

- 修士論文 -

二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの実現と筋の粘弾性を生かした制御に関する研究

Realization of Robot Arm with
Bi-articular Driving Mechanism and
its Control Using Muscular
Viscoelasticity

平成19年2月2日提出

指導教員 堀 洋一教授

東京大学工学系研究科

56414 吉田 憲吾

内容梗概

二関節筋とはヒトを初めとする生物が普遍的に備える跨った二つの関節を同時に駆動する筋肉である。生物の四肢にはこの二関節筋と一つの関節のみを駆動する一関節筋がともに存在して自在に制御されているが、従来のロボットは一関節筋に相当するアクチュエータを備えるのみである。本論文においてはロボットが二関節筋の仕組みを取り入れることで、主にフィードフォワードを使った生物のようにロバストで巧みな制御能力を獲得できることを主張する。特に各関節に存在する一関節筋の拮抗対と、その間を繋ぐ二関節筋の拮抗対を持つアームモデル及び各筋の粘弾性による釣り合いを基とした制御手法について提案し、これをシミュレーション及び自作実験機による実験によって示す。自作実験機は二関節筋の仕組みを二関節同時駆動機構として実現したもので、機構の構成や他の実現法の指針について合わせて述べる。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	1
第2章	生物の仕組みを取り入れる取り組み	3
2.1	新しい構造としての二関節筋を取り入れる取り組み	3
2.1.1	従来のロボットアームと生物の四肢の比較	3
2.1.2	二関節筋に関する基礎的研究の現状	3
2.1.3	二関節筋の応用と利用に関する研究の現状	4
2.1.4	本研究と既存研究との比較	5
2.2	生物の制御の仕組みを取り入れる現状	5
2.2.1	生物の制御機構としてのCPG	5
2.2.2	CPGを用いた応用研究の現状	6
2.2.3	本研究と既存研究との比較	7
第3章	二関節筋を持つアームのモデル	9
3.1	筋の粘弾性モデル	9
3.2	3対6筋を持つアームのモデル	9
3.3	拮抗対の各筋の活動レベルの和と差を取り入れた表現方法	11
第4章	二関節筋を持つアームの特性	12
4.1	二関節筋を持つアームの手先出力	12
4.1.1	二関節筋を考慮した手先出力の導出	12
4.1.2	従来機構との比較	12
4.2	二関節筋を持つアームの手先剛性	15
4.2.1	二関節筋を考慮した手先剛性の導出	15
4.2.2	手先剛性の解析	17
4.3	二関節筋を持つアームの釣り合い特性	19
4.3.1	拮抗対の釣り合い特性	19
4.3.2	3対6筋を持つアームの釣り合い特性	20
第5章	筋の粘弾性による釣り合いを生かした制御手法	22
5.1	釣り合いによる制御手法の提案	22
5.2	提案する制御手法のシミュレーションによる検証	23
5.2.1	ラグランジュ法を用いたシミュレーション手法	23
5.2.2	提案手法のシミュレーション結果	24

第6章	ロボットアームの実装	30
6.1	3対6筋を実現するロボットアームの提案	30
6.1.1	単関節駆動機構と二関節同時駆動機構	30
6.1.2	筋の粘弾性の実現	31
6.1.3	3対6筋に相当する機構を備えたロボットアーム	32
6.2	ロボットアームの設計と制作	33
6.2.1	機械部分の設計と制作	33
6.2.2	ロボットアームの制御機構	34
第7章	結論	37
7.1	本論文のまとめ	37
7.1.1	静的、動的特性及び粘弾性を利用した制御手法に関するまとめ	37
7.1.2	二関節同時駆動機構を用いたロボットアームに関するまとめ	37
7.2	今後の課題	38
7.2.1	二関節筋の特性を生かした制御手法に関する課題	38
7.2.2	二関節筋の仕組みを持つロボットアームに関する課題	38
	参考文献	39
	発表文献	41
	謝辞	42

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、様々なロボットが研究・開発され広く活躍しているが、これらは生産財として利用される産業用ロボットと、それ以外の新しいタイプのロボットに大別できる。現在、日本におけるロボット産業の生産額は約 6000 億円でこれらのほとんどは産業用ロボットによるものであり、国内において中長期的には飽和状態にあると考えられている。そして現在、新しいロボットの開発が研究機関のみならず、企業においても実用化に向けて積極的に行なわれるようになってきた。[1]

新しいロボットはまずはアミューズメントの分野から始まり、徐々に生活の様々な分野における活躍を目指している。介護、家事など少子高齢化が進む中、これまでヒトが行ってきた作業のロボットによる代替は、時代の要請とも言える。しかし、新しいロボットが普及するにあたり越えるべき課題は多い。ヒトと極めて近い距離で働く以上、安全性はまっ先に考慮されるべきであるが、現在は単にロボットが出力できるパワーの最大値を抑えるという方法でカバーしている。しかしながら、これでは十分な性能は見込めず、安全性を備えた新しい制御方法が必要である。

現在の産業用ロボットはヒト以上の正確な動作、高速な動作を可能としているが、これらの多くは人とは隔離された空間での活動を前提としており、人と協調しながら働くことは困難である。生活の中でヒトと協働して働くような新しいロボットにおいてはこれらとは異なるいくつかの要件が求められる。

1. 不安定、未知の環境下である程度の正確性を保てること。
2. 歩行、走行、回避など特定の動作を素早く行なえること
3. ヒトや環境との衝突時に、衝撃を逃がすように剛性を調節できること。

これらはまさにヒトを始めとする生物が備える能力であるが、生物はこれらを驚くほど簡単に実現している。複雑で膨大な計算を必要とする制御や、簡単でも固定された環境にのみ対応できる制御は従来のロボットに一般的に利用されている方法であるが、これでは上記の要件を満たすことができず、求められるのは簡単でロバストな制御手法である。

我々はこの困難な課題を生物に学ぶことで解決できると考えている。現在のロボットは制御手法のみならず、その構造についても大きく生物と異なっているが、我々は生物の仕組みをロボットに取り入れることでロボットが大きく一步ヒトに近づき、ヒトとロボットが協働する社会が実現できる。

1.2 研究の目的

本研究では生物の仕組みをロボットに取り入れることによる、簡単でロバストな制御の実現を目指す。生物の仕組みとして、筋の粘弾性と、二関節筋と呼ばれる生物特有のアク

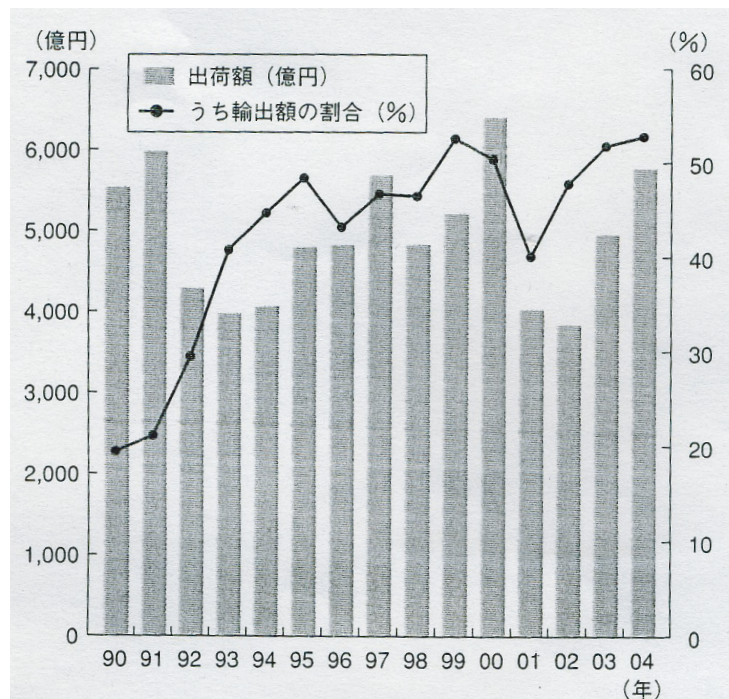


図 1.1: ロボット産業の出荷額と輸出割合の推移 [1]

チュエータを取り扱い、これらが存在することによる特性を静的な面、動的な面の両面から示す。また、これらの特性を生かしたロボットアームの駆動方法を提案し、この有効性をシミュレーションによって示す。

次に、二関節筋の原理を二関節同時駆動機構として実現し、これを備えるロボットアームを制作する。いくつかの実装方法を比較検討し、今回選択した設計についての詳細を述べる。

第2章 生物の仕組みを取り入れる取り組み

2.1 新しい構造としての二関節筋を取り入れる取り組み

2.1.1 従来のロボットアームと生物の四肢の比較

従来のロボットアームでは、各関節に独立なアクチュエータを有する形が一般的である。一方ヒトの上肢・下肢を始めとして、生物は各関節を独立に駆動するアクチュエータ（一関節筋）だけでなく、各関節にまたがって同時に力を発揮するアクチュエータ（二関節筋）を持っている。（図 2.1）

