

平成 23 年度 修士学位論文

受動要素を用いたアクチュエータシステムの構築と
エネルギー蓄積及び開放による制御手法

指導教員 池浦良淳 教授



三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

システム設計研究室

三島 一洋

三重大学大学院 工学研究科

目次

第1章 緒言

1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	5
1.3 本論文の構成	5

第2章 人間の筋特性

2.1 肘関節	7
2.1.1 肘関節の構造と動き	7
2.1.2 肘関節の筋肉の配置	7
2.1.3 筋の性質	8
2.2 人間の筋骨格特性	9

第3章 提案システムの構造とその動作原理

3.1 エネルギー蓄積型アクチュエータシステムの構造と動作原理	13
3.1.1 エネルギー蓄積型アクチュエータシステムの構造	13
3.1.2 提案システムの動作原理	15
3.2 提案システムの制御方法	18
3.2.1 提案システムの軸回りの運動方程式	18
3.3 粘性変化による提案システムの制御手法	19
3.3.1 粘性制御手法	19
3.3.2 粘性と平衡点の同時制御手法	21
3.4 シミュレーションによる制御理論の検証	22

3.4.1	躍度最小軌道.....	22
3.4.2	シミュレーションを用いた粘性制御によるアーム制御の有効性検証.....	24
第4章 粘性減衰ダンパーの性能評価		
4.1	粘性減衰ダンパーの構築.....	28
4.2	粘性同定実験.....	30
4.2.1	実験目的.....	30
4.2.2	粘性同定実験の準備.....	31
4.2.3	粘性同定実験方法.....	32
4.2.4	粘性同定実験における粘性の導出方法.....	33
4.2.5	粘性同定実験結果.....	37
4.3	カルマンフィルタを用いた粘性値の推定.....	45
4.3.1	拡張カルマンフィルタのアルゴリズム.....	45
4.3.2	粘性減衰ダンパーへの適用.....	47
4.3.3	拡張カルマンフィルタによるパラメータの推定.....	49
第5章 結言		
5.1	まとめ.....	53
5.2	今後の課題.....	54
参考文献.....		55
謝辞.....		58

第1章

緒言

1.1 研究背景

介護者負担軽減のための人間支援機器の研究開発が盛んに行われている。現在の日本では晩婚化や生活への不安などの要因による出生率の低下により少子高齢化や医療技術の進歩により超高齢化社会になると予想されている。Fig.1.1は各年度における要支援、要介護者の推移を示しており、Fig.1.2は訪問介護の従事者と事業所数の推移を示している。これを見てわかるように、超高齢化社会により介護者の増加が見込まれている中で、介護に携わる介護従事者の数は近年横ばいの状況であり、介護に携わる人たちの負担は深刻な問題となってきた^{[1][2]}。そのため介護従事者の負担軽減する人間支援機器の開発は介護者の負担を減らせるだけでなく被介護者自身の精神的負担を減少させ、双方の生活の質の向上につながると考えられる。

その中で、現在注目されているのが介護用ロボットやロボットスーツである^{[3][4][5][6]}。医療や介護の現場では女性介護者の割合が高く、被介護者をベットから起こす際や車椅子に乗せる際など被介護者を持ち上げるなどの力仕事が多いのが現状である。そのため、介護者負担の軽減を目指した支援機器の開発が注目されている。Fig.1.3で示される介護支援ロボットは株式会社日本ロジックマシンが開発した百合菜でベッドから車椅子への移乗などの介護者を抱きかかえる必要がある重労働をする際の負担を軽減できる介護ロボット

である^[7]。これを用いることにより寝たきり患者を車椅子へ移乗させることが可能となり、これまで二人がかりで作業していた重労働でも、一人の介護士とロボットによる協調作業が実現できれば介護士の省人化と大幅な負担軽減につながる。また、Fig.1.4に示すようなサイバードイン製のHALのようなロボットスーツは、例えば車椅子の生活を余儀なくされた人の歩行をサポートするのに役立ち、筋肉が衰えた高齢者でも通常では持てないような重量の物も持てるようになり、筋肉の衰えや脊髄損傷などによる身体の障害に対しても動作の支援を行うことができるロボットである^{[8][9][10]}。この場合、人間がこのアシスト装置を装着するので、安全性だけでなく、装着者の意思通りにロボットが動作できるかが重要な問題となってくる。

その他の研究室としては、例えば八木らは天井に取り付けたロボットアームを携帯電話を用いて遠隔操作し遠隔介護を行うロボットアームを開発したが、携帯電話による遠隔介護では携帯電話へのフィードバック映像が送られてくるまでに時間がかかることでタイムラグの大きさが課題として残っている^[11]。また、本間らは介護者の負担が大きい作業の一つである排泄における介護に着目し介護現場からヒアリングを行い、トイレアシストシステムの開発をして実証試験を行うことで、負担の軽減については目標を達成できたが、操作タスクが増えることにより被介護者から手や目が離れることが問題視され操作タスクの簡略化の問題が残っている^[12]。遠山らは介護者が被介護者をベッドから車椅子に移す動作を例に挙げ、介護者の負担を減少させることを目的としたアシストスーツの開発^[13]を行ったが、関節の位置の移動によるずれの修正に関しての課題が残っている。本田らは、ロボットは今後人間に直接接触して作業を行うことが多くなると考え、高い安定性と柔軟性を実現する手法として低圧駆動型空気圧アクチュエータを用いた5指ロボットハンドを開発した。制御系には人体の筋構造である拮抗筋の関係に着目し筋拮抗比と筋活性度という概念を用いて位置制御を行ったが、空気圧アクチュエータのヒステリシスによる偏差が残る課題が残っている^[14]。和田らは介護ロボットについて肉体的な介護ではなく精神面のサ

ポートに着目しロボットセラピーを提案し、ロボットセラピーにより被験者に笑顔が増えたという報告や一種のコミュニケーションツールとしても運用できることが確認され、介護ロボットにおける精神面サポートという新たな可能性を示した^[15]。佐々木らは下肢のリハビリテーションにロボットの技術を応用した空気圧アクチュエータを用いたマスタースレーブ型訓練装置を開発し、マスター側の歩行動作をスレーブ側で再現することで歩行矯正が可能であることを示したが装置の小型の課題が残っている^[16]。

以上より従来研究もそれぞれに成果をあげてはいるが問題点も多い。その中でも装置の大型化という問題は家庭内などあまり広くない場所での使用に問題があり人を抱き上げる力を発揮でき尚且つ如何に装置自体を小型軽量にするのは重要な課題である。



Fig1.1 要支援、要介護者の推移^[1]

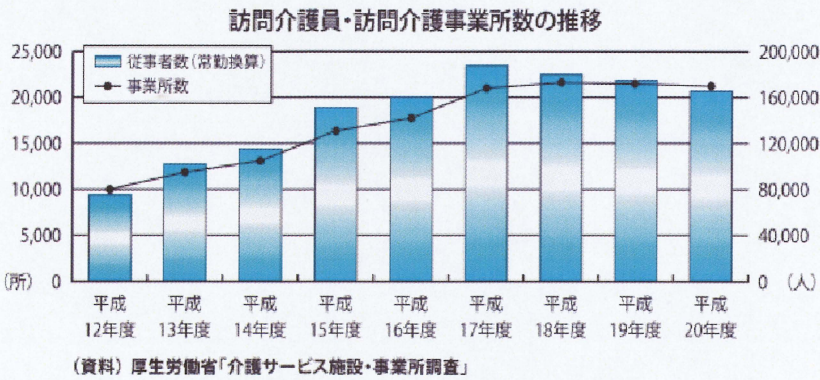


Fig1.2 訪問介護者、訪問介護事業所数の推移^[2]

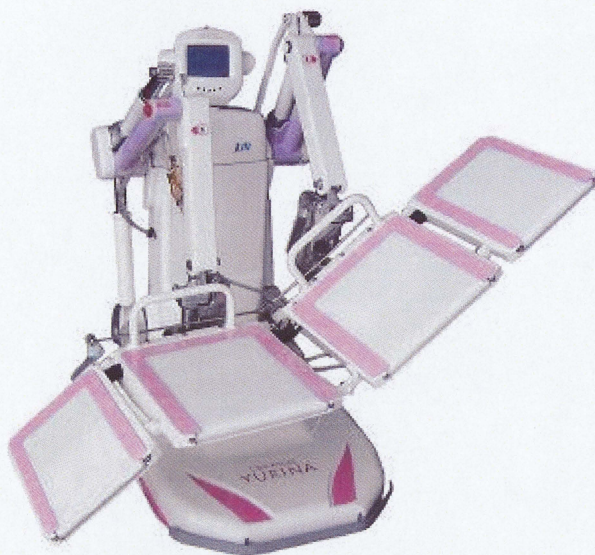


Fig.1.3 百合菜^[7]

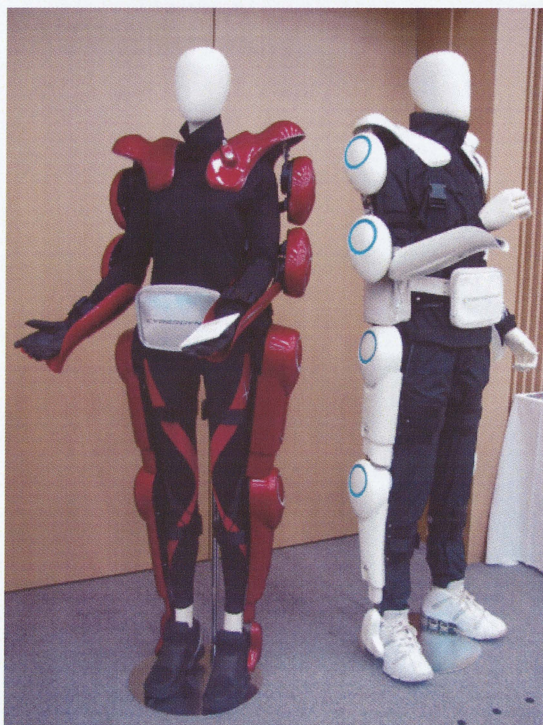


Fig.1.4 パワーアシストスーツ(HAL)^[8]

1.2 研究目的

介護ロボットには、人を抱き上げる大きな力を発生すると同時に、介護者が抱き上げを行うのと同様の速さが求められる。実際の介護現場で使用してもらうには、現状と同じ作業時間で同じ作業を、作業者の負担を軽減して行う必要があるためである。従来の電動アクチュエータによる駆動システムでは、大きな力を発生するには高い減速比のギアを使用する必要があり、素早い動作の実現が困難になる。また、大きな力を発生し、素早い動作を実現するためには、低減速比のギアを使用し、高トルクを発生できる大型アクチュエータを使用する必要がある。このような大型アクチュエータを使用するとアームも大型化することにより、介護ロボット自身も大型化してしまい実際の介護現場で介護ロボットを運用することを考えたとき、活動できるスペースは限られている場合が多く運用を難しくする。そのため、介護ロボットには大きな力を発揮することはもちろんであるが、より小型で素早い動作も可能であることが求められる。

そこで、本研究では大型の高トルクアクチュエータに頼らない新しいアクチュエータシステムとして、ばねと小型アクチュエータ、粘性減衰ダンパーを組み合わせたエネルギー蓄積型アクチュエータシステムを提案する。エネルギー蓄積とは、ばねを伸ばした状態をエネルギーを蓄積させた状態と定義し、ばねが縮もうとする弾性力を利用して駆動し、粘性減衰ダンパーで動きを制御する構造である。ばねにエネルギーを蓄え、その力を解放することにより大きな力と素早い動作を実現可能とするアクチュエータシステムを提案し、提案するエネルギー蓄積型アクチュエータシステムの有効性の検証を目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第2章で本研究で提案するシステムの構造の参考にした肘関節について筋肉の配置や構造について述べる。第3章では受動要素を用いたエネルギー蓄積型アクチュエータシステムの構成、動作原理、制御理論について模式図と運動方程式を用いて述べ、提案する制御方法の有効性をシミュレーションを用いて検証している。第4章では粘性減衰ダンパーの製作と粘性同定実験から粘性の近似値の算出とカルマンフィルタを用いたパラメータの推定について述べる。最後に、第5章では本研究のまとめと今後の研究課題について述べる。

第 2 章

人間の筋特性

本章では本研究で提案するロボットアームにおける肘関節を想定したエネルギー蓄積型アクチュエータシステムのコンセプトである人間肘関節について構造、筋肉の配置、性質について述べる。2.1 節で人間の肘関節の構成について述べた後、2.2 節において筋骨格特性について順に述べる。

2.1 肘関節

2.1.1 肘関節の構造と動き

肘関節は上腕骨と橈骨、尺骨の 3 骨の間に生じた複関節で、肘の屈伸を行う。上腕骨滑車と尺骨の滑車切痕との間の腕尺関節、上腕骨小頭と橈骨頭との間の腕橈切痕との間の上頭尺関節が共通の関節包におおわれており関節包の内側と外側はそれぞれ内側側副靱帯および外側側副靱帯によって補強されている^[17]。

肘関節の基本的な動きは屈伸・伸展・回内・回外があり屈伸は腕を曲げる動作、伸展は伸ばす動作を言い、回内、回外は内側と外側に前腕をひねる動作である。

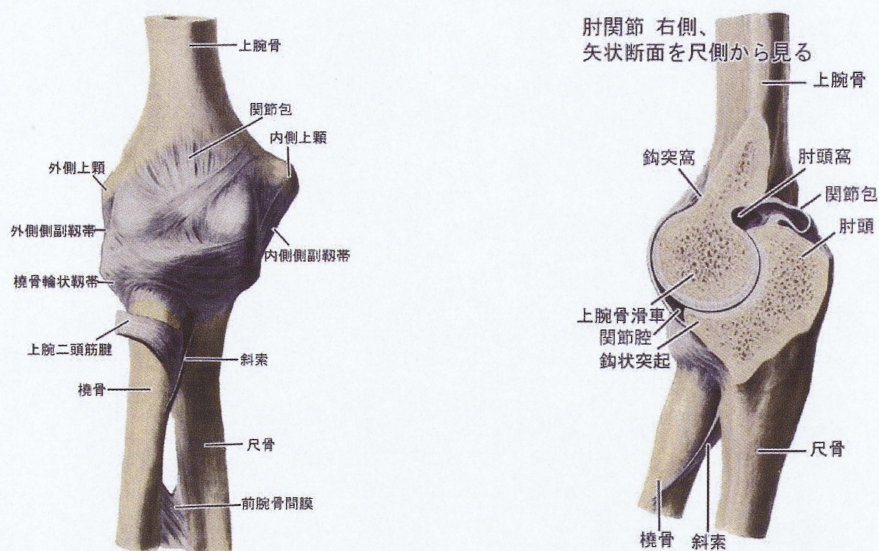


Fig 2.1 Elbow Joint^[17]

2.1.2 肘関節の筋肉の配置

人間の肘を動かす筋は屈筋群と伸筋群に区別されます。屈筋は腕の前面に位置し、伸筋は後面に位置する。肘関節の場合屈筋は上腕二頭筋、伸筋は上腕三頭筋にあたる。腕にある屈筋の腱、伸筋の腱は一種のガイドレールを走っており、支帯と呼ばれる靱帯によってそれぞれの場所に保持されている。

2.1.3 筋の性質

一般に屈筋・伸筋をともに弛緩させれば、関節は柔らかくなり、外部から自由に動かせることができる。逆に屈筋・伸筋を同時に収縮させると関節を非常に固くすることができる。

一方屈筋・伸筋の収縮力の差が関節の駆動トルクになる。このことから同じ駆動トルクを得ながら筋の収縮レベルを変えることで、関節まわりの粘弾性特性を自由に調整できることがわかる^[18]。

筋の収縮には等尺性収縮、等張力性収縮、等速性収縮、増張力性収縮の4つがあり、等

尺性収縮は筋の長さが一定の状態でも力を発揮している状態をいい、等張力性収縮は張力を一定に保った状態での収縮であり、等速性収縮は速度を一定に保つ収縮で、増張力性収縮は収縮が進むにつれて張力が増加する収縮である。

筋収縮の力学的特性としては静的特性と動的特性があり^[19]静的特性としては張力—長さ関係がある。筋が長くなるにつれて張力が増加するという弾性特性が筋に備わっていることがわかる。動的特性としては力—速度関係がある。Fig.2.2 のように筋力は、筋の短縮速度に反比例して減少し粘性特性を有している。

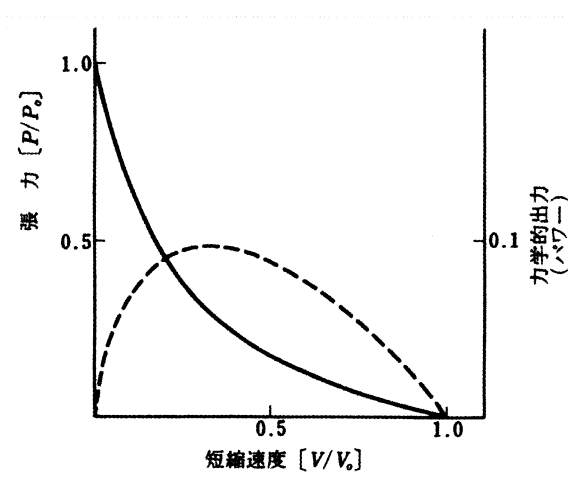


Fig.2.2 筋張力と短縮速度の関係^[19]

