりも小さなサイズの HRT が中心である。その背景には、前節で説明したように二関節筋機構を装備した 3 対 6 筋の実効筋概念がないために複雑な制御にてロボット動かしていることと、生物の筋肉に比べて HRT に使われるアクチュエータの発生可能な推力が小さいことが原因であると思われる。

そこで、本論文では HRT に使われている従来のアクチュエータよりもコンパクトで大きな推力を発生可能なアクチュエータの開発を目指す。初めに、アクチュエータに求められる性能として推力、ストロークそして重量に関して評価した。

2.1 拮抗二関節筋用アクチュエータに求められる性能

HRT の運動性能を向上させるために、二関節筋機構を装備した 3 対 6 筋の実効筋概念について述べてきたが、HRT のアームやレッグを想定した際に二関節筋の役割をするアクチュエータを選定する必要がある。二関節筋の役割をするアクチュエータに重要なことは、ロボットアーム用にするのかロボットレッグ用にするのかということから、ロボットのサイズ特に関節半径、動かす速さ、用途などによってアクチュエータの大きさ、必要推力、必要ストローク等は変わってくる。アクチュエータの推力とストロークはロボットの寸法と重量から慣性モーメント等の力学計算を行うことで算定出来る。アクチュエータの設計を行うときに、どのようなロボットにていかなる動きをさせるかが非常に重要になるが、本論文では先行研究 [6] を参考に、ヒトと同じ大きさのロボットアームを想定した場合における二関節筋用アクチュエータの必要推力と必要ストロークを当面の設計仕様として議論を進める。

すなわち、以下の図 2.1, 具体的数値が表 2.1 で表される日本の平均成人男性の上肢とほぼ同じ大きさのロボットアームの駆動を想定する。

Table 2.1: ロボットアームのパラメータの一例 [6].

	Link1	Link2
Length (mm)	$l_{L_1} = 300$	$l_{L_2} = 300$
Width (mm)	$w_{L_1} = 100$	$w_{L_2} = 300$
Mass [arm] (kg)	$m_{L_1} = 2$	$m_{L_2} = 1$
Radius (mm)	$r_{R_1} = 30$	$r_{R_2} = 30$
Mass [joint] (kg)	$m_{R_1} = 0.5$	$m_{R_2} = 0.5$
Movable angle (rad)	$\pi/2$	$5\pi/6$

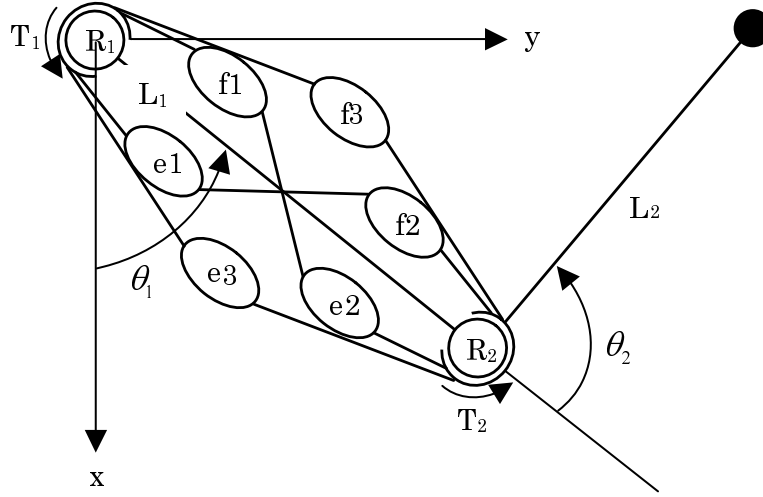


Fig. 2.1: 二関節筋機構を持ったロボットアームシステム [6].

R_1 に接続する単関節駆動機構 $e1$, $f1$ の出力のみによって、 R_2 の角度を 0rad に保って運動する場合を考えた。 R_1 の角度を 0 rad から $\frac{1}{4}\pi\text{rad}$ まで $f1$ の最大出力で加速し、 $e1$ の最大出力で減速して $\frac{1}{2}\pi\text{rad}$ で停止する。この動作にかかる時間を $2T\text{sec}$ として、動作時間と単関節駆動機能の出力関係を慣性モーメントと回転の運動方程式から求めた。

リンク 1, 2 の長さを l_{L1} , l_{L2} 、幅を w_{L1} , w_{L2} 、質量を重心点に集中しているとして m_{L1} , m_{L2} とし、関節 1, 2 の半径を r_{R1} , r_{R2} 、質量を m_{R1} , m_{R2} とした。関節 R_1 を中心とした慣性モーメントを I とすると、

$$\begin{aligned}
 I = & m_{L1} \left\{ \frac{1}{12} (l_{L1}^2 + w_{L1}^2) + \left(\frac{l_{L1}}{2} \right)^2 \right\} \\
 & + m_{L2} \left\{ \frac{1}{12} (l_{L2}^2 + w_{L2}^2) + \left(l_{L1} + \frac{l_{L2}}{2} \right)^2 \right\} \\
 & + \frac{1}{2} m_{R1} r_{R1}^2 \\
 & + m_{R2} \left(\frac{1}{2} r_{R2}^2 + l_{L1}^2 \right)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

と計算される。

関節の半径を r 、リンクの角度を θ 、単関節駆動機構の発生する出力を F_m とすると、回転の運動方程式は

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = r F_m \tag{2.2}$$

であり

$$\frac{1}{2} T^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{\pi}{4} \tag{2.3}$$

より、 T と F_m の関係は

$$F_m = \frac{\pi}{2} \frac{I}{r T^2} \tag{2.4}$$

となる。

一方、ヒトの上肢 (肘関節) を駆動する際に必要なアクチュエータのストローク x は以下のように計算される。

図 2.1 の 2 つの関節の可動角をそれぞれ θ_1, θ_2 とすると、各駆動機構の必要ストロークは

$$x_{e1} = x_{f1} = \theta_1 r_1 \quad (2.5)$$

$$x_{e2} = x_{f2} = \theta_2 r_2 \quad (2.6)$$

$$x_{e3} = x_{f3} = \theta_1 r_1 + \theta_2 r_2 \quad (2.7)$$

と表される。

これらの計算式を用いて表 2.1 の数値および $T = 1.0\text{sec}$ を用いて計算すると、単関節駆動用のアクチュエータに必要な推力は約 45.0N となった [6]。

ゆえに、ロボットアームが様々な動作を可能にしたり物を持つような負荷のかかった状態において動作するためには、二関節筋用のアクチュエータに求められる推力は最低でも 50N 程度を必要とする。実際には、アームにアクチュエータが実装している状況といった今回検討した状況よりもロボットの重量が大きくなることは必要不可欠であるため、二関節筋用のアクチュエータとして十分に機能するための推力は少なくとも 100N 以上必要となる考え、以降のアクチュエータの開発上の目標と定めた。

また、ストロークも表 2.1 を基に可動角と関節半径の大きさから約 125.0mm 以上必要なことが計算出来る。ストロークは式 (2.5), (2.6), (2.7) からロボットのサイズにのみ関係し重量には左右されないため、今回対象とした日本人の平均成人男性と想定するのであれば、必要ストロークは大方 150mm 程度あれば充分であると言える。

アクチュエータの重量に関しては特別な条件は存在しないが、HRT のアームやレッグに搭載する際に重すぎでは機能しない。二関節筋用アクチュエータを搭載することは HRT の関節部分のアクチュエータの数を増加させることになるので、そのアクチュエータが重すぎでは逆に従来の構成よりも性能が劣ってしまう可能性も考えられる。ゆえに、ヒトとほぼ同じサイズの HRT を想定した場合、表 2.1 中のアームと関節の重量に二関節筋用アクチュエータの重量が加わった値がアーム全体の重量になるため、二関節筋用アクチュエータ自体は 3kg 程度に抑えることが重要となる。

これらの条件を満たしながら、ヒトとほぼ同じサイズのロボットアームが装備出来る程度のアクチュエータの体積、重量を考慮した上で、新しいリニア電磁アクチュエータを設計した。

2.2 数種類のアクチュエータの調査と選定

初めに、HRT に用いるためのアクチュエータとして、本論文で設計する電磁アクチュエータとその他の一般的なアクチュエータを比較した。電磁アクチュエータの中で HRT に適したアクチュエータを設計するための検討を述べる。

2.2.1 電磁アクチュエータとその他のアクチュエータの比較

現在、二関節筋用のアクチュエータとして油圧アクチュエータや空気圧アクチュエータにゴムとワイヤを組み合わせる構造や、回転型モータと機械系を組み合わせた構造等が使われている。それぞれには特徴があるが、実際にヒト型サイズの HRT の二関節筋駆動用アクチュエータは装置全体が軽量で大推力を発生することが必要となる。そこで現在二関節筋用として主に使われている、電磁アクチュエータ、油圧アクチュエータおよび空気圧アクチュエータの長所と短所を表 3.1 に示す。

油圧アクチュエータは一般的に電磁アクチュエータに比べて大推力を得やすいと言われている。ゆえに、主に現在の HRT の二関節筋駆動用アクチュエータとして油圧アクチュエータが使われている。

空気圧アクチュエータは他のアクチュエータ比べると一般的に推力が小さく応答速度も低いいため、二関節筋用のアクチュエータとしては電磁アクチュエータよりも劣っていると思われる。し

Table 2.2: 3 種類の主なアクチュエータの特徴.

Electric actuator	
◎ Harmonization of electronics and digital computers, Easy control, High response and accuracy	× Heavy weight, Low power
Hydraulic actuator	
◎ High power and accuracy, Easy control	× Large device, Danger of fire
Pneumatic actuator	
◎ Cheap device cost, High safety and high environmental characteristic	× Low power, Low response

かし、最近の学会誌 [7][8] によるとパワーアシストロボット用に空気圧ゴム人工筋を用いた研究も行われている。例を挙げると、市販のゴムチューブと繊維コードを用いて次の図 2.2 のようなマッキベン型ゴム人工筋というものを作成したアクチュエータがある。外径 11.6mm, 内径 8mm, 自然長 793mm のゴムチューブを用いており、600kPa に加圧すると 340N 程度の収縮力が発生し、商品化されている人工筋の性能に匹敵するものである [7]。そして、パワーアシストロボットに使うための空気圧ゴム人工筋アクチュエータは実用段階まで進んでおり今後の発展が期待される。

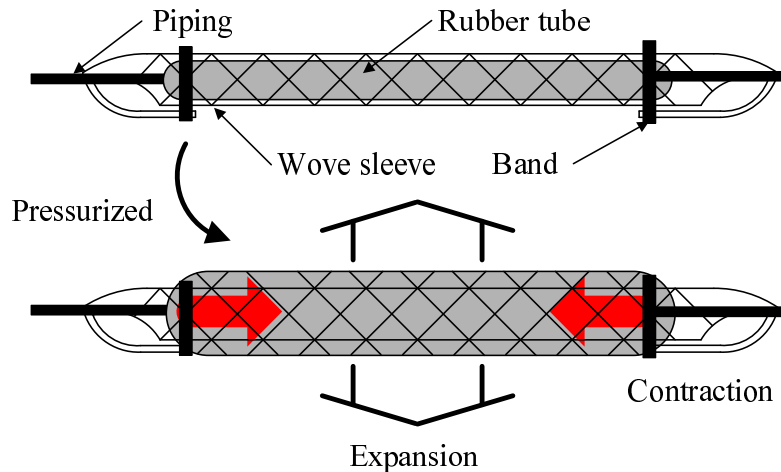


Fig. 2.2: マッキベン型ゴム人工筋 [7].

さらに、マイクロロボット用として MEMS アクチュエータやマイクロアクチュエータ等も幅広く研究されている。マイクロアクチュエータの中にはアクチュエータ自体にマイクロセンサやマイクロプロセッサを搭載して通信機能や制御機能を持たせる研究も進められている [8]。これにより配線を少なくすることが期待されている。しかし、マイクロロボットは数 mm から数 cm 程度の大きさで体内や配管内等に進入して検査や作業を行うためのものであるため、これらのアクチュエータを単純にヒト型サイズのロボットに適応することがいいとは言えない。

本論文では、ダイレクトドライブで油タンク、加圧装置やチューブ等の余計な部品が不要でエネルギー効率が高く、装置全体をコンパクトに出来るリニア電磁アクチュエータを提案する。その理由の一つに、電磁アクチュエータは電流制御のため一般的な産業用モータでも mm/sec オーダの高速応答が可能であることが挙げられる。さらに、再現性が高く位置の制御も一般的な産業用モータで mm もしくは μm オーダを達成している点でも優れている。加えて、電磁アクチュエータはマイクロプロセッサとの融合が測りやすいことから制御しやすい。これらは電磁アクチュエー

タが他のアクチュエータに比べて優れている点であり、HRT に俊敏かつ柔軟な動きをさせるためには非常に重要である。

そして、粘弾性を持ちつつ直線的な伸縮動作を行う二関節筋の動作を模擬するためには、回転型モータと滑車等によって再現するよりもリニア電磁アクチュエータのほうが構造を簡単に出来る。その理由に関して次節で説明する。

2.2.2 リニア電磁アクチュエータの必要性

回転型モータは古くから作られているために高効率で多くの種類のものが存在し、用途によって色々使い分けられている。

対して、リニア電磁アクチュエータは小型の電動歯ブラシから精密機械などに使われ始めている。その利点にダイレクトドライブが挙げられる。ダイレクトドライブにより装置自体が直線的に可動するため、回転型モータの場合のように直線的な力を発生するための滑車等の部品が不要になると言う大きな利点がある。また、機械の摩擦を低減出来るため機器の保守の低減につながる。そして、直線的な伸縮動作を行う筋肉の動作の模擬のためには、直線的に推力を発生可能なリニア電磁アクチュエータが他のアクチュエータよりも適していると考えられる。

次に、実際に独自のリニアアクチュエータを用いて 3 対 6 筋の筋肉の模擬したロボットアームの事例を取り上げる。

沖電気工業 (株) では二関節筋機能を工学モデルで具現化したロボットプラットフォーム (BiCCOM)¹ という概念にてロボットアームおよびレッグをを実際に開発し、精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会の研究会にて発表している。図 2.3 のように図 1.1 にある (ei: fi, i=1, 2, 3) の 6 つの筋肉の代替として 6 つのリニアアクチュエータを用いてヒトの腕周りの筋肉を再現している。そこに使われているリニアアクチュエータも沖電気工業 (株) が独自に開発したものであり、可変弾性アクチュエータ (VEA)² と名付けられ、図 2.4 のよう構成をしている。

そして、実際に図 2.3 の試作機によって図 1.2 に示す駆動パターンを再現したところ、手先部分のアーム先端の発生する出力特性が熊本らの研究によって示されている、ヒトと同じ出力特性を示すことを実現している。それは図 1.1 にあるように出力特性が 6 角形を示し、その各辺の長さがそれぞれの拮抗筋の実効筋力値の和に等しくなること、つまり $(A-B)=(D-E)=f_3+e_3$, $(B-C)=(E-F)=f_2+e_2$, $(C-D)=(F-A)=f_1+e_1$ となることである。これにより、VEA を拮抗 3 対 6 筋配列で構成した BiCCOM ロボットアームは、熊本らの研究成果 [1] と一致した出力特性、つまり 2 関節筋機能を再現出来ることを確認できたとしており、今後ヒトと同じような俊敏な動きをコンパクトに実現する可能性を示唆している。

さらに、開発した BiCCOM ロボットアームは二関節筋機構の存在によって外乱に対する姿勢制御を可能にしていることも実証しており、BiCCOM ロボットレッグにおいては、その延長でロボットレッグが跳躍して姿勢制御なしに実効筋構造のみできれいに着地することに成功している [1][3]。

沖電気工業 (株) の開発した BiCCOM は、3 対 6 筋の二関節筋機構持つロボットアームが図 1.2 にあるような簡単な制御にてヒトと同じ出力特性を再現出来るか確認するために、図 1.1 の構造を忠実に再現した構造となっているが、実際に本論文においては BiCCOM のように 6 つのアクチュエータを用いずに同じ動きを模擬出来るのではないかと考えた。なぜなら、筋肉は縮むときのみ力を発生するために左右両方向に力を発生するためには拮抗筋が必要となるが、電磁アクチュエータは単体で左右両方向に力を発生出来るため、言い換えれば伸縮のどちらの動作においても力を発生出来るからである。

¹BiCCOM:Bi-articular muscle installed Coordination Control Model

²VEA:Variable Elastic Actuator

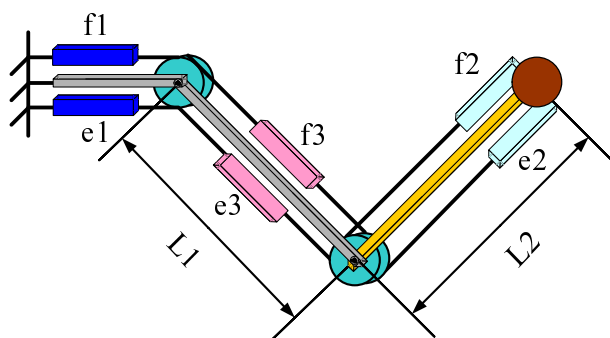


Fig. 2.3: 二関節筋機構を持つロボットアーム - BiCCOM robot arm[3].

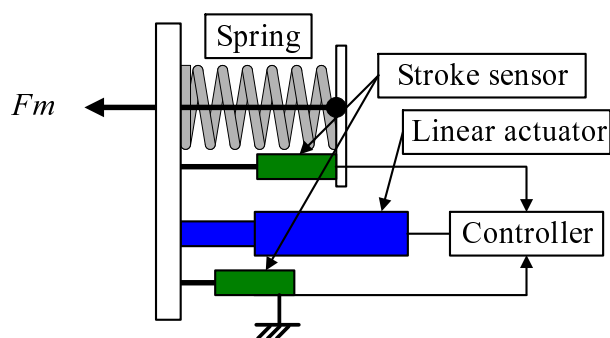


Fig. 2.4: 可変弾性アクチュエータの概念 [3].

例えば、図 1.2 の A 点から B 点へロボットアームを動かすように各アクチュエータの出力を制御する際に、 e_3 , f_3 の代替をするアクチュエータはその出力を一次関数的に変化させている。 e_3 , f_3 の出力が同じであればこの合力は打ち消されて 0 になるが、このとき 2 つの筋肉は粘弾性を果たす機能していると言われている [1]。 e_3 , f_3 の筋肉を一つのアクチュエータで代替すると、図 2.5 のように二つの筋肉の出力を交差させながら変化させることは出来ないが、リニア電磁アクチュエータ自体に粘弾性を持たせた制御を行えばその役割を果たすことが出来ると考えられる。同様に、回転型モータにも粘弾性を持たせた制御を行うことは可能であるため、回転型モータとリニア電磁アクチュエータによって図 2.3 よりも装置全体をシンプルかつコンパクトに構成することが期待出来る。実際に沖電気工業 (株) の BiCCOM ロボットレッグでは回転型モータを用いてアクチュエータの総数を減らす試みも行われている。ゆえに、本論文では図 2.5 のように肘・肩関節の部分には従来と同じように回転型モータを搭載し、 e_3 , f_3 の筋肉の働きを一つのリニア電磁アクチュエータで模擬することを提案する。そこで、これらの構想を達成させるためにはコンパクトで大推力を発生出来る二関節筋用アクチュエータが必要なため、本論文では様々なリニア電磁アクチュエータの応用を考えた。

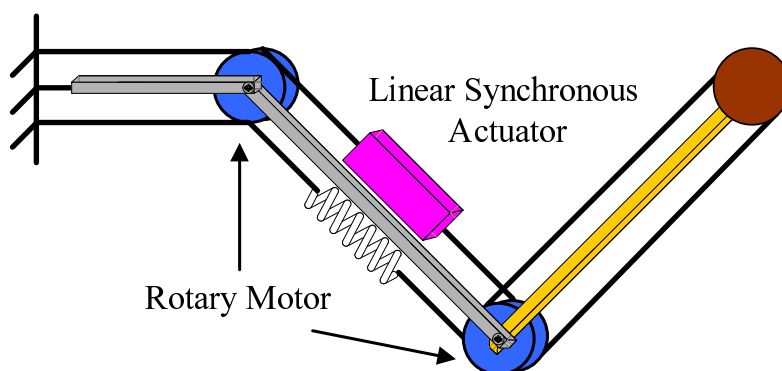


Fig. 2.5: 回転型モータとリニア電磁アクチュエータで構成されたロボットアームの概念.