二関節筋が存在することによって、一方の関節に協働的に働く時、もう一方には拮抗的に働くという現象が起こる。また各関節を独立に取り扱うということもできなくなる。一見不要にも思われるが、この二関節筋が特に生物の制御機能にとって大きな役割を果たしているとして注目されてきている。

2.1.2 二関節筋に関する基礎的研究の現状

二関節筋の存在自体は解剖学的に非常に古くから知られているが、実際にこの筋がどのようにヒトに役立っているのかということは良く分かっていなかった。[2] IngenShenau らは、二関節筋の役割として、体幹部で発生したエネルギーを四肢に伝える点を指摘している。[3]

Hogan は手先インピーダンスの制御に関して、二関節筋をはじめとする冗長な筋の拮抗構造が、大きな役割を果たしていることを示した。[4][5]

Mussa Ivaldi らは、姿勢による手先のスティフネス楕円体の変化を実験的に示している。[6]

生物のアームは様々な筋が組み合わさってできているが、Kumamoto らによって、二次元運動に限定した場合に複雑な筋群を機能の面から一関節筋と二関節筋の 3 対 6 筋の実効筋モデルによって表そうとする取り組みがなされている。（図 2.2）3 筋 6 対を持つアームの手先出力や粘弾性に関する研究がなされ、二関節筋が生物の制御機能に大きな役割を果たしていると主張している。[7][8][9]

二関節筋の役割に関する研究としては、跳躍時に腓腹筋と呼ばれる下腿部の二関節筋が各関節で生じたトルクを直動運動に効率良く変換する役割を果たしているということが Oshima, Toriumi らによって確かめられた。図 2.3 に腓腹筋を含む跳躍モデルを示す。[10][11]

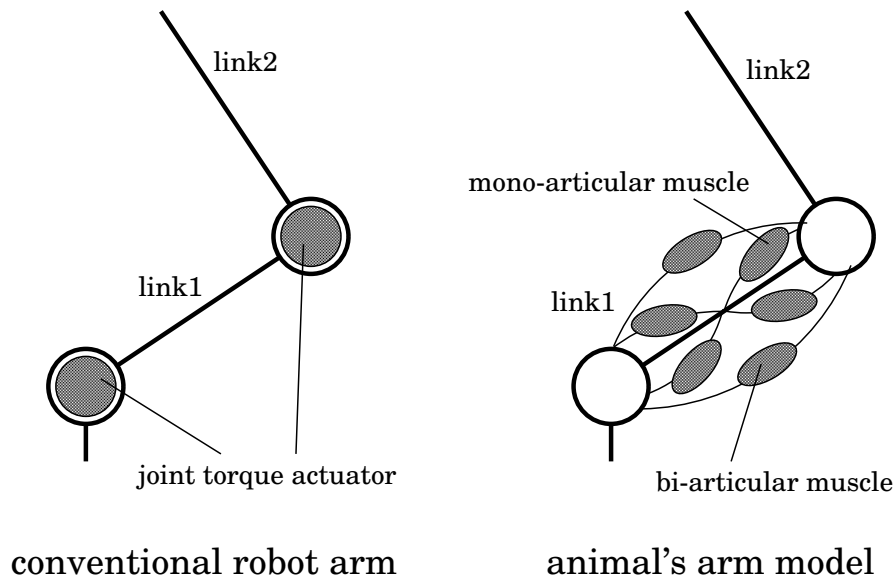


図 2.1: 従来のロボットアームと生物の四肢の構造の比較

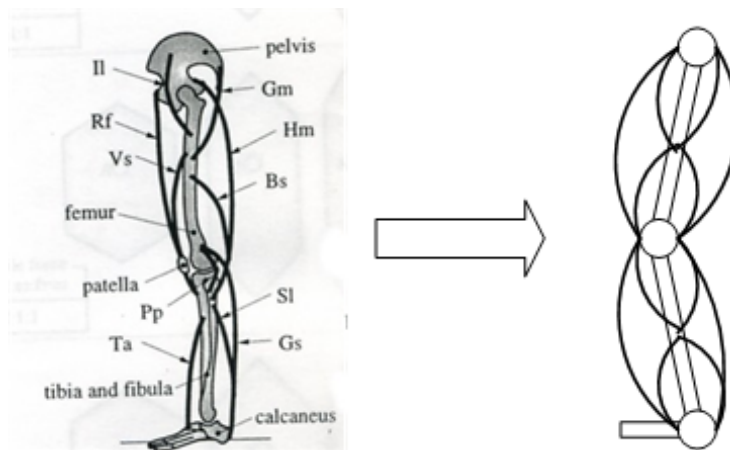


図 2.2: 平面運動に限定することで単純化した実効筋モデル

2.1.3 二関節筋の応用と利用に関する研究の現状

二関節筋を取り入れたロボットの例としては前述の Kumamoto らによって制作された、アクチュエータとしてラバチュエータを用いたロボットアームがまず挙げられる。[7] これによって等尺条件化におけるアームの手先出力や粘弾性の特性が確認された。また Oshima, Toriumi らは腓腹筋等を実装した跳躍ロボットを提案している。[10]

一方沖電気工業の小田らによって開発された HIPRO ロボットは、筋肉の諸特性を機械的に実現し二次元平面上における生物のアームを模擬するものである。また二関節筋による粘弾性の調整機構を利用して上手く着地することのできる跳躍ロボットも発表している。(図 2.4)[12][13]

またリハビリテーション領域において、単関節筋を選択的に鍛えることによって入院患者の筋力回復を目指す研究が福井らによってなされた。[14] また、大島らによって簡便な方法によって下肢、上肢の筋力測定を実効筋の概念から測定しようとする取り組みがなされている。[15] その応用として実際にスポーツ科学の分野に取り入れて、陸上競技や自転

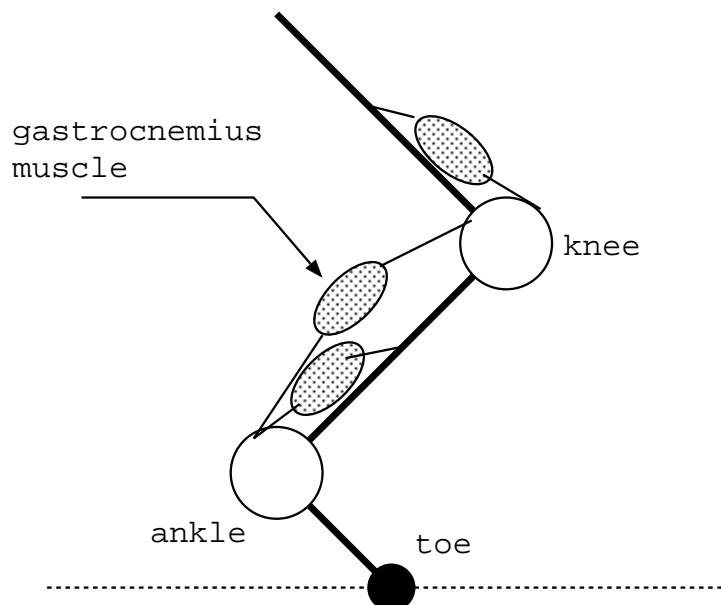


図 2.3: 腓腹筋 (gastrocnemius muscle) を含む跳躍モデル

車競技に生かす取り組みも行なわれている。(図 2.5) 田島らにより自動車の操舵に関して、実効筋の概念から力の発揮しやすさ等を検討し次世代のステアリングシステムに関する研究がなされている。[16]

2.1.4 本研究と既存研究との比較

これらの研究は、主に二関節筋を含むアームの静的な特徴に基づくものが多い。しかしながら、実際にロボットに応用していく場合にこれだけでは不足である。本研究ではさらに動的な特性を検証し、二関節筋が制御機能にどのように役立っているのかという点を明らかにする必要がある。ロボットアームの実装に関しては、これまでに挙げた二関節筋を持つロボットは機械的に粘弾性を実現したり、あるいは二関節筋をバネ、ワイヤ等で置き換えているが、本研究では電磁アクチュエータを用いて早い制御ループによって仮想的に粘弾性を作り出す方法を取ることにする。

2.2 生物の制御の仕組みを取り入れる現状

2.2.1 生物の制御機構としての CPG

CPG とは Central Pattern Generator の略であり、生物の脊髄中に存在して歩行やはばたきなどの繰り返しの動作のリズムを生成している。もともと神経生理学の分野において生物の行動を生成するものとして発見されたものであるが、現在ロボットのリズムを持った運動等への適用が注目されている。

CPG とはある位相関係を持った神経振動子の集まりとして構成される。神経振動子は神経素子の結合によって形成され、一定の出力を与えると自励振動を起こすというのがその基本である。また特徴とし「引き込み」と呼ばれる外部から与えられた振動的な入力信号に自励振動を同調させていく性質がある。