2.2 人間の筋骨格特性

人間の筋骨格特性として、人間の腕は筋肉と腕から構成される筋骨格系である。一つの関節につき、それを動作させる筋肉は最低二つあり、それ以外に、二つの関節を同時に駆動する筋肉も存在する。そのため、筋骨格モデルを構成するには大変な努力が必要である。近年では、デジタルヒューマンに代表されるように人間のモデル化もされるようになってきた。例えば、長谷川らの研究では、人間の筋骨格モデルを用いて、人間の歩行シミュレーションができるようになってきている^[20]。

ここでは本研究対象である肘関節について肘周りの 1 自由度について筋骨格系を見る。肘から先の前腕は大きく分けて先述したように上腕二頭筋と上腕三頭筋の二つの筋肉から駆動されている。筋肉の特性については、さまざまな研究がなされているが、もっとも簡潔に表されているものとして、式(2.1)に示す伊藤らのモデルがある^[23]。

$$F=u-kux-bu\dot{x} \quad (2.1)$$

ここで、 F は筋により前腕を駆動する力、 u は筋自体の発生力、 x は筋の長さ、 k および b は定数である。式(2.1)より、筋全体の剛性は ku 、粘性は bu であり、それぞれ筋力に比例する非線形システムであることがわかる。Fig.2.3 は、肘周りの筋骨格 1 自由度モデルを示したものである。ここで、 I は前腕の慣性モーメント、 θ は肘の回転角度であり肘を曲げる方向を正とする。また添え字の f は上腕二頭筋に関するパラメータを添え字の e は上腕三頭筋に関するパラメータを表す。肘周りの運動方程式は、

$$I\ddot{\theta}=p(F_f-F_e) \quad (2.2)$$

となる。ここで、 p は筋力が関節に作用するモーメント長さを示す。式(2.1)および筋の長さと回転角度との関係は、

$$p\theta=x_f-x_e \quad (2.3)$$

となりを式(2.1), (2.3)考慮すると式(2.2)は、

$$\frac{I\ddot{\theta}}{p}=u_f u_e - p \left(k_f u_f + k_e u_e \right) \theta - p (b_f u_f + b_e u_e) \dot{\theta} \quad (2.4)$$

となる、ここで、

$$k_f=k_e=k \quad (2.5)$$

$$b_f=b_e=b \quad (2.6)$$

とすると、式(2.4)は

$$\frac{I\theta}{p}=u_f-u_e-p(u_f+u_e)(k\theta+b\dot{\theta}) \quad (2.7)$$

で表す事が出来る。式 (2.7) の右辺の第 1 項 は筋力の差を表しており、前腕の駆動トルクとなる。右辺第 2 項は、前腕を駆動する際の抵抗力となるものであり、その剛性、粘性は筋力の和に比例して変化する。特に式(2.7)の様な形のシステムは双線形システムと呼ばれている。

以上のことからわかるように人間の腕は、慣性、剛性、粘性特性をもつインピーダンスモデルで表現でき、剛性と粘性が筋力に応じて変化する可変粘弾性特性を有している。特に剛性の変化と同時に粘性も変化することはシステムの安定性の上でも重要な特性である。もし、剛性のみが高くなればシステムの安定性は低下し、上位中枢による高度な制御が必要となる。それは、脳などの神経系に大きな負担をかけることになる。剛性の増加に伴い粘性も増加する人間の筋骨格システムは人間の脳などの高次システムに負担をかけないような特性が備わっていると言える。

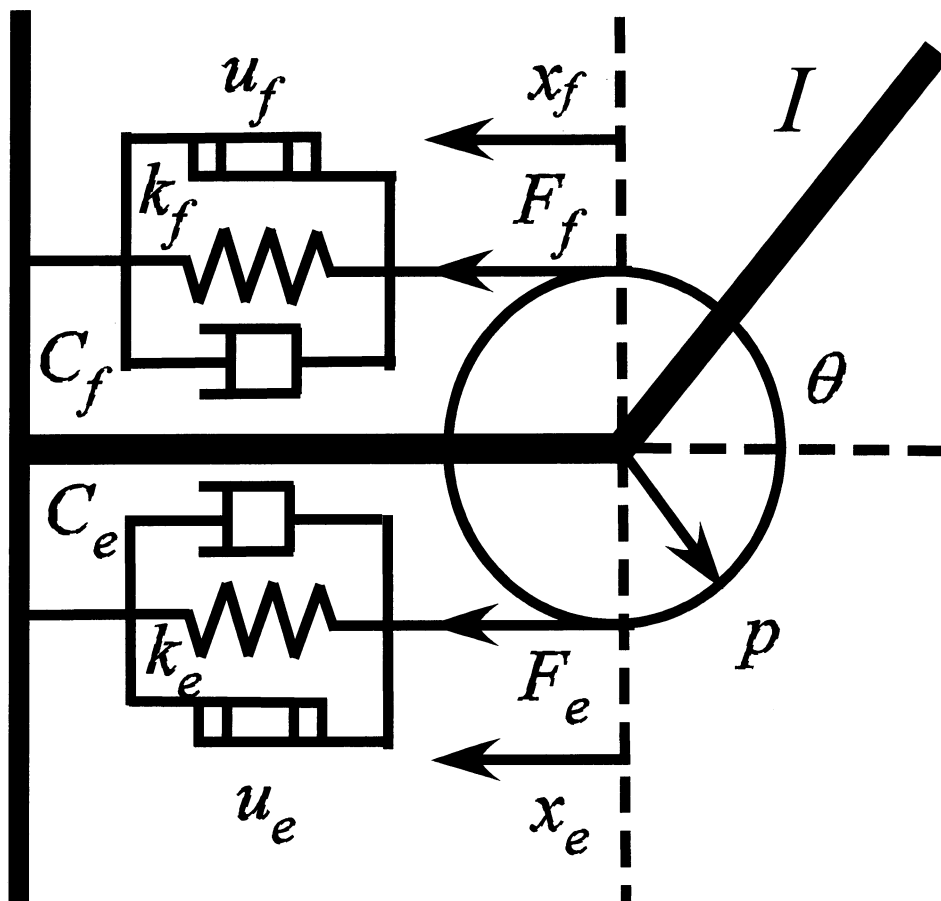


Fig 2.3 人間肘周りの回転系の筋骨格モデル

第 3 章

提案システムの構造とその動作原理

本章では提案するエネルギー蓄積型のアクチュエータシステムについて述べる。

3.1 節では提案するエネルギー蓄積型のアクチュエータシステムの構造と動作原理について述べ、3.2 節では駆動軸周り運動方程式を述べ、3.3 節では制御方法について述べており、3.4 節では提案手法についてシミュレーションを用いて有効性の検証を行っている。

3.1 エネルギー蓄積型アクチュエータシステムの構造と動作原理

3.1.1 エネルギー蓄積型アクチュエータシステムの構造

本研究で提案するエネルギー蓄積型アクチュエータシステムのコンセプトとしては人間の腕回りの構造が動作のために一番理想的であると考え、筋配置を模した構造となっている。人間の筋肉は主動筋と能動筋の二種類の筋肉が拮抗筋として対になっており、両者のトルクの差が関節トルクとなる。提案システムでは筋肉の代わりにばねを用い、駆動軸に粘性可変ダンパーを設置することで人間の腕の筋特性である粘弾性特性と拮抗筋の関係を再現している。人間の筋特性を模したロボットアームの研究では川村ら^[21]、中村ら^[22]、小菅ら^[23]の研究がある。だが関節部粘性に関して粘性減衰力の制御に油圧を用いているものはない。本研究で提案しているバネと可変粘性ダンパーを用いたエネルギー蓄積型のアクチュエータシステムを Fig.3.1 に示す。これは左からリニアアクチュエータ、ばね、ベルト、プーリー、アームで構成されており駆動軸には本研究で新しく提案する粘性減衰ダン

パーが取り付けられている。この粘性減衰ダンパーは油圧を用いることで粘性を変化させることが可能なダンパーとなっており、粘性を変化させることでアームの動作速度を制御するために使用する。油圧を使用する理由としては人の抱き上げなどの際にはロボットに大きな負荷が掛かる為、粘性減衰ダンパーには大きな保持力が必要となる。磁性流体などの素材でも粘性を変化させることは可能であるが、保持力の問題や特殊な素材であるため今後製品としての普及を考えた際のコスト面などを考慮した結果本研究では比較的単純な構造で大きな力を発揮できる油圧に着目した。こちらの詳しい構造については4章で紹介する。従来のロボットシステムにおいてはアームを駆動する構造としてばねやダンパーを用いることはなく駆動軸に直接アクチュエータを取り付けることで駆動するのが一般的な手法であるが、本研究ではアームを駆動し、操作する構造としてばねと粘性減衰ダンパーが取り付けられている。そして上下に取り付けた二つの並進アクチュエータは直接駆動軸を操作するのではなくばねを引くために用いるものである。そして上下に取り付けられたばねはベルトを介して繋がっており、駆動軸のプーリーを介してアームを駆動させる構造となっている。また将来的にはばねを操作するアクチュエータに関しても駆動軸と同様にプーリーを取り付けることで上下のばねをベルトを介して繋ぐことで一つのアクチュエータでバネを操作することも可能である。

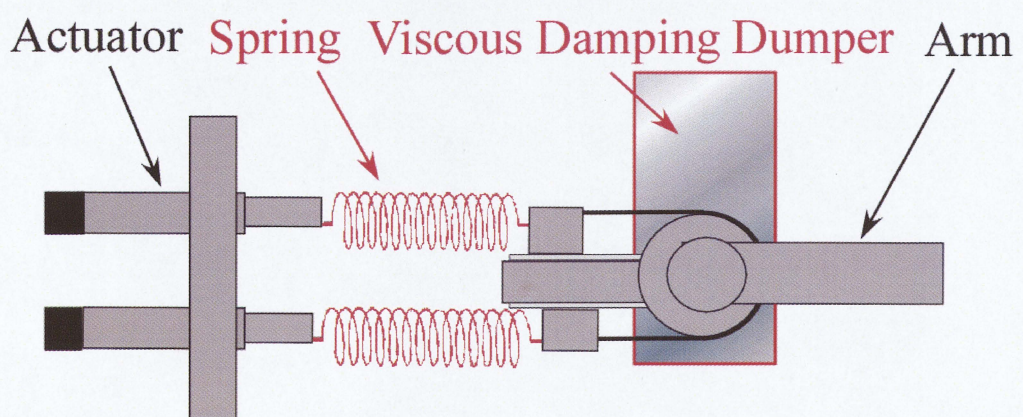


Fig 3.1 提案するアクチュエータシステム

3.1.2 提案システムの動作原理

提案システムの動作原理についてアームが水平な状態からアームを上方向に回転させる場合について模式図と照らし合わせて説明する。

STEP.1 駆動軸の粘性を最大にすることでブレーキをかけ固定する。

本研究では駆動軸に粘性減衰ダンパーを取り付けており、駆動源であるバネを操作するためにはアームが動かないように固定する必要があるため、ダンパーの粘性を最大にすることでアームが駆動しないようにロックし固定する。

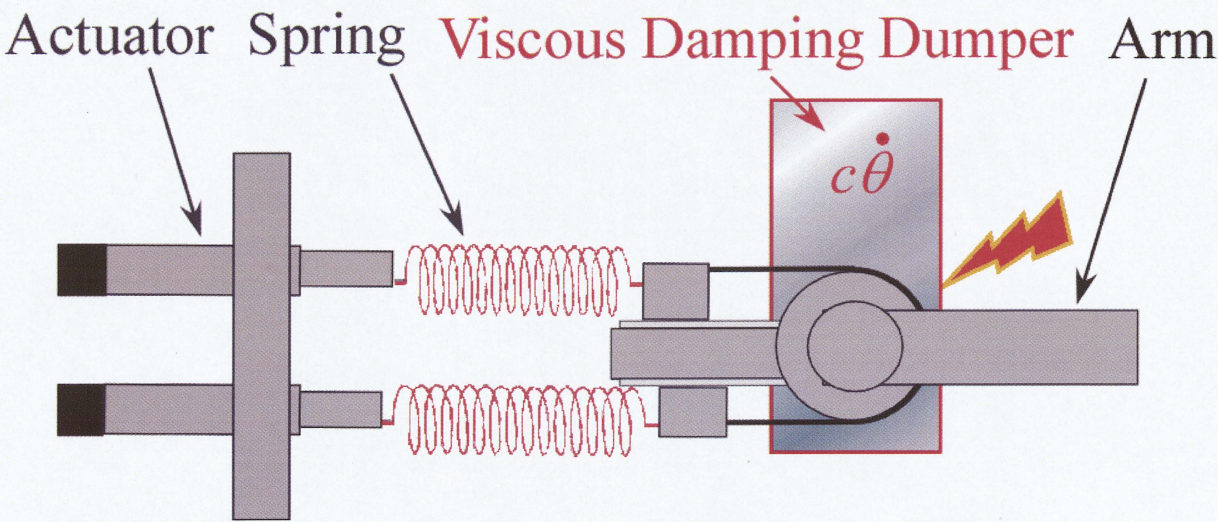


Fig 3.2 提案するアクチュエータシステムの動作 1

STEP.2 アクチュエータを用いて二つのばねの平衡点を操作する。

本研究で取り扱う平衡点とは上下に取り付けられたバネの変位量の差でありバネの力が釣り合う位置として定義する。そして二つの並進アクチュエータを用いて平衡点を操作する。上下に取り付けたアクチュエータを用いて任意のアクチュエータの変位量 x_1 、 x_2 を操作し上下のばねの平衡点を操作する。そして本来であれば、ばねの平衡点を操作することによりアームは図中の赤い点線の位置まで回転するが、現状では先ほど述べたように粘性減衰ダンパーを用いて粘性を最大にすることでブレーキをかけているためまだ駆動はしていない状態である。

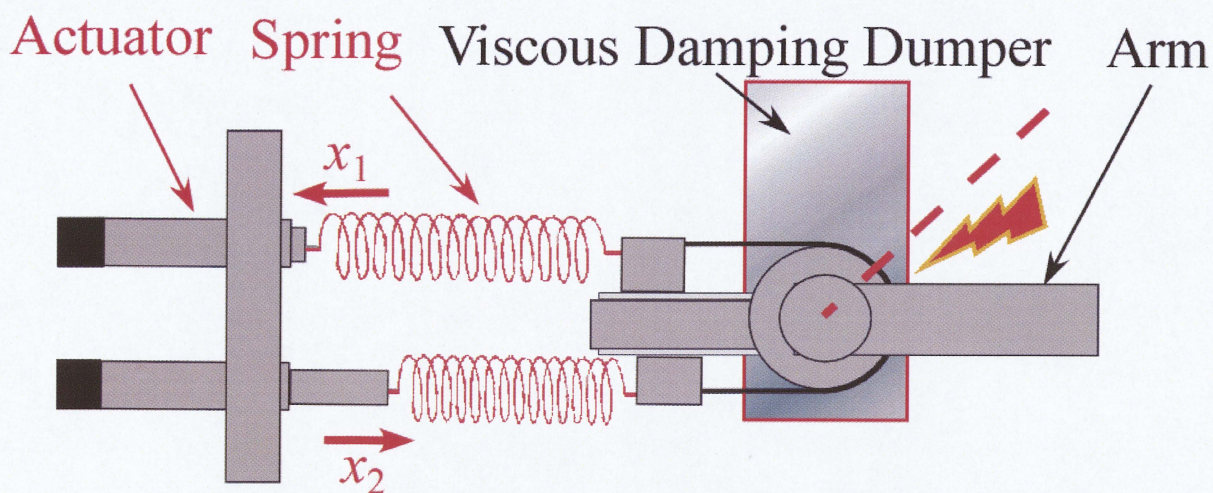


Fig 3.3 提案するアクチュエータシステムの動作 2

STEP.3 粘性を下げてダンパーを解放することでばねが収縮し、ばねが収縮する力の差を利用してアームを駆動させる。

粘性減衰ダンパーを操作し粘性を低下させることで、上下のばねが縮みアームは上下のバネの力が釣り合う位置まで回転する。

STEP.4 動き出したアームは粘性減衰ダンパーで粘性を変化させることでアームの動作速度を制御する。

提案システムでは仮に粘性減衰ダンパーを用いなかった場合、ばねの力により勢い良くアームが動くことやばねによる振動が発生する恐れもあるため装置としての安全性に問題が残る。そこで粘性減衰ダンパーを用いて粘性を制御することで動作速度のコントロールが可能となる。これが提案システムの動作原理となる。