2.2.3 電磁アクチュエータの例 - 直接吸引型アクチュエータ -

本論文では、はじめに永久磁石と電磁石の吸引力を利用するモデルを検討した。具体的にはギャップを持った 2 つの鉄心同士の引き合う力を利用する。前節で述べたように、直接伸縮する筋肉の代替としてリニア電磁アクチュエータが適すると考えた場合に、検討した直接伸縮型アクチュエー

タは伸び縮みする電磁バネであり、シンプルな構成にて機械バネの代替になると考えた。概要を図 2.6, 2.7 に示す。

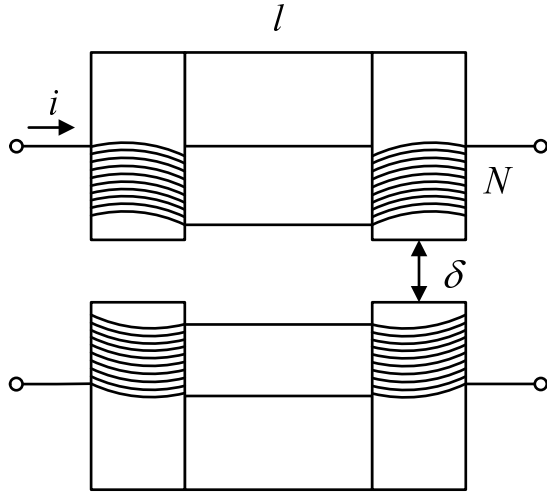


Fig. 2.6: 直接吸引型アクチュエータ

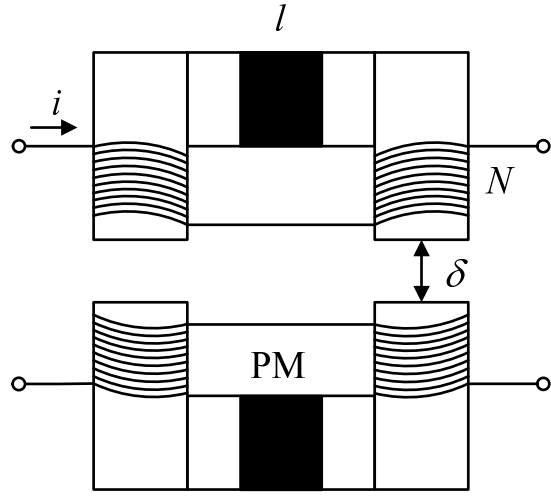


Fig. 2.7: 永久磁石を挿入した場合

このようなモデルで発生可能な出力を磁気回路法を用いて計算した。鉄心断面積 S 、ギャップ δ 、コイル巻き数 N 、コイルに流れる電流 i 、鉄の比透磁率 μ_s 、鉄心の長さ (片側) l とする。起磁力は Ni 、磁気抵抗は $R = \frac{2l}{\mu_s S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S}$ であり、 $\mu = \mu_0 \mu_s$ とするとこのモデルの磁気抵抗, 磁束および磁束密度はそれぞれ

$$R = \frac{2l}{\mu_s S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \quad (2.8)$$

$$\phi = \frac{Ni}{R} \quad (2.9)$$

$$B_1 = \frac{\phi}{S} \quad (2.10)$$

と表される。鉄心同士の引き合う力 F は

$$F = S \frac{B_1^2}{\mu_0} \quad (2.11)$$

となる。

具体的に値を与えて出力を計算した。図 2.6 の電磁石のみのモデルにおいてギャップを $\delta = 5\text{mm}$ 、コイルの巻き数 $N = 400\text{Turn}$ 、ギャップ, 鉄心, 永久磁石の断面積を $S = 1000\text{mm}^2$ 、鉄の比透磁率 $\mu_s = 1000$ 、コイルに流れる電流 $i = 1\text{A}$ 、鉄心の長さ (上下それぞれ) $l = 100\text{mm}$ とした。

磁気抵抗 R は

$$\begin{aligned} R &= \frac{2l}{\mu_s S} + \frac{2\delta}{\mu_0 S} \\ &= \frac{151}{2\pi \times 10^{-6}} \text{ (}\Omega\text{)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

これより、磁束 ϕ は

$$\phi = \frac{Ni}{R} = \frac{8\pi \times 10^{-4}}{151} \text{ (Wb)} \quad (2.13)$$

であり、磁束密度 B は

$$B_1 = \frac{\phi}{S} = \frac{0.8\pi}{151} \text{ (T)} \quad (2.14)$$

となる。 F_m は

$$\begin{aligned}\therefore F_m &= S \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7}} \times \left(\frac{0.8\pi}{151} \right)^2 \\ &\simeq 0.220 \text{ (N)}\end{aligned}\quad (2.15)$$

となる。これより、電磁石だけでは二関節筋用のアクチュエータの出力として非常に小さいことが分かった。

永久磁石があるモデル

次に、上下の鉄心の中に l_m の長さの永久磁石を含む図 2.7 のようなモデルについて考えた。永久磁石の長さを l_m 、永久磁石と鉄心の隙間を α とすると出力は

$$F = B \left(\frac{2l}{\mu} + \frac{2\delta + \alpha}{\mu_0} \right) + 2Hl_m = 0 \quad (2.16)$$

と与えられる。ここで α を 0 とすると、上式より永久磁石による磁束密度は

$$B_2 = -\frac{l_m}{\frac{l}{\mu} + \frac{\delta}{\mu_0}} H \quad (2.17)$$

で与えられる。フェライト磁石の B-H 特性を使用範囲を限定したときに図 2.8 のように近似すると、 B_2 はこの B-H の関係式によって表される直線と特性グラフの交点として求めることが出来る。

本論文では、上下の鉄心部分に保持しているフェライト型永久磁石の長さを $l_m = 10\text{mm}$ とし、この磁石の特性を図 2.9 のように近似した。

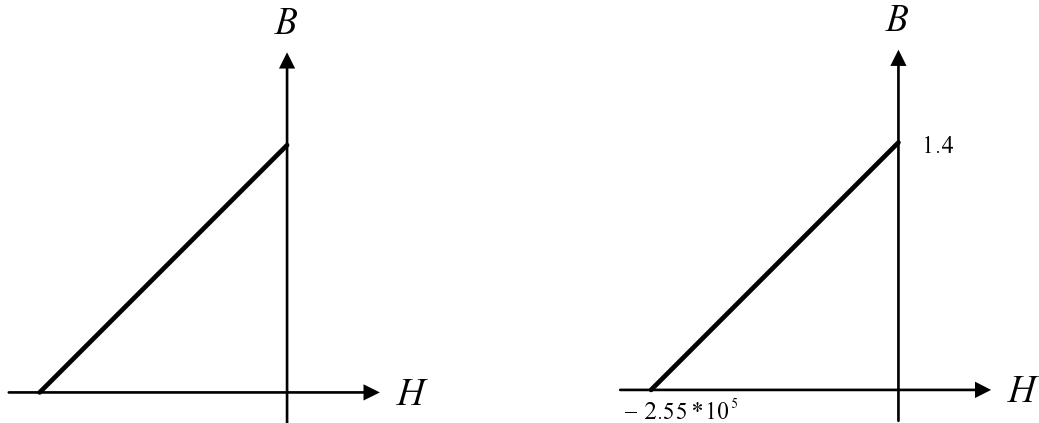


Fig. 2.8: フェライト磁石の B-H 特性 [9].

Fig. 2.9: フェライト磁石の B-H 特性 (近似)[9].

このとき、出力は

$$F = B \left(\frac{2l}{\mu} + \frac{2\delta + \alpha}{\mu_0} \right) + 2Hl_m = 0 \quad (2.18)$$

となる。ここで α を 0 とすると、上式より永久磁石による磁束密度は

$$\begin{aligned}B_2 &= -\frac{l_m}{\frac{l}{\mu} + \frac{\delta}{\mu_0}} H \\ &= -\frac{4\pi \times 10^{-4}}{510} H\end{aligned}\quad (2.19)$$

という関係が導かれる。

この直線と図 2.9 のグラフとの交点を求めると、磁束密度 B_2 は $B_2 \simeq 0.433\text{T}$ となった。

電磁石による出力と永久磁石による出力の足し合わせ

以上より求められた電磁石による磁束密度と永久磁石による磁束密度を足しあわせ、このモデルにおける最終的な出力を計算した。

$$B = B_1 + B_2 = 0.450 \text{ (T)} \quad (2.20)$$

ゆえに、このアクチュエータの出力 F は

$$F = \frac{10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.450^2 \simeq 16.1 \text{ (N)} \quad (2.21)$$

となる。この値は、2.2節で計算した腕のみを動かすモデルで要求される値とほぼ等しくなった。ゆえに、 1000mm^2 の断面積では永久磁石を入れても十分な力は得られないことが明らかになった。さらに、ギャップは 5mm しかなく、このギャップを大きくすると急速に出力は小さくなっていくためギャップ部分をストロークとすることは難しい。また、この方法では電流と磁束の向きが同じであるため、電流で制御できない永久磁石による磁束が電流によって制御可能な電磁石による磁束を大きく上回っており、永久磁石による吸引力が支配的となる。すなわち、これでは電流を調節することで出力制御可能になるという電磁アクチュエータとしての働きを持たせられないということになった。

このモデルでは要求される性能を実現するのは困難であることが分かったため、ギャップが一定になるようにし、磁束と電流の方向を変える方針で検討した [9]。

2.2.4 電磁アクチュエータの例 - ボイスコイルモータ (VCM) -

次に、既存のアクチュエータの中で応用できそうなボイスコイルモータ (Voice Coil Motor) について検討した。図 2.10 に一例を示す。磁界中に置かれたコイルに電流を流すとコイルに力が発生する。そして、永久磁石の磁界中に置かれたボイスコイルが電流の変化に応じてスライドする仕組みになっている。大半が直流電流を見るので制御が簡単であること、無接点で機械的な直進運動をつくれること、そして立ち上がりの機敏さが VCM の特長である。図 2.10 のような形状では通常のモータと異なり直線往復運動をし、可動部分がコイルだけのために高速な移動と正確な位置決めが可能となる。VCM は対象に直線運動を与える駆動装置として、主にコンピュータの外部記憶装置のヘッドを駆動するアクチュエータに用いられている。

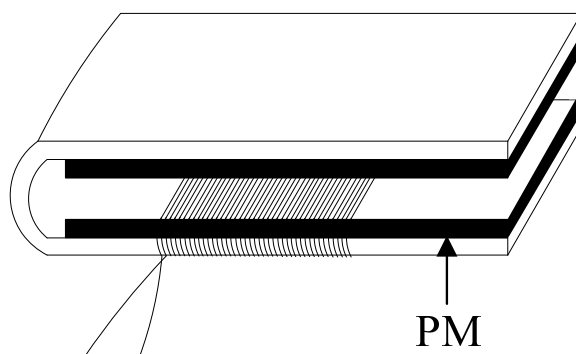


Fig. 2.10: ボイスコイルモータの一例.

欠点としては、コイルに電流を送るためのリード線が必要なためにストロークの長さが限られてしまうということが挙げられる。また、ストロークを長く取ろうとした場合に図 2.10 上のヨークにあたる部分は上下分離できないためヨークが長くなる。それに伴い永久磁石部分を長くせざる

るを得なくなる。これはヨークを切断した場合には磁路が形成されないため、出力が非常に小さくなってしまうためである。ゆえに、現在製品化されている VCM は大出力のものはストロークが非常に短いものしか存在しないと推定される [9]。

2.3 永久磁石の Halbach 配列による空心形リニア同期アクチュエータの開発

以上のモデルによる検討を踏まえて、大推力を発生させるためには強い永久磁石を用いた同期型アクチュエータが適するのではないかと考えた。永久磁石型リニア同期モータは位置決め装置や精密機械等の様々な用途に用いられている。本論文では、コンパクトで大推力またコイルから発生する熱の低減等を目指して、次に示すような空心形のリニア同期アクチュエータを提案した。その特徴を次に述べる。なお、提案したリニア同期アクチュエータは (株) 日立製作所 日立研究所殿に支援協力して頂いた。

2.3.1 特徴

図 2.11 に提案する強い永久磁石を用いた空心形のリニア同期アクチュエータの概要を示す。図 2.12, 2.13 は試験機の写真である。図 2.12 は可動子の写真であるが、可動子を構成する永久磁石は希土類磁石の中でも高い残留磁束と保持力を持つ Nd-Fe-B 型の磁石を用いた。加えて、コンパクト化・大推力化およびコイルから発生する熱の低減等を目指して永久磁石を Halbach 配列という配列を用いて構成した。

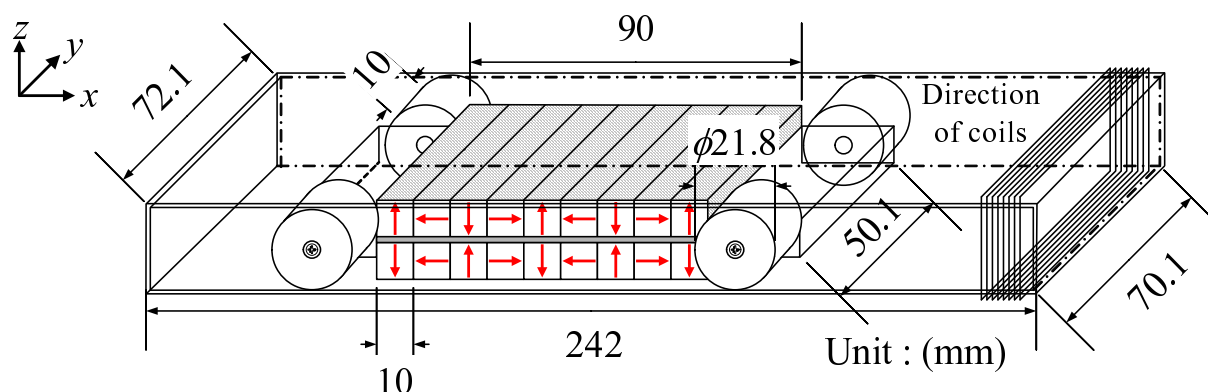


Fig. 2.11: 製作した試験機の概要.

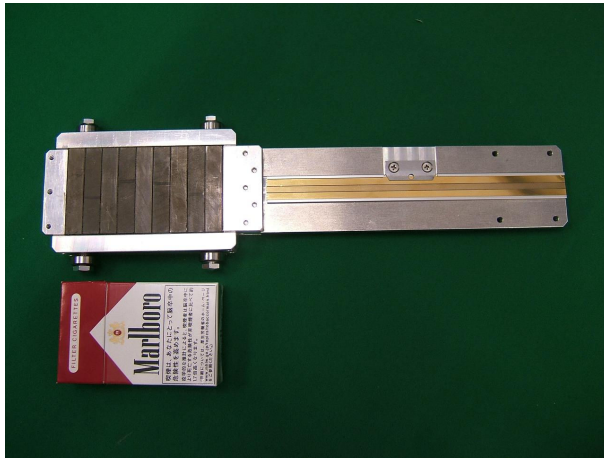


Fig. 2.12: Halbach 配列で組まれた永久磁石による可動子.

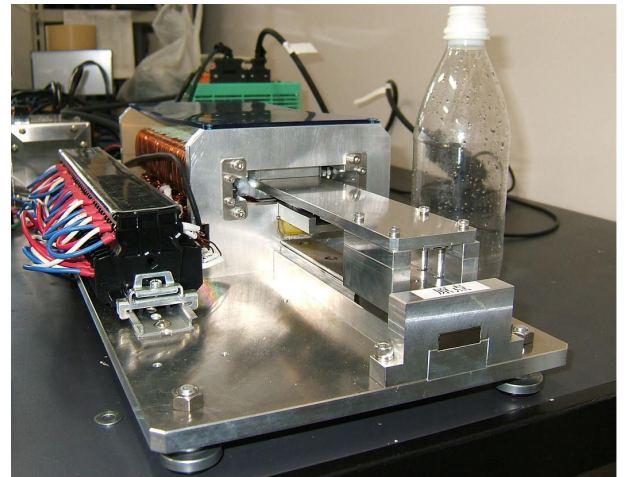


Fig. 2.13: 製作した試験機の全体図.

Halbach 配列は、図 2.14(a) のように磁石の磁化の向きを少しずつずらして構成することで安定した強い磁束分布を得られるというものである。片側式リニアモータの場合、片側だけに強い磁界を発生し反対側にはほとんど磁界を発生しないという特長を持つ。このため、図 2.14(a) の従来の配列方法と比べて鉄心が不要になり、装置の軽量化にもつながる。

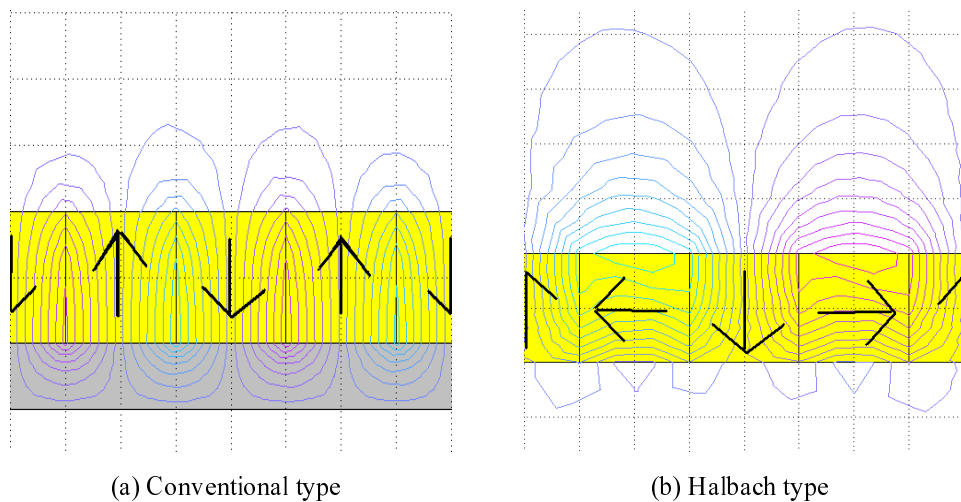


Fig. 2.14: Halbach 配列の特徴.

磁化の向きを細かく分けて配置することで磁束はより正弦波に近づくが、本論文では磁石の生産性を考慮して磁石の向きを $\frac{\pi}{2}\text{rad}$ ずつ変化させる形で構成した。そして、図 2.11 のように上下の Halbach 配列の永久磁石を薄い鉄板を用いて接着した。これにより磁石の接着は難しくなるが、上下の両面で同方向に推力を発生することが出来る。また、用いる永久磁石の極ピッチと磁石の厚みによって推力が変動する。参考文献 [9] にて可動子重量と推力の関係が評価されているが、それに磁石の生産性も考慮して磁石一つの大きさを $10 \times 10 \times 50\text{mm}$ とした。

推力によって可動子が動く際に、摩擦によって推力が減ることを最小限に抑えるために、可動子の外側にはアルミニウム製の車輪を装着した。そして、磁石の外側はアルミニウムによって支えられ、位置を制御するためにパルス分解能 $0.5\mu\text{m}$ の光学式リニアスケールがついている。図 2.12 の状態で重量を計測すると 1.13kg であった。可動子の外側を非磁性素材で包み、その外側にコイルを巻いて電機子を構成した。また、コイルは集中巻で三相分配置した。

2.3.2 基本性能評価 - 二次元有限要素法解析と実測との比較 -

解析条件

$$I_{urms} = 3.0 \cos(\omega t) \quad (2.22)$$

$$I_{vrms} = 3.0 \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.23)$$

$$I_{wrms} = 3.0 \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad (2.24)$$

可動子の磁束密度分布

ここでは Halbach 配列で構成された可動子の磁束密度分布に関して、解析結果と測定結果を比較、検証した。解析および測定する点は $z = 1.0, 4.0, 7.0$ mm であり、 y 方向は磁石の中心での値を測定し、二次元解析と比較した。また、可動子を低速で動かしながらガウスメータで z 方向の磁束密度 B_z を測定し、静磁界解析の結果と比較した。比較結果を図 2.16, 2.17, 2.18 に示す。これより、解析と測定の結果はほぼ同じであり、試験機において Halbach 配列の可動子を正確に製作出来たことが確かめられた。そして、実際にコイルの巻かれているのは図 2.17, 2.18 の辺りであり、結果から均一な正弦波の磁束分布をなしているため、提案モデルは基本的な空心形アクチュエータの特性を持つと考えられる。

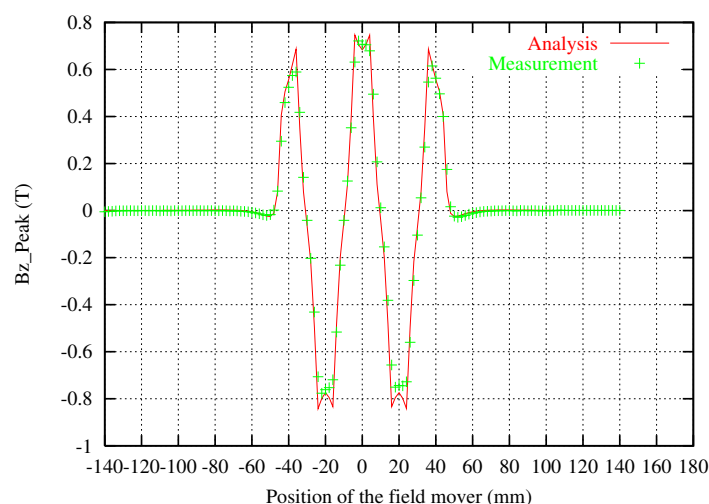


Fig. 2.16: 磁石表面から 1mm における磁束密度分布の二次元有限要素法解析と実測との比較.