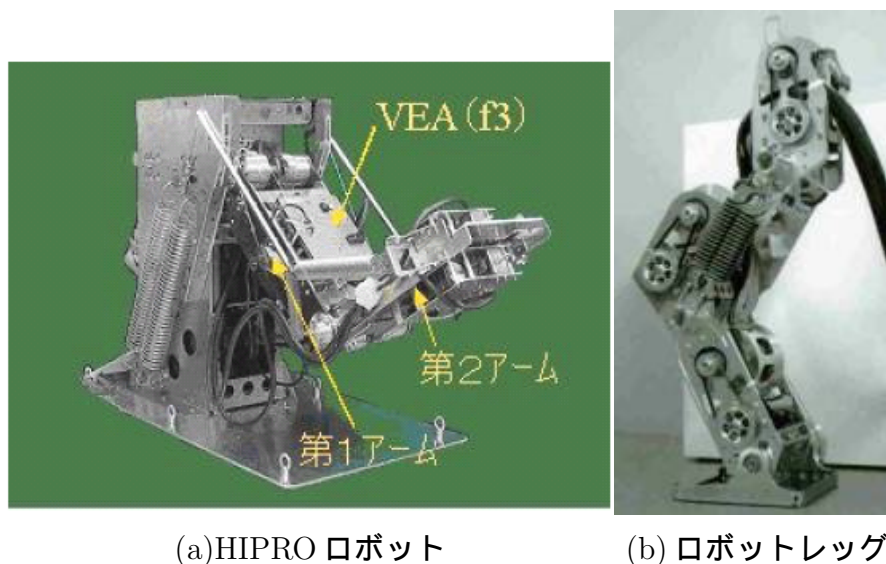


図 2.4: 沖電気工業による二つの二関節筋の原理を用いたロボット

CPG の代表的なモデルとして Matsuoka のモデルの多数の素子が結合した一般形として式 (2.1) に示す。[17] 各素子は興奮後に沈静化するという性質 (順応特性、疲労特性) を持っており、これを二つ排他的に結合することで、発振させることができる。図 2.6 に二つの素子を組み合わせた場合についての原理を示す。

$$\begin{aligned}\tau_{n1}\dot{x}_n &= -x_n - \beta_n f(v_n) - \sum_{i=0}^N \gamma_{ni} f(x_i) + b_n(u_0 + u_{fn}) \\ \tau_{n2}\dot{v}_n &= -v_n + f(x_n)\end{aligned}\quad (2.1)$$

各パラメータの説明であるが、 x_n は各素子の出力である。 v_n は各素子の疲労の度合いを示すものである。 β は各素子の順応の強度であり、これが大きいほど興奮から鎮静への山が急峻になる。 γ は素子同士の結合係数であり、負の時に排他的な結合となる。 u_0 は一定入力であり、 u_{fn} は振動的な入力 (フィードバックなど) を通常用いる。

これらの素子に一定の入力を与えた場合、最初素子は興奮し出力 x_n の値は上昇する。しかしながら、次第に疲労がたまって沈静化し、出力は一定の値に落ちつく。これを二つ排他的に結合すると、片方が興奮状態にある時、もう片方はそれに応じて沈静化する。興奮状態にある素子はそのうち疲労によって沈静化するから、そうすると今まで抑制されてきた側が興奮するようになる。これを交互に繰り返すことによって、発振する神経振動子を得ることができる。

2.2.2 CPG を用いた応用研究の現状

多賀らによって CPG の引き込み特性を用いた、矢上面内の二次元二足歩行の安定な制御系の提案・構築を行なわれている。[18][19][20][21] また、多足歩行のロボットへの応用としては、木村らの四足ロボット「鉄犬」の実現、六足ロボットとして稲垣らの研究がある。[22][23]

基本的に、各筋もしくは各関節トルクの駆動指令源として CPG を用い、各関節角等の情報を受けとって引き込み動作に利用するといった形で、制御が行なわれている。

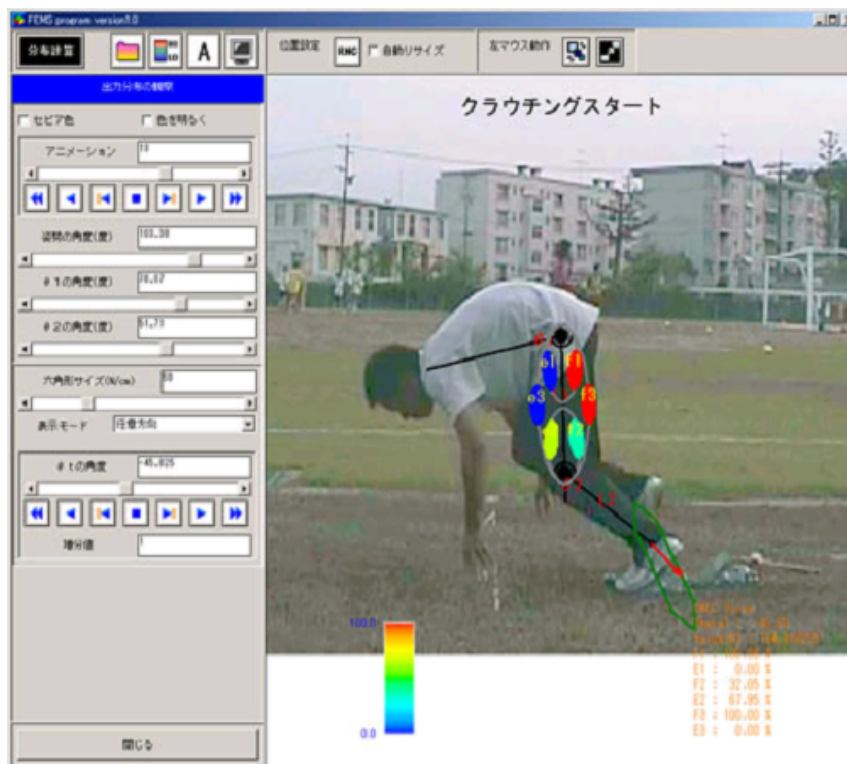


図 2.5: 筋の出力分布を計測する FEMS プログラム

企業による実用化としては、富士通からニューラルネットワークと CPG を組み合わせた学習機構を持つロボットが発表されている。[24]

2.2.3 本研究と既存研究との比較

CPG を用いた研究の問題点として、制御対象と CPG の神経素子網の関係が必ずしも明確でないことが挙げられる。各関節に配置したアクチュエータに神経素子を対応させる場合もあるが、この必然性についても疑問が残る。本研究における制御手法は、二関節筋を持ったモデルを用いてこれらの粘弾性にに基づき提案するものであり、より生物の本来持つ基本的な制御機構に近いと考えられる。

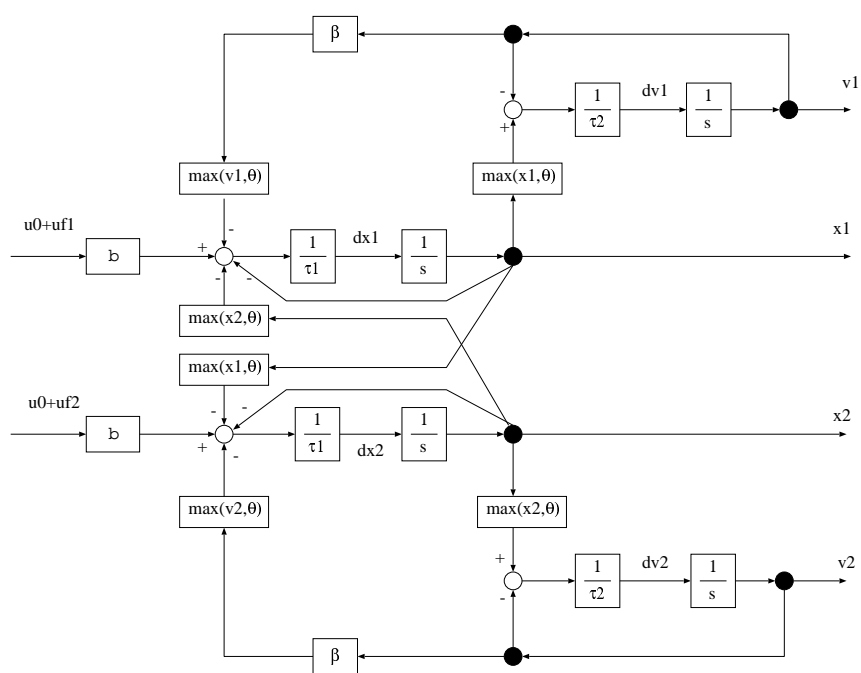


図 2.6: 二つの素子を組み合わせた場合の CPG モデル

第3章 二関節筋を持つアームのモデル

3.1 筋の粘弾性モデル

本研究では筋の粘弾性を積極的に制御に利用する。筋の出力 F は活動レベル α と、筋の長さ L および筋の収縮速度 V からなる非線形な関数の積として式 (3.1) のように表わすことができる。