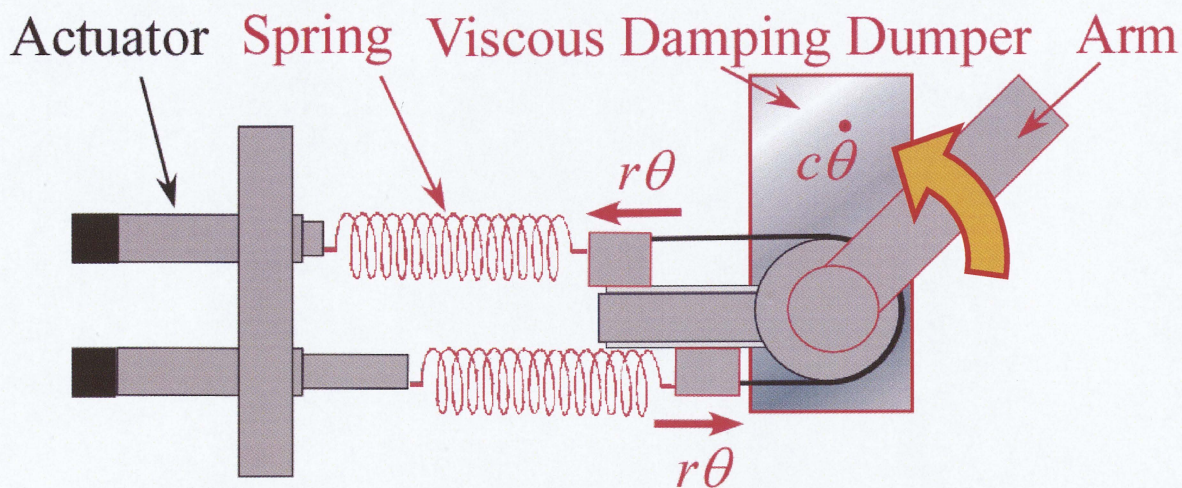


Fig 3.4 提案するアクチュエータシステムの動作 3-4

3.2 提案システムの制御方法

3.2.1 提案システムの軸回りの運動方程式

提案システムの制御方法をモデル図と運動方程式を照らし合わせて説明する。

提案システムのモデル図を Fig.3.5 に示す。本研究で提案するエネルギー蓄積型アクチュエータシステムの軸回りの運動方程式を以下に示す。

$$J\ddot{\theta}(t) = -c(t)\dot{\theta}(t) - kr\{r\theta(t) - x_1(t)\} - kr\{r\theta(t) - x_2(t)\} \quad (3.1)$$

(3.1)式を移項しまとめると以下の

$$J\ddot{\theta}(t) + c(t)\dot{\theta}(t) + kr\{2r\theta(t) - (x_1(t) + x_2(t))\} = 0 \quad (3.2)$$

となる。ここではアームの慣性モーメントを J [Nms²/rad]、粘性抵抗 c [Nms/rad]、ばね定数 k [N/m]、駆動軸のプーリーの半径 r [m]、アームの回転角 θ [rad]、バネの平衡点 x_e [m] としている。バネの変位量である x_1 [m], x_2 [m] を平衡点 x_e とし

$$x_e = x_1(t) + x_2(t) \quad (3.3)$$

とおくと(3.2)式は以下のようにまとめることが出来る。

$$J\ddot{\theta}(t) + c(t)\dot{\theta}(t) + kr\{2r\theta(t) - x_e(t)\} = 0 \quad (3.4)$$

粘性抵抗 c については本研究で提案する粘性減衰ダンパーを使用するため時変パラメータとした、アームの慣性モーメント、ばね定数、プーリーの半径は実機のパラメータであるため提案システムにおいて制御できる可変変数は粘性とばねの平衡点であるからこの二つの変数を如何に決定し制御するかがこのシステムにおいて重要になる。

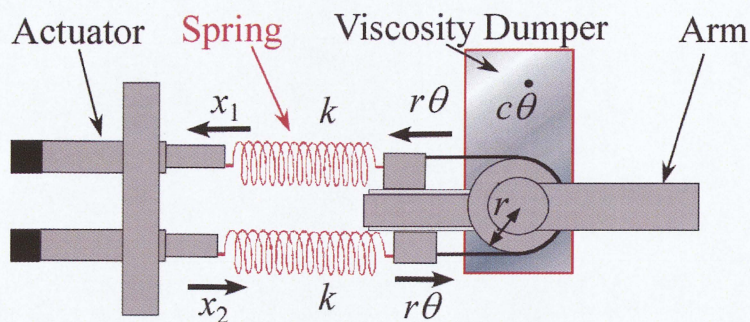


Fig 3.5 提案するアクチュエータシステムの各パラメータ

3.3 粘性変化による提案システムの制御手法

3.3.1 粘性制御手法

制御手法としては現在二つの方法を考えている。まず一つ目として平衡点を定数として扱う方法がある（以後粘性制御手法）。これは動作原理の部分でも触れているのだが動作としてまず目標軌道からばねの変位量である平衡点を算出し、そこからアームを目標軌道に対して追従制御するために制御すべき粘性を求める。次にアクチュエータによってばねの平衡点を操作する。平衡点の操作が完了したところで次にダンパーを制御しアームの動作速度コントロールを行うというものであり、平衡点の操作が完了してから粘性ダンパーを制御する方法である。粘性制御手法ではまず平衡点を求める必要があるため提案システムの運動方程式(3.1)を粘性 $c(t)$ について解くと

$$c(t) = \frac{-J\ddot{\theta}(t) - kr(2r\dot{\theta}(t) - x_e(t))}{\dot{\theta}(t)} \quad (3.5)$$

となる。本研究で用いる粘性減衰ダンパーにはトルクを発生させる機構はなく、また式(3.5)の分母にある角速度も負の値になることはないため

$$c(t) \geq 0 \quad (3.6)$$

$$\dot{\theta}(t) \geq 0 \quad (3.7)$$

という条件が成り立つことから式(3.5)は

$$-J\ddot{\theta}(t) - kr(2r\theta(t) - x_e(t)) \geq 0 \quad (3.8)$$

となる。式(3.8)を平衡点 x_e について解くと

$$x_e(t) \geq \frac{J\ddot{\theta}(t)}{kr} + 2r\theta(t) \quad (3.9)$$

となる。またダンパーによって実現できる粘性の最低値を指定して平衡点を求める事もできる。その場合は実現できる粘性の最低値を C_{\min} とおくと、

$$x_e(t) \geq \frac{(J\ddot{\theta}(t) + C_{\min})}{kr} + 2r\theta(t) \quad (3.10)$$

となり式(3.10)は粘性の最低値を指定した場合の平衡点の導出条件となる。粘性制御手法では平衡点を固定して考えるため平衡点の導出式はそれぞれ

$$x_e = \left[\frac{J\ddot{\theta}(t)}{kr} + 2r\theta(t) \right]_{\max} \quad (3.11)$$

$$x_e = \left[\frac{(J\ddot{\theta}(t) + C_{\min})}{kr} + 2r\theta(t) \right]_{\max} \quad (3.12)$$

となる。ここで右辺の項に最大値を使用している理由は、仮に最大値を使用しなかったと

きにアームが目標とする軌道の終点まで到達しないことになる為にはここでは最大値を使用している。ここで得られた平衡点と $\theta(t)$ に目標軌道 θ_d を粘性の式(3.5)に代入すると

$$c_d(t) = \frac{-J\ddot{\theta}_d(t) - kr(2r\theta_d(t) - x_e)}{\dot{\theta}_d(t)} \quad (3.13)$$

が得られる。そして式(3.13)で得られた $c_d(t)$ が目標軌道に追従制御させる為に制御すべき粘性となる。

3.3.2 粘性と平衡点の同時制御手法

粘性制御手法の場合、ばねの平衡点を操作する時間が必要となり単一の運動を行う際には問題はないのだが、例えばアームを往復運動させるなどの連続した動作を行おうとした時に平衡点を操作する時間が発生してしまう。そこでもう一つの制御方法としてばねの平衡点の操作が完了してからダンパーの制御を行うのではなく、平衡点の操作とダンパーの操作を同時に行う方法を提案する（以後同時制御手法）。これにより先ほど述べた粘性制御手法に比べ平衡点を操作しながらダンパーも制御するため全体の動作時間の減少が期待できる。だがこの方法を行う場合にも課題がある。本研究では小型アクチュエータに高減速比のギアを用いることを想定しているためアクチュエータに高速での動作は期待できない。そのため例えば平衡点の操作とダンパーの操作を同時に行おうとすると平衡点の操作が間に合わずばねに十分な力が蓄えられていないためアームを駆動させる事は難しい。そこでアクチュエータによる遅れを考慮し、最低限ダンパーを制御する前に操作しておくべき平衡点の操作量 $b[m]$ を求める必要がある。

予め操作しておくべきばねの操作量 $b[m]$ を含んだ運動方程式は以下のようになる。

$$J\ddot{\theta}(t) + c(t)\dot{\theta}(t) + kr\{2r\theta(t) - (x_e(t) + b)\} = 0 \quad (3.14)$$

式(3.14)を粘性 $c(t)$ について解くと、

$$c(t) = \frac{-J\ddot{\theta}(t) - kr\{2r\theta(t) - (x_e(t) + b)\}}{\dot{\theta}(t)} \quad (3.15)$$

となる。こちらの式(3.11)も先ほどと同様に粘性の最低値を考慮した式に直すと、

$$\frac{-J\ddot{\theta}(t) - kr\{2r\theta(t) - (x_e(t) + b)\}}{\dot{\theta}(t)} > C_{\min} \quad (3.16)$$

となる。この式(3.16)が常に成り立つには左辺の最小値が粘性の最低値 C_{\min} より大きくなる b が予め操作しておくべき操作量となる。またここで用いた平衡点はモーターによる時間遅れを考慮したものを使用している為、時定数を変化させることでばねの操作量 b は変化し、例えば時定数を小さくするほど b の値は小さくなり、時定数を大きくするほど平衡点の値に近づいていく傾向が見られる。

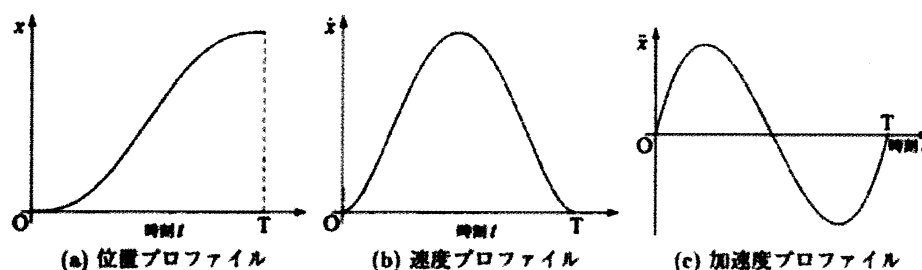
3.4 シミュレーションによる制御理論の検証

3.4.1 躍度最小軌道

前節で述べた中で目標とする軌道を決定することでばねの操作量である平衡点、アームを制御するために操作すべき粘性が導出できると記述したことからシミュレーションを行う際にも目標とする軌道を決定する必要がある。そこで本研究では目標軌道に躍度最小軌道を用いる。これは Flash と Hogan^[24]が提唱した上肢のリーチング動作の数理モデルであり式(3.17)で表すことができる。

$$C_{AJ} = \frac{1}{2} \int_0^T \left(\frac{d^3 \theta(t)}{dt^3} \right)^2 dt \quad (3.17)$$

躍度最小軌道は人との協調動作やパワーアシスト装置の分野の研究で用いられる事が多くあり、これは Morasso^[25]らが行った人間の上肢リーチング観測を行う中で何度も同じ運動を繰り返して行う中で確認された特徴である手先軌道がほぼ直線になるという点、手先速度プロファイルがベル型になる点、手先加速度プロファイルが二峰性をもつという三つの特徴を満たす数理モデルである。上肢運動などは手先軌道ができるだけ滑らかになるように決定されるとの仮定に基づき、運動軌道の荒さ（滑らかさの逆）を躍度（加速度の時間微分）によって表現したものであり、これを最小化する運動軌道生成モデルを提案したものである。これによれば、リーチングの速度変化はベル形になり、実際のヒトの運動とよく一致した動作パターンを生成できる点などから躍度最小軌道は人との協調動作やパワーアシスト装置の分野の研究で目標軌道として用いられている^{[26][27][28][29]}。また、躍度最小モデルでは手先の位置のみを規定するものであるが、扱うデータが運動学的情報のみ



であり、計算コストが非常に小さく、簡単な計算で、ある程度妥当な身体運動の生成ができる利点がある。そのため、この躍度最小モデルは脳神経系の運動制御の計算理論として提唱されたものであるが、デジタルヒューマンにおける実用的な運動生成技術としても有用である。

Fig 3.6 躍度最小軌道^[30]

また式(3.17)は運動の開始時 t_0 、運動の終了時間 t_f における速度、加速度が

$$\dot{\theta}(0)=\dot{\theta}(t_f)=0 \quad \ddot{\theta}(0)=\ddot{\theta}(t_f)=0 \quad (3.18)$$

式(3.18)の条件を満たすとき、躍度最小モデルは以下の 5 次多項式で表すことができる。

$$\theta(t)=\theta_0+(15\tau^4-6\tau^5-10\tau^3)(\theta_0-\theta_f) \quad (3.19)$$

θ_0 、 θ_f 、はそれぞれ初期位置と終了位置を表しており、 τ 以下のように表される。

$$\tau=t/t_f \quad (3.20)$$

本研究において提案するシステムの動作は、運動の開始時、終了時にアームが停止している状態であり式(3.18)を満たしているため、式(3.19)をシミュレーションにおける目標軌道として使用する。

3.4.2 シミュレーションを用いた粘性制御によるアーム制御の有効性 検証

前節で説明した躍度最小軌道を用いて制御方法の中でも粘性制御手法についてシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたパラメータは Table に示す。アームの慣性モーメントを $J[\text{Nms}^2/\text{rad}]$ 、ばね定数 $k[\text{N/m}]$ 、駆動軸のプーリーの半径 $r[\text{m}]$ 、躍度最小軌道のパラメータである初期位置を $\theta_0[\text{rad}]$ 、目標角度を $\theta_f[\text{rad}]$ 、動作時間 $t_f[\text{s}]$ 、ばねの平衡点 $\theta_e[\text{m}]$ としている。平衡点は 3.3.1 節で説明した方法で提案モデルの軸周りの運動方程式から算出を行った。

シミュレーションの流れとしては目標軌道に躍度最小軌道を用いる。アームの目標角度から目標軌道である躍度最小軌道を導出し次にアームを目標軌道に追従して制御するために操作すべき粘性を導出し、最後に求めた粘性と平衡点を与えることでアームが目標軌道に追従して制御できているかを確認するためにシミュレーションにより検証を行った。Fig3.7 にシミュレーションに用いた目標軌道である躍度最小軌道を示す。横軸に時間を取り、縦軸は角度[rad]を示している。Fig3.8 にアームを目標軌道に対して追従制御するために操作すべき粘性を示す。こちらも横軸は時間[sec]を表し、縦軸は粘性[Nms/rad]を表している。

こちらのグラフから見てとれるように運動の開始時及び終了時に粘性が大きくでていることがわかる。これは提案手法の場合ばねに力を蓄え開放するときの弾性力を利用しているため運動の開始時に大きな力が加わりばねが縮もうとするためであり、運動の終了時にも粘性が大きくなる理由はアームを目標位置に固定するためである。計算より求めた粘性値とばねの平衡点を用いて提案システムが目標軌道に追従して制御することが出来るのかシミュレーションにより検証を行った。シミュレーション結果を Fig3.9 に示す。

Table 3.1 シミュレーションに用いたパラメータ

Morment of Inertia	J [Nm・s ²]	0.142
Spring Constant	k [N/m]	4.60×10^3
The Radius of a Pulley	r [m]	4.00×10^{-2}
Initial Position	θ_0 [rad]	0.00
Target Angle	θ_f [rad]	7.85×10^{-1} (45°)
Operating Time	t_f [s]	1.00
Position of Equilibrium	x_e [m]	6.28×10^{-2}