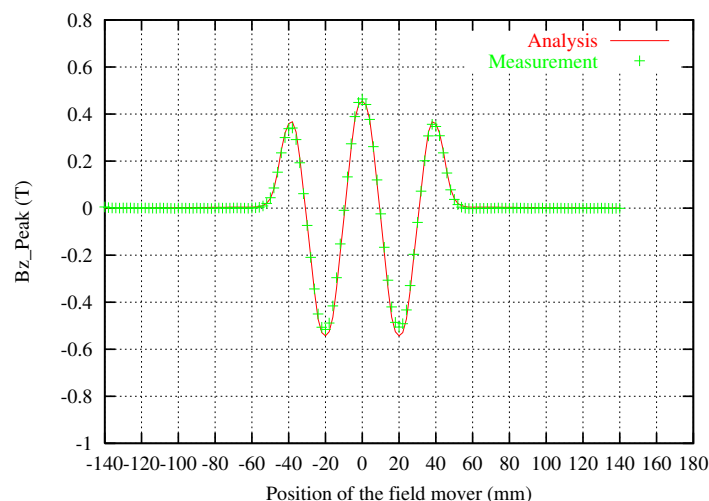


Fig. 2.17: 磁石表面から 4mm における磁束密度分布の二次元有限要素法解析と実測との比較.

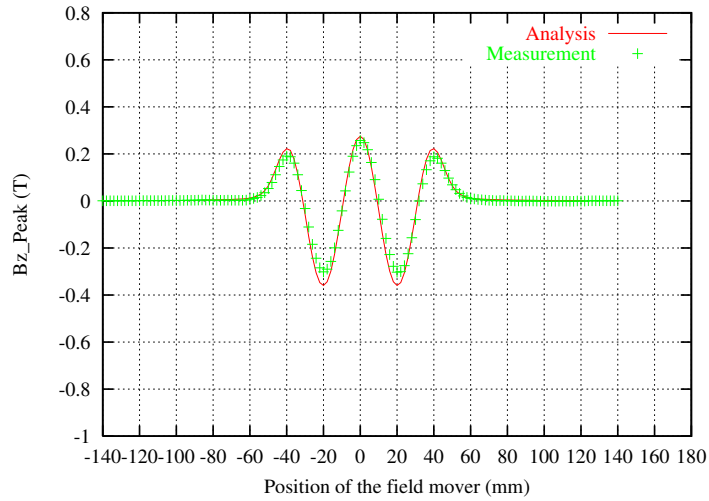


Fig. 2.18: 磁石表面から 7mm における磁束密度分布の二次元有限要素法解析と実測との比較.

提案モデルの発生する静推力

次に、静推力に関して解析結果と測定結果を比較した。三相交流電流を次式のようにした。

$$I_{urms} = 3.0 \cos\left(\frac{11\pi}{6}\right) \quad (2.25)$$

$$I_{vrms} = 3.0 \cos\left(\frac{7\pi}{6}\right) \quad (2.26)$$

$$I_{wrms} = 0.0 \quad (2.27)$$

そして、 $x = 0$ から $x = 40\text{mm}$ まで可動子を $\frac{1}{6}$ ピッチずつ 2 ピッチ分動かしたときの推力変化を解析した。可動子が 2 ピッチ移動すると ωt が 1 周期変化するため、2 ピッチ分解析した。ここで $\omega t = \frac{11\pi}{6}\text{rad}$ 一定としたのは次の図 2.19 において○で囲まれているように電気角速度 $\omega t = \frac{11\pi}{6}\text{rad}$ としたときに、 $I_{urms} = 0$ となるためである。

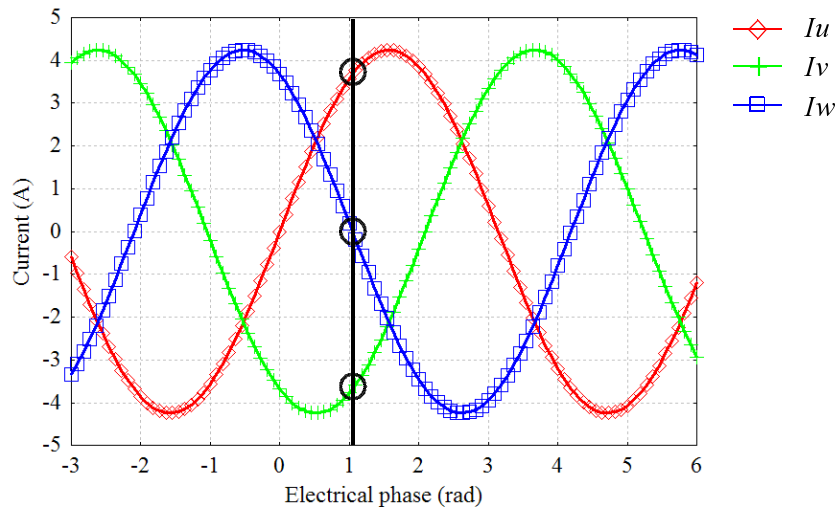


Fig. 2.19: 三相交流電流波形における測定点.

解析結果を図 2.20 に示す。波形は正弦波となった。図中 A 点が相差角 $= \frac{\pi}{2}\text{rad}$ になる点であり、そのときの推力は 53.0N となった。

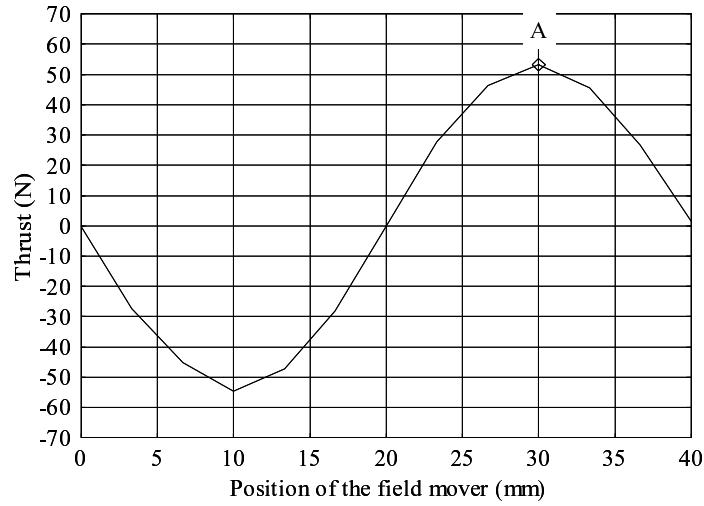


Fig. 2.20: 直流電流を流した状態で可動子を低速で動かしたときの二次元有限要素法による推力変化.

次に、 $I_{wrms} = 0.0A$ として I_u, I_v に直流電流を流したままで可動子を一定の低速度で動かし、推力の変化を測定した。つまり、式 (2.25) から式 (2.27) より測定時の電流を $\omega t = \frac{11\pi}{6}\text{rad}$ 一定とし、式 (2.28) から式 (2.30) のように変化させて 10 点測定した。

$$I_{urms} = \frac{\sqrt{2}}{2} \times 0.5, \frac{\sqrt{2}}{2} \times 1.0, \dots, \frac{\sqrt{2}}{2} \times 5.0 \quad (2.28)$$

$$I_{vrms} = -\frac{\sqrt{2}}{2} \times 0.5, -\frac{\sqrt{2}}{2} \times 1.0, \dots, -\frac{\sqrt{2}}{2} \times 5.0 \quad (2.29)$$

$$I_{wrms} = 0.0 \quad (2.30)$$

測定結果を図 2.21 に示す。これより、電流を線形に増加させると推力も線形に増加していることが分かる。そして、可動子を一定の低速度で動かすと推力が正弦波状に変化していることが見てとれる。図 2.21 中の太線が実際に駆動させる実効値 3.0A における推力変化であり、相差角が $\frac{\pi}{2}\text{rad}$ となる B 点での推力は約 52.5N の推力が発生した。

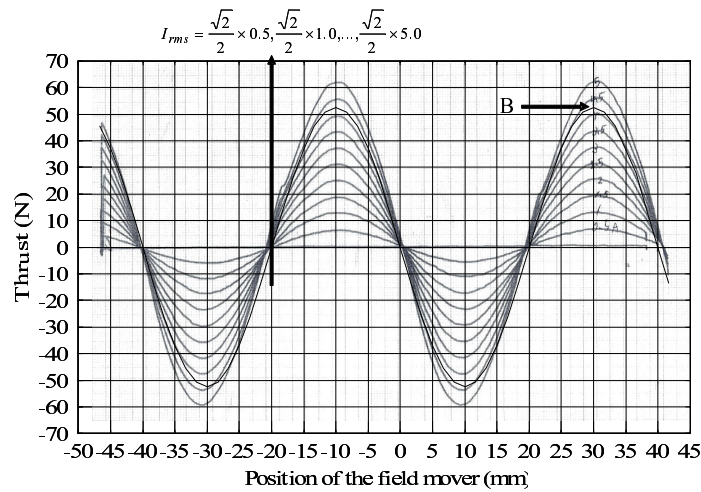


Fig. 2.21: 直流電流を流した状態で可動子を低速で動かしたときの実測による推力変化.

図 2.20 の A 点と比較してもほとんど誤差はなく、試験機は二次元解析した値とほぼ同じ静推力が得られることが分かる。これは図 2.16, 2.17, 2.18 から、測定と解析における可動子の磁束分布がほぼ同じであるため、コイルからの漏れ磁束がほとんど存在しないことから推測出来る。加えて、図 2.16, 2.17, 2.18 から BII 則に基づいて簡単に推力を計算すると、約 50.0N の推力を発生出来ることが分かっており、わずかな損失は摩擦が原因と推測され、試験機がほぼ目標通りの性能を持っていることが確かめられた。しかし、製作したアクチュエータは最低目標である 50N 以上の推力を発生可能であることは実証できたが、100N 以上の推力を発生させるためにはコイルに流す電流値を 10A 程度にしなければならないため、大推力化にはコイルから発生する熱が問題となる。

次に、相差角が $\frac{\pi}{2}$ rad を保つように電流の位相をずらしながら、可動子を移動させたときの推力変化について解析した。 ωt を $\frac{\pi}{6}$ rad ずつ変化させ、可動子を $\frac{1}{6}$ ピッチずつ変化させて静磁界解析を行い、その結果をつなぎ合わせた。ここでも、可動子が 2 ピッチ移動すると ωt が 1 周期分進むため 2 ピッチ分の静推力解析を行い、それ以降の可動子が動いたときの結果を同様とみなした。

解析結果を図 2.22 に示す。これより、試験機は空心形アクチュエータの特長である小さな推力リップルを実現出来ることが期待出来る。解析では、推力リップルは 1.3% 以内に収まった。これは空心形アクチュエータの特長を再現できていることを示し、試験機が小さな推力リップルで駆動出来ることが期待される。今後の課題として、実際に試験機の駆動実験を行いこの結果と比較する。

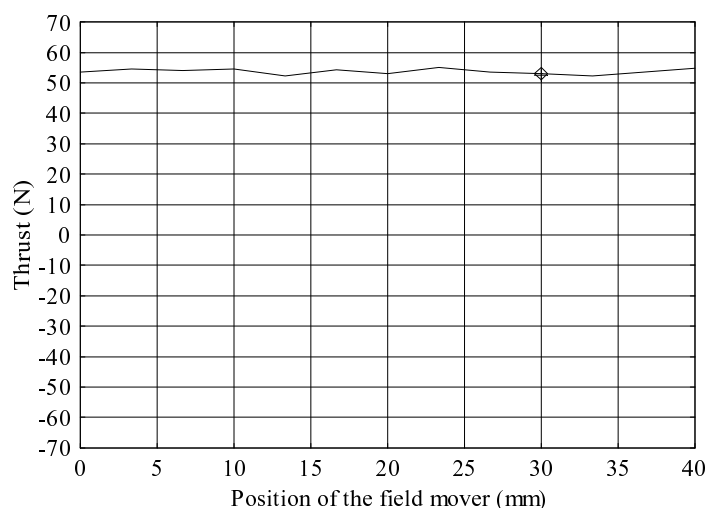


Fig. 2.22: 電気角を $\frac{\pi}{2}$ rad に保った状態で可動子が動くことを想定したときの二次元有限要素法による推力変化。

2.4 製作した空心形リニア同期アクチュエータの問題点と検証

前節にて評価したように、本章で設計・試作したリニア同期アクチュエータは、磁氣的に簡単な構造で永久磁石の Halbach 配列を採用することによる正弦波状の磁束密度分布を持ち、発生推力は三相交流電流の振幅に線形的に変化する良好な特性を持っている。しかし、この試験機を用いて HRT に適したアクチュエータの制御を行おうと考えていた矢先に Halbach 配列で構成された永久磁石の接着が剥がれてしまい図 2.23 のように端の磁石が外れて外側のコイルに接触して傷つけると言う致命的な故障が生じた。

設計の際に磁石にかかる反発力を計算し、それよりも十分に大きな吸着力を持つ接着剤にて磁石を接着したが、鉄板を Halbach 配列の永久磁石を上下対称に接着したため、接着時に反対側の

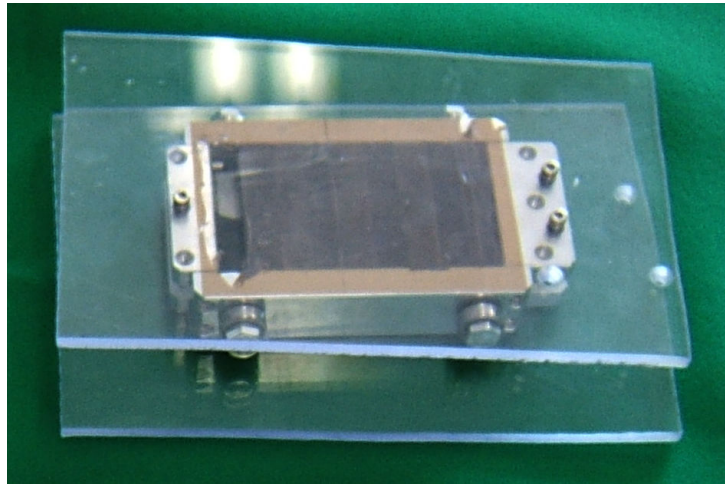


Fig. 2.23: 永久磁石の反発力により接着が剥がれてしまった可動子.

磁石にかかる反発力が想定以上に大きくなってしまったことと、端の磁石は外側に磁束を発生させ他の内側にある磁石よりも磁束密度分布が不安定になることから、他の磁石よりも大きな斥力を受けたと思われる。

これは構造上の問題であり、Halbach 配列の特徴である磁化の向きが異なる磁石を隣り合わせにして強引に接着するという不安定さを露呈する結果となってしまった。今後このような問題を防ぐためには、Halbach 配列を採用するときには磁石の外側に枠を設け、その中に磁石を入れて支持機構を強化し磁石配列の崩壊を防ぐ必要がある。

本論文で製作した試験機は十分な推力を出すために永久磁石とコイルとのギャップを 1mm としているため、上記のような外枠を用いて再構成することが不可能であり、この試験機を補修してその後の実験を行うことを断念した。

加えて、試験機の段階とは言えアクチュエータ全体の重量は 10kg 近くなってしまった。これは十分な推力を発生させるためにはコイルの巻数を 40 回も巻く必要があり、そのコイルがストローク分だけ配置されているために総重量が重くなってしまったことが原因である。ゆえに、3kg 程度で装置で十分な推力を発生させるにはアクチュエータの磁気回路構成を見直す必要がある。

2.5 拮抗二関節筋駆動用としてのその他のリニア電磁アクチュエータ

2.5.1 鉄心を持つリニア同期アクチュエータ - トンネルアクチュエータ -

製作したリニア同期アクチュエータは Halbach 配列を用いた空心形のアクチュエータであったが、鉄心を持った形でも極ピッチを小さくして駆動の高周波化を図ると共に、支持やセンシングなどの周辺装置の小型化を実現すれば軽量化は狙える。そして、鉄心形は空心形よりも本質的に大推力が狙える。

鉄心を持つリニア同期アクチュエータの中で、装置全体をコンパクトにかつ大推力を発生させることが期待されることができ、工作機械の分野で応用が広がりつつある (株) 日立製作所 日立研究所の金弘中博士の発明したトンネルアクチュエータに注目し、HRT に搭載するための改良を考えた。まず、そのトンネルアクチュエータの特徴を述べる。

従来より広く使用されている片側式リニアモータは回転モータを単純に切り開いて平面に展開した構造となっており、電機子と可動子との間に大きな磁気吸引力が働く。この吸引力は必要とされる推力より数倍も大きな値になってしまうため、リニアベアリング等の案内支持機構に高い

剛性と高い精度が要求される。このため、従来の永久磁石型片側式リニア同期モータは応用範囲に制限があり低コスト化にも限界があった。図 2.24 のトンネルアクチュエータは、これらの片側式リニアモータよりコンパクトで高い加速度性能を持つために、半導体製造装置や小型精密加工機械等の生産性の向上に寄与することが可能である。図 2.25 は 1 相分の断面図である。その技術的特長は、以下の通りである [10]。



Fig. 2.24: トンネルアクチュエータの試験機.

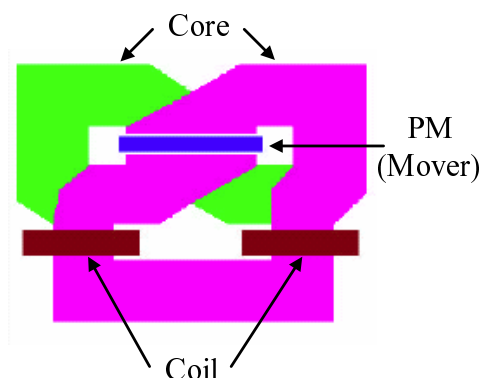


Fig. 2.25: トンネルアクチュエータ 1 相分の断面図.

1. 支持が容易で可動部が小型・軽量の構造

図 2.25 に示すように、上部磁極歯と下部磁極歯の間隙に永久磁石の磁極を交互に配置した可動子が配置されている。固定子に流す電流を変えることで可動子との間に吸引・反発力が生じる。しかし、このような構造によって磁気吸引力は相殺され、磁束のほとんどは推進力として作用しギャップの支持機構の簡素化を実現した。

2. 短い極ピッチ, ギャップへの磁束の集中による大推力の実現

電磁石が生み出す起磁力によって、上の歯が N 極ならば下の歯が S 極、上の歯が S 極ならば下の歯が N 極になるという積層鋼板構造となる。同じ形状のコアを裏返して交互に配置することにより、隣り合う積層鋼板同士の磁極の向きが交互になるため、磁極間漏れ磁束が少なく大きな推力が得られる。

3. 簡易な構成で軽量の可動子

可動子上の永久磁石は N 極・S 極を交互に配置するだけで構成出来るため、他の方式のリニアモータに比べ $\frac{1}{5}$ 以下まで軽量化が可能である。

4. 生産コスト低減

巻線作業やリード線処理が簡単になり、低コスト化が可能である。

金弘中博士は、トンネルアクチュエータは配線が簡単で場所をとらないため、更なる小型化と大推力化が期待出来ると考えている。装置が小さくなると磁石と巻線間のギャップを縮めることができ、さらに磁石の厚みを薄く出来るために支持機構の強度も大きな問題ではなくなる。これらの考察を基に、ロボットの二関節筋用のアクチュエータとして小型のトンネルアクチュエータを設計することは今後充分に考えられる。

2.5.2 コンパクト化を目指した新たな電磁アクチュエータ

トンネルアクチュエータ形の有鉄心アクチュエータと空心形のどちらが本当に優れているか現段階では判断できていないが、これから設計・検討すべき空心形アクチュエータの構成として次の図 2.26 の形を提案する。

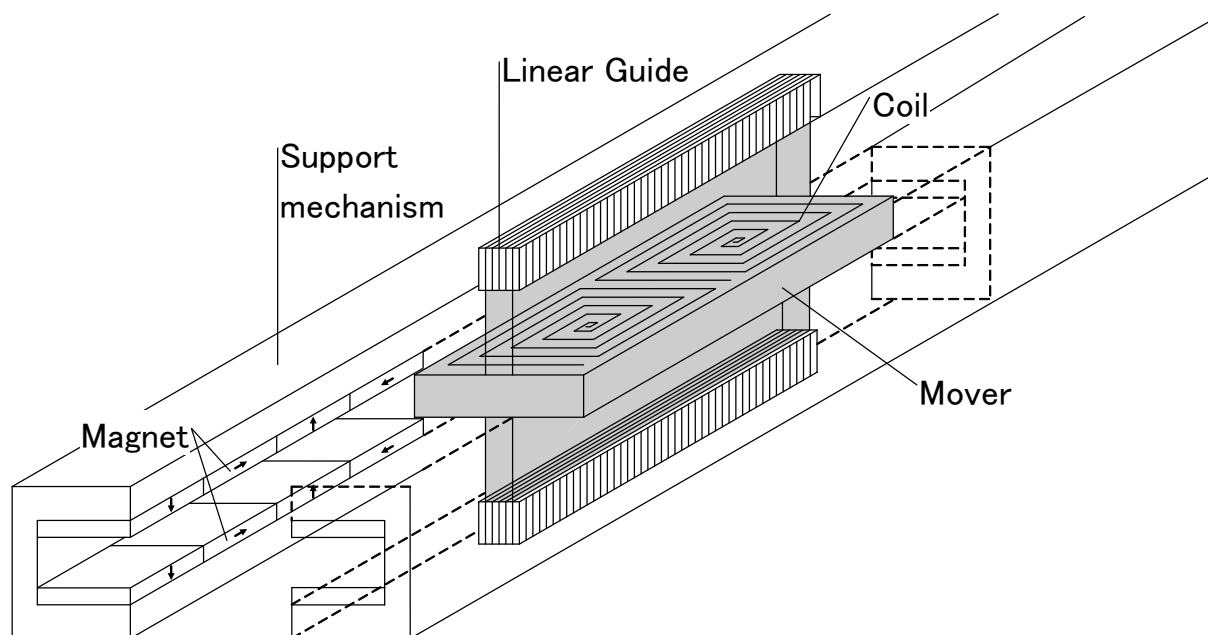


Fig. 2.26: 軽量化を狙った空心形リニア同期アクチュエータ.