$$F = \alpha g(L, V) \quad (3.1)$$

これを、自然長 $L = l_0$ および収縮速度 $V = 0$ の近傍でテイラー展開することによって、筋の粘弾性モデルを得る。

$$\begin{aligned} F &\approx \alpha \left\{ g(l_0, 0) + \left. \frac{\partial g}{\partial L} \right|_{V=0, L=l_0} (L - l_0) + \left. \frac{\partial g}{\partial V} \right|_{V=0, L=l_0} (V - 0) \right\} \\ &= \alpha (f_0 - k_0 x - b_0 \dot{x}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ただし、 k_0, b_0 はそれぞれ正の定数である。ここで、収縮力を $u = \alpha f_0$ とすれば、式 (3.2) に対して

$$k = \frac{k_0}{f_0}, b = \frac{b_0}{f_0}$$

のように置くことで、収縮力を指令値として式 (3.3) と表わすことができる。

$$F = u - K(u)x - B(u)\dot{x} = u - kux - bu\dot{x} \quad (3.3)$$

バネ成分、ダンパ成分の係数は筋肉の収縮力 u に比例する関数として表すことができ、比例定数をそれぞれ k, b とする。 x は自然長からの変位である。

よって生物の筋肉は図 3.1 のように模式的に表すことができ、バネ成分、ダンパ成分を持ったアクチュエータとして表わされる。

3.2 3対6筋を持つアームのモデル

図 3.2 のように生物のアーム機構を模式的に表わす。

ここで図 3.2 の e_1, f_1 は関節 R1 に働く一関節筋、 e_2, f_2 は関節 R2 に働く一関節筋である。また、 e_3, f_3 は関節 R1, R2 にまたがる二関節筋である。

次に各関節におけるトルクが、各筋の出力によってどのように発生するかを示す。二つの関節 R1, R2 の半径をそれぞれ r_1, r_2 とし、各々に発生するトルクを T_1, T_2 とする。各筋の出力を F_x , ($x = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3$) とすると、式 (3.4) と表わされる。

$$\begin{aligned} T_1 &= (F_{f_1} - F_{e_1})r_1 + (F_{f_3} - F_{e_3})r_1 \\ T_2 &= (F_{f_2} - F_{e_2})r_2 + (F_{f_3} - F_{e_3})r_2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

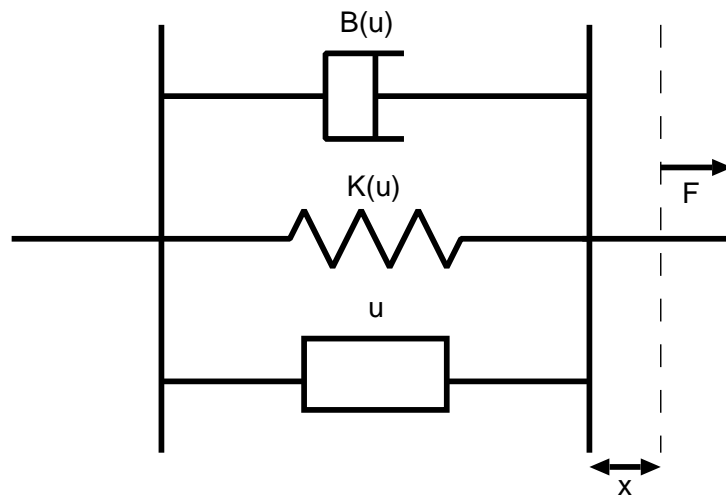


図 3.1: 筋肉の模式図

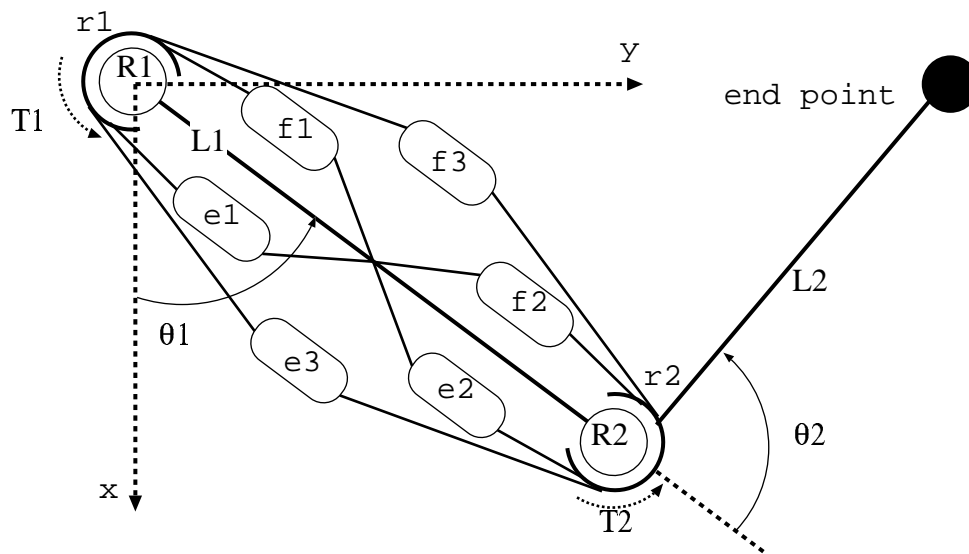


図 3.2: 典型的な生物のアーム機構

式 (3.3), 式 (3.4) より、各筋の収縮力を u_x , ($x = e1, e2, e3, f1, f2, f3$) とすれば式 3.5

$$\begin{aligned}
 T_1 &= (u_{f1} - u_{e1})r_1 - k(u_{f1} + u_{e1})r_1^2\theta_1 - b(u_{f1} + u_{e1})r_1^2\dot{\theta}_1 \\
 &\quad + (u_{f3} - u_{e3})r_1 - k(u_{f3} + u_{e3})(r_1\theta_1 + r_2\theta_2)r_1 - b(u_{f3} + u_{e3})(r_1\dot{\theta}_1 + r_2\dot{\theta}_2)r_1 \\
 T_2 &= (u_{f2} - u_{e2})r_2 - k(u_{f2} + u_{e2})r_2^2\theta_2 - b(u_{f2} + u_{e2})r_2^2\dot{\theta}_2 \\
 &\quad + (u_{f3} - u_{e3})r_2 - k(u_{f3} + u_{e3})(r_1\theta_1 + r_2\theta_2)r_2 - b(u_{f3} + u_{e3})(r_1\dot{\theta}_1 + r_2\dot{\theta}_2)r_2
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

また、e1 と f1、e2 と f2、e3 と f3 はそれぞれ拮抗関係にあり、これらの対を拮抗対と呼ぶ。最大努力時においては拮抗関係にある筋 e と f の間に、筋 e の出力を E 、出力の最大値を E_{max} とし、筋 f の出力を F 、出力の最大値を F_{max} とすると式 (3.6) という関係がある。

$$\begin{aligned}
 \frac{E}{E_{max}} + \frac{F}{F_{max}} &= 1 \\
 \text{ただし、} 0 \leq E \leq E_{max} \text{ , } E_{max} > 0 \\
 0 \leq F \leq F_{max} \text{ , } F_{max} > 0
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

3.3 拮抗対の各筋の活動レベルの和と差を取り入れた表現方法

さて、拮抗対の収縮力の和と差を考えることで、出力と粘弾性を上手く取り扱うことができる場合がある。ここで、各拮抗対の筋肉の収縮力の和と差を式 (3.7) のように定義する。各筋の収縮力は u_x , ($x = e1, e2, e3, f1, f2, f3$) とする。

$$\begin{aligned}
 S_1 &= u_{f1} + u_{e1}, D_1 = u_{f1} - u_{e1} \\
 S_2 &= u_{f2} + u_{e2}, D_2 = u_{f2} - u_{e2} \\
 S_3 &= u_{f3} + u_{e3}, D_3 = u_{f3} - u_{e3}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

ただし、

$$|S_1| > |D_1|, |S_2| > |D_2|, |S_3| > |D_3|$$

である。

式 (3.3), 式 (3.4), 式 (3.7) より、式 (3.8) が導かれる。

$$\begin{aligned}
 T_1 &= r_1D_1 - kr_1^2\theta_1S_1 - br_1^2\dot{\theta}_1S_1 \\
 &\quad + r_1D_3 - k(r_1\theta_1 + r_2\theta_2)r_1S_3 - b(r_1\dot{\theta}_1 + r_2\dot{\theta}_2)r_1S_3 \\
 T_2 &= r_2D_2 - kr_2^2\theta_2S_2 - br_2^2\dot{\theta}_2S_2 \\
 &\quad + r_2D_3 - k(r_1\theta_1 + r_2\theta_2)r_2S_3 - b(r_1\dot{\theta}_1 + r_2\dot{\theta}_2)r_2S_3
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