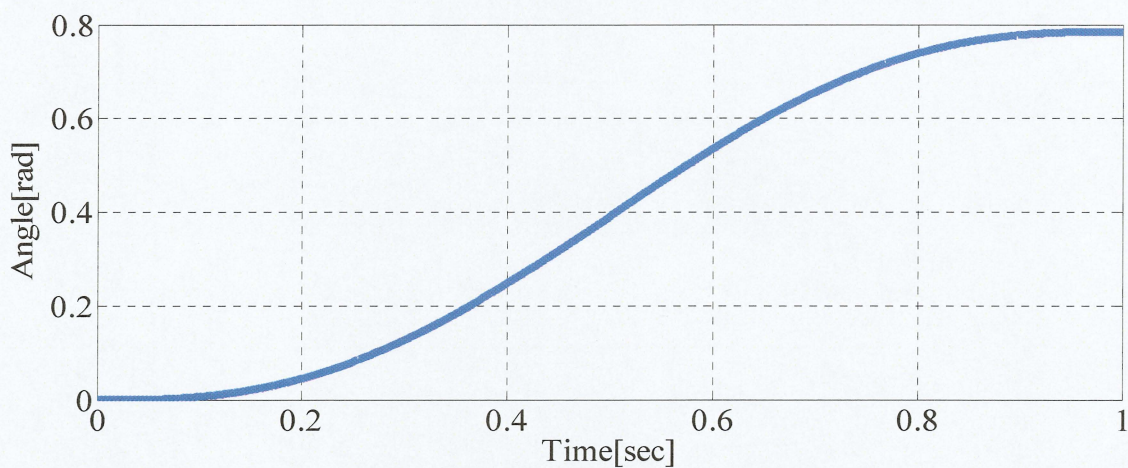


Fig 3.7 シミュレーションに用いる目標軌道

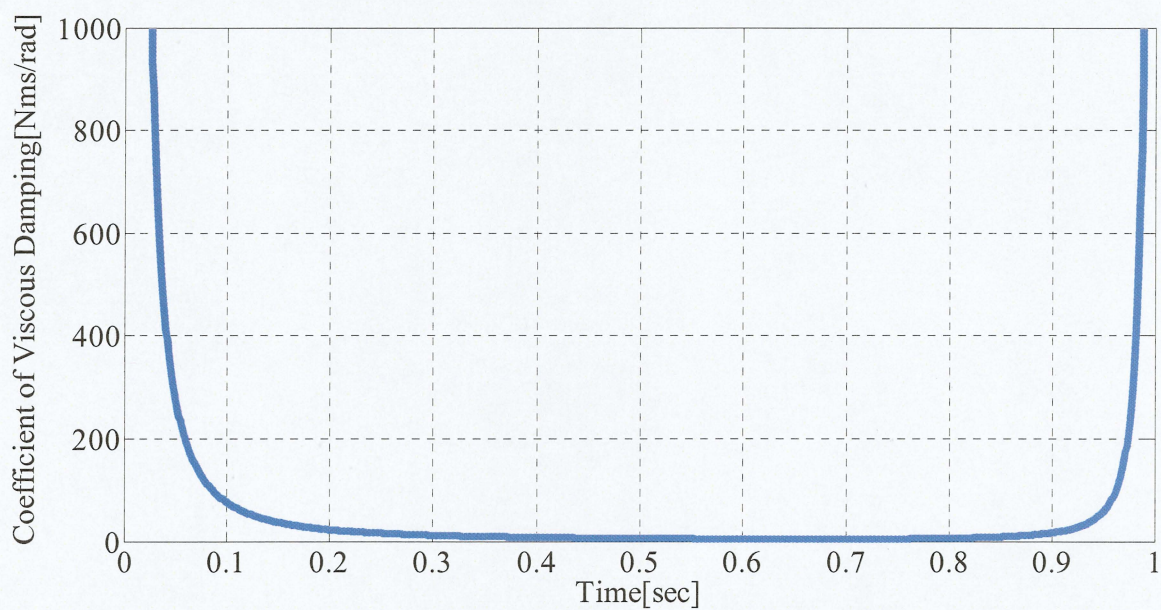


Fig3.8 アームを目標軌道に対して追従制御させるために操作すべき粘性

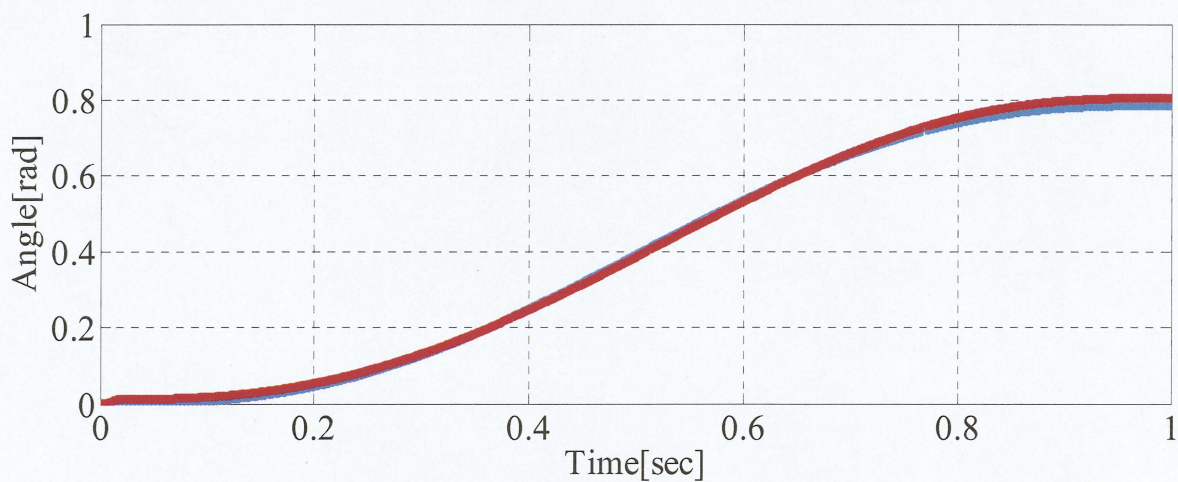


Fig3.9 目標軌道と提案手法にアームの手先位置制御との比較

Fig.3.9 は横軸は時間[sec]を表し縦軸は角度[rad]を表しており青色のデータが目標軌道であり、赤色のデータが提案システムにより粘性を制御することにより得られたアームの軌道である。シミュレーション結果よりアームの軌道が今回のシミュレーションで目標軌道に使用した躍度最小軌道に追従して制御出来ている事がわかる。

以上の結果より提案システムにおいてロボットアームを目標軌道に追従して制御を行うには粘性を短時間に大きく変化させる必要があることがわかる。このため次章で製作した粘性減衰ダンパーの性能を評価するために実験とカルマンフィルタを用いて性能の評価を行った。

第 4 章

粘性減衰ダンパーの性能評価

本章では、本研究で製作した粘性減衰ダンパーの構造とその性能について述べる。

4.1 節では粘性減衰ダンパーの構造について述べ、4.2 節では粘性同定実験について述べており 4.3 節ではカルマンフィルタを用いて実験結果から粘性値の推定について述べている。

4.1 粘性減衰ダンパーの構築

本研究ではアクチュエータを用いてばねに力を蓄え、ばねが収縮する力を利用してアームを駆動させる。この方法ではアームの駆動源としてばねの力を利用していることからばねによる振動の問題や動作速度コントロールができないという問題点がある。そのため本研究ではその二つの問題を解決する対策として粘性減衰ダンパーを提案し製作を行った。製作した粘性減衰ダンパーを Fig4.1 に示す。粘性減衰ダンパーを製作するにあたり要求性能を満たす既製品が見当たらなかった為、本来は空気圧を用いて駆動させる空気圧アクチュエータ SMC 社製の MSZB50A を使用した。空気圧アクチュエータは二つのピストンラックとその間に配置されているピニオンギアから構成されており空気圧アクチュエータ内に油を注入して使用している。粘性減衰ダンパーは空気圧アクチュエータとそれを繋ぐ配管、そして油の流路を変化させるニードルバルブから構成されている。本来は二つのピストンに空気圧を加えることで中央にある出力軸を任意の方向に回転させる目的で作られているが本研究ではこのアクチュエータに油を充満させ、出力軸をアームの駆動軸に繋ぎアームが回転する事によって二つのピストンが上下に動き内部に充満している油を押

し出す構造になっている。そして押し出された油は配管を通じてピストン間を循環する。本研究では減衰力の制御を目的として製作しているため配管の経路にニードルバルブを取り付けており、ニードルバルブを操作することによりダンパー内を流れる油の流量を制御することが可能となる。ニードルバルブは絞りのついた制御弁を用いて流量を制御する弁であり構造は Fig4.2 に示す。そして油の流量を制御することによってアームの制御を行う。

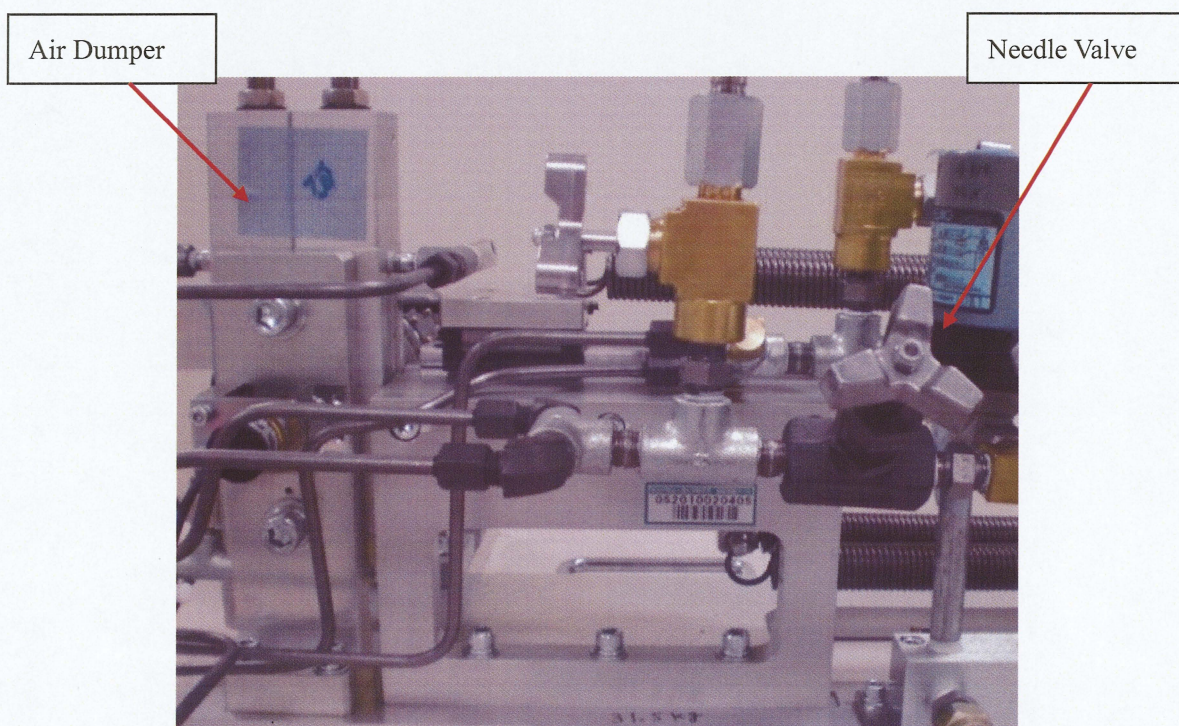


Fig.4.1 粘性減衰ダンパーの外観.

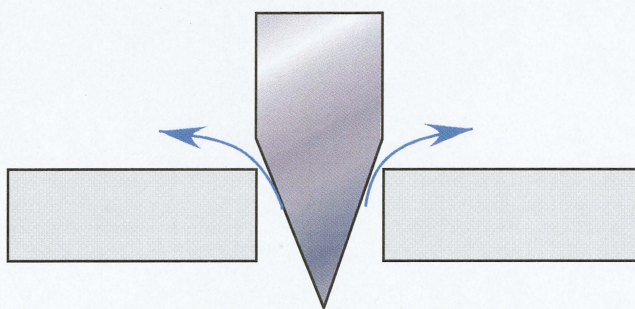


Fig.4.2 ニードルバルブ

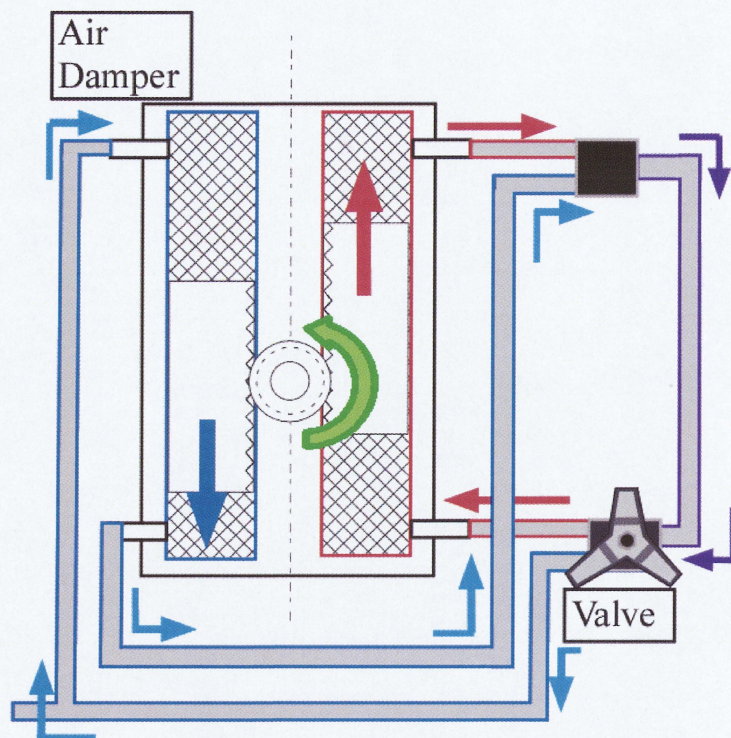


Fig.4.3 粘性減衰ダンパーの内部構造

4.2 粘性同定実験

4.2.1 実験目的

粘性減衰ダンパーのニードルバルブをコントロールし粘性の制御を行うことでばねによる振動を防ぎ、アームの動作速度のコントロールとアームの固定の三役を担う。これらの動作を実際の実験装置やシミュレーション上で検証するには今回製作した粘性減衰ダンパーの性能を評価する必要がある。具体的にはダンパーのニードルバルブの開き具合（以後バルブ開度）により粘性による減衰力がどのように変化するかを検証する必要がある。

4.2.2 粘性同定実験の準備

本研究では粘性を求める方法としてアームの自由落下運動時のアームの角速度とその時にアームに掛るトルクを計測することで粘性の導出を行った。これは粘性減衰力が速度に依存するためである。アームの角速度はロータリーエンコーダで計測した角度情報から取得した。またアーム部分にはトルクセンサが付いていなかったためアームに掛るトルクを計測するために製作した実験用アームを Fig4.4 と Fig4.5 に示す。アームの根元の部分が削られている理由はトルク計測のためにひずみゲージを使用するためであり、また先端には紐を通し重りを吊り下げることが出来るように穴をあけている。実験に使用したひずみゲージは無負荷の状態では 0V 出力し、アームに $1\text{N}\cdot\text{m}$ の力がかかった際に 1V 出力するように各種重りを用いてひずみアンプの調整を行っている。

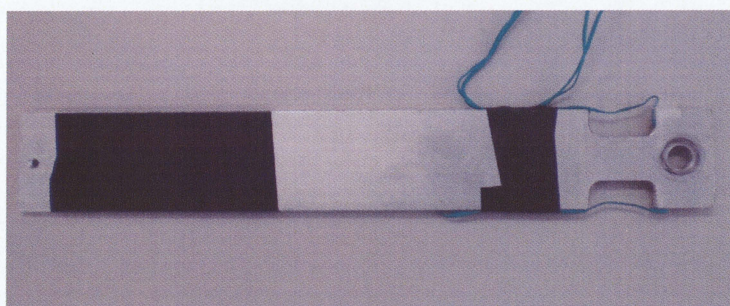


Fig. 4.4 実験用アーム

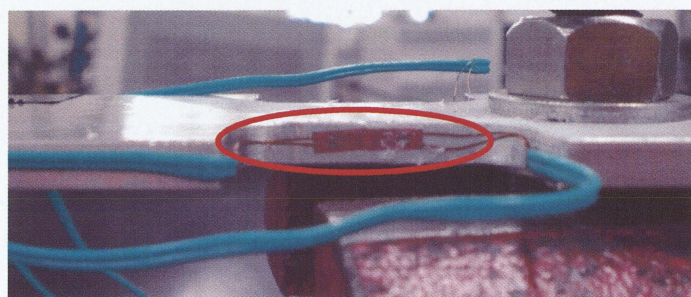


Fig. 4.5 ひずみゲージ

4.2.3 粘性同定実験方法

先ほども述べたように実験方法はアームの先端に穴を開けそこに紐を通しておもりを吊り下げ、おもりの重さによるアームの自由落下運動をさせる。そして自由落下運動時のアームの角度、アームに掛かるトルクをそれぞれロータリーエンコーダとひずみアンプで計測した。重りの吊り下げ方は紐の一端に重りを括りつけ、紐をアームの先端の穴に通し先端を手で保持する。手で保持することでアームには重りの負荷が掛らない状態であり、紐を離すことで重りによりアームが自由落下する。アームの回転角はアームが水平状態あるときを 0° とし上向きに 30° 傾けた位置で手離し重りを落とす点とした。これは回転角を大きくしすぎると紐に吊るされた重りが揺れることで重力方向に掛る負荷とは別の重りの上下左右方向の揺れによるトルクをひずみゲージが検出してしまうためである。実験条件はすべての実験で同一の重りを用いて重りによる自由落下運動をバルブの開度を変更する毎に 5 回行った。バルブは完全に閉まっている状態を 0° としバルブ自体は 4 回転 1440° まで回転するが 1 回転 360° を超えると粘性に変化が見られないことが予備実験により判明したためバルブ開度を 0° から 360° の範囲で 10° 刻みで実験を行った。またダンパーの管内圧力は 1.0MPa とした。計測方法は実験を行う際に重りが揺れていないことをひずみアンプに表示される電圧で確認してから紐を離して、自由落下運動を行い、アームが落下し終わり停止したら計測を止めた。

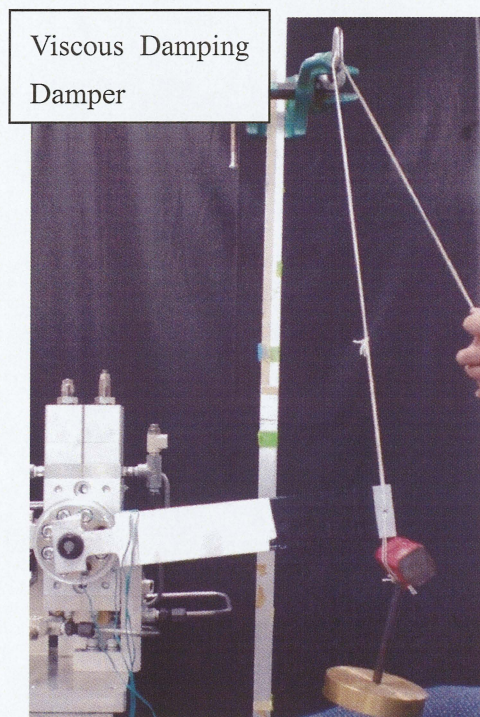


Fig.4.6 実験方法

4.2.4 粘性同定実験における粘性の導出方法

実験で測定する項目は、アームにかかるトルク、アームの角度の2つである。サンプリングタイムはバルブ開度 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ では 0.1s 、バルブ開度 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$ では 0.05s 、バルブ開度 $100^{\circ}\sim 360^{\circ}$ では 0.01s で計測を行った。これはバルブ開度を小さくするほどアームの自由落下運動時の角速度が低下し、ロータリーエンコーダが回転を検知していない状態でもデータを取得してしまい角速度データが計測できなかったからである。それぞれの条件における実験の試行回数は5回である。Fig.4.2 から Fig.4.4 に実験により計測するデータの一例としてバルブ開度が 30° の時に取得したデータを示す。