試作した空心形のリニア同期アクチュエータは鉄心を使わないことで軽量化を狙ったが、実際はストロークの長さだけコイルを巻く必要があり、さらにコイルの巻数も推力を出すために多くなってしまい、総重量は鉄心形の従来のリニアモータと同程度になってしまった。

図 2.26 のアクチュエータはその問題を解決するために可動子にコイルを装着することを提案した。それにより可動子のコイルを試作機よりも大幅に減少させることが出来るため、可動子を現状よりも軽量化出来る。磁石の付いている固定子の支持強度が重要な問題となるが、磁石とコイルとのギャップを試作機よりも縮めることが出来れば、磁石の厚みを薄くしても同程度の推力を発生させることが可能になるため固定子側も軽量化が期待出来る。さらに、現状の試作機や市販されているリニアモータの大半がリニアスケールの配置で場所を取っている問題もある。コンパクト化のためには、位置決め制御に必要なリニアスケールの配置と電源ケーブルを図 2.26 の可動子内に配置することを考えている。これらは装置全体のコンパクト化に重要であるが、現在の製品で厳密に考えられているものはほとんどない。

今後の課題として、トンネルアクチュエータを応用したものや図 2.26 の提案したアクチュエータの比較・評価を行う。さらに、製品化されているリニア電磁アクチュエータをロボットの二関節筋用のアクチュエータとして応用することも考慮する。それらのアクチュエータに位置センサや電源ケーブルの配置を工夫することで、実際に HRT に搭載出来るようなコンパクトな電磁アクチュエータを目指す。その際には、本論文で製作した試作機のような故障が起きないような機械的支持力の解析を丁寧に行事が重要となる。ただし、このような形の磁気回路を持つものがすでに製品化されているので、構造上の致命的問題はないと考えている。

第3章 生物の粘弾性をリニア同期アクチュエータ単体の実装させる制御手法

本章では、実際に HRT の二関節筋用アクチュエータとしてリニア電磁アクチュエータを用いることを想定した場合に、筋肉のように俊敏で柔らかさを持った動きをリニア電磁アクチュエータ単体の制御によって実現することに関して述べる。

従来の HRT は、本論文の前半で述べたように機械工学の制御理論を適用して各関節のアクチュエータを独立に自由に制御するシステムであった。そして各関節に用いるアクチュエータには空気圧アクチュエータや回転型モータを用い、ロボットの粘弾性は実際のパネやダンパを用いて再現してきた。ゆえに、一度パネやダンパを搭載してしまうと全ての動きがその特性によって支配されてしまうという問題を解決できない。

そして、我々生物は運動中に筋肉の粘弾性を変化させることで柔軟な動きを実現している。例を挙げると、有蹄類であるウマは歩行時には柔らかい筋肉の性質によってゆっくりとした動きを実現し、逆に走るときには筋肉に力を入れて跳ねるように走る。

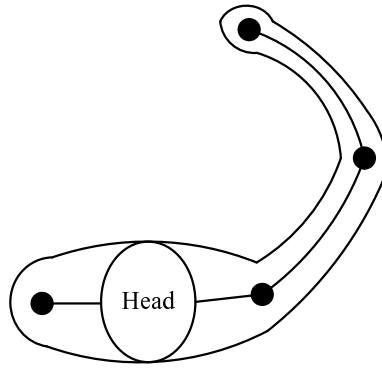
制御の分野ではパネやダンパを制御系の一つの要素として捉え、ソフトウェアによってその粘弾性を自在に操る研究も行われている。本章では、リニア電磁アクチュエータの制御系自体に粘弾性を再現する仮想パネ・ダンパ要素を組み込み、アクチュエータの駆動中にソフトウェアを用いて剛性・弾性係数を容易に変化させることに関して検討した。

また、最終的には本章で検討した粘弾性を備えた制御系をリニア電磁アクチュエータによって再現することを試みた。そのために前章までに述べた製作した試験機を用いて制御系の評価を行う予定であったが故障してしまった。そこで、(株) 日立製作所 日立研究所の金弘中博士からトンネルアクチュエータおよびドライブ回路をお借りして実験を行った。

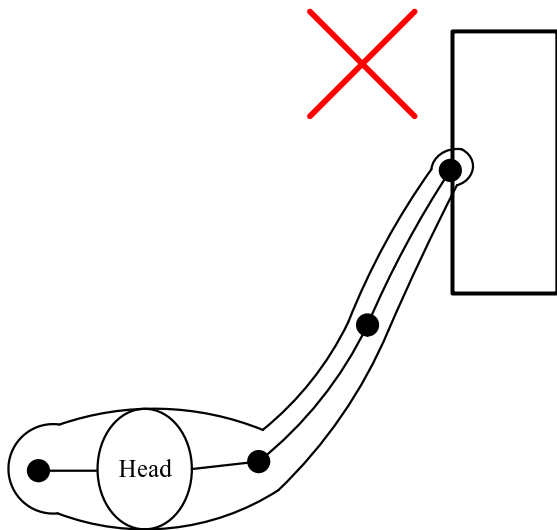
3.1 リニア同期アクチュエータの基本的な制御手法

図 3.1 のように目標位置までロボットアームを移動させる動きを想定した場合に、図 3.1 (b) のようにも目標点を超えてしまうのは失敗である。図 3.1(c) のように目標位置を越えることなく正確に止めるためには、アクチュエータにオーバーシュートが起きないように制御することは非常に重要である。

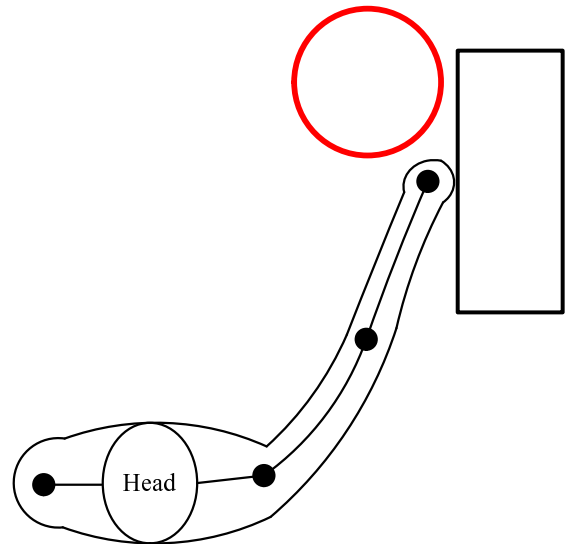
リニア同期アクチュエータは永久磁石型同期電動機をリニアにしたものである。交流電圧・電流を扱わなければならない。交流モータは電圧・電流の交流量を三相-二相変換および dq 変換を行うことで直流量として扱える。これらは既に交流モータにおいて主流となっている手法であるため、本論文では参考文献 [11][12] 等から以下に簡単に説明する。



(a) 腕を動かす前の状態



(b) 目標点に対して
オーバーシュート発生



(c) 目標点で正確に停止

Fig. 3.1: ロボットアームの動きの一例.

3.1.1 永久磁石型同期電動機の電圧方程式

三相-二相変換

三相-二相変換とは次の変換行列 \mathbf{C} により三相電圧・電流 $v_{u,v,w}, i_{u,v,w}$ を、直角二相電圧・電流 $v_{a,b}, i_{a,b}$ に変換することである。

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi \\ \sin 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

dq 変換

dq 変換とは次の変換行列 \mathbf{D} により直角二相交流電圧・電流 $v_{a,b}, i_{a,b}$ から $v_{d,q}, i_{d,q}$ を得ることで電圧・電流の交流量を d, q 軸における直流量とみなす変換のことである。回転子の回転角度位置を θ とし、回転子の瞬時角速度を ω とすれば、 $\theta = \int \omega dt$ であり、変換行列 \mathbf{D} は次の式で表される。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

電圧方程式

式 (3.1), (3.2) を用いて詳細な計算を行う。モータの電機子抵抗を R 、d, q 軸インダクタンスを L_d, L_q および永久磁石による電機子鎖交磁束の最大値を Φ_f とすると、d, q 軸上の電圧方程式は以下のように導出される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_a \end{bmatrix} \omega \quad (3.3)$$

ただし、 $\Phi_a = \sqrt{\frac{3}{2}}\Phi_f$ である。また、 $\Phi_a\omega$ の項は q 軸誘起電圧を表す。永久磁石型同期電動機では、式 (3.3) において

1. R の電圧降下は充分小さくなる。
2. sL_d, sL_q 等の過渡項は充分小さくなる。
3. 永久磁石の界磁磁束 Φ_f は L_q に比べて充分大きくなる。
4. $i_d = 0$ として制御する。

こと等が重要になる。

3.1.2 リニア同期アクチュエータにおける扱い

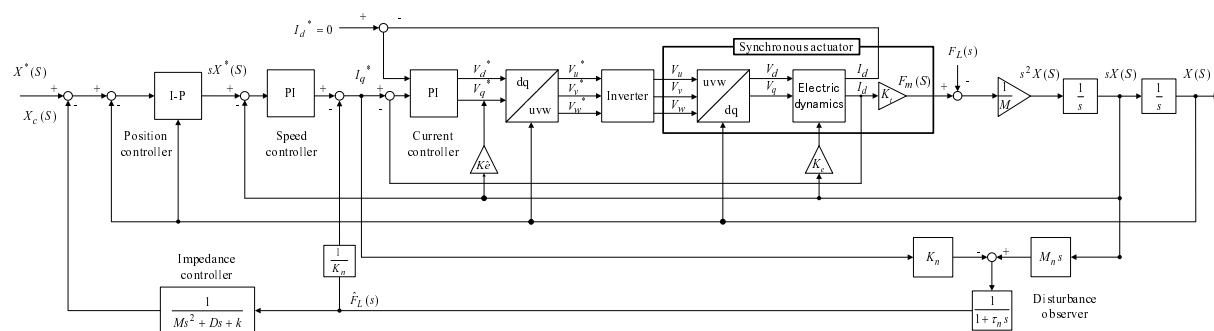
同期電動機における回転型とリニア型の違いを簡単に述べる。3.1 節での議論に基づき構成したリニア同期アクチュエータは、回転型と違いリニアエンコーダとセンサにより可動子の位置を測定する。ゆえに、前節で使われている回転子の角度位置 θ はリニアスケールによって計測される可動子の位置 x と永久磁石の極ピッチから、巻線と可動子に配置された永久磁石の磁束の位相角に置き換えられる。また、同期電動機は誘導電動機と違い端効果を考慮した設計が基本的に不要なため、図 3.2 のように回転型における角速度・回転角度を単純に可動子の速度・位置として置

モータの損失が無視された場合、q 軸誘起電圧を E_M とすると、次式が成り立つ。

$$F_M \dot{x} = E_M i_q \quad (3.5)$$

$$\frac{X(s)}{F_M - F_L} = \frac{1}{Ms^2} \quad (3.6)$$

精密機械などに使われるリニアモータの制御系は位置制御系で組まれることが多い。3.1 節での議論に基づき構成したリニア同期アクチュエータにおける電流制御系から位置制御系までの制御ブロックの一例を図 3.2 に示す。図 3.2 中の太枠で囲まれた部分がリニアモータの電氣的・機械的ダイナミクスである。



通常のリニアモータにおいては、前節の基本的な制御に加えて摩擦力等を補償する外乱オブザーバによって制御する。しかし、生物の動きを模擬したロボット用のアクチュエータは、精密機械に使われるモータのように単調な動きを繰り返すだけではない。例えば、我々生物はある動きをする場合においても力の大きさや方向を一定にする状況は少なく変化していることが多いため、アクチュエータの力の大きさは微妙に変化することが多い。加えて様々な外乱も存在する。そのような状況でアクチュエータに柔らかさを持たせるためには、剛性・減衰係数等を考慮した補償項の設計が必要になる。

3.2.1 インピーダンス制御

33

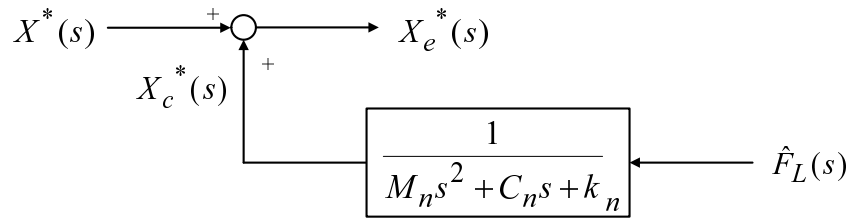


Fig. 3.3: インピーダンス制御ループ.

擬出来るため、機械系が不要となり装置のコンパクト化につながる。インピーダンス制御項を拡大すると図 3.3 で表される。

図 3.2, 3.3 中の $\hat{F}_L(s)$ はアクチュエータにかかる摩擦力等に加えて、ロボットに対する外乱等からアクチュエータにかかる反力を表している。実際の制御ではこの反力はオブザーバを用いて推定出来る。

仮想インピーダンスを実現するには、推定された反力に対してインピーダンスモデルに従った位置応答を実現すればよい。すなわち、反力 $\hat{F}_L(s)$ が加わったときの位置変位 $X_c^*(s)$ をインピーダンスモデルに従って、

$$X_c^*(s) = \frac{\hat{F}_L(s)}{M_n s^2 + C_n s + k_n} \quad (3.7)$$

M_n : 可動子の質量, C_n : 粘性係数, k_n : バネ定数のノミナル値とする。

反力 $\hat{F}_L(s)$ がないときの位置指令値 $X^*(s)$ に補正 $X_c^*(s)$ を加えたものを指令値として位置制御系に入力すれば、仮想インピーダンス制御が実現される。

3.2.2 コンプライアンス制御

図 3.3 に示すように、位置指令 $X^*(s)$ にインピーダンスモデルにより作られる $X_c(s)$ を加えた $X_e^*(s) = X^*(s) + X_c^*(s)$ が位置制御系への指令値となる。環境に接触せず反力 $\hat{F}_L(s) = 0$ のときは $X_c^*(s) = 0$ であるため、 $X_e^*(s) = X^*(s)$ となりアクチュエータは位置指令に忠実に追従する。環境に接触して反力 $\hat{F}_L(s)$ が返ってくると、それに応じた変位指令 $X_c(s)$ が生成され、位置制御系への指令値が $X_w^*(s) = X^*(s) + X_c^*(s)$ の形で修正されコンプライアンス動作が実現出来る [11][13]。

3.3 外乱オブザーバとインピーダンス制御系を持つ位置制御系の設計

外乱オブザーバとインピーダンスモデルを図 3.2 のように挿入し、位置制御までのシステムを考えた。 K_n, M_n は K_t, M のノミナル値、 τ_n は純粋微分を避けるための LPF (制御の速さやサンプリング周期によるが、1msec 程度) である。これにより摩擦力等の外乱を考慮した。

また、式 (3.7) よりインピーダンスモデルを $\frac{1}{M_n s^2 + C_n s + k_n}$ というダンピングのある二次系とした。バネ定数 k_n が任意に設定可能であるが、バネ定数 k_n を入れただけでは振動的な系になってしまう。そこで、ダンピングのある系にするために粘性係数 C_n を入れた。粘性係数 C_n は二次系の極配置から決められる。ダンピングのある二次系の標準形の特性方程式は次式となる。

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3.8)$$

ただし、 ω_n : 固有角周波数 (rad/sec), ζ : 減衰係数である。

$0 < \zeta < 1$ の場合、二つの極は $s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ となり、複素平面上で ω_n を半径とする円周上に位置し (円の大きさが応答速度に関係する)、実軸となす角度 θ は減衰係数 ζ と $\zeta = \cos \theta$

の関係にあることが分かる。また、減衰係数 ζ は重要なパラメータであり、 ζ が0に近くなるほど応答は振動的になる。ゆえに、オーバーシュートを抑えるには ζ を1に近づけることが重要となる。式 (3.8) より、

$$\frac{C_n}{M_n} = 2\zeta\omega_n \quad (3.9)$$

$$\frac{k_n}{M_n} = \omega_n^2 \quad (3.10)$$

となる。これより、 $\omega_n = \sqrt{\frac{k_n}{M_n}}$ が得られ、バネ定数 k_n が大きくなるほど応答速度が速くなること分かる。また、式 (3.9), (3.10) より粘性係数は $C_n = 2\zeta\omega_n M_n$ となる [11][13]。

ヒトのような動きをロボットアームで模擬するためには、バネ定数 k_n を1N/mm程度 (1Nで押すとバネが1mm凹む) にするのがよいと考える。同様に減衰係数 ζ を1に近づけ応答を振動的にさせないことも重要となる。また、粘弾性を備えた位置制御システムにおいてアクチュエータのオーバーシュートを防ぐためには、参考文献 [14] にあるように位置制御器をI-P制御系を採用し、Kessler標準形によって設計することも重要である。

3.4 粘弾性を実装した力制御システム

前節において、位置制御系に仮想バネ・ダンパ要素を挿入した制御系によるアプローチを考えたが、本節ではより簡単なシステムでアクチュエータを制御することを考えた。

3.4.1 力制御形インピーダンス制御

現在の多くのリニアモータの制御が位置制御系で組まれているが、正確な位置を必要とするこれらの用途とヒトのような動きを実現させるためのアクチュエータの制御方法は少し異なっているのではないかとこの点に着目した。生物の動きに着目すると、脳から筋肉への指令は何Nの力を出せというように力指令である。この考えは図 1.2 において各アクチュエータの発生する力の割合を制御することでロボットアームが任意の方向へ力を発生可能であるという理論と同じことを意味しており、位置制御系によって制御するよりも状況を捉えやすい。

そこで本論文では、二関節筋用アクチュエータの制御法として図 3.4 のような力制御システムを提案した。図 3.4 中の $F_m^*(s)$ にあるように力指令となっているのが特徴であり、前節で考えたインピーダンス制御項を加えることでアクチュエータの粘弾性を自由に設定可能である。この提案した制御システムを本論文では力制御形インピーダンス制御と定義する。

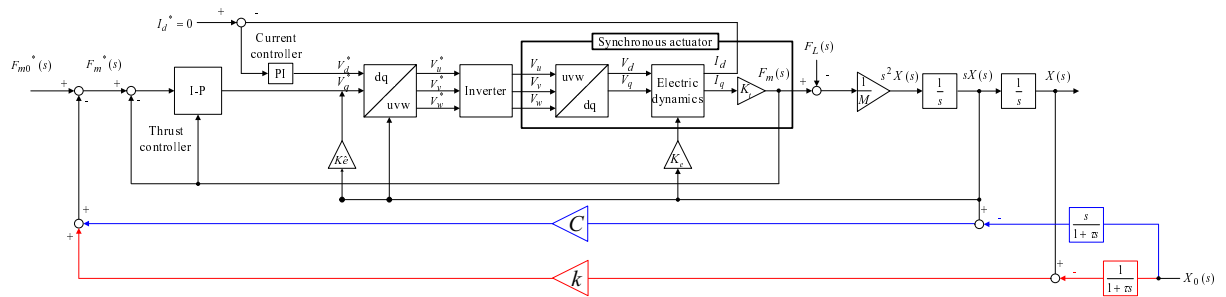


Fig. 3.4: 力制御形インピーダンス制御のブロック線図.