第4章 二関節筋を持つアームの特性

4.1 二関節筋を持つアームの手先出力

4.1.1 二関節筋を考慮した手先出力の導出

関節 R1,R2 の角度を図 3.2 のように θ_1, θ_2 とし、またリンク L1,L2 の長さをそれぞれ l_1, l_2 とするとヤコビ行列 J は

$$J = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

であるから、各関節のトルクと手先の力の関係は、

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = J^T \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

とすることができる。よって、

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、式 (3.4) 及び、式 (4.3) により、各筋肉が手先に及ぼす力の大きさと向きを示すことができる。ただし $r = r_1 = r_2$ とし、 $\theta_2 = 0, \pi$ の特異点を除く。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} &= \frac{r}{l_1 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} (F_{f1} - F_{e1}) \\ &+ \frac{r}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} (F_{f2} - F_{e2}) \\ &+ \frac{r}{l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \end{pmatrix} (F_{f3} - F_{e3}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

これらの重ね合わせにより、3対6筋を持つ生物の手先においては、6角形の出力が得られることになる。

4.1.2 従来機構との比較

各関節に独立にトルクを発生させる従来のアーム機構 (A) と、二関節筋の仕組みを持つアーム機構 (B) について、それぞれ手先出力がどのようなになるかを求める。

各関節の角度を様々に変えて、式 (4.4) に従い解析したものを図示する。手先角度は、R1 の角度を 30 度、60 度、R2 の角度を 30 度、60 度、120 度とそれぞれ変えて計算している。

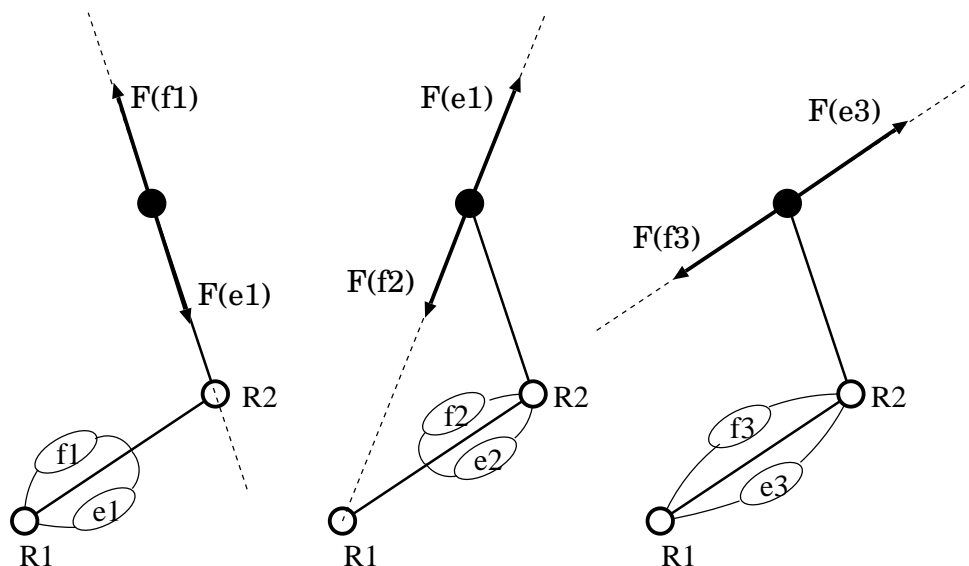


図 4.1: 各筋肉による手先の出力

各拮抗対によって手先にどのような方向の出力を与えるかを示している。左は関節 1 にかかる一関節筋による出力、中は関節 2 にかかる一関節筋、右は二関節筋による出力である。

各パラメータは A, B 共通で各腕の長さ l_1, l_2 を $l_1 = l_2 = 1[\text{m}]$ とする。また各関節の半径 r_1, r_2 を $r_1 = r_2 = 0.1[\text{m}]$ とする。

また、A, B それぞれのアクチュエータが発する最大トルクに関してであるが、A の各関節において発生する最大トルクと、B において一関節筋の効果のみによって発生する最大トルクが等しくなるという条件で解析する。つまり A の結果に二関節筋の効果を加えたものが B の結果である。具体的な数値としては、A の機構においては、各関節において $\pm 0.1[\text{N} \cdot \text{m}]$ の最大トルクを発生させる。B の機構においては、各筋肉が、最大 1N の力を発生する。よって一関節筋 e_1, f_1, e_2, f_2 によってそれぞれの関節に $\pm 0.1[\text{N} \cdot \text{m}]$ の最大トルクを発生し、二関節筋によってそれぞれの関節に同時に $\pm 0.1[\text{N} \cdot \text{m}]$ を与える。

従来のアーム機構の結果

解析結果を図 4.3 のように示す。図の順序は図 4.2 に対応する。この場合は手先出力は四角形 (平行四辺形) となった。全体的に出力は最大出力方向に偏っており、特に関節 1 より手先が離れた場合においては、著しくこの傾向が表れる。

二関節筋の仕組みを用いたアーム機構の結果

解析結果を図 4.4 のように示す。図の順序は従来アーム機構に同じく、図 4.2 に対応する。手先が関節 1 から遠い場合においても最大出力方向以外への力の大きさがある程度保たれるようになった。

比較のまとめ

従来機構に比べて、二関節同時駆動機構を持つアームでは各方向に均等な力を発生することが可能になった。第一関節の角度 θ_1 の方向への力を加えることによって、 $l_1 = l_2, r_1 = r_2$ の条件では、従来機構において力が最小となっていた方向に対して 2 倍の力を得ることが