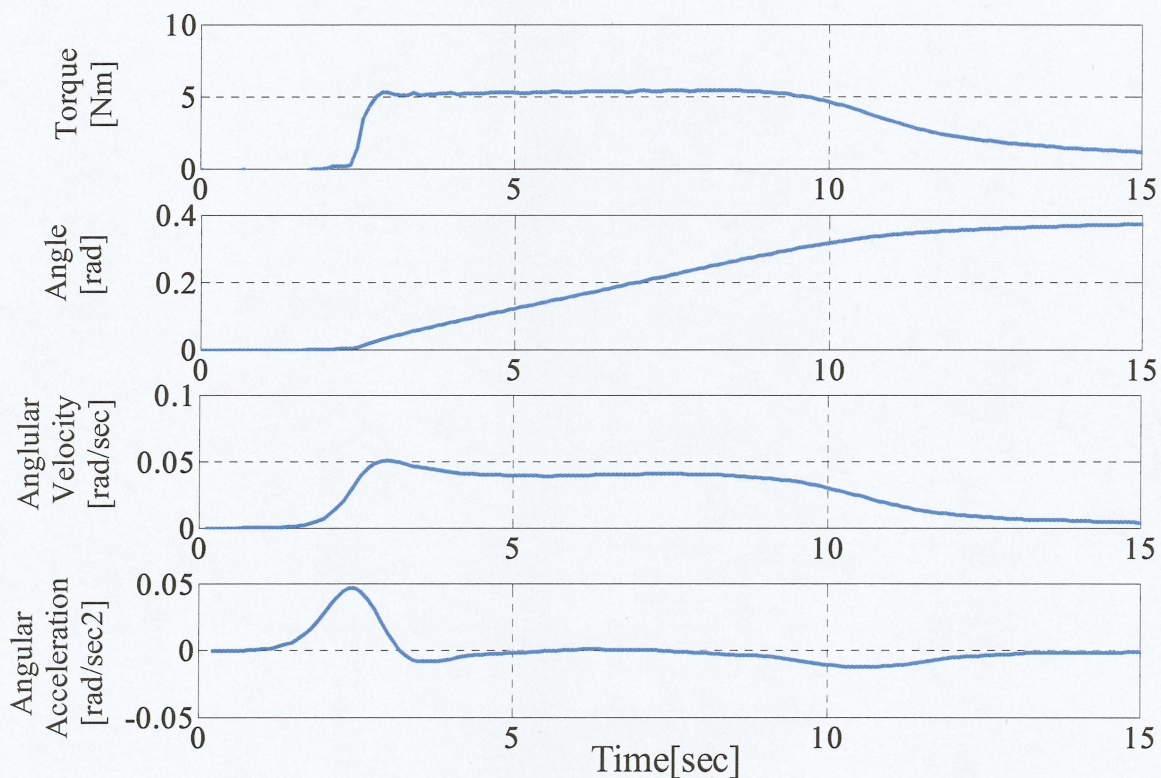


Fig 4.7 実験により取得するデータ例

Fig4.7 は上からアームに掛かるトルク[Nm]、アームの角度変位[rad]、角速度[rad/s]、角加速度[rad/s²]を示しており横軸はすべて時間[s]である。角速度、角加速度は角度情報を微分して導出している。次にここで得られたデータから粘性の値を導出する方法について運動方程式と実験データを用いて説明する。粘性減衰ダンパーと軸周りの運動方程式は

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} = T \quad (4.1)$$

で表すことが出来る。アームの慣性モーメントを J [Nms²/rad]、粘性減衰ダンパーの粘性を c [Nms/rad]、アームに掛かるトルクを T [Nm]、アームの角度変位を θ [rad]とする。アームに掛かるトルクには粘性によるものとアーム自身の慣性によるものがあるが今回の

実験で使用したアームの慣性モーメントによる負荷が粘性に比べ小さいことから慣性はないものとして粘性の導出を考えると式(4.1)は

$$c\dot{\theta} = T \quad (4.2)$$

となる。式(4.2)を粘性について解くと

$$c = T / \dot{\theta} \quad (4.3)$$

となる。本研究ではこちらの式から導出した値を粘性減衰ダンパーと定義する。式(4.3)より粘性を導出するにはアームに掛かるトルクとアームの角速度の関係を知る必要があるため、トルクと速度の関係グラフを Fig.4.8 に示す。

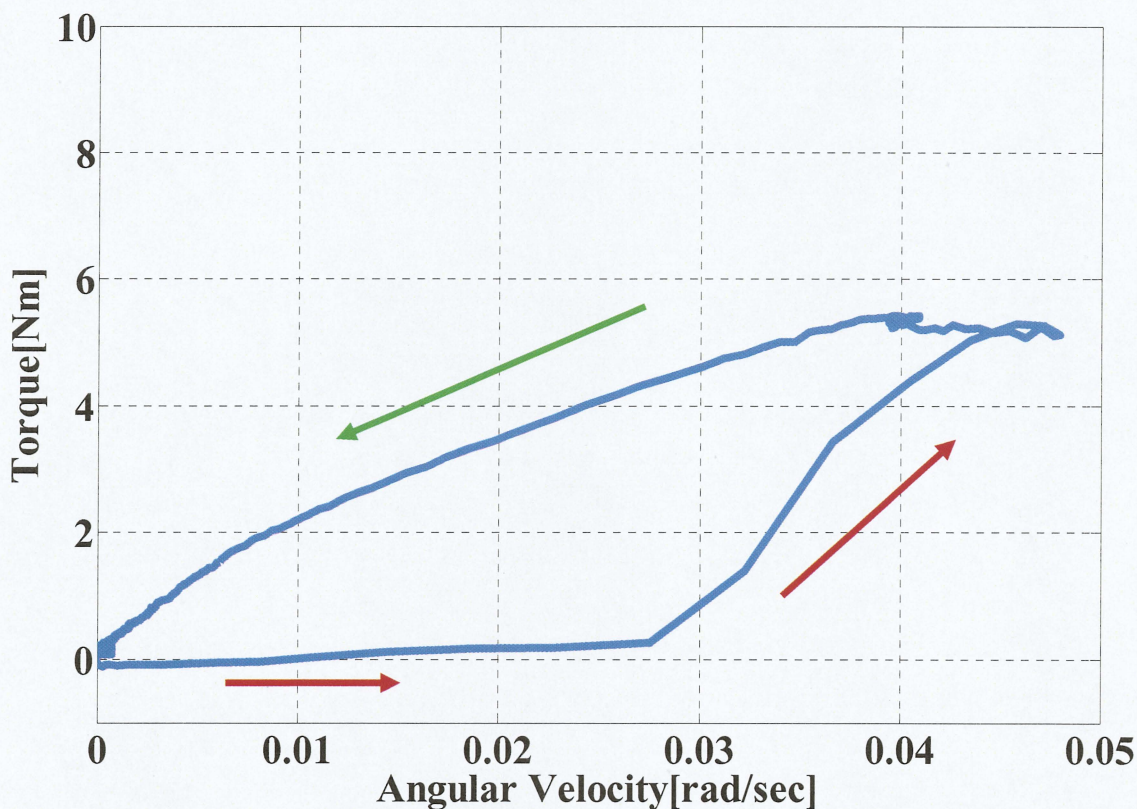


Fig 4.8 トルク-角速度の関係

Fig.4.8 はアームの加速時、減速時にアームに掛かるトルクを表しており横軸が角速度 [rad/s]、縦軸がトルク [Nm]を表している。グラフの見方としてはでは赤い矢印側のデータが加速時を表し、緑色の矢印側のデータが減速時のデータとなる。加速時のデータには、手で保持している時間の力もダンパーによる負荷とは別に人の手による力も含まれているため今回は減速時のデータに着目し、減速時のデータに関して粘性を導出するために式 (4.3)で示したようにデータの傾きを線形近似し、その傾きを粘性とする。Fig.4.9 に減速時の角速度とトルクの関係を示す。

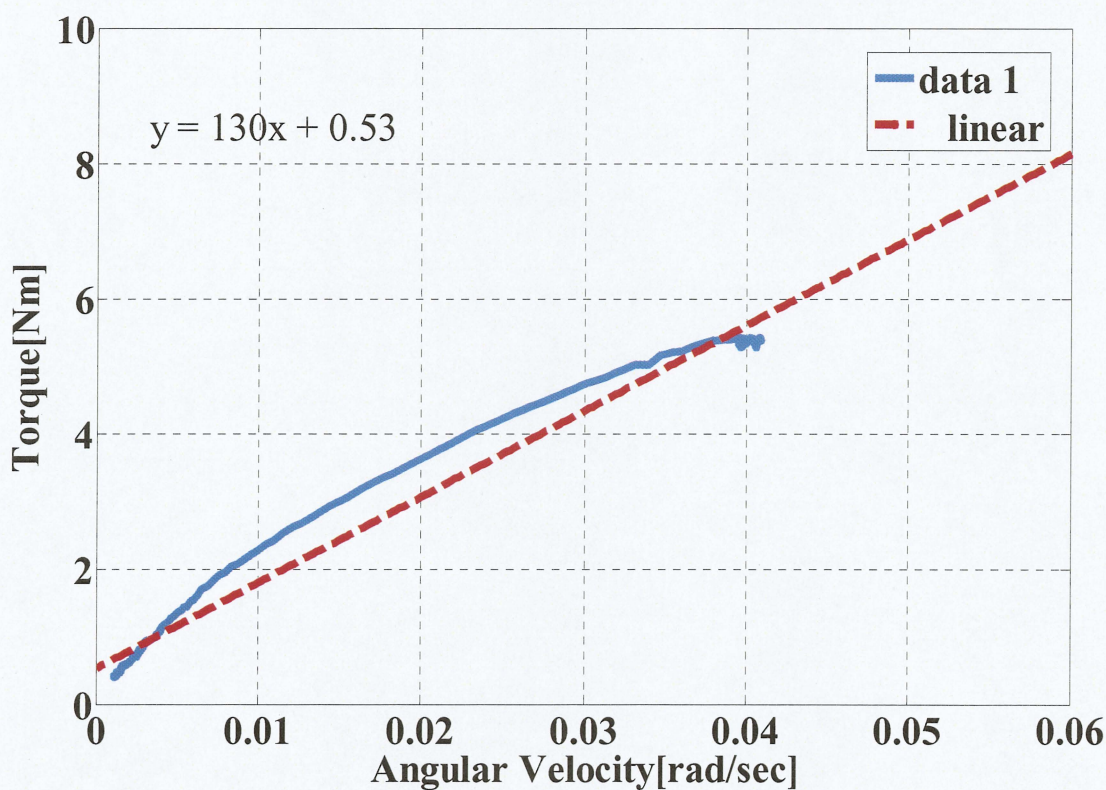


Fig.4.9 トルクー角速度線図による粘性の導出方法

Fig.4.9 は横軸が角速度[rad/s]、縦軸がトルク[Nm]を示している。赤い点線は減速時の線を線形近似した直線である。グラフ上の式は線形近似をした線形近似式であり、このデータの場合、傾き 130 を粘性の値と簡易的に求める。各バルブ開度における粘性値は 5 回の実験データの粘性の値の平均値を、そのバルブ開度での粘性の値とした。

4.2.5 粘性同定実験結果

粘性同定実験の結果の一例としてバルブ開度が 10° 、 60° 、 120° における実験結果を示す。Fig.4.10 はバルブ開度 10° のときに取得した実験結果である。横軸は全て時間[s]を表しており、上から順にトルク[Nm]、角度[rad]、角速度[rad/s]、角加速度[rad/s²]を表している。

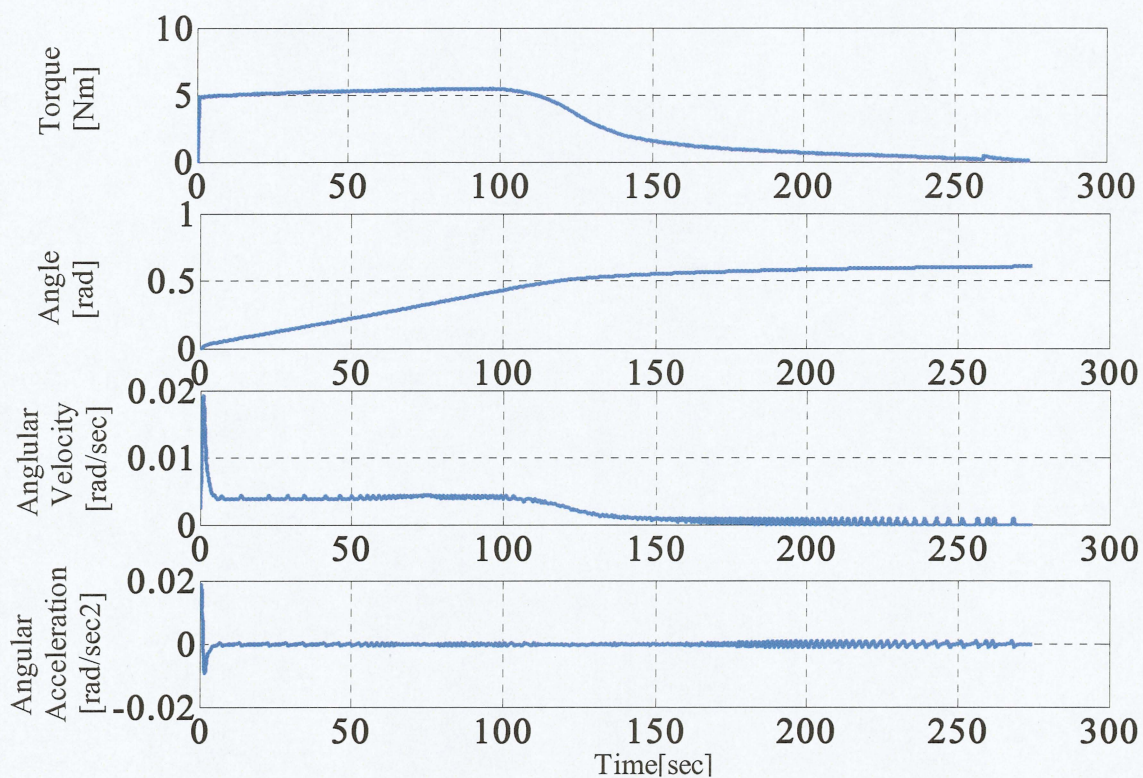


Fig.4.10 実験結果(バルブ開度 10°)

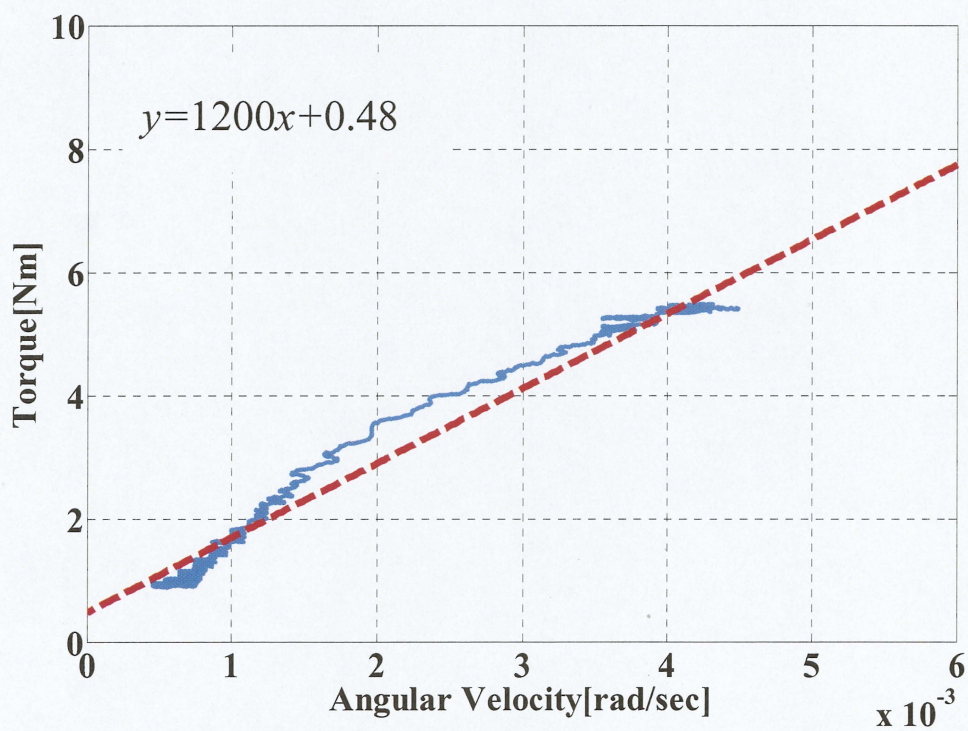


Fig.4.11 トルク-角速度線図(バルブ開度 10°)