入力指令の捉え方が位置指令から力指令に変わることによって制御器の構成が簡単になるが、図 3.4 の下側にあるようにアクチュエータの現在位置および速度情報を用いて粘弾性制御を行うため、 $X_0(s)$ のように位置指令を用いることも出来る。入力を位置指令 $X_0(s)$ と考えた場合、図 3.2 と図 3.4 はほぼ同じような制御系になる。つまり、図 3.4 の弾性・粘性係数 k, C を小さな比例ゲインと捉えれば、その部分が図 3.2 の位置制御系および速度制御系の制御器となる。結果的には緩い PID 制御系と同じようなシステムになっているとも捉えられるが、本論文においてはアクチュエータの推力を制御するのがこのシステムの目的であり、そこに粘弾性要素を挿入するという意図の下で設計した。

3.4.2 二慣性系を考慮する必要性と一慣性系との違い

ロボットアーム・レッグ用のアクチュエータはアームまたはレッグに装着した状態で機能するため、アクチュエータの制御は図 3.5(a) のように二慣性系で考える必要がある。そこで、力制御システム系を考えたときの二慣性系および一慣性系の違いによるアクチュエータの伝達関数に関して述べる。

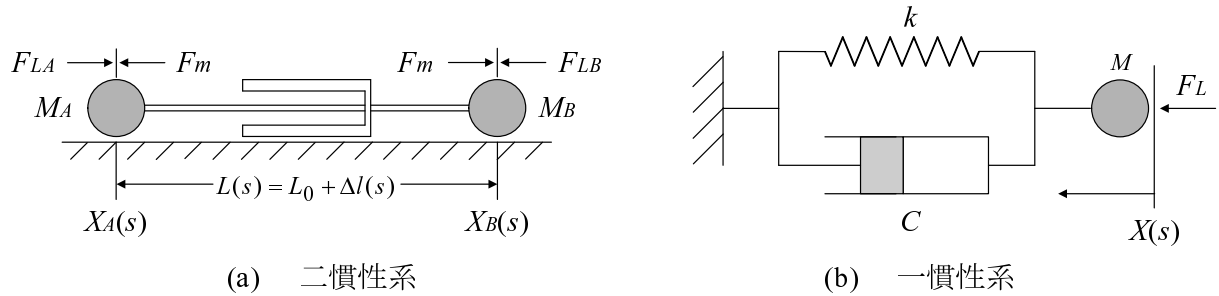


Fig. 3.5: 一慣性系と二慣性系.

二慣性系に関して、ラプラス領域で長さとの関係を表現すると次式になる。

$$X_A(s) + L(s) = X_B(s) \quad (3.11)$$

$$\Delta L(s) = X_B(s) - X_A(s) - L_0 \quad (3.12)$$

$$s^2 M_A X_A(s) = -F_m(s) + F_{LA}(s) \quad (3.13)$$

$$s^2 M_B X_B(s) = F_m(s) - F_{LB}(s) \quad (3.14)$$

一方、図 3.5(b) のような一慣性系では

$$s^2 M X(s) = -kX(s) - CsX(s) - F_L(s) \quad (3.15)$$

となる。

前に述べたように、製作した Halabach 配列の永久磁石を持つ空心形のリニア同期アクチュエータが故障してしまったため、(株) 日立製作所 日立研究所の金弘中博士のトンネルアクチュエータをお借りする形となった。そのため、以降の制御器設計に必要なパラメータおよび設計した制御システムによるシミュレーションと試験機への実装の際には、次の表 3.1 の特性を持つ試験機を基に行った。

一慣性系において、式 (3.15) と図 3.4 から力指令に対する推力応答の伝達関数 $G(s)$ を求める。

$$G(s) = \frac{F_m(s)}{F_m^*(s)} = \frac{\frac{K_i}{s} \frac{1}{R+L_q s} K_t}{1 + \frac{K_i}{s} K_p \frac{K_t}{R+L_q s}} = \frac{K_t K_i}{L_q s^2 + (R + K_p K_t)s + K_t K_i} \quad (3.16)$$

Table 3.1: 試験機 の特性.

R (Ω)	0.675
L_d (H)	15.5
L_d (mH)	18.65
M (kg)	6.0
K_e (N/A)	10.76
K_t (V/msec $^{-1}$)	10.76

$$\therefore G(s) = \frac{1}{1 + \frac{R+K_pK_t}{K_tK_i}s + \frac{Lq}{K_tK_i}s^2} \quad (3.17)$$

これから極配置を考えるために簡略化すると、

$$G(s) = \frac{1}{1 + 2T_2s + 2T_2^2s^2} \simeq \frac{1}{1 + 2T_2s} \quad (3.18)$$

と表すことが出来る。極配置は、

$$s = \frac{1}{2T_2}(-1 \pm i) \quad (3.19)$$

と簡単な形となる。Kessler 標準形から

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{R + K_pK_t}{K_tK_i} \\ T_2 &= \frac{Lq}{R + K_pK_t} \\ \therefore \frac{T_1}{T_2} &= \frac{(R + K_pK_t)^2}{LqK_tK_i} = 2.0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

をみたすように制御器を設計する。ここで、表 3.1 の値を使い $K_p = 1.0$ として計算した。式 (3.20) より $T_2 = 1.6\text{msec}$, $T_1 = 3.2\text{msec}$ となり、 $K_i = 325.8$ となった。

ここで $G(s)$ の特性方程式を $D_1(s) = \frac{1}{G(s)}$ と置く。 $D_1(s)$ を式 (3.8) のように固有角周波数 ω_n と減衰係数 ζ で考えた場合、 $\frac{2\pi}{\omega_n}$ に対して $2T_1$ が充分小さければ、 $D_1(s)$ は 1 とみなすことが出来る。

図 3.4 のブロック線図から $X(s)$ を求める。

$$V(s) = sX(s) = \frac{1}{Ms}G(s) - F_m^*(s) - F_L(s) \quad (3.21)$$

$$F_m^*(s) = F_{m0}^*(s) - CsX(s) - kX(s) + \frac{Cs}{1 + \tau s}X_0(s) \quad (3.22)$$

ただし、 τ は純粋微分を避けるための LPF であり 1msec 程度

ここで $D_2(s) = 1 + \tau s$ と置くと、先程と同様に $\frac{2\pi}{\omega_n}$ に対して τ が充分小さければ、 $D_2(s)$ は 1 とみなせる。

以上を基にすると $X(s)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} X(s) &= \frac{1}{Ms^2} [G(s) \{ F_{m0}^*(s) - (Cs + k)X(s) + \frac{Cs + k}{1 + \tau s}X_0(s) \} - F_L(s)] \\ &= \frac{1}{Ms^2 + (Cs + k)\frac{1}{D_1(s)}} \left\{ \frac{1}{D_1(s)} F_{m0}^*(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s)D_2(s)} X_0(s) - F_L(s) \right\} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$X(s) = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2 D_1(s)} F_{m0}^*(s) + \frac{1}{D_2(s)} \frac{1 + \frac{C}{k}s}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2 D_1(s)} X_0(s) - \frac{1}{k} \frac{D_1(s)}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2 D_1(s)} F_L(s) \quad (3.24)$$

となり、実際には

$$\therefore X(s) = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2} F_{m0}^*(s) + \frac{1 + \frac{C}{k}s}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2} X_0(s) - \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{C}{k}s + \frac{M}{k}s^2} F_L(s) \quad (3.25)$$

と書ける。

二慣性系の場合は次のようになる。式 (3.22) と同様に、

$$F_m^*(s) = F_{m0}^*(s) - (Cs + k) \{X_B(s) - X_A(s) - \frac{1}{D_2(s)} l_0(s)\} \quad (3.26)$$

$$\therefore F_m(s) = \frac{F_m^*(s)}{D_1(s)} = \frac{1}{D_1(s)} F_{m0}^*(s) - \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_B(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_A(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} l_0(s) \quad (3.27)$$

となる。また、式 (3.13), (3.14) より

$$s^2 M_A X_A(s) = -\frac{1}{D_1(s)} F_{m0}^*(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_B(s) - \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_A(s) - \frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} l_0(s) + F_{LA} \quad (3.28)$$

$$\frac{D_1(s) M_A s^2 + Cs + k}{D_1(s)} X_A(s) - \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_B(s) = -\frac{1}{D_1(s)} F_{m0}^*(s) - \frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} l_0(s) + F_{LA} \quad (3.29)$$

$$s^2 M_B X_B(s) = \frac{1}{D_1(s)} F_{m0}^*(s) - \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_B(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s)} X_A(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} l_0(s) - F_{LB} \quad (3.30)$$

$$-\frac{Cs + k}{D_1(s)} X_A(s) + \frac{D_1(s) M_B s^2 + Cs + k}{D_1(s)} X_B(s) = \frac{1}{D_1(s)} F_{m0}^*(s) + \frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} l_0(s) - F_{LB} \quad (3.31)$$

式 (3.29), (3.31) を整理すると、

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \frac{D_1(s) M_A s^2 + Cs + k}{D_1(s)} & -\frac{Cs + k}{D_1(s)} \\ -\frac{Cs + k}{D_1(s)} & \frac{D_1(s) M_B s^2 + Cs + k}{D_1(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A(s) \\ X_B(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{D_1(s)} & -\frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} \\ \frac{1}{D_1(s)} & \frac{Cs + k}{D_1(s) D_2(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{m0}^*(s) \\ l_0(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{LA} \\ -F_{LB} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.32)$$

となる。ゆえに、

$$\begin{aligned} \therefore \begin{bmatrix} X_A(s) \\ X_B(s) \end{bmatrix} &= H(s) \begin{bmatrix} D_1(s) M_B s^2 + Cs + k & Cs + k \\ Cs + k & D_1(s) M_A s^2 + Cs + k \end{bmatrix} \\ &\quad \times \left(\begin{bmatrix} -1 & -\frac{Cs + k}{D_2(s)} \\ 1 & \frac{Cs + k}{D_2(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{m0}^*(s) \\ l_0(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1(s) F_{LA} \\ -D_1(s) F_{LB} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

ただし、

$$H(s) = \frac{1}{(D_1(s) M_A s^2 + Cs + k)(D_1(s) M_B s^2 + Cs + k) - (Cs + k)^2}$$

となる。\$D_1(s)\$ および \$D_2(s)\$ は 1 とみなせるため、

$$\begin{aligned} \therefore \begin{bmatrix} X_A(s) \\ X_B(s) \end{bmatrix} &= H(s) \begin{bmatrix} M_B s^2 + Cs + k & Cs + k \\ Cs + k & M_A s^2 + Cs + k \end{bmatrix} \\ &\quad \times \left(\begin{bmatrix} -1 & -(Cs + k) \\ 1 & Cs + k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{m0}^*(s) \\ l_0(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{LA} \\ -F_{LB} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (3.34)$$

ただし、

$$H(s) = \frac{1}{(M_A s^2 + C s + k)(M_B s^2 + C s + k) - (C s + k)^2}$$

となり、式の展開は複雑ではあるが基本的な力学的考察および制御の考え方は一慣性系と変わらない。

図 3.4 の一慣性系の力制御系システムを二慣性系に拡張し、シミュレーションによって評価することは可能であるが、試験機であるトンネルアクチュエータの固定子は完全に固定されている一慣性系であるため、本論文では一慣性系における力制御システムの評価を行った。

第4章 粘弾性を持つリニア同期アクチュエータの実現

本章では、前章にて考えた粘弾性をソフトウェアによって自在に調整出来る力制御形インピーダンス制御の試験機への実装について述べる。提案した力制御形インピーダンス制御をあらかじめ MATLAB Simulink を用いて評価し、試験機と比較した。

図 4.1 に試験機として使用したトンネルアクチュエータの写真を載せる。表 3.1 の特性を持つ、永久磁石型リニア同期アクチュエータである。写真にあるように、このトンネルアクチュエータとサーボアンプおよび PC を使って試験機を制御した。また、図 4.2 に図 4.1 の結線の概念図を示し、図 4.3 にサーボアンプによる力制御形インピーダンス制御のブロック線図を示す。

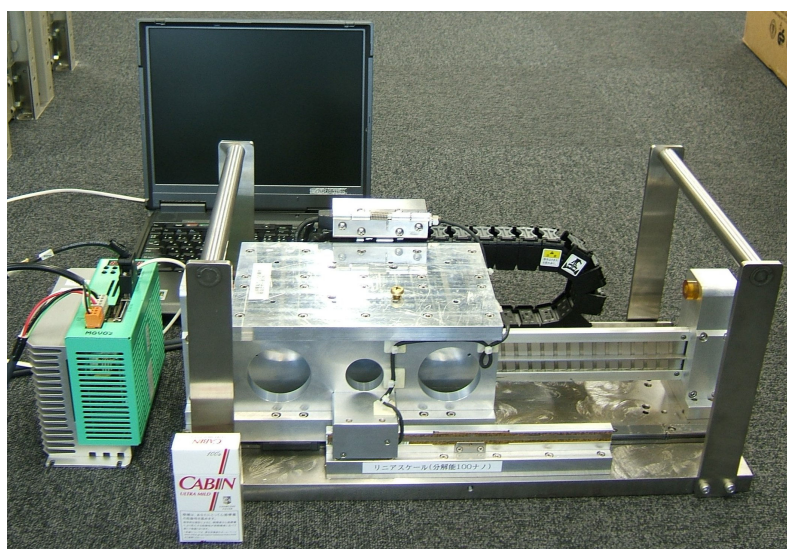


Fig. 4.1: 試験機の外観.

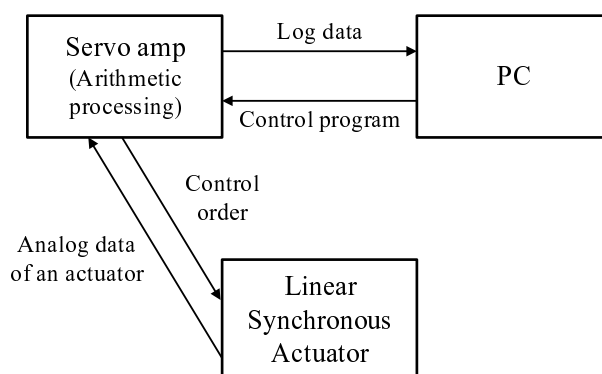


Fig. 4.2: サーボアンプを用いた試験機の制御概念図.

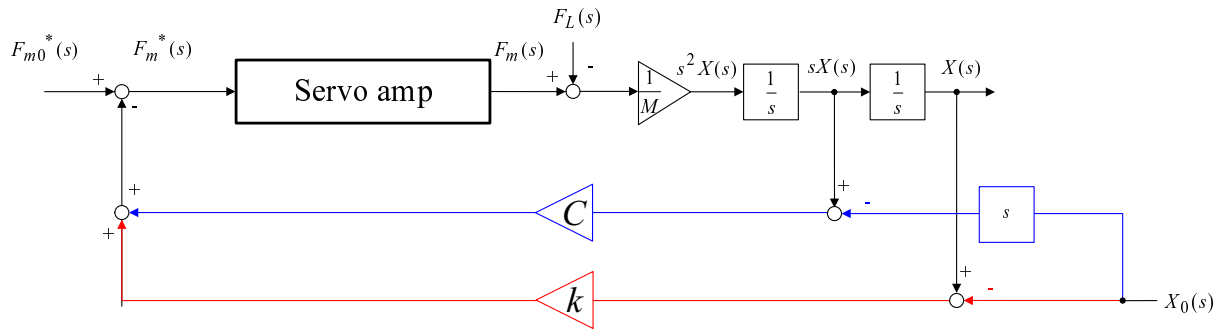


Fig. 4.3: サーボアンプを用いた力制御形インピーダンス制御のブロック線図.

4.1 サーボアンプを用いた試験機の制御手法

図 3.4 にあるようにリニアモータはベクトル制御によって推力を発生するが、本論文で用いるサーボアンプは推力制御, 位置制御, 速度制御などを備えている。そのためこのサーボアンプを用いれば、例えば推力指令を入力するとモータのパラメータを用いてベクトル制御を行い、指令に応じた推力を発生させることが出来る。本論文では、推力指令の入力に対して入力通りの推力をサーボアンプにて自動的に得られることを前提として、図 4.3 のブロック線図で構成される力制御形インピーダンス制御の実装を行った。

4.2 試験機の特性と解析との比較・評価

試験機が粘弾性を持った動作を実現しているかを次の 2 つの条件によって確かめた。どちらの条件においても粘弾性の影響が分かり易いように、ロボット用アクチュエータとして用いるよりも柔らかい係数を用いた。

4.2.1 条件 1 - 試験機に一定推力を加えて粘弾性を確かめる -

試験機の可動子が原点 (0mm) にある状態で、50N の推力指令を与える。それにより可動子が移動するが、可動子の原点との距離が離れるに従ってバネとダンパが伸びた状態になるため、最終的には試験機の発生する推力と仮想バネ・ダンパによる反発力とが釣り合い可動子が停止する。

このような動作を行う場合に、固有角周波数が $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ と $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合において、減衰係数を $\zeta = 0.1, 0.5, 0.7, 0.9$ と変化させたときの可動子の位置変化と推力変化を比較した。参考までに、 $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ のときバネ定数 $k = 600\text{N/m}$ であり、 $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ のときバネ定数 $k = 1350\text{N/m}$ となる。

初めに、 $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.4 から図 4.7 に示す。

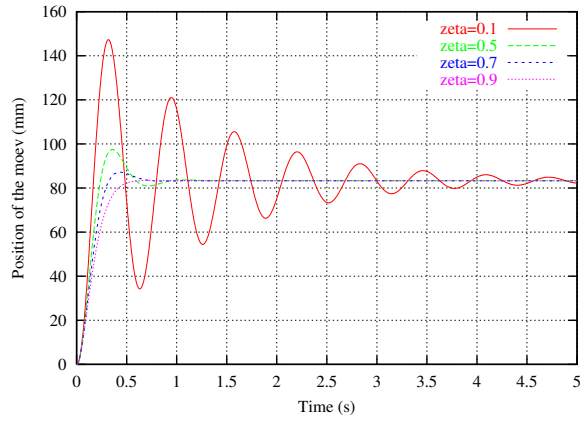


Fig. 4.4: Simulink における ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

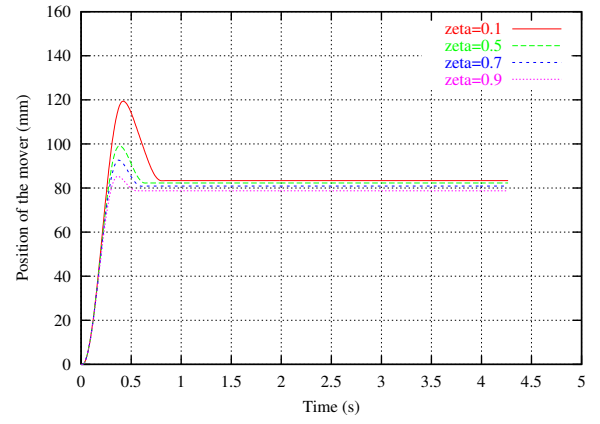


Fig. 4.5: ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

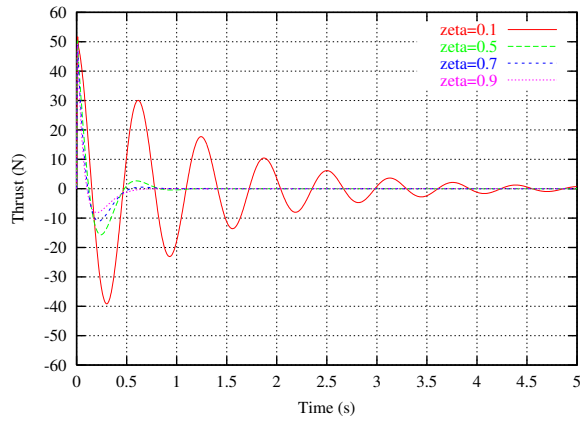


Fig. 4.6: Simulink における ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

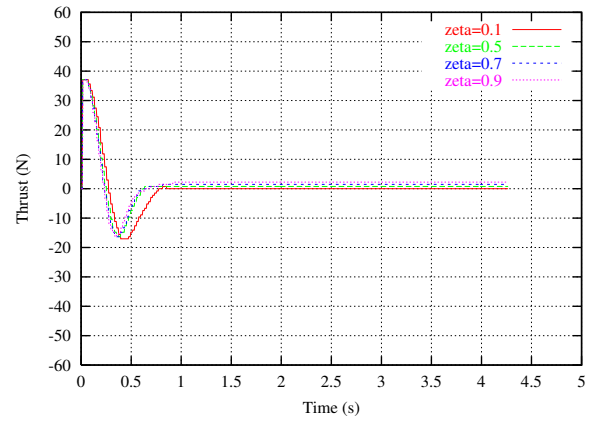


Fig. 4.7: ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

次に、 $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.8 から図 4.11 に示す。

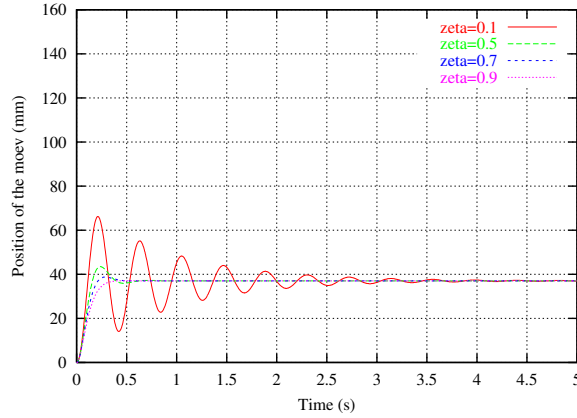


Fig. 4.8: Simulink における ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合)。

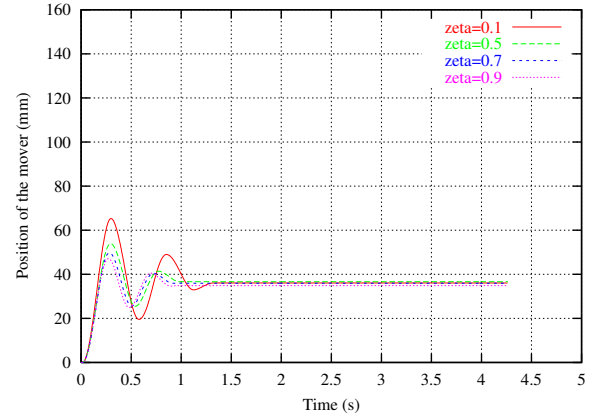


Fig. 4.9: ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合)。

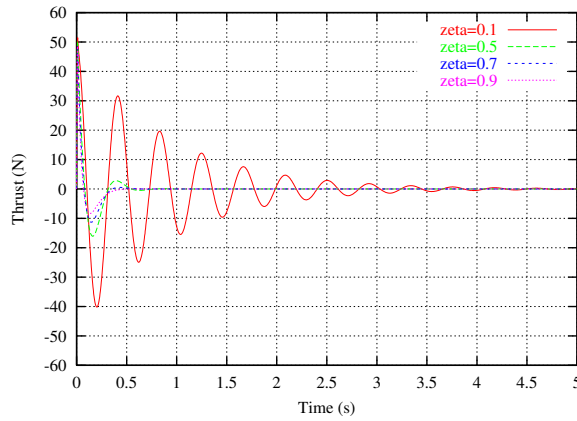


Fig. 4.10: Simulink における ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合)。