4.1 二関節筋を持つアームの手先出力

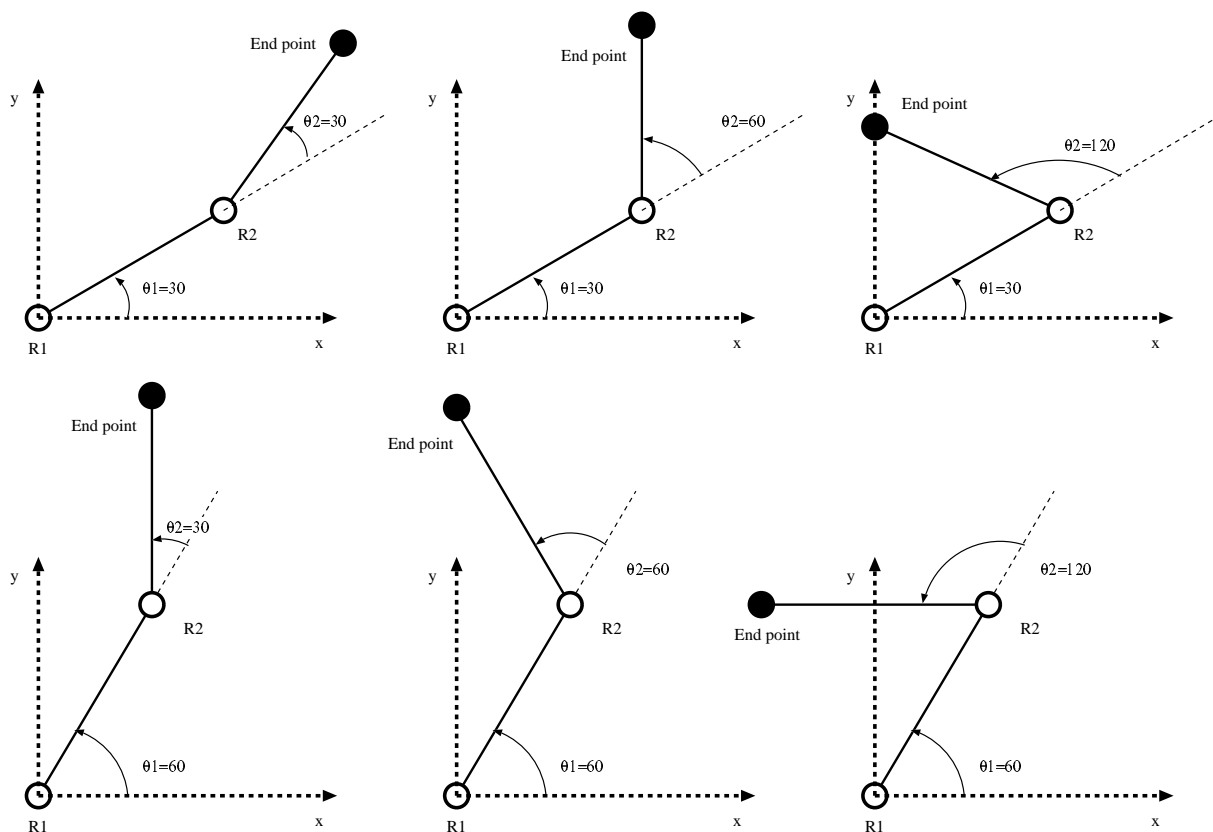


図 4.2: 解析を行なうアーム角度

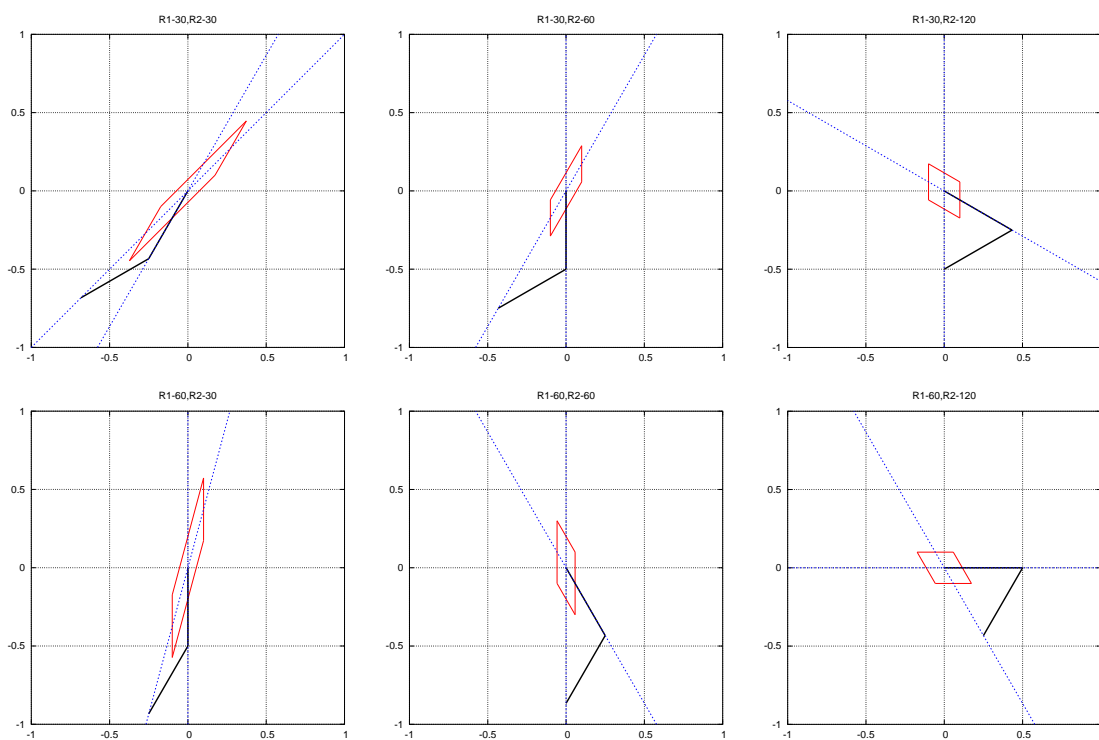


図 4.3: 従来のアーム機構の手先出力

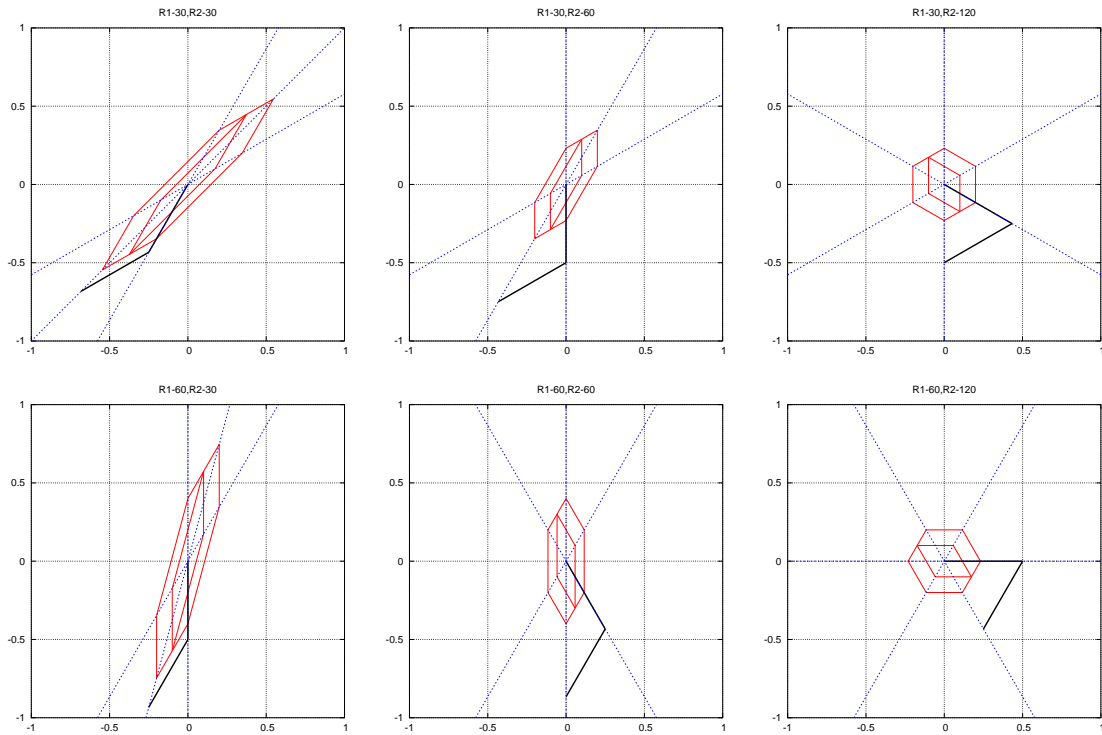


図 4.4: 二関節筋の仕組みを用いたアーム機構の手先出力
内側の四角形が二関節筋を除いた場合のアーム機構の手先出力である。つまり、従来機構の手先出力となる。

できるようになった。

これにより二関節同時駆動機構を持つアームでは、アクチュエータの個数は従来機構に比べて多くなるものの、アクチュエータ自体は出力の小さなものを使えるようになる。従来機構で用いたアクチュエータに比べて、2分の1の出力のアクチュエータを組み合わせることで、力が小さくなってしまふ部分の出力を同等に引き上げることができる。

4.2 二関節筋を持つアームの手先剛性

4.2.1 二関節筋を考慮した手先剛性の導出

静止状態及び、 $l_1 = l_2 = l, r_1 = r_2 = r$ の条件のもと、手先の微小な変位 $\Delta x, \Delta y$ に対する手先の力の変位 $\Delta F_x, \Delta F_y$ を考える。まず、微小なトルク $\Delta T_1, \Delta T_2$ と手先の力の関係を表すと。

$$\begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha & \beta \\ -\gamma & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \alpha &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2), \beta = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), \\ \gamma &= l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2), \delta = l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

とする。次に手先の微小な変位と、各関節の微小な変位 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ の変位について求めると

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha & -\gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

ここで、式 (3.5) より、微小な関節角度の変化によるトルクの変化を求めると

$$\begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} & \frac{1}{C_3} \\ \frac{1}{C_3} & \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

ただし

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{1}{kr^2(u_{f1} + u_{e1})} = -\frac{1}{kr^2 S_1}, \\ C_2 &= -\frac{1}{kr^2(u_{f2} + u_{e2})} = -\frac{1}{kr^2 S_2}, \\ C_3 &= -\frac{1}{kr^2(u_{f3} + u_{e3})} = -\frac{1}{kr^2 S_3} \end{aligned} \quad (4.8)$$

である。式 (4.5), 式 (4.6), 式 (4.7) より、手先の微小な変位と、手先の力の関係は

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

ただし

$$\begin{aligned} a_{11} &= \alpha^2 C_A + 2\alpha\gamma C_B + \delta^2 C_C \\ a_{12} &= -\alpha\beta C_A - (\alpha\delta + \beta\gamma) C_B - \gamma\delta C_C \\ a_{22} &= \beta^2 C_A + 2\beta\delta C_B + \delta^2 C_C \\ C_A &= \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3}, C_B = \frac{-C_1 C_2}{C_1 + C_2 + C_3} \\ C_C &= \frac{C_2(C_1 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} \end{aligned}$$

手先のポテンシャルエネルギーを Ep とすれば、

$$Ep = \begin{pmatrix} \Delta x & \Delta y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

と表わすことができ、等ポテンシャル面は楕円体となる。長径を $2A$, 短径を $2B$ として、傾きが ψ の楕円は

$$\left(\frac{\cos \psi}{A^2} + \frac{\sin \psi}{B^2} \right) \Delta x^2 + \left(\frac{\sin \psi}{A^2} + \frac{\cos \psi}{B^2} \right) \Delta y^2 + 2 \sin \psi \cos \psi \left(\frac{1}{A^2} - \frac{1}{B^2} \right) \Delta x \Delta y = 1 \quad (4.11)$$