Fig.4.11 は横軸が角速度[rad/s]、縦軸がトルク[Nm]を表しており赤い点線は減速時のデータを線形近似した線形近似線でありグラフ上の式は線形近似式である。このデータの場合、傾き 1200 を粘性の値と簡易的に求める。こちらのグラフから見てとれるようにバルブ開度を小さくすることによって粘性減衰ダンパーの粘性抵抗が大きいためアームが先ほど示したバルブ開度 30° の時と比べゆっくり動いている事が見て取れる。このため重りが落下するまでの時間が長かったためにトルク値に重りのゆれによるトルクが入ってしまいデータが波打ったようなかたちとなっている。

Fig4.12 はバルブ開度 60° のときに取得した実験結果である。横軸は全て時間[s]を表し、縦軸は上から順にトルク[Nm]、角度[rad]、角速度[rad/s]、角加速度[rad/s²]を表している。Fig.4.13 は横軸に角速度[rad/s]、縦軸にトルク[Nm]を示す。点線は減速時のデータを線形近似したものである。グラフ上の式は線形近似式であり、このデータの場合、傾き 37 を粘性の値と簡易的に求める。

Fig4.14 はバルブ開度が 120° のときに取得した実験結果である。横軸はすべて時間[s]を表し、縦軸は上から順にトルク[Nm]、角度[rad]、角速度[rad/s]、角加速度[rad/s²]を表している。Fig.4.15 は横軸に角速度[rad/s]、縦軸にトルク[Nm]を表している。赤い点線は減速時のデータを線形近似したものである。Fig.4.15 上の式は線形近似式であり、このデータの場合、傾き 9.4 を粘性の値と簡易的に求める。

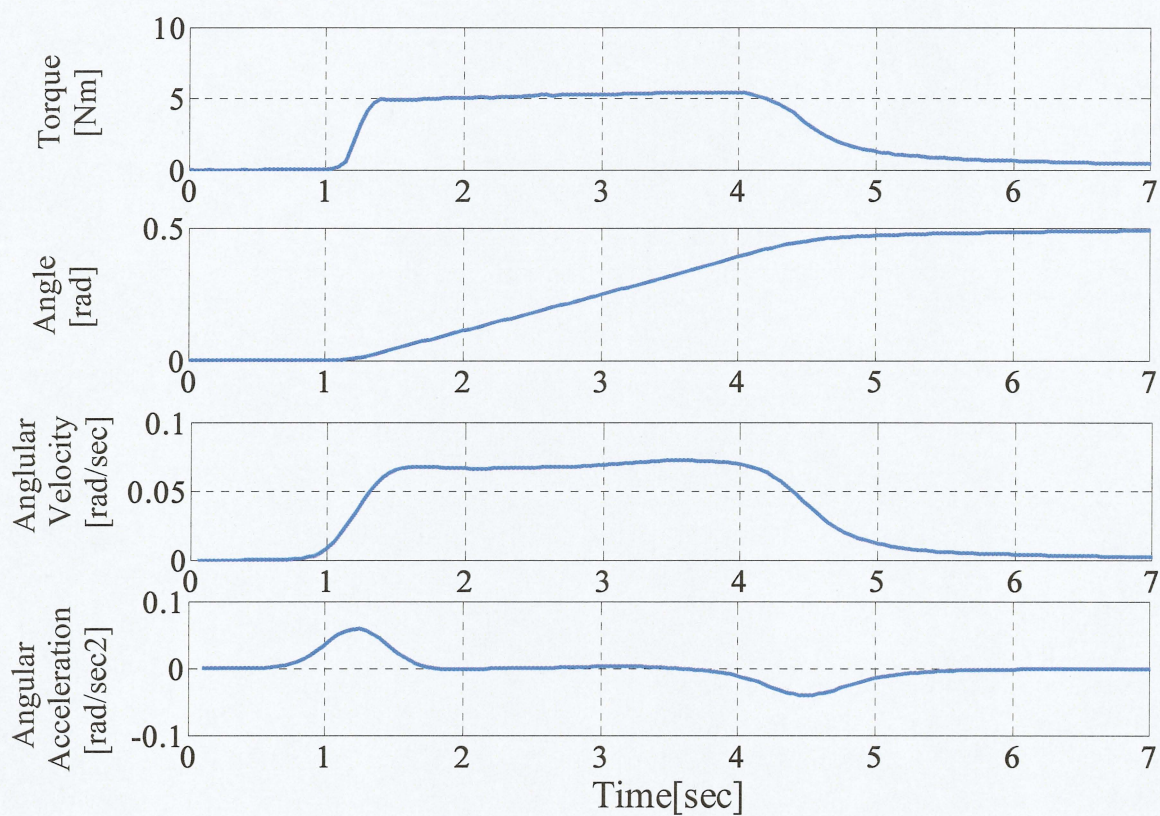


Fig.4.12 実験結果(バルブ開度 60°)

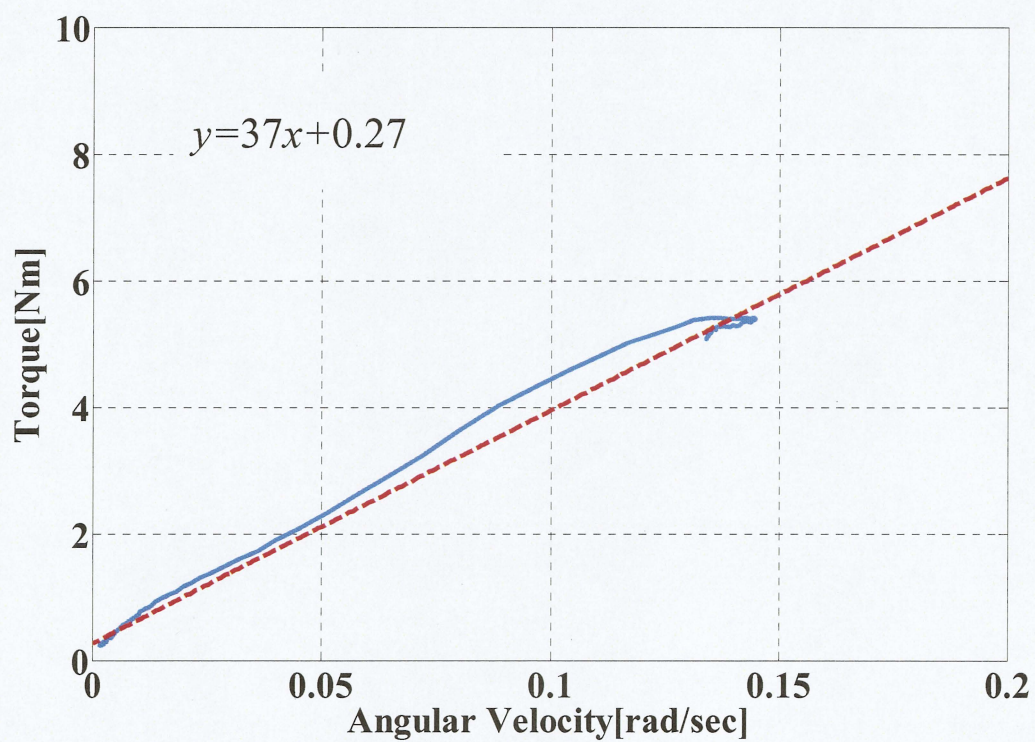


Fig.4.13 トルク-角速度線図(バルブ開度 60°)

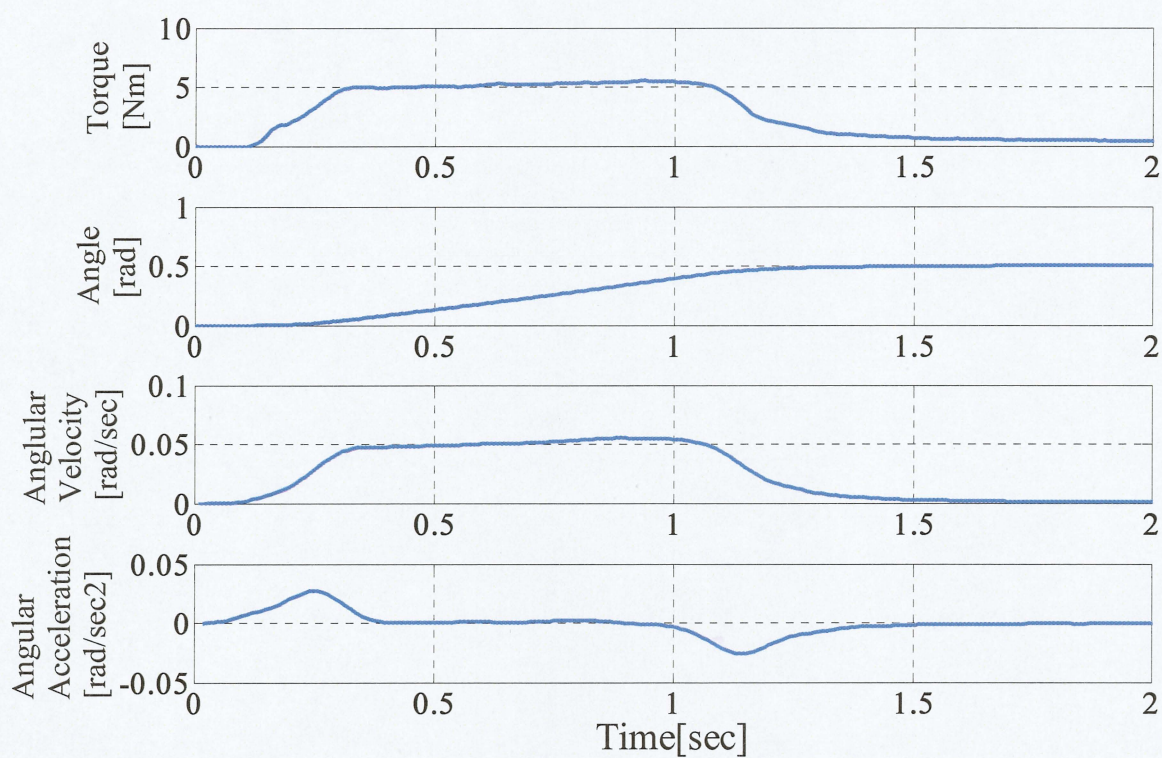


Fig.4.14 実験結果(バルブ開度 120°)

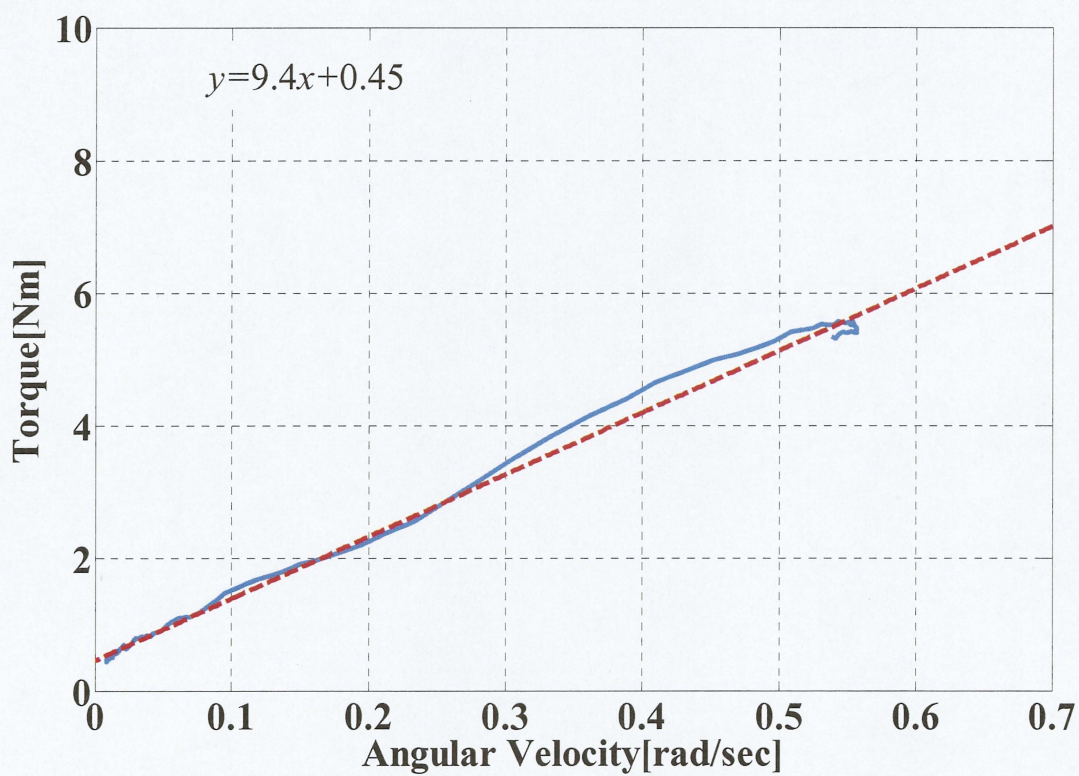


Fig.4.15 トルク-角速度線図(バルブ開度 120°)

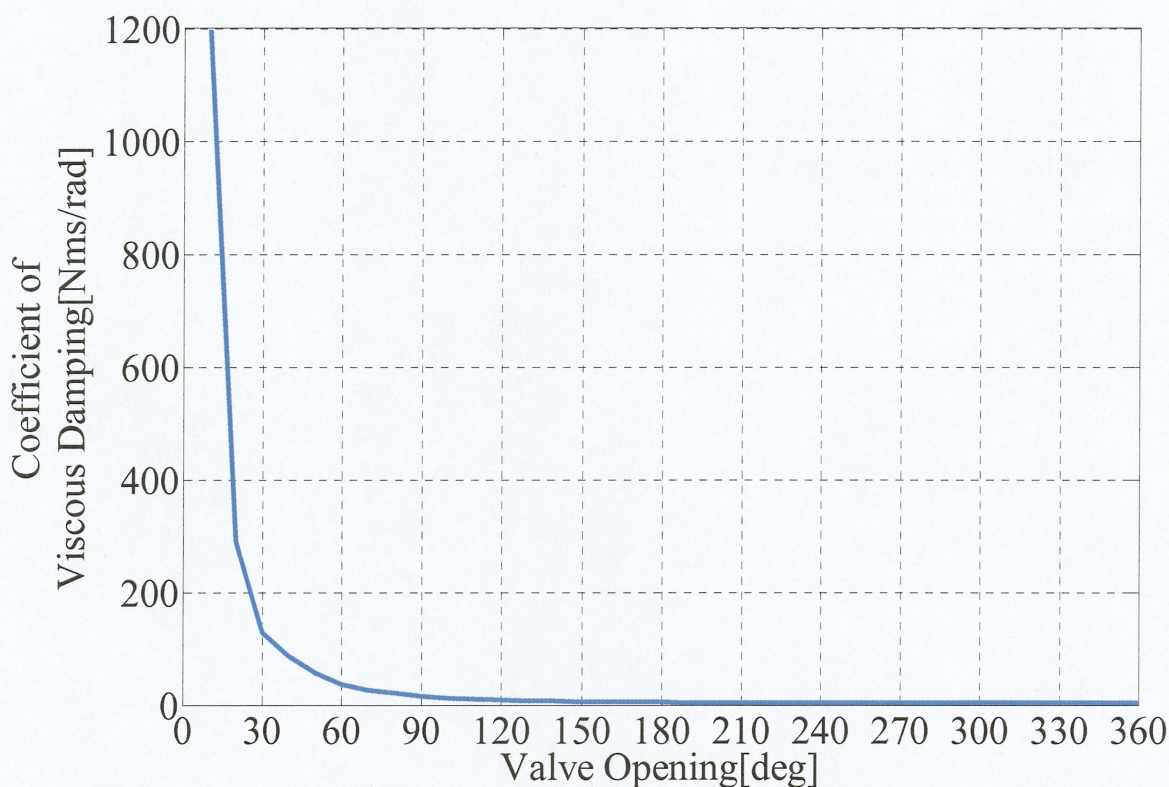


Fig.4.16 各バルブ開度と粘性の関係

同様に各バルブ開度における 5 回分の実験データの粘性の平均値と各バルブ開度との関係を Fig.4.16 に示す。

Fig.4.16 は横軸にバルブ開度[deg]、縦軸に粘性[Nms/rad]を表している。実験結果から見てとれるようにバルブ開度が低い所では、粘性が大きく変化する様子が見てとれる。またバルブ開度が大きくなるにつれて粘性の変化が緩やかに変化していることがわかる。これは粘性を制御する部分で使用されているニードルバルブによる影響であると考えられる。こちらのデータを用いて実際に粘性制御による実験を行うには各バルブ開度によって粘性がどのように変化するのかを把握し制御できるようにするためにバルブの開度と粘性の関係を関数として表現する必要があることから粘性の式として実験データにより近い近似曲線として Fig.4.16 の曲線を累乗近似した曲線を Fig.4.17 に示す。バルブ開度の低い所での誤差が小さくなるように、 $10^{\circ} \sim 180^{\circ}$ までの粘性値の範囲で累乗近似を行った。