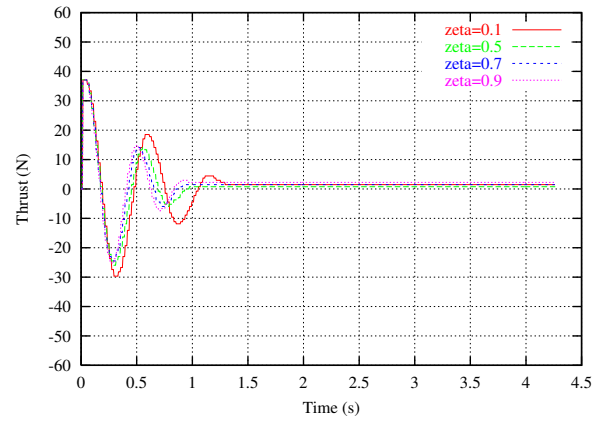


Fig. 4.11: ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合)。

これより、本論文で提案した力制御形インピーダンス制御システムを概ね試験機に実装出来たと言える。しかし、実際には可動子の位置変化および推力変化に共通して、 $\zeta = 0.1$ の場合は解析結果のほうが測定結果に対して振動的になった。解析結果は減衰係数 ζ の変化による粘性が忠実に再現されているが、実際には支持機構の摩擦や電源ケーブルの影響に起因する付加的な粘性が存在するために異なる結果となった。

電源を切り制御をかけない状態で試験機を手で動かしたときに、機器の持つ粘性を感じることが出来る。そのため、この特性の試験機を用いた時点で $\zeta = 0.1$ のような振動的な状況を作るとは難しい。しかし、実際にロボット用のアクチュエータとして使うことを考えた場合に、アクチュエータがこれだけ振動的に動くような状況はロボットにとって不要であるため、この点において解析と測定の結果が異なることは問題にならない。

また、 $\zeta \geq 0.5$ の場合に可動子の停止位置が解析結果と測定結果では多少異なった。これも試験機の持つ摩擦が原因であると考えられるため、以降の条件 2 において試験機の摩擦項を想定した解析を行い再評価した。

さらに、可動子の位置変化に注目すると、可動子が原点から離れて仮想バネダンパによって引き戻される位置は測定結果のほうが大きくなった。試験機の持つ摩擦を考慮すると、測定結果のほう

が遠い位置まで動くのは間違っているように思えるが、これは推力変化から考察出来る。Simulinkを用いた解析による推力変化は制御周期が非常に速いため正確に計算されているが、測定による推力変化を見ると一定時間で離散的に変化している。これはサーボアンプに対応するプログラムを用いて粘弾性要素を実装したことに原因がある。本論文では、アクチュエータの位置・速度情報等を用いて制御を行うプログラムをPCからシリアル転送されるコマンドに基づきサーボアンプ自身が処理している。そのため、プログラムの処理に数10msecの時間がかかってしまうために推力制御がSimulinkによる解析に比べて遅くなっている。サーボアンプ自身のサンプリング周期は μsec オーダーと十分な速さを持つため、今後はアナログ入出力でリアルタイム性のある通信をし、PC側で信号処理を行うことでアクチュエータを無駄時間なく制御することが早急な課題である。

また、 ω_n を大きくすると応答速度が大きくなることは解析および測定の両方で実証出来た。しかしながら、 $\omega_n \geq 15\text{rad/sec}$ にすると試験機が発振した。これも制御の処理時間に伴い位相余裕が失われていることに起因する問題であるが、今後上記の高速な信号処理を行うことでより大きな固有角周波数で制御出来ると考えている。

4.2.2 条件2 - 条件1から試験機の摩擦を考慮した再シミュレーション -

試験機の摩擦を考慮した Simulink による解析結果を試験機による測定結果と比較する。 $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.12 から図 4.15 に示す。次に、 $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.16 から図 4.19 に示す。

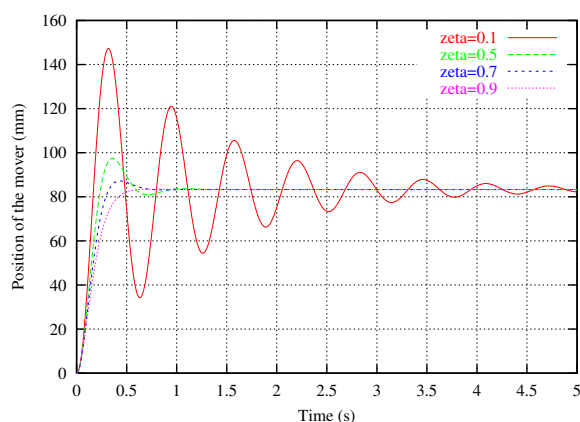


Fig. 4.12: 摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合)

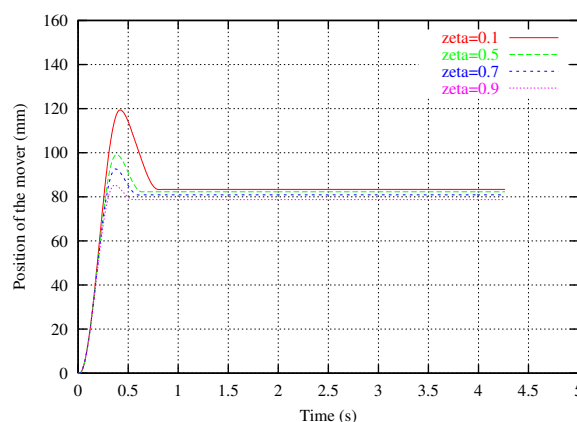


Fig. 4.13: ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

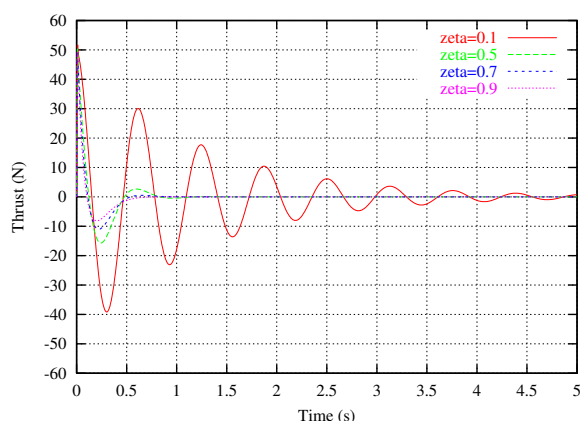


Fig. 4.14: 摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

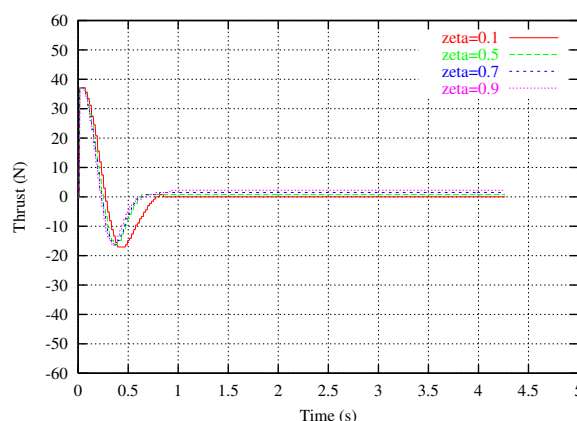


Fig. 4.15: ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

これより、試験機の摩擦を考慮することで条件1よりも解析結果を測定結果に近づけることが出来た。条件1, 2より、試験機に粘弾性を持たせた力制御形インピーダンス制御をほぼ解析通り実装出来たと言える。そして、解析と測定との誤差は試験機の支持機構の摩擦や電源ケーブルの影響に起因する付加的な粘性摩擦や粘性が主な原因であることが分かった。今後は、試験機のもつ摩擦や粘性の特性を補償する制御器を考慮する必要がある。

また、試験機は減衰係数 ζ を大きくしてもオーバーシュートが発生した。これも条件1と同様でサーボアンプへのコマンドのシリアル転送による無駄時間を含む制御を行ったことが原因である。4.1節で述べたように、推力指令の入力に対して指令にあう推力をサーボアンプが自動的に発生させる仕組みになっているため、アクチュエータにオーバーシュートを発生させないように力制御系にI-P制御系を用いることを実装出来なかった。今後、ハードウェアを改良して制御指令を行う際にはオーバーシュートを発生させない制御系にする必要がある。

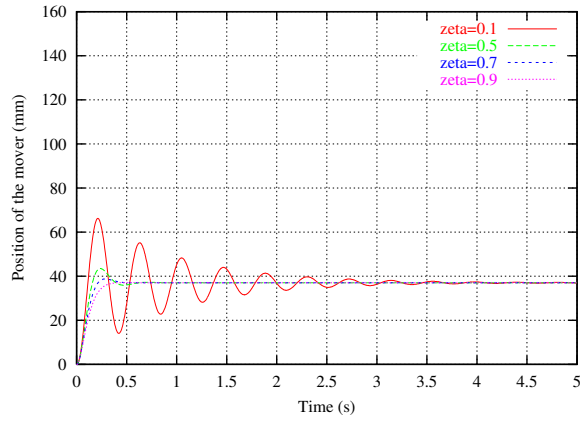


Fig. 4.16: 摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

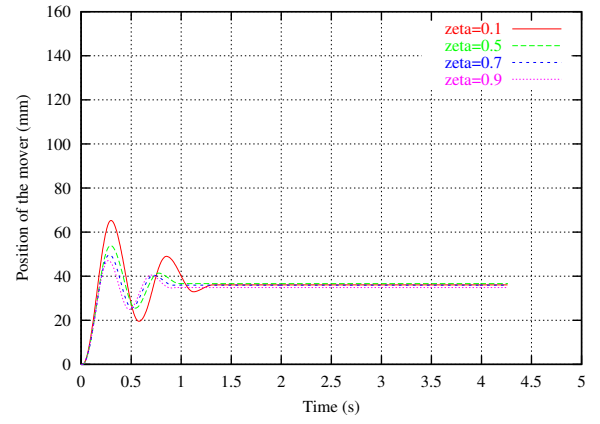


Fig. 4.17: ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

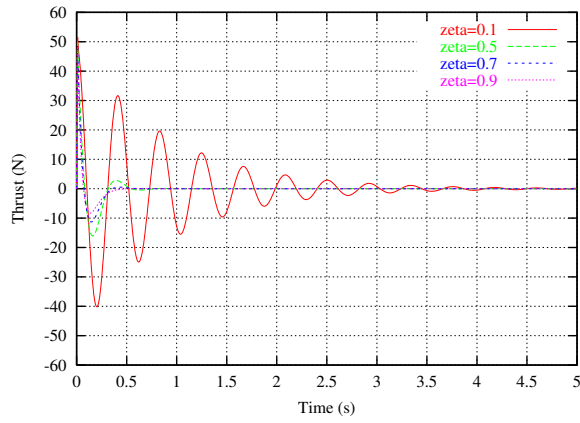


Fig. 4.18: 摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

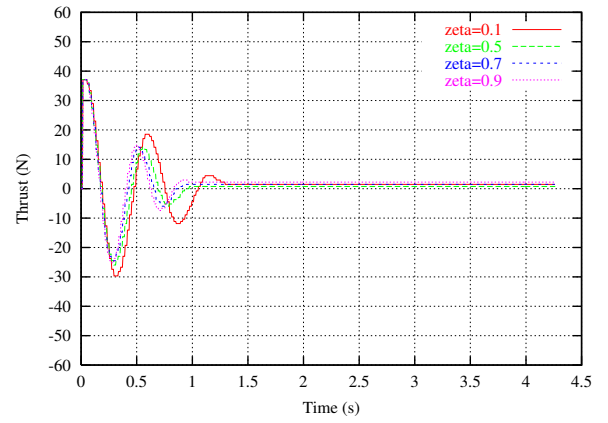


Fig. 4.19: ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

4.2.3 条件 3 - 試験機を基準値に移動させる指令を与えて粘弾性を確かめる -

試験機の可動子を原点にある状態から 100mm 先の目標値へ移動させる指令を与える。試験機には力指令を与える。つまり、原点から 100mm の場所を基準とし、原点まで可動子を押し戻した状態から基準点まで引き戻すような、バネを引っ張った状態から離す状況を想定している。ゆえに可動子は多少振動しながら基準点付近で停止する。

条件 1 と同様に、固有角周波数が $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ と $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合において、減衰係数を $\zeta = 0.1, 0.5, 0.7, 0.9$ と変化させたときの可動子の位置変化と推力変化を比較した。

初めに、 $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.20 から図 4.23 に示す。

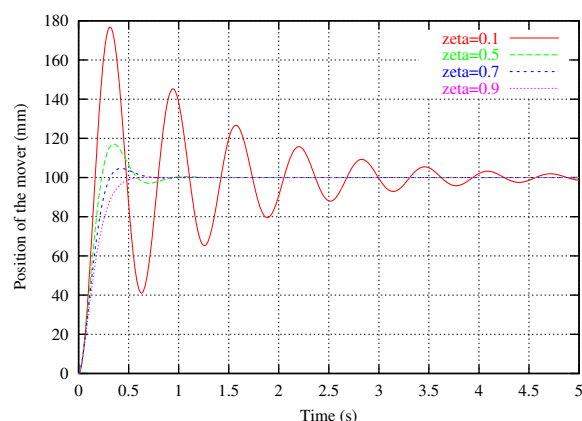


Fig. 4.20: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

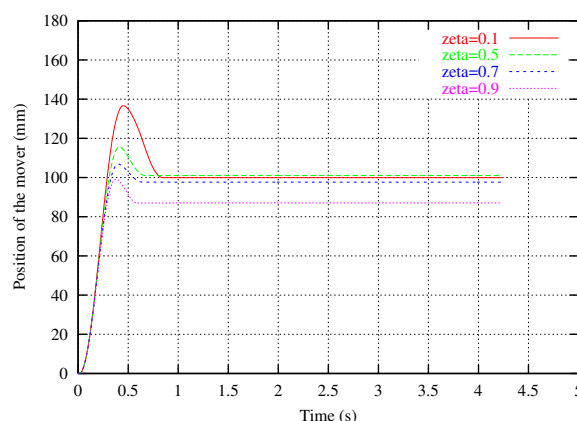


Fig. 4.21: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

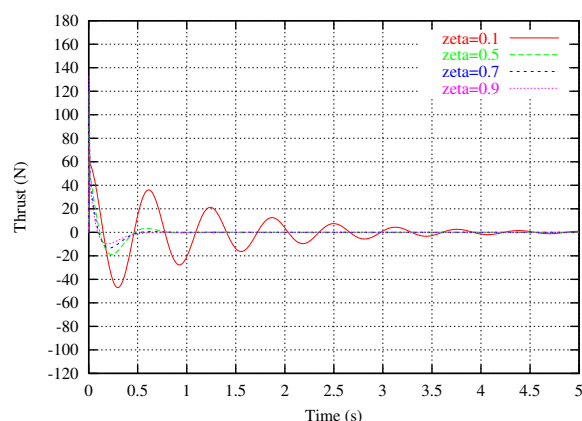


Fig. 4.22: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

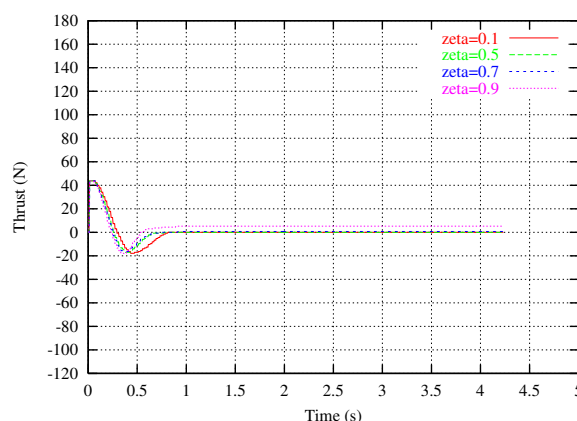


Fig. 4.23: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

次に、 $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.24 から図 4.27 に示す。

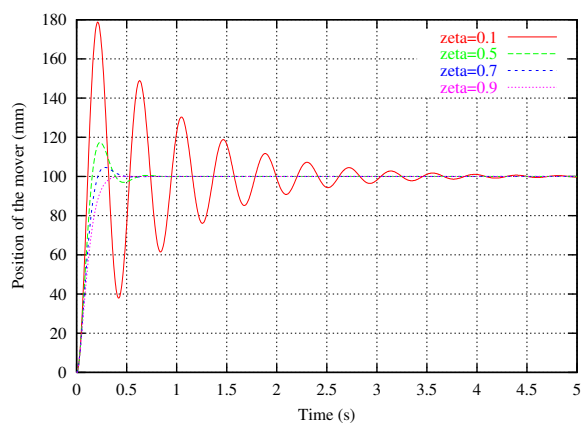


Fig. 4.24: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

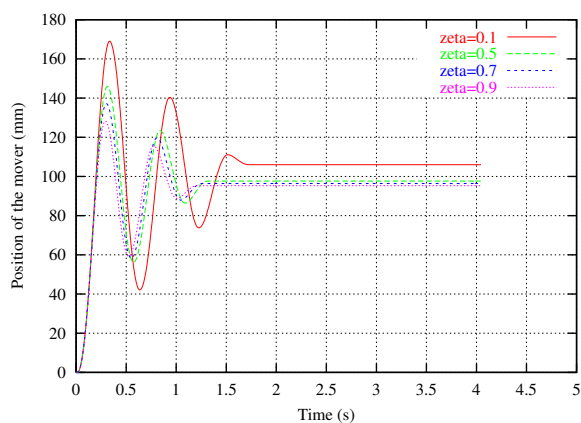


Fig. 4.25: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

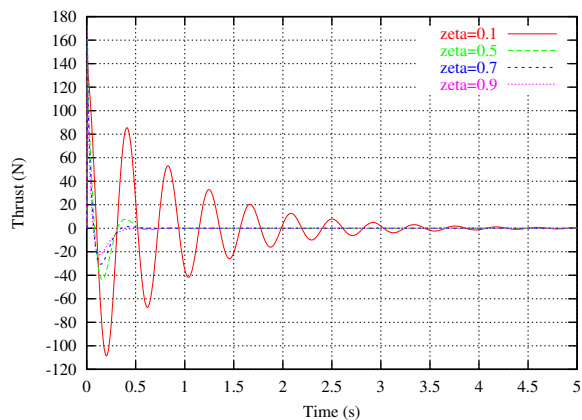


Fig. 4.26: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

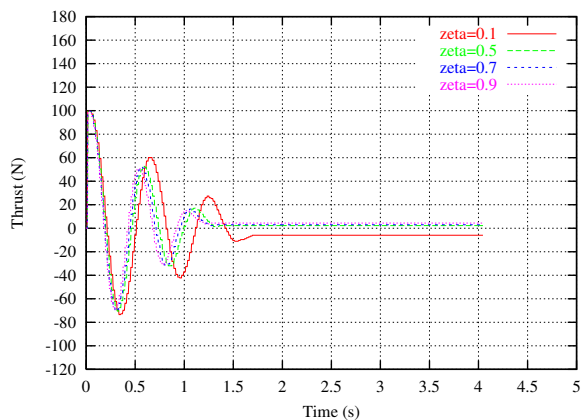


Fig. 4.27: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

また、この条件は基準位置へ移動することを目的としているため、位置制御系でも同じような動きを実現出来る。そこで図 3.2 のように位置制御系に粘弾性要素を加えた制御系における可動子の位置変化と推力変化を Simulink によって解析した。本論文において、図 3.2 によって構成される制御システムを力制御形インピーダンス制御に対して位置制御形インピーダンス制御と定義する。