と表わされ、式 (4.10) を展開すると

$$\frac{a_{22}}{(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)Ep} \Delta x^2 + \frac{a_{11}}{(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)Ep} \Delta y^2 - \frac{2a_{12}}{(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)Ep} \Delta x \Delta y = 1 \quad (4.12)$$

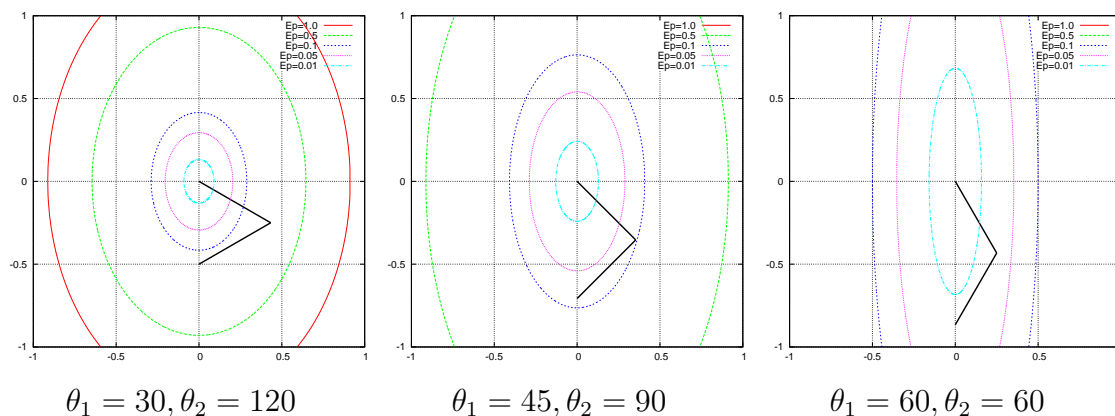


図 4.5: 手先が y 軸上に存在する際の等ポテンシャル面

となる。

楕円体を自由に設定するためには、長軸、短軸、傾きの3つを指定する必要がある、少なくとも独立な3つのパラメータが必要となる。ということで、手先出力と剛性楕円を独立に設定可能にするためには、3対6筋に対応する6つのアクチュエータが必要となる。

4.2.2 手先剛性の解析

手先が y 軸上に存在する時の解析結果

特に $\theta_2 = \pi - 2\theta_1$ となる時、つまり手先が y 軸上に存在する場合に、各拮抗対の和 $S_1 = S_2 = S_3$ となる条件では等ポテンシャル楕円体の傾きを0と調節することができる。図 4.5 に、この条件において各関節角を $\theta_1 = 30, \theta_2 = 120$ 、 $\theta_1 = 45, \theta_2 = 90$ 、 $\theta_1 = 60, \theta_2 = 60$ とそれぞれ変えた場合の楕円体を示す。この時、 $S_1 = S_2 = S_3 = 20[\text{N}]$ とし、 $l_1 = l_2 = 1[\text{m}]$ である。

収縮力の和を変化させた場合の解析結果

また、この際に各拮抗対の収縮力の和を変化させた場合にどのように楕円体が変わるかを図 4.6 に示す。ここでは、 $S_1 = S_2 = S_3 = 20[\text{N}]$ から各拮抗対の和をそれぞれ、40N, 60N と変化させた場合にどのような変化が起こるかを解析している。

このケースでは第二関節を駆動する一関節筋 $f_{2,e2}$ の発揮する力の方向が、 y 軸と一致しているために、 $f_{2,e2}$ の収縮力を強くした場合には楕円体の傾きに変化はなく、適切に $f_{1,e1}$ および $e_{1,e1}$ 、または $f_{3,e3}$ および $e_{3,e3}$ の収縮力を強くしてやることにより傾きを調整することが可能である。

手先が y 軸上から外れた場合の解析結果

次に、手先を y 軸上から外した場合についても同様に解析する。まずは、 $S_1 = S_2 = S_3 = 10[\text{N}]$ として、収縮力の和を全て等しくした状態についてを図 4.7 に示す。次に、 $\theta_1 = 30, \theta_2 = 90$ として、各拮抗対の収縮力の和をそれぞれ変えたものを図 4.8 に示す。