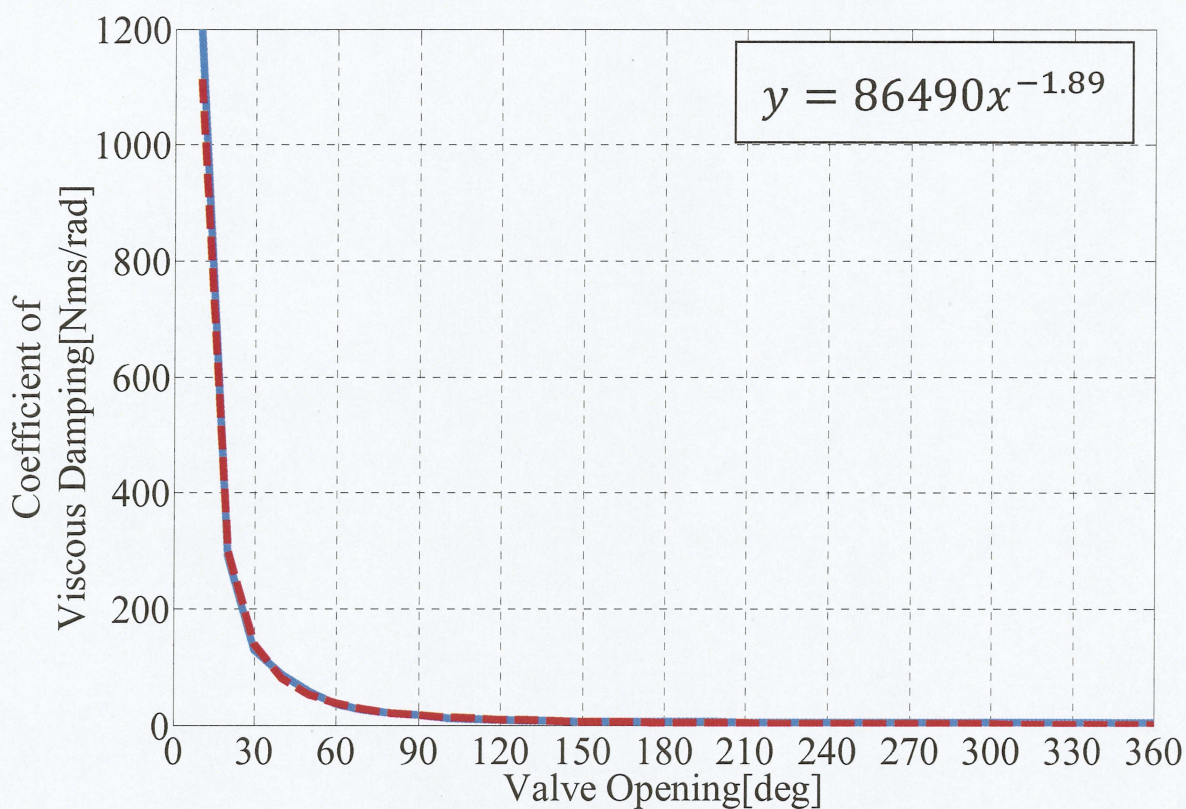


Fig.4.17 各バルブ開度における粘性の実験値とその近似式

Fig.4.17 は横軸がバルブ開度[deg]、縦軸は粘性[Nms/rad]を表している。赤い点線が累乗近似した近似曲線を示し、グラフ上の式はこの近似曲線の式である。このグラフではバルブ開度が高い部分がわかりづらいため、縦軸の粘性の上限値を 200 Nms/rad に変更したグラフを Fig.4.18 に示す。

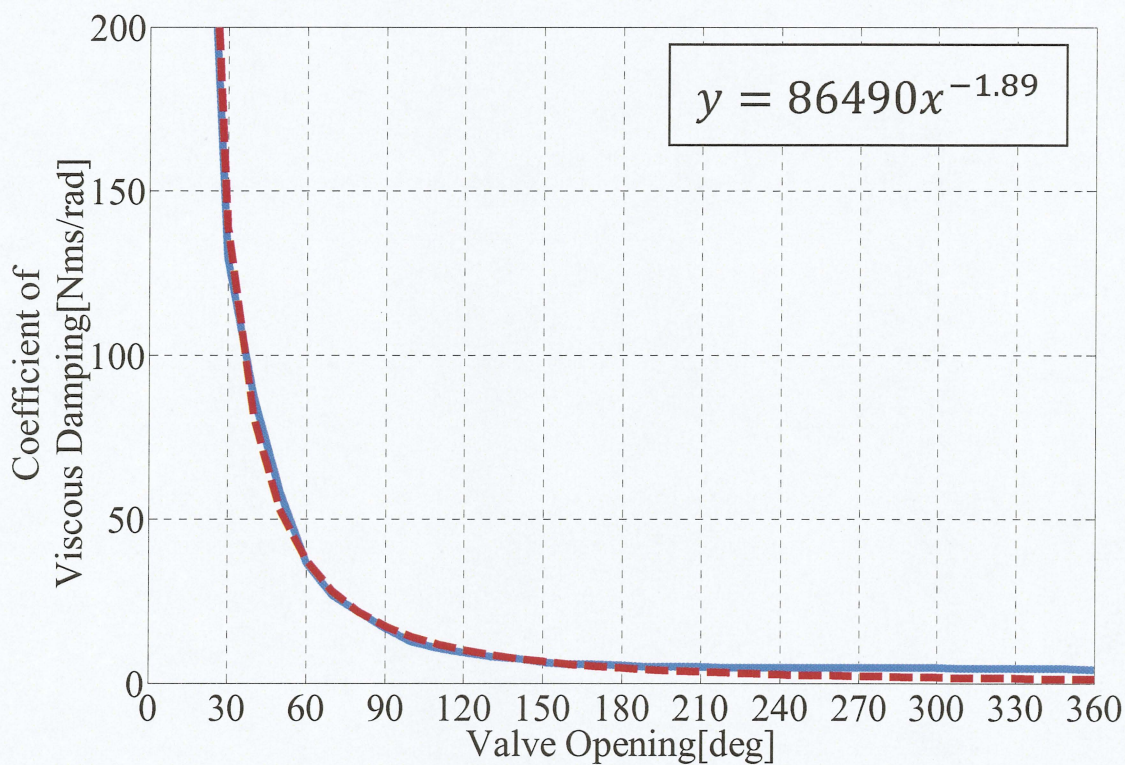


Fig.4.18 各バルブ開度における粘性値の近似式

Fig.4.18 は横軸にバルブ開度[deg]、縦軸に粘性[Nms/rad]を示す。点線が累乗近似した近似曲線を示し、Fig.4.18 上の式はこの近似曲線の式である。

以上の結果より求めた粘性値は角速度、トルクの関係より求めた近似値であるためダンパーの粘性とは言えない可能性がある。そこで次節でカルマンフィルタを用いて粘性の推定を行い実験より求めた粘性の近似値とカルマンフィルタより求めた推定値を比較し粘性値の同定を行う。

4.3 カルマンフィルタを用いた粘性値の推定

4.3.1 拡張型カルマンフィルタのアルゴリズム

実験結果であるトルク-角速度線図の傾きから求めた粘性は、あくまでも近似的に求めた値であるため、その正確性を確認する必要がある。そこでカルマンフィルタを用いて粘性の値を推定し、近似的に求めた値と推定値を比較する。また慣性、摩擦などのパラメータも推定し、本実験装置ではどのパラメータの影響が大きいかを調べ、粘性制御の有効性を検証する。本実験装置の非線形性を考慮したうえで、カルマンフィルタの中でも、推定値近傍で非線形関数を線形近似するとされる拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを用いてパラメータ推定を行うこととする。

いま状態ベクトルが X_i 、出力ベクトルが Y_i とする離散時間のシステムの状態方程式、出力方程式が

$$X_{i+1} = \phi_i(X_i) + v_i \quad (4.4)$$

$$Y_i = h_i(X_i) + w_i \quad (4.5)$$

で表されているとする。ここで、 i は離散時間系におけるサンプリングステップ、 v_i 、 w_i はガウシアン白色ノイズベクトルで平均値0、分散は任意とする。

次に推定したいパラメータがある場合は、それをパラメータベクトルとして、新たに状態ベクトル

$$Z_i = \begin{bmatrix} X_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

を定義し、次のような拡大系を考える。

$$\begin{aligned} Z_{i+1} &= \Phi_i(Z_i) + V_i \\ &= \begin{bmatrix} \phi_i(X_i) \\ \theta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_i \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} Y_i &= H_i(Z_i) + W_i \\ &= h_i(X_i) + w_i \end{aligned} \quad (4.8)$$

拡張カルマンフィルタによる*i*ステップでの*i+1*における*Z*の推定値を $\hat{Z}_{i+1/i}$ とすると、 $\hat{Z}_{i+1/i}$ は以下のように求められる。

$$\hat{Z}_{i+1/i} = \Phi_i(\hat{Z}_{i/i}) \quad (4.9)$$

$$\hat{Z}_{i/i} = \hat{Z}_{i/i-1} + K_i [Y_i - H_i(\hat{Z}_{i/i-1})] \quad (4.10)$$

$$K_i = P_{i/i-1} B_i^T [B_i P_{i/i-1} B_i^T + R_i]^{-1} \quad (4.11)$$

$$P_{i/i} = P_{i/i-1} - K_i B_i P_{i/i-1} \quad (4.12)$$

$$P_{i+1/i} = A_i P_{i/i} A_i^T + Q_i \quad (4.13)$$

$$A_i = \frac{\partial \Phi_i(\hat{Z}_{i/i})}{\partial Z_i} \quad (4.14)$$

$$B_i = \frac{\partial H_i(\hat{Z}_{i/i})}{\partial Z_i} \quad (4.15)$$

ここで、 K_i はカルマンゲイン、 $P_{i/i}$ は推定誤差共分散行列、 Q_i 、 R_i はそれぞれ V_i 、 W_i の共分散行列である。

ここで推定値の初期値 $\hat{Z}_{0/-1} = \bar{Z}$ と推定誤差共分散行列の初期値 $P_{0/-1} = \bar{P}$ 、 Q_i 、 R_i を設定すれば、式(4.9)～式(4.15)により、サンプリングステップごとの推定値が求まる。本論文では \bar{Z} 、 \bar{P} 、 Q_i 、 R_i をカルマンフィルタの設定値と呼ぶ。

4.3.2 粘性減衰ダンパーへの適用

装置の軸まわりの運動方程式は

$$J\ddot{\theta}+C\dot{\theta}=\tau-\tau_f \quad (4.16)$$

とする。時間での状態ベクトルを $X_t = [\theta_t \ \dot{\theta}_t]^T$ とすると、 \dot{X}_t は

$$\dot{X}_t = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_t \\ \frac{1}{J_t}(\tau_t - \tau_{ft} - C_t \dot{\theta}_t) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

ここで、サンプリング時間を Δt として一次差分近似の手法を用いて離散化すると

$$\dot{X}_t \cong \frac{X_{k+1} - X_k}{\Delta t} \quad (4.18)$$

と表せる。よってシステムの状態方程式と出力方程式は、出力を装置のアーム部の角度変位とすると、

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= \phi_i(X_i) + v_i \\ &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \Delta t + \theta_i \\ \frac{\Delta t}{J_i}(\tau_i - \tau_{fi} - C_i \dot{\theta}_i) + \dot{x}_i \end{bmatrix} + v_i \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} Y_i &= h_i(Z_i) + w_i \\ &= \theta_i + w_i \end{aligned} \quad (4.20)$$

となる。本研究では推定したいパラメータベクトルは $\theta_i = [J_i \ c_i \ \tau_{si}]^T$ であるから、 θ_i を含めた拡大系の状態方程式と観測方程式は

$$\begin{aligned} Z_{i+1} &= \Phi_i(Z_i) + V_i \\ &= \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \Delta t + \theta_i \\ \frac{\Delta t}{J_i}(\tau_i - \tau_{fi} - C_i \dot{\theta}_i) + \dot{x}_i \\ J_i \\ C_i \\ \tau_{fi} \end{bmatrix} + V_i \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} Y_i &= H_i(Z_i) + W_i \\ &= \theta_i + W_i \end{aligned} \quad (4.22)$$

となる。このシステムを式(4.9)～式(4.13)の拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに適用す

る。なお式(4.14)、式(4.15)は

$$A_i = \frac{\partial \Phi_i(\hat{Z}_{i/i})}{\partial Z_i}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\hat{C}_i}{\hat{J}_i} \Delta t & \frac{\tau_{fi} + \hat{C}_i \hat{\theta}_i - \tau_i}{\hat{J}_i^2} \Delta t & -\frac{\hat{\theta}_i}{\hat{J}_i} \Delta t & -\frac{1}{\hat{J}_i} \Delta t \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$B_i = \frac{\partial H_i(\hat{Z}_{i/i})}{\partial Z_i}$$

$$= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4.24)$$

のようになる。

4.3.3 拡張カルマンフィルタによるパラメータの推定

カルマンフィルタを用いてパラメータ推定を行う。データを採取後にパラメータを推定及び近似するオフライン推定法を用いてパラメータを推定する。粘性同定実験より採取したアームの角度とアームにかかるトルクから、角度、角速度、実験装置全体の慣性、粘性、摩擦力の推定を行う。各バルブ開度の5回分の推定値の平均値を、そのバルブ開度の推定値とする。Fig.4.19 にバルブ開度と粘性の推定値の関係を示す。Fig4.19 は横軸にバルブ開度[deg]、縦軸に粘性[Nms/rad]を示しており上段と下段のグラフは同じものであり、下段のグラフは上段のグラフにおいてバルブ開度が大きい部分がわかりにくいため粘性の上限値を200に変更したものを下段に載せてある。実線がカルマンフィルタによる粘性の推定値を示し、点線が実験結果の傾きから近似的に求めた粘性の値を示す。2つのデータは近い値を示しており、実験結果の傾きから近似的に求めた粘性に関してはバルブ開度が小さ

い範囲では一致していることが確認できたがバルブ開度が 200° を超えた範囲では実験から求めた近似値では減少傾向が見られるが、カルマンフィルタの推定値ではその傾向が実験値より見られない。これは粘性減衰ダンパーがバルブの開度が 180° を超えた付近から粘性に変化が見られず、ある一定の値近傍で増加したり減少したことが見て取れたことが実験より確認できているためこのことが原因と考えられる。Fig.4.20 にバルブ開度と実験装置全体の慣性の推定値の関係を示す。

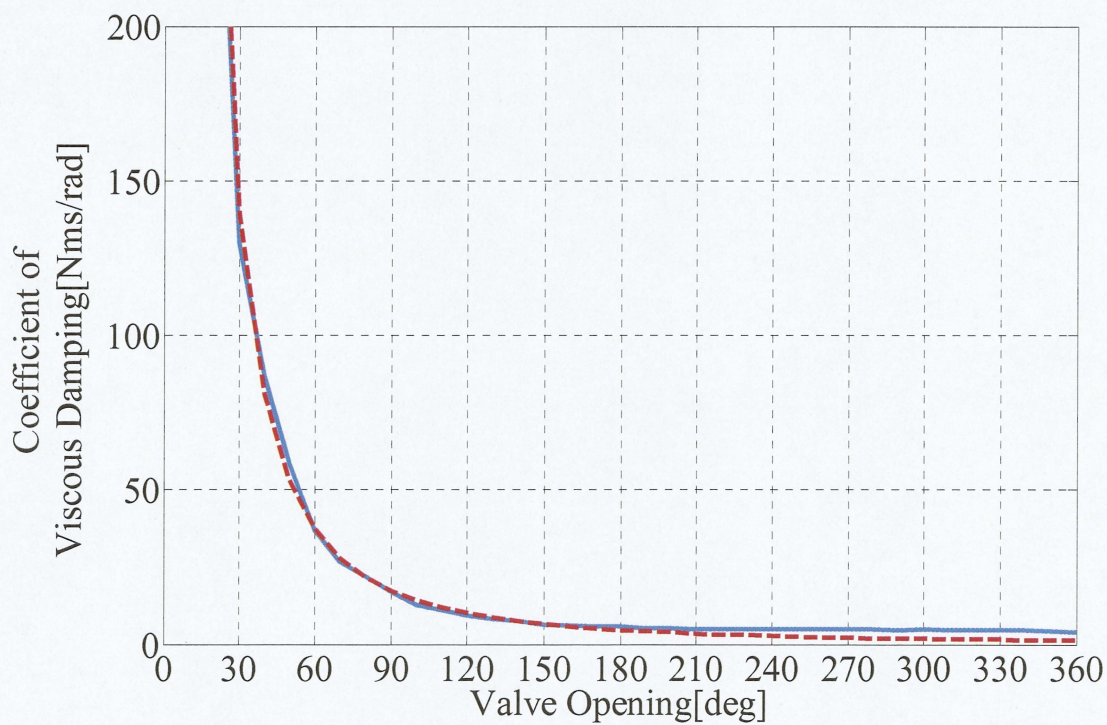
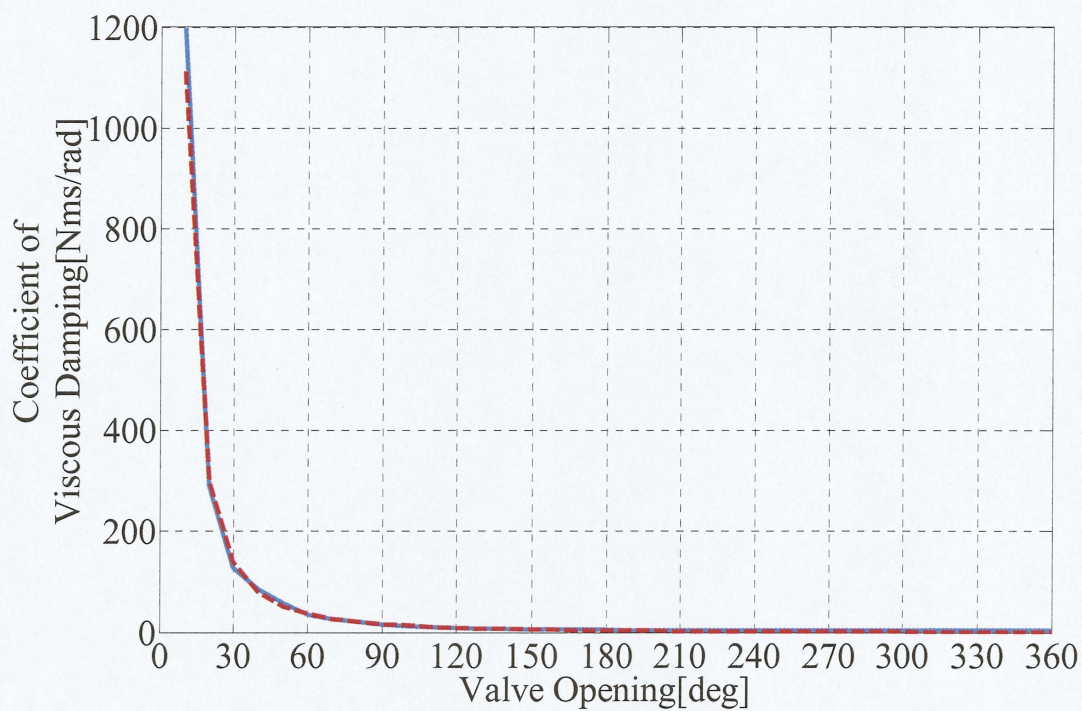