初めに、 $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ における解析および力制御形インピーダンス制御系による測定結果を図 4.28 から図 4.31 に示す。力制御形インピーダンス制御の測定結果を再び載せることで位置制御形インピーダンス制御と比較しやすくする。

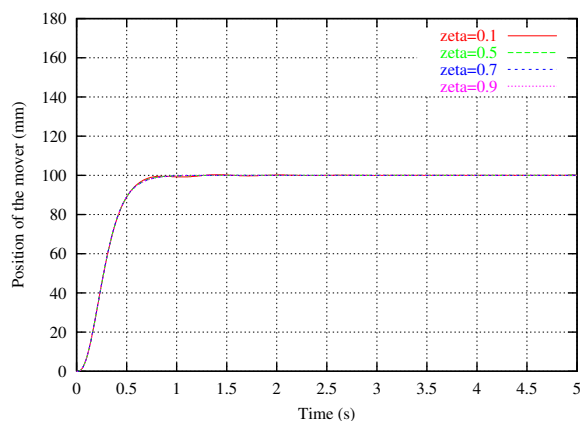


Fig. 4.28: 位置制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

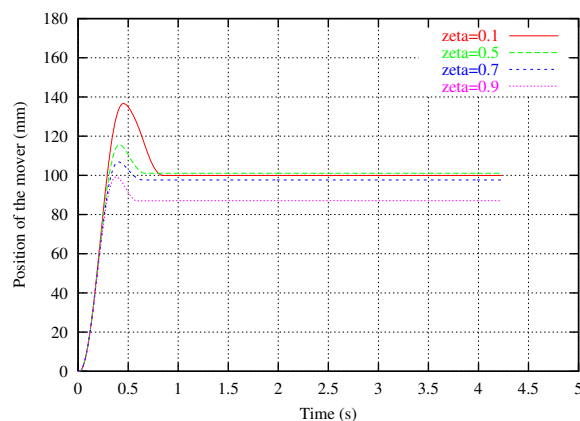


Fig. 4.29: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

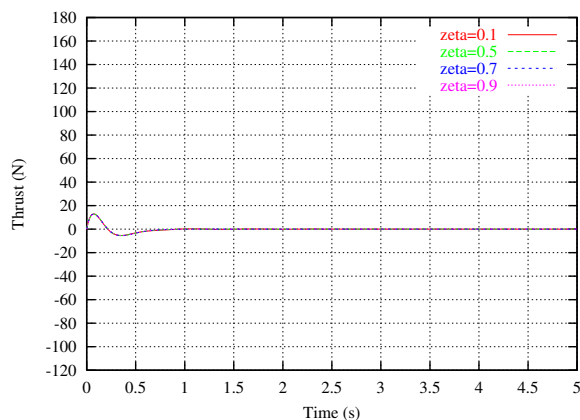


Fig. 4.30: 位置制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

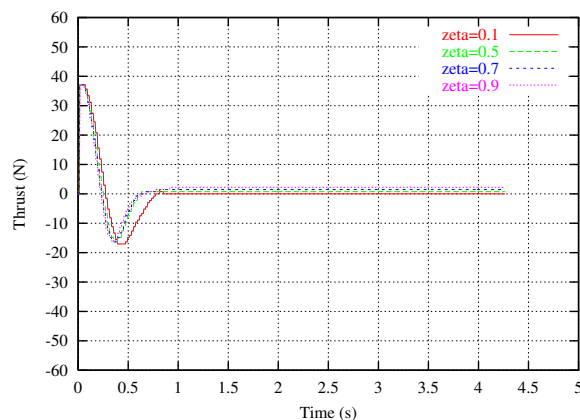


Fig. 4.31: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

続いて、 $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ における解析および力制御形インピーダンス制御による測定結果を図4.32から図4.35に示す。

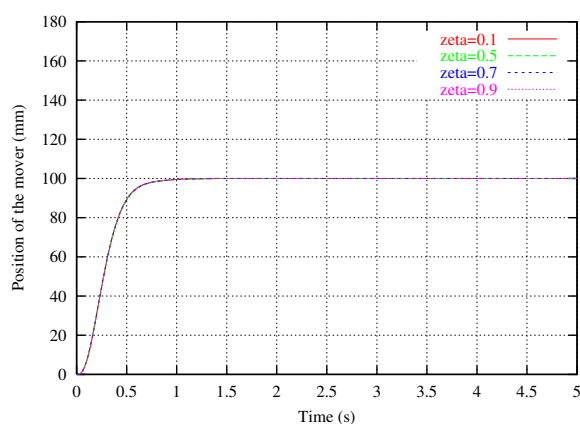


Fig. 4.32: 位置制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

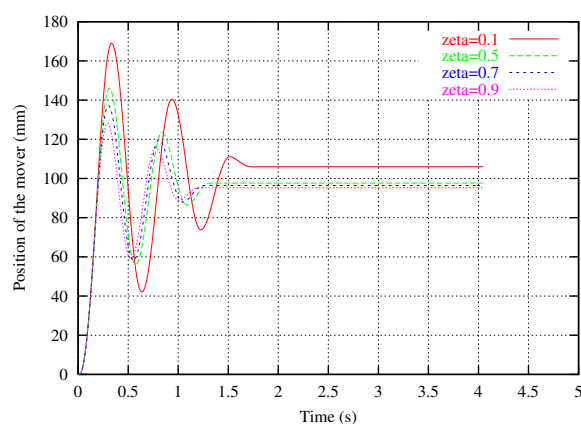


Fig. 4.33: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

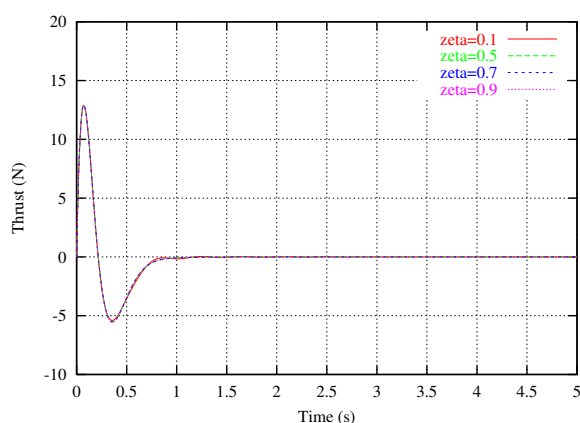


Fig. 4.34: 位置制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

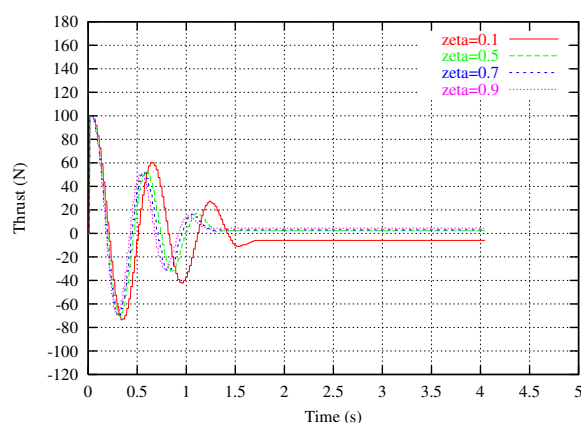


Fig. 4.35: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

この条件においても、力制御形インピーダンス制御システムを用いることで試験機単体で粘弾性を持つ動きを概ね実現することが出来た。しかし、条件1, 2と同様に試験機の持つ粘性や摩擦による差が存在した。

また、 $\zeta \geq 0.5$ の場合の可動子の位置変化を比較すると試験機のほうが振動的となった。これは、最初に試験機が目標値へ移動する際に発生した慣性力によるものと考えられる。可動子は6kg程度の重量があるために、移動の際に発生した慣性力が無視できなくなるが、ここでも制御周期が遅いために慣性力の影響を考慮した推力の制御が行えていない。

位置制御形インピーダンス制御による解析と力制御形インピーダンス制御の結果を比較すると、提案した力制御形インピーダンス制御システムの方が制御周期を速めることが出来る。位置制御形に比べてカスケード制御系によって制御器を構成していないことが制御周期を速くした。しかし、位置制御形インピーダンス制御は可動子の移動が遅いため発生する推力も小さくアクチュエータのオーバーシュートが発生しないのに対して、力制御形ではオーバーシュートが発生した。

4.2.4 条件4 - 条件3から試験機の摩擦を考慮した再シミュレーション -

条件2と同様に、条件3において試験機の摩擦項を考慮し、Simulinkを用いて解析した。

初めに、摩擦を考慮した力制御形インピーダンス制御の $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図4.36から図4.39に示す。次に、摩擦を考慮した力制御形インピーダンス制御の $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図4.40から図4.43に示す。

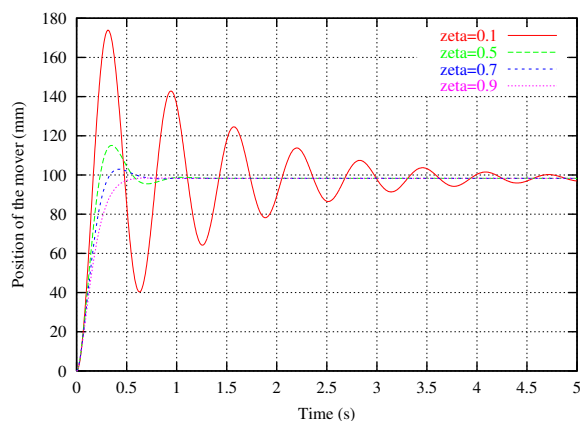


Fig. 4.36: 力制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

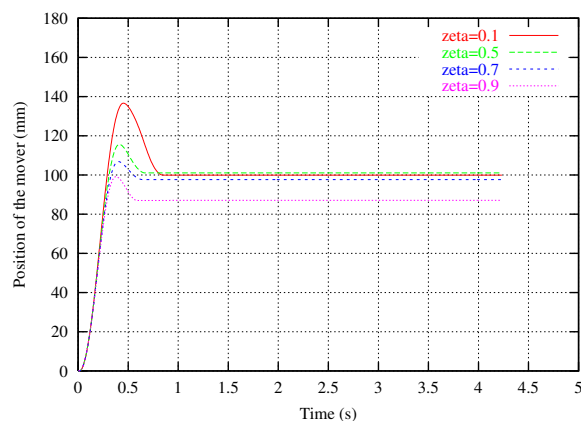


Fig. 4.37: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

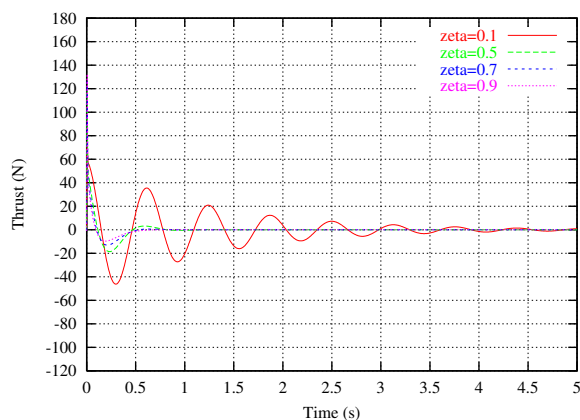


Fig. 4.38: 力制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

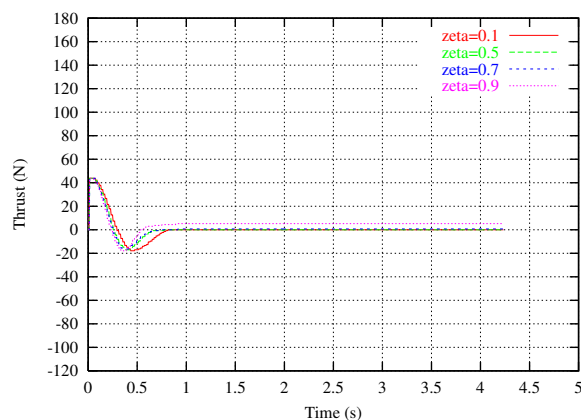


Fig. 4.39: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

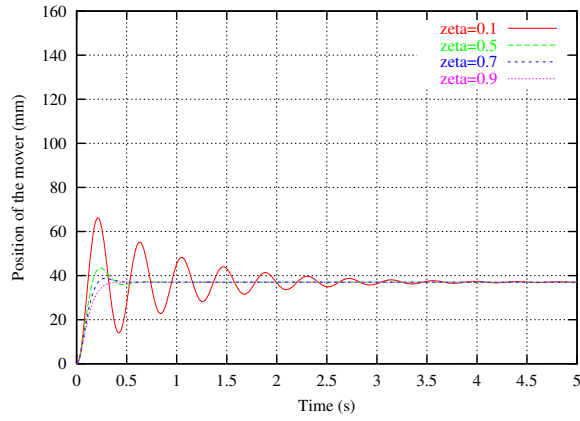


Fig. 4.40: 力制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

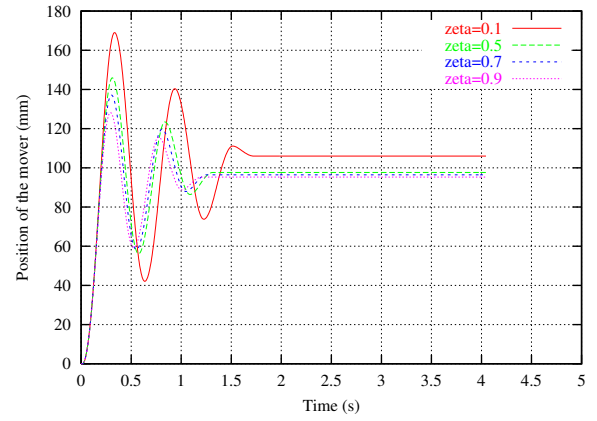


Fig. 4.41: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

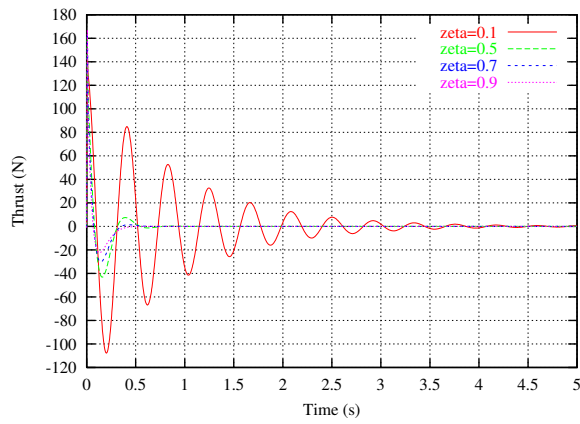


Fig. 4.42: 力制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

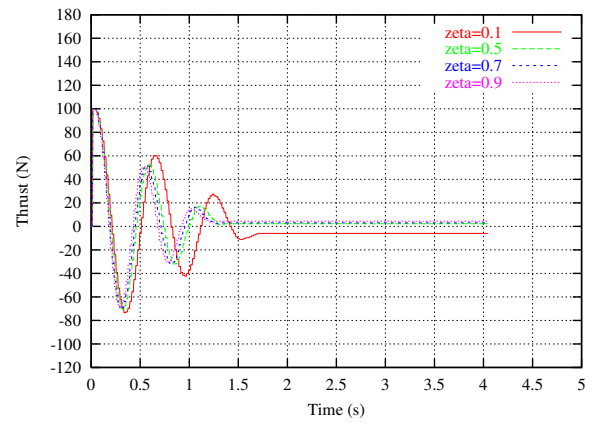


Fig. 4.43: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

続いて、摩擦を考慮した位置制御形インピーダンス制御の $\omega_n = 10\text{rad/sec}$ における解析結果と力制御形インピーダンス制御による測定結果を図 4.44 から図 4.47 に示す。

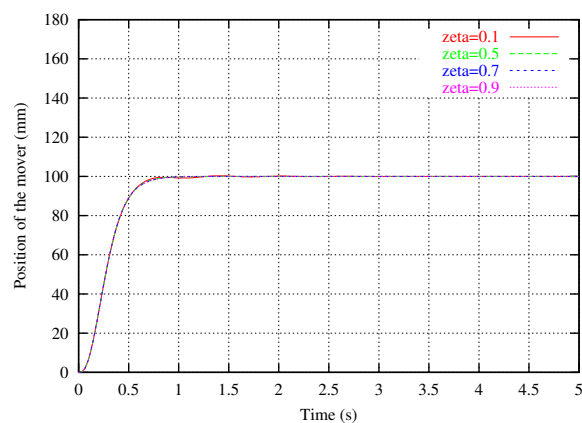


Fig. 4.44: 位置制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

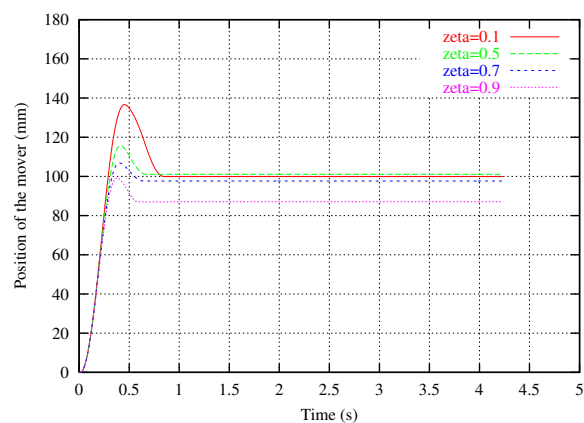


Fig. 4.45: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

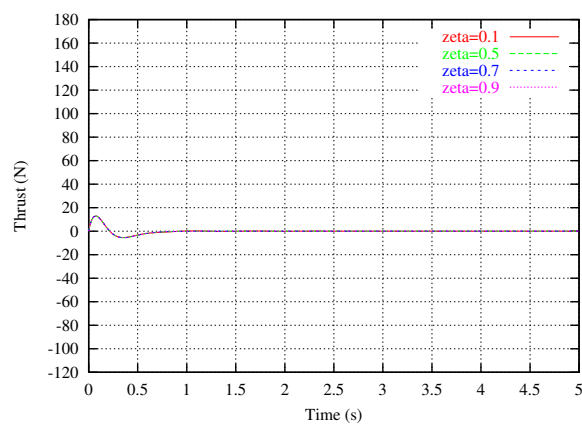


Fig. 4.46: 位置制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

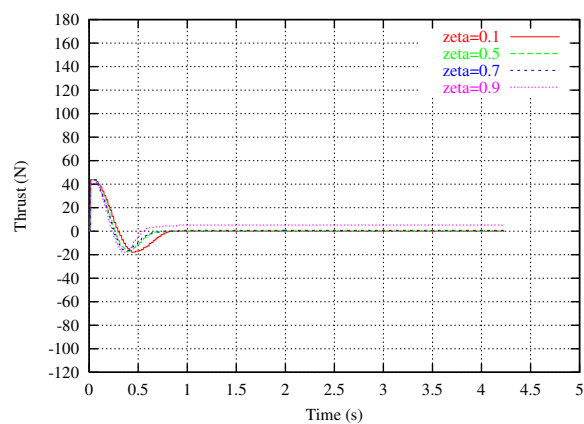


Fig. 4.47: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 10\text{rad/sec}$ の場合).