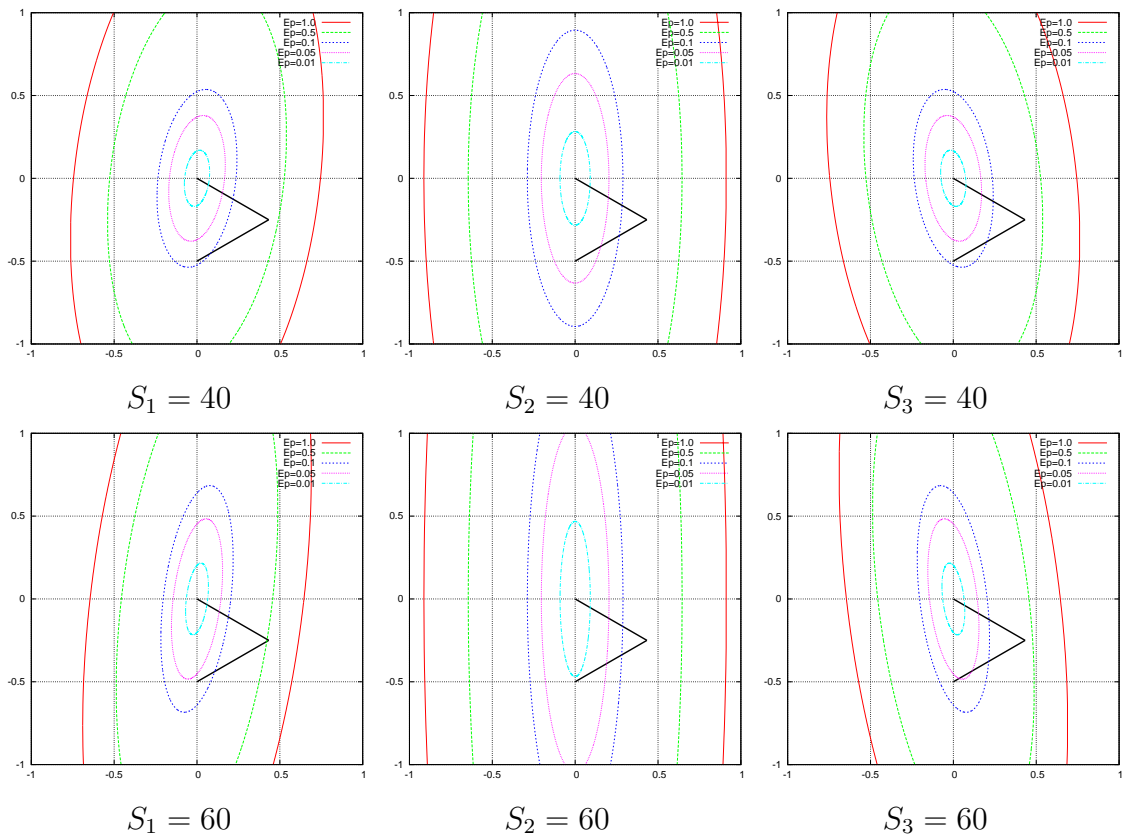


図 4.6: 手先が y 軸上に存在し ($\theta_1 = 30, \theta_2 = 120$)、一つの拮抗対の収縮力を変化させた場合

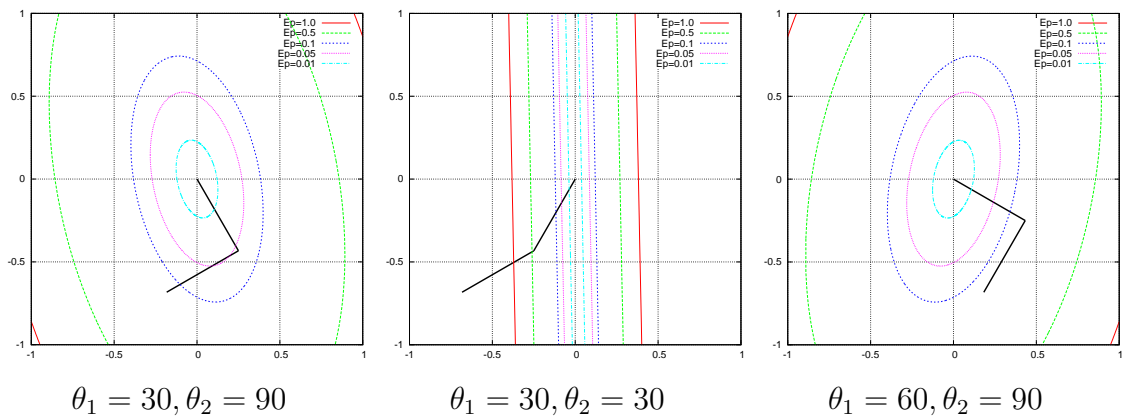


図 4.7: 手先が y 軸上から外れた場合

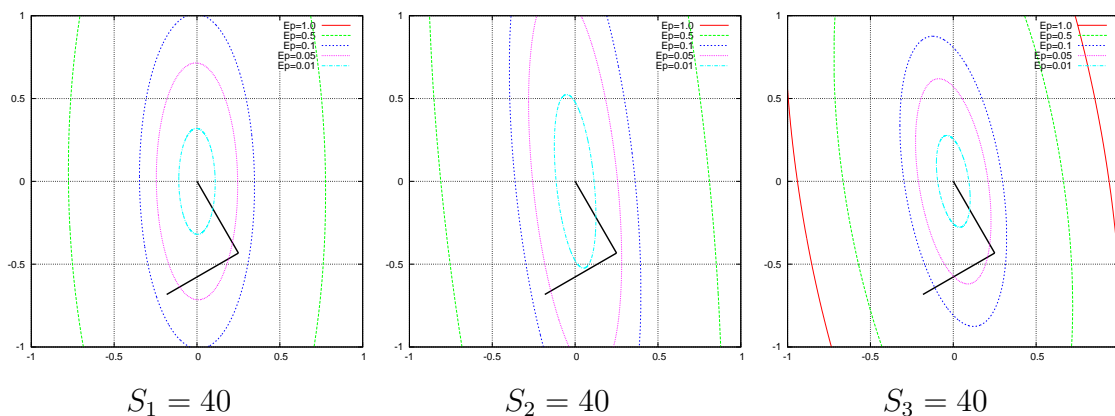


図 4.8: 手先が y 軸上から外れ ($\theta_1 = 30, \theta_2 = 150$)、一つの拮抗対の収縮力を変化させた場合

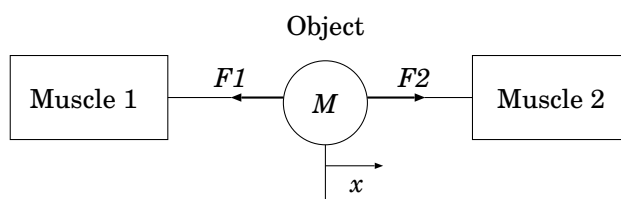


図 4.9: 拮抗対と物体の配置

4.3 二関節筋を持つアームの釣り合い特性

4.3.1 拮抗対の釣り合い特性

図 4.9 のように各拮抗対が物体を駆動させる単純なモデルを考える。各拮抗対に適当に収縮力の組を与えると、それぞれの拮抗対は収縮力と、収縮力によって可変な弾性力によって物体をある釣り合い位置へと動かそうとする。

ここで、一次元における移動を考え、物体の質量を M とする。また各収縮力を u_e, u_f とし、それぞれの和と差を $S = u_f + u_e, D = u_f - u_e$ とし一定とする。この時、運動方程式は式 (4.13) となる。

$$M\ddot{x} = D - kSx - bS\dot{x} \quad (4.13)$$

この運動方程式を解くと式 (4.14) となる。

$$x(t) = Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t} + \frac{D}{kS} \quad (4.14)$$

ただし

$$A = \frac{x_0 - \frac{x_0}{\beta} - \frac{D}{kS}}{1 - \frac{\alpha}{\beta}}, \alpha = \frac{-bS + \sqrt{(b^2S - 4Mk)S}}{2M}$$

$$B = \frac{x_0 - \frac{x_0}{\alpha} - \frac{D}{kS}}{1 - \frac{\beta}{\alpha}}, \beta = \frac{-bS - \sqrt{(b^2S - 4Mk)S}}{2M}$$

式 4.14 の $\frac{D}{kS}$ 項がいわば釣り合いの位置であり、 $t \rightarrow \infty$ とすれば、振動的 ($b = 0$) にならない限り釣り合い位置に収束する。また、 $-1 \leq \frac{D}{S} \leq 1$ であるから $-\frac{1}{k} \leq x \leq \frac{1}{k}$ がこのアク

4.3 二関節筋を持つアームの釣り合い特性

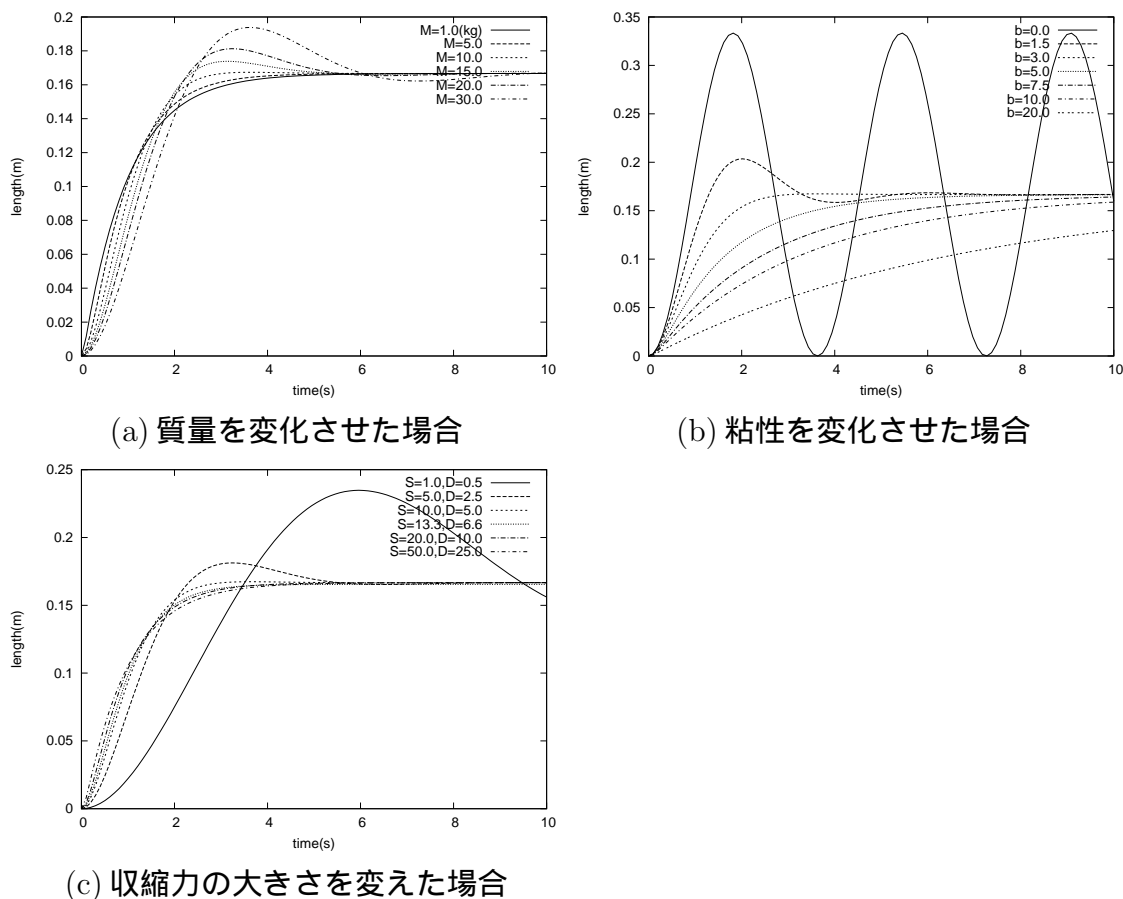


図 4.10: 拮抗対による物体の駆動特性

チュエータが安定的に動作できる範囲である。よって可動範囲は k による。パラメータをいくつかに変えた時の挙動の変化を図 4.10 に示す。ここでは、 $k = 3.0$ とし、 $S : D = 2 : 1$ としている。

物体の駆動源としての利用を考えた場合、多くの場合に望ましい挙動を示すのは、 $(b^2 S - 4Mk)S = 0$ からわずかに負となる範囲である。よって想定する物体の重量の最大値を M_{max} とし、この時に対応させる収縮力の和を S_{max} とし、 $\sqrt{\frac{4M_{max}k}{b^2}}$ 程度に設定するのが望ましいと考えられる。

4.3.2 3対6筋を持つアームの釣り合い特性

図 3.2 のように、各関節を動かす一関節筋の拮抗対、各関節をまたぐ二関節筋の拮抗対の 3 対 6 筋を含むアームにおける釣り合いに関する特性を考える。

式 (3.5) より、 $T_1 = T_2 = 0$ となるような θ_1, θ_2 を求めると式 (4.15) を得る。ただし、 $r = r_1 = r_2$ とする。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{kr} \frac{(D_1 + D_3)S_2 + (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \\ \theta_2 &= \frac{1}{kr} \frac{(D_2 + D_3)S_1 - (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

次に各筋にある収縮力を与えた場合にロボットアームの様々な姿勢においてどのような方向に力を発揮するかを示す。図 4.11 に示すように (a) は二関節筋を持たない場合のベクト