Fig.4.19 カルマンフィルタによる粘性の推定値と実験結果より得た粘性の近似値の比較

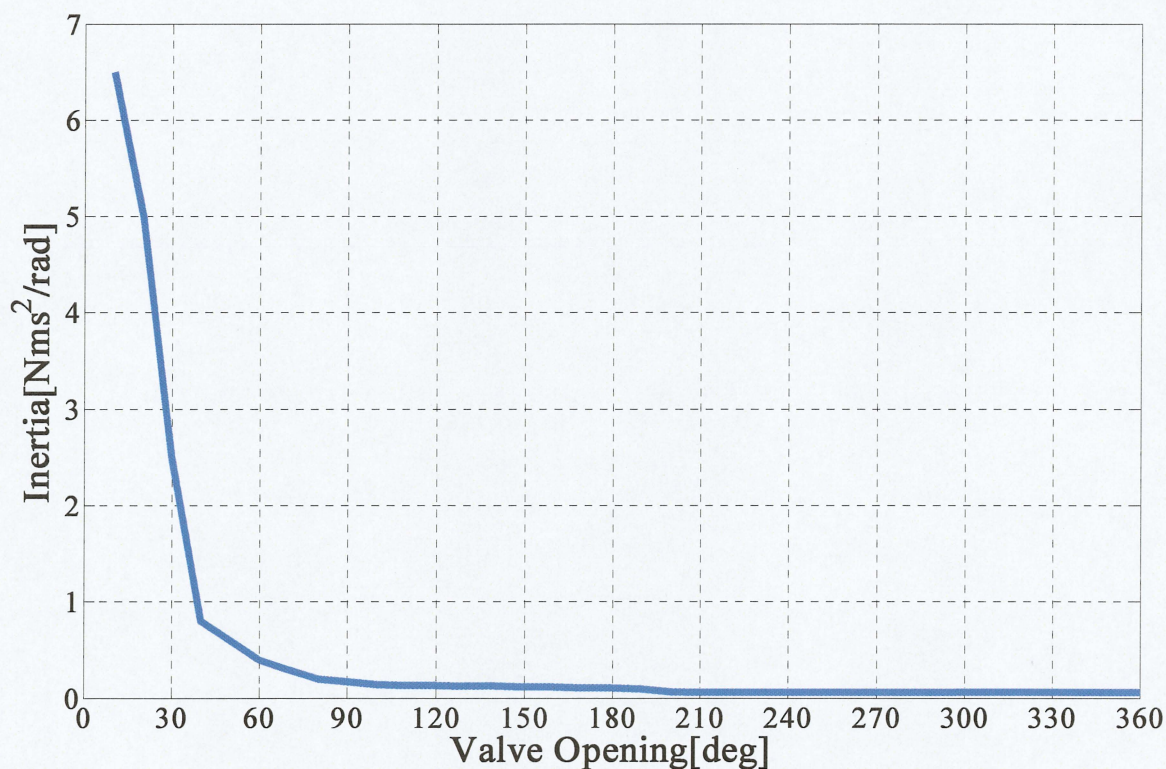


Fig.4.20 バルブの開度の違いによる慣性の推定値

Fig.4.20 は横軸にバルブ開度[deg]、縦軸に慣性[Nms²/rad]を示す。慣性の推定値もバルブ開度を低くするにつれ、大きく増加した。アームの慣性は一定であるので、流体の慣性に着目する。流体の慣性は流速の2乗に比例する値である。バルブを閉めることによって、バルブ部分で流体が流れにくくなり、バルブ部分での流速が上がることで流体の慣性が増加し慣性の推定値が増加したと考えられる。Fig.4.21 にバルブ開度と実験装置全体の摩擦の推定値の関係を示す。

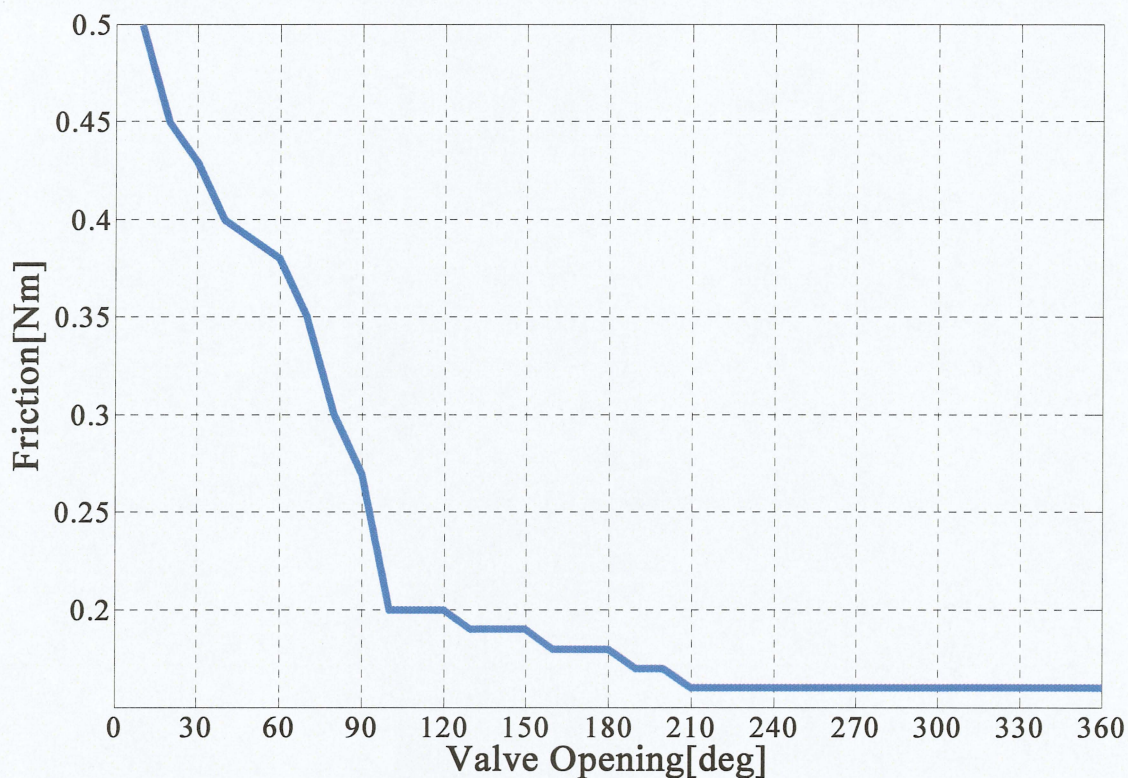


Fig.4.21 バルブ開度の違いによる摩擦力の推定値

Fig.4.21 は横軸にバルブ開度[deg]、縦軸に摩擦[Nm]を示す。摩擦の推定値は、粘性、慣性と比較した場合、開度による変化が小さい事が示された。

この3つのパラメータの推定値を比較する。慣性、摩擦の推定値もバルブ開度を変えることで変化するが、粘性の推定値がバルブ開度を変えることで最も大きく変化する事が示された。また3つの推定値の大きさを比較しても、粘性の推定値が最も大きい。以上の事からバルブ開度の変化による粘性の変化の大きさと慣性、摩擦と比べて粘性の値の大きくでることの2点から、実験装置における粘性変化での制御の有効性を示せた。

第5章

結言

5.1 まとめ

本研究では、ロボットアームシステムの大型化の要因の一つである大型のアクチュエータに頼るのではなく、高減速比ギア付き小型アクチュエータとばね、粘性減衰ダンパーを組み合わせた新しいエネルギー蓄積型アクチュエータシステムの提案を行い、提案システムの有効性の検証を目的として研究を行った。

提案システムを制御するため、ばねに力を蓄え開放する際の弾性力を利用することで、素早い動作と大きな力を発揮し、粘性減衰ダンパーを変化させてロボットアームの手先制御を実現するため、ばねの平衡点の操作と粘性の制御による手先位置制御手法を考案し、シミュレーションを用いて粘性の制御によるロボットアームの手先位置制御の有効性を示した。

次に、提案システムにおいて重要な要素となるである粘性の制御について、シミュレーションにより得られたアームを制御するために操作すべき粘性の変化量が、実際のシステムにおいて実現できるのかを検討した。粘性減衰ダンパーを実際に製作し、実験により製作を行った粘性減衰ダンパーの特性を評価解析し、粘性の近似値を求めることで粘性を変化させることが可能であることを確認した。このように小型アクチュエータとばね、粘性減衰ダンパーを組み合わせたロボットアームシステムにおいて粘性の変化による手先軌道の制御手法の有効性が確認された。

5.2 今後の課題

本研究では小型アクチュエータとばね、粘性減衰ダンパーを組み合わせた新しいアクチュエータシステムを提案し、提案した制御手法をシミュレーションと粘性減衰ダンパーの性能評価実験より提案システムの有効性の検証を行ったが、今後は実際に実験装置を使用して提案手法の有効性を検証する必要がある。また製作をした粘性減衰ダンパーの性能評価実験より、バルブの開度の誤差が粘性に大きく影響することが確認できた。こうしたことからアクチュエータを用いてバルブの制御を行う際はバルブ開度の誤差をフィードバックしバルブの開度を精密に制御する必要があり、粘性の操作量と目標値との誤差がどこまで許容できるのか、また、粘性が目標値から差を有した場合でも不安定になることなく制御できる制御手法を確立していく必要がある。

参考文献

- [1]厚生労働省「平成 21 年度 介護保険事業状況報告（年報）」p.6
- [2]厚生労働省「平成 21 年度介護サービス施設・事業所調査」
- [3]高橋光司,積際徹,横川隆一:「人間の上肢運動を補助する介護ロボットの開発」,人間機械学会講演論文集,No94, pp.13-16 (2009)
- [4]田嶋知弥, 行田将彦, 小林貴則, 久野義徳:「複数の人に非言語で対応する介護ロボット」, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.151(2011)
- [5]石川直人, 藤原直樹, 全文星, 小林貴訓, 久野義徳:「移動介護ロボットのための頭部動作に基づく対象者の認識」, 電子情報通信学会総合大会講演論文集 情報・システム(2), p.220(2009)
- [6]中川昭夫,大築康生,藤本弘道,陳隆明,赤澤康史:「ロボットスーツ脳卒中片麻痺上肢のためのロボット技術を応用した訓練システム」,総合リハビリテーション,37 巻,9 号,pp.803-808(2009)
- [7]株式会社日本ロジックマシン,福祉機器ホーム介護ロボット百合菜,株式会社日本ロジックマシンホームページ
- [8]佐藤帆紡,川畑共良,田中文英,山海嘉之:「ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援」,日本機械学会論文集 (C 編) 76 巻,762 号, pp.227-235(2010)
- [9]中島孝:「神経・筋難病患者が装着するロボットスーツ HAL の医学応用に向けた進捗,期待される臨床効果」,保健医療科学,Vol.60 ,No.2 ,pp.130-137(2011)
- [10]新宮正弘,江口清,山海嘉之:「バイオフィードバックを用いたポリオ経験者の筋神経系制御能力の改善とロボットスーツ HAL による麻痺肢動作支援」,日本機械学会論文集 (C 編), 76 巻,772 号, pp.3630-3639 (2010)

- [11]八木昭彦,左貝雅人,松宮潔,正宗賢,土肥健純:「携帯電話による遠隔操作が可能な天井走行型ロボットアームの開発」,第3回生活支援工学系学会連合大会講演予稿集, p.34(2005)
- [12]本間敬子,山田陽滋,松本治,李秀雄,小野栄一:「介護支援ロボットの実証試験における倫理審査と被験者保護について:排泄介護総合支援ロボット「トイレアシスト」の事例報告」,日本ロボット学会誌, 28 巻,2 号, pp.181-190 (2010)
- [13]遠山茂樹,米竹淳一郎:「超音波モーターを応用したパワーアシストスーツ、バイオメカニズム学会誌」,Vol.30,No.4,pp.189-193(2006)
- [14]本田祐規,西川敦,宮崎文夫:「筋拮抗比と筋活性度を用いた空気圧駆動5指ロボットハンドの制御」,信学技報,Vol.109,No406,pp.37-41(2010)
- [15]和田一義,柴田崇徳,川口幸隆:「介護老人保健施設における長期ロボット・セラピー:実験5年目における経過報告」,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1A1-J03(1-2) (2009)
- [16]佐々木大輔,則次俊郎,高岩昌弘:「空気圧ゴム人工筋を用いた下肢訓練用ウェアラブルマスタスレーブ装置の開発」,日本機械学会福祉工学シンポジウム講演集,pp.179-182(2009)
- [17]<http://web.sc.itc.keio.ac.jp/anatomy/juncturae/A03509001-009.html>
- [18]山暴啓一,丸山工作共著:「筋肉」,化学同人(1986)
- [19]石井直方:「重力と闘う筋、筋はどのようにして力を出すのか?」,山海堂,(2001)
- [20]伊藤宏司,伊藤正美:「生体とロボットにおける運動制御」,計測自動制御学会,(1991)
- [21]早矢士侑治,川村貞夫,満田隆,植村充典,関本昌紘,伊坂忠夫:「人間の筋構造を有するロボットのロバスト・センサフィードバック制御」,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A1-B09(1-4)(2009)
- [22]田中大資,中村太郎:「人工筋肉マニピュレータの剛性制御」,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集,1A2-M02(1-4) (2009)

- [23]戸崎祐樹,平田秦久,小菅一弘:「発生可能なブレーキ領域を考慮したワイヤ型パッシブ運動支援システムの制御」,第 54 回自動制御連合講演会,pp.1523-1526(2011)
- [24]T. Flash , N. Hogan: 「The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model」 , Journal of Neuroscience, 5, pp.1688-1703(1985)
- [25]Morasso: 「Spatial Control of Arm Movements」 ,”Experimental Brain Research, Vol.42, pp.223-227(1981)
- [26]半田裕一郎,池浦良淳:「人間どうしの三次元協調運動の特性解析に関する研究」三重大学修士学位論文(2008)
- [27]土井達也,山田宏尚,池本敏久,檜谷浩:「ハンドクレーン型パワーアシスト装置のシミュレーション」,日本フルードパワーシステム学会論文集,Vol.39,No.2,pp.28-33(2008)
- [28]神代充,渡辺富夫,柴田論,山本智規:「視線提示を考慮した握手要求動作モデルの開発」,日本機械学会論文集,Vol.77,No.776,pp.1429-1440(2011)
- [29]増山樹,村松鋭一,渡部慶仁,有我祐一,遠藤茂:「生体を模倣したロボットアームの制御」,計測自動制御学会東北支部研究集会,245-24(2008)
- [30] 有本卓,関本昌紘:「“巧みさ”とロボットの力学」,毎日コミュニケーションズ(2008)

謝辞

本研究を行うにあたって、実力不足だった私が何度も質問に伺い、その都度丁寧な説明、ご指導をいただいた池浦良淳教授に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。また、大変お忙しい中本論文を査読して頂くとともに、多数のご教示、ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 駒田諭准教授に厚く御礼申し上げます。研究だけでなく先生の持たれている様々な知識や経験談を話していただき、パソコンの操作についてもすぐに対応してくれた早川聡一郎准教授に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。研究についての問題点やこれまでしてこられた研究からの経験や実際に実験装置を作られてきた方の立場からの意見やご指導をいただいた澤井秀樹技官に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。研究過程において発表の際に質問や研究への助言を頂いた水谷一樹特任教授に深く感謝し厚く御礼申し上げます。

研究の進め方や、MATLAB の使い方、研究室での生活について様々なアドバイスや指導をいただいた研究室の先輩方皆さんに深く感謝します。同じ研究グループとして主に実験を担当し研究を共に行った東泰成君に深く感謝します。そしてこの研究室で学部の中から数えて3年間皆で楽しく、研究内容は違う中で情報交換をしながら共に過ごした同期の天野洸人君、安藤雅人君、清水輝君、玉置翔士君、長田大君、廣瀬昭貴君に深く感謝し本研究の結びとします。