最後に、摩擦を考慮した位置制御形インピーダンス制御の $\omega_n = 15\text{rad/sec}$ における解析および測定結果を図 4.48 から図 4.51 に示す。

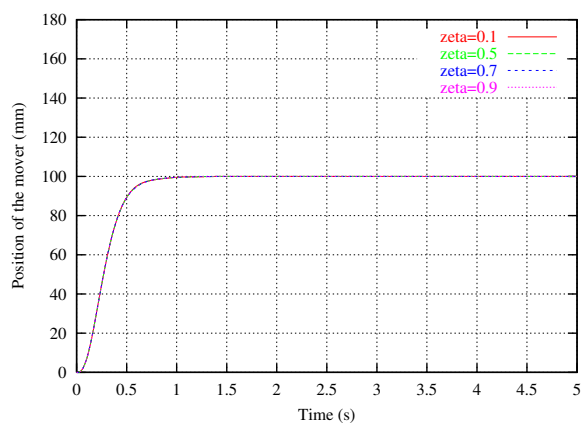


Fig. 4.48: 位置制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる可動子位置の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

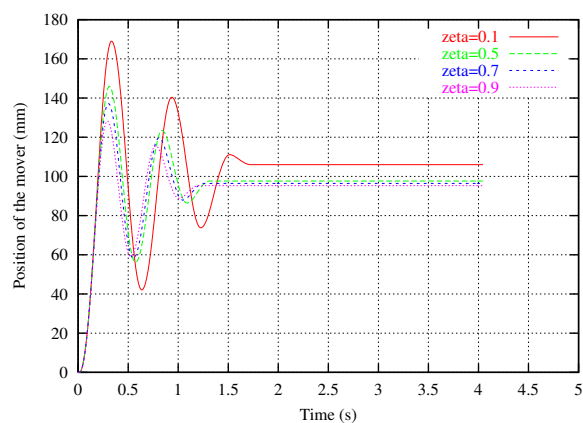


Fig. 4.49: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる可動子位置の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

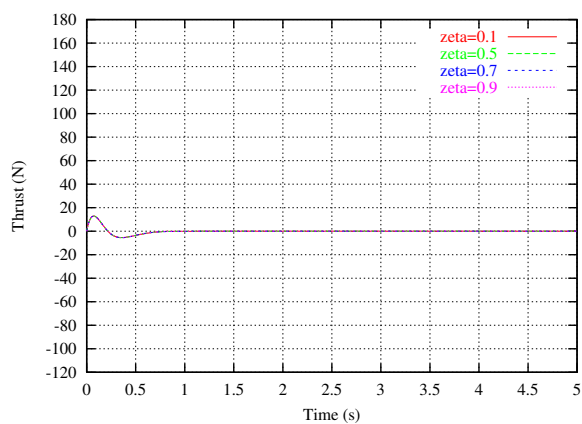


Fig. 4.50: 位置制御形インピーダンス制御で摩擦を考慮した場合の ζ の違いによる推力の解析結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

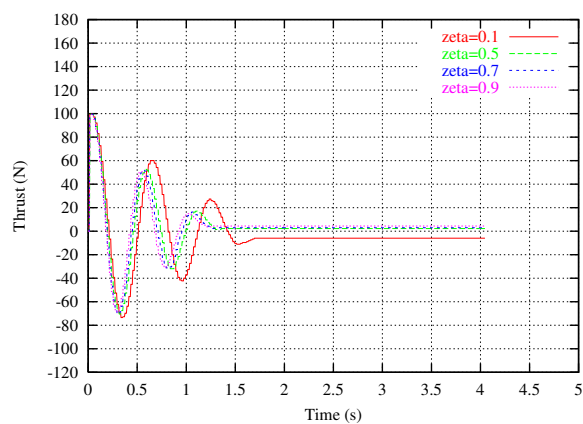


Fig. 4.51: 力制御形インピーダンス制御を用いた場合の ζ の違いによる推力の測定結果 ($\omega_n = 15\text{rad/sec}$ の場合).

試験機から発生する摩擦を考慮することで解析と測定結果は近い値となった。しかし、条件3, 4で考察した試験機の慣性力を抑制するためには、PCを用いた制御の試験機への実装が必要である。

以上より、2つの条件によって提案した力制御形インピーダンス制御の試験機への実装を評価した。これより、本論文で提案したシステムに用いて粘弾性要素を制御系に挿入することで、ソフトウェアで容易に粘弾性を変化させながらアクチュエータを駆動させることが出来るため、実際のバネやダンパなしにアクチュエータ単体の制御でヒトのような柔らかい動きを自在に模擬出来るようになることが確かめられた。さらに、本論文で提案したシステムを用いることで、よく使われている位置制御系よりも制御周期を短く出来ることが確かめられた。

問題点として、試験機の支持機構の摩擦や電源ケーブルの影響に起因する付加的な粘性摩擦や粘性が原因で解析と測定の間に誤差が生じた。今後は、試験機のもつ摩擦や粘性の特性を補償する制御器を考慮する必要がある。

また、本論文ではサーボアンプに制御処理を行わせたために、コマンドのシリアル転送の遅さから力制御に無駄時間を発生し、結果的にシミュレーションよりも実験系の制御周期が長くなってしまったことが挙げられる。そのため、試験機がシミュレーション通りに動作することは出来なかったが、PC側で制御のための信号処理を行い、アナログインタフェースを用いることでこの問題は解決出来る。その実現が当面の今後の課題である。

第5章 結論

本論文では、ヒューマノイドロボットの運動性能の向上のために我々生物の持つ二関節筋という筋肉に注目し二関節筋機構を持つロボットの製作が進められている中で、二関節筋用アクチュエータとしてコンパクトで大推力を発生可能なアクチュエータを目指して、リニア電磁アクチュエータの開発を行った。ロボット用のアクチュエータとして様々な種類のアクチュエータが開発されているが、本論文では制御の速さと正確さを持つ電磁アクチュエータに注目した。そして、直線的に推力を発生させる筋肉と同じように、ロボット用にリニア電磁アクチュエータを用いることで滑車等の部品が不要になるため装置全体をコンパクトに出来る利点を利用した。

現在製品化されているリニア電磁アクチュエータよりも、コンパクトで大推力なリニア電磁アクチュエータを目指して、永久磁石を Halbach 配列という特殊な配列方法で構成した空心型のリニア同期アクチュエータを製作した。製作したアクチュエータは電磁界解析とほぼ同じ静推力を発生させることが出来た。しかし、二関節筋用アクチュエータに必要な推力を発生させるために装置全体が大きくなり過ぎるという問題が起こった。そして、Halabach 配列という特殊な手法が機器の不安定さを露呈し、永久磁石の接着が剥がれる問題も起こった。

製作したリニア同期アクチュエータは使用できなかったが、別のリニア同期アクチュエータを用いて生物の持つ粘弾性をアクチュエータ単体で模擬するための制御手法に関して検討し、実装した。筋肉を模擬するアクチュエータのために推力指令の制御系を提案し、仮想バネ・ダンパによる粘弾性を制御系に組み込んだ力制御形インピーダンス制御システムを提案した。提案した制御系はバネ・ダンパ要素のパラメータをソフトウェアによって容易に調整出来るため、アクチュエータ単体で粘弾性を持つ動作を実現出来る。加えて、位置指令に粘弾性要素を加えたアクチュエータ制御も出来るという特徴を持つ。

提案した力制御形インピーダンス制御システムを実際の試験機に実装させ、解析とほぼ同じ特性を得ることが出来た。これにより、アクチュエータ単体で発生する推力の特性を変化させることが可能になるため、固い動きをするアクチュエータに生物の持つような滑らかさを容易に実装させることが可能になった。

第6章 今後の課題

6.1 アクチュエータのコンパクト化

本論文で製作した空心形のリニア同期アクチュエータではサイズと重量の両方の点からヒューマノイドロボット用として用いることは難しい。特に、コンパクト化・軽量化は非常に重要な課題となる。電磁アクチュエータの制御の速さや正確性はHRTにとっても非常に有効であると考えるが、コンパクト化に関しては非常に難しい問題である。

金弘中博士の開発したトンネルアクチュエータは図 4.1 にあるように精密機器用のアクチュエータとして開発されたが、装置をコンパクトにする可能性も秘めている。本論文で述べたように、電磁アクチュエータを考えた際にも鉄心形に比べて空心形が必ずコンパクト化・軽量化につながるとは限らない。そして、今日様々な企業や研究グループによって本論文で提案したような形状のリニア電磁アクチュエータが開発されており、それらを用いることのほうが新しいアクチュエータを開発するよりも効率的かもしれない。しかし、本研究で提案したリニアセンサや電源ケーブルの配置方法などはまだ世の中で発表されていない独自のものと考えられるため、今後のロボット用アクチュエータに積極的に採用することを目指す。

6.2 PC 側で制御することによる制御処理の短縮化

第4章で考察したとおり、本論文で用いた試験機への実装手法はサーボアンプで制御処理を行うために制御にかかる処理時間が長くなってしまい、測定結果と解析結果には誤差が生じた。

その解決のために、力制御形インピーダンス制御システムの信号処理をPC側で行い、処理時間の短縮を目指す。サーボアンプ自身のサンプリング周期は μsec オーダと十分な速さを持つため、今後は図 6.1 のようにアナログ入出力でリアルタイム性のある通信をし、PC 側で信号処理を行うことでアクチュエータを無駄時間なく制御することが早急な課題である。

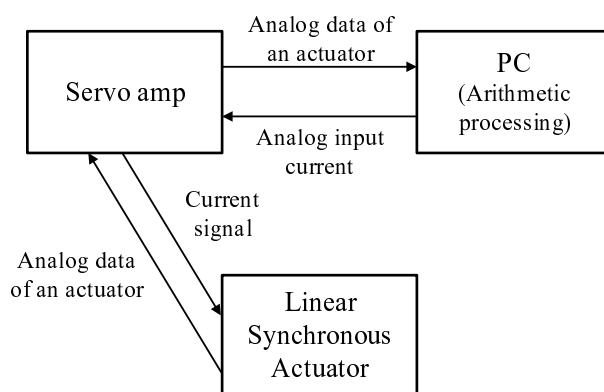


Fig. 6.1: PC 側で演算処理を行う制御概念図.

6.3 機器の持つ摩擦や粘性の影響を考慮した力制御システム

本論文において実装した力制御形インピーダンス制御システムでは、試験機の支持機構の摩擦や電源ケーブルの影響に起因する付加的な粘性が制御システムに影響した。

これに関しては、次の図 6.2 に粘性を考慮する制御項を組み込むことで改善できると考えている。図 6.2 中の粘弾性補正項の一例として以下の伝達関数が考えられる。

$$\hat{G}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.1)$$

本論文で提案した力制御形インピーダンス制御システムでは、外乱オブザーバの情報を単純にフィードバックする手法では粘弾性を抑制した固い制御系になってしまう。そこで図 6.2 中にある粘弾性を表現する伝達関数 $\hat{G}(s)$ を介して推力指令に補正することで、システムの粘弾性を設計の意図に合わせつつ摩擦や機械の持つ粘性を抑制出来ると考える。

今後、PC を用いて現在よりも速い制御周期で実際にアクチュエータを制御する際に、図 6.2 のようなシステムの評価を行う。

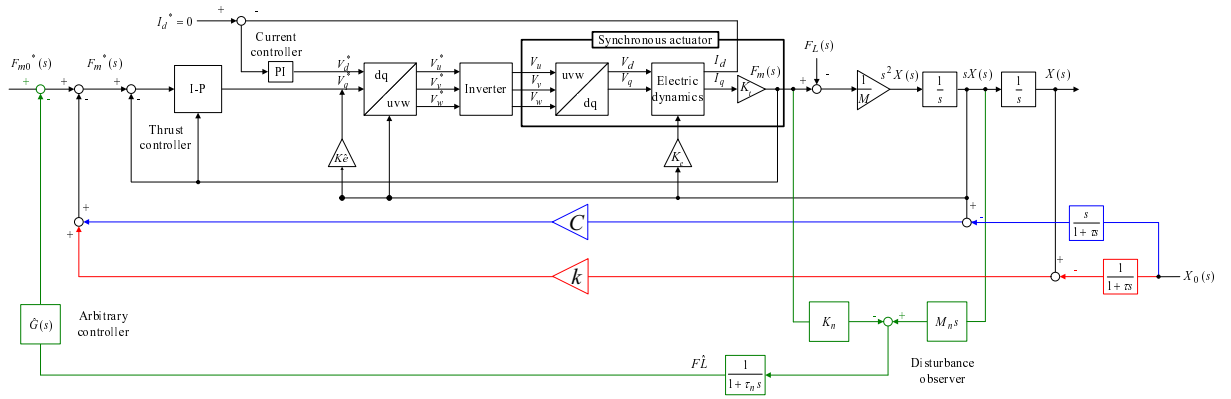


Fig. 6.2: 機器の持つ粘性を補償した力制御形インピーダンス制御のブロック線図。

6.4 二関節筋機構を備えたロボットの総合的な制御

本論文で提唱した、力制御系に粘弾性要素を実装した制御手法によって電磁アクチュエータを制御すれば、様々な種類の電磁アクチュエータにおいて仮想バネ・ダンパを持った動きが実現できる。ヒューマノイドロボットに用いる電磁アクチュエータ一つひとつに提唱した制御手法を用いれば、従来のロボットよりも柔軟な動きを実際のバネ・ダンパなしにコンパクトに実装できるようになる。

将来的には、本論文で提唱した力制御形インピーダンス制御システムを基盤として、二関節筋を備えたロボットを回転型モータとリニア電磁アクチュエータを用いた制御にて実現したい。例えばウマが歩くときと走るときの動きの質の違いを、二関節筋機構の特徴を生かした力制御システムによって一台のハードウェアで実現することを目指す。

参考文献

- [1] 熊本水頼, “ヒューマノイドロボット工学,” 東京電機大学出版局, 2006
- [2] 熊本水頼, “協調制御モデル -Animal Inspired Technologies-,” 精密工学会第1回 Workshop, 2005
精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 HP : <http://www.air-dawn.net/>
- [3] 門田健志, 鈴木健也, 深井善朗, 小田高広, “二関節筋装備基本モデル「HIPRO」-VEA を用いたロボットアームによる二関節筋特性評価-,” 精密工学会第1回 Workshop, 2005
- [4] 藤川智彦, 大島徹, “三対6筋を装備したリンクモデルにおける機械的特性,” 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 第8回例会, 2006
- [5] 藤川智彦, 大島徹, “筋配列から見た進化のロボット工学的評価,” 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 第6回例会, 日本人類学会 進化人類分科会 第16回 シンポジウム, 2006
- [6] 吉田憲吾, 堀洋一, “二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームに関する基礎研究,” 東京大学卒業論文, pp.21-24, 2005
- [7] 則次俊郎, “空気圧ゴム人工筋の開発と人間支援ロボットへの応用,” 日本 AEM 学会誌 Vol14, No.2, pp.186-196, 2006
- [8] 鈴森康一, “マイクロロボット用アクチュエータ,” 日本 AEM 学会誌 Vol14, No.2, pp.168-173, 2006
- [9] 山本裕介, 古関隆章, “二関節筋拮抗動作のための Halbach 磁石を用いた電磁アクチュエータの提案と概念設計,” 東京大学卒業論文, pp.-., 2006
- [10] HITACHI:ニュースリリース, 2004.4.9
<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2004/04/0409.html>
- [11] 趙 莉, 古関隆章: “オブザーバからの外乱力推定信号を用いた永久磁石型リニア・アクチュエータの駆動制御,” 東京大学卒業論文, 2005
- [12] 引原隆士, 木村紀之, 千葉明, 大橋俊介: “パワーエレクトロニクス,” 朝倉書店, 2000
- [13] Yoichi Hori: “Robust Motion Control based on a Two-Degrees-Of-Freedom Servosystem, Advanced Robotics,” *VSP and Robotic Society of Japan*, Vol.7, No.6, pp.525-546, 1993
- [14] 古関隆章, 劉江桁: “モータドライブ・磁気浮上実験の「とりあえずの制御系設計」:実験室からの報告,” 電気学会 リニアドライブ研究会, 2001

発表文献

- [1] 福正博之, 山本裕介, 古関隆章, “Halbach 永久磁石を利用した二関節筋駆動用アクチュエータの概念設計と基本特性の評価,” 平成 18 年電気学会全国大会 (5-050), 2006.3
- [2] 福正博之, 山本裕介, 古関隆章, “二関節筋電磁アクチュエータの磁気回路設計と静推力特性,” 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, pp.19-22, 2006.5
- [3] Hiroyuki Fukusho, Takafumi Koseki, Houng-Joong KIM, and Hitoshi Shibata, “Design method and fundamental calculation of a light PM-type linear synchronous actuator for producing large thrust,” The 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems, DS4F1-13, 2006.11
- [4] 福正博之, 古関隆章, “ロボットアーム駆動用リニア同期アクチュエータの負荷力オブザーバを用いた剛性・減衰係数の制御,” SPC-06-171/LD-06-73, 2006.12
- [5] Hiroyuki Fukusho, Takafumi Koseki, “Control of a PM-type linear synchronous actuator for an artificial muscle with arbitrary stiffness and damping emulation,” The 8th Seoul National University - The University of Tokyo Joint Seminar on Electrical Engineering, 21st-Century COE Workshop, 2007.2 (発表予定)

謝辞

本論文をまとめるにあたり、以下の多くの方々にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

指導教員である古関 隆章助教授には、私が古関研究室に入った時から丁寧に御指導を頂きました。打ち合わせの場では多くの助言を頂きまして、その都度研究への意欲と自分のやるべきことを導いてくださいました。さらには、学会で発表する機会を設けてくださるなど、多くの貴重な経験をさせて頂きました。誠にありがとうございました。

日立製作所 日立研究所 金 弘中様、柴田 均様、中津川 潤之介様をはじめ多くの方々には、私の提案および設計したリニア同期アクチュエータを実際に製作して頂きました。加えて、多くの技術指導をして頂きました。誠にありがとうございました。

信越化学工業株式会社 青山 康明様には、アクチュエータの設計及び製作の際に永久磁石の特性や磁気回路構成などの専門的な知識を教えて頂きました。誠にありがとうございました。

堀 洋一教授には、私の研究に関して常に広い視野からご指導を頂きました。また、堀教授をはじめとする電気系の先生方には、博士課程入学試験や修士輪講において、本研究の方向性を定めるのに非常に重要なご指摘を頂きました。誠にありがとうございました。

京都大学名誉教授 熊本 水頼先生をはじめとする、精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会の委員会の皆様には、私が研究を進めるにあたり数多くの知識を教えて頂きました。さらに、皆様の行われている研究から私の研究の方向性を定めるのに重要なご指摘を頂きました。誠にありがとうございました。

技術職員の渋谷 武夫様、内田 利之様そして高田 康宏様には試験機製作において重要なご指摘を頂きました。そして、工作機械の使い方も教えて頂きました。誠にありがとうございました。

博士課程2年の野崎 雄一郎さんには学会論文の書き方、発表の仕方をはじめ本研究に関して重要なご指摘を頂きました。また、毎日の帰り道や学会出張先で多くの時間を過ごすことが出来、非常に充実した2年間の研究生生活を共に過ごすことが出来ました。

修士2年の大山 大介君、は非常にマイペースな方でした。大山君が研究されていた研究は、研究分野も異なるため、よく分からなかったですが、研究室内で、共に楽しい時間を過ごすことが出来たと思います。同じく修士2年の山口 瑛史君には、私が東京大学に修士の学生として入学した時から非常にお世話になりました。私が早くに研究室になじむことが出来たのは山口君に気を遣って頂いたおかげであり感謝申し上げます。また、お互いの研究に関して議論したり同時期に学会論文を書くなど多くの苦労を共にしました。

修士1年の鈴木 武海君は何事に対しても熱く真面目に取り組む性格で、いつも研究室を盛り上げるムードメーカーとして共に楽しく過ごすことが出来ました。さらに、非常に博識で私の本研究においてもたくさんのことを教えて頂きました。鈴木君に色々教えて頂いたおかげで、ここまで本研究を進めることが出来ました。感謝申し上げます。同じく修士1年の中田 貴之君は研究室の飲み会などでみんなを盛り上げて頂きました。研究室内でも楽しく過ごすことが出来ました。同じく修士1年の原 和弘君は、私が古関研究室に入ったと同時に学部4年生として研究室に入り2年間に共にしました。研究分野は異なっていたものの、彼の研究に対する姿勢を見ていつも刺激を受けました。

学部4年の Cheung Cheuk Kei Brian 君は、日本語を非常に上手に使い積極的にコミュニケーションをとってくれました。おかげで私も非常に話しやすく、1年間に共に楽しく過ごすことが出

来ました。さらに、研究熱心な姿勢に刺激を受けました。

そして、野崎さんをはじめとする研究室の鉄道が好きな方々には、覚えきれないほどの多くの鉄道に関する知識を教えて貰いました。

古関研究室秘書の南 佳子様には、学会出張の手続きなどの事務作業を行って頂いただけでなく、楽しい話で研究室全体を明るく盛り上げて頂きました。

堀研究室 修士2年の吉田 憲吾君にはロボットへの生体機構の応用という同じ研究分野で研究を進める中で、知識を教えて頂いたり意見を交わすことで本論文をまとめるにあたりお世話になりました。

昨年度古関研究室でお世話になった方々や他研究室の方々にも感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

最後に、修士の2年間東京で一人暮らしをしながら研究を進めるにあたり、生活支援および精神的に支えて頂いた親族と友人に感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

平成19年2月2日

福 正 博 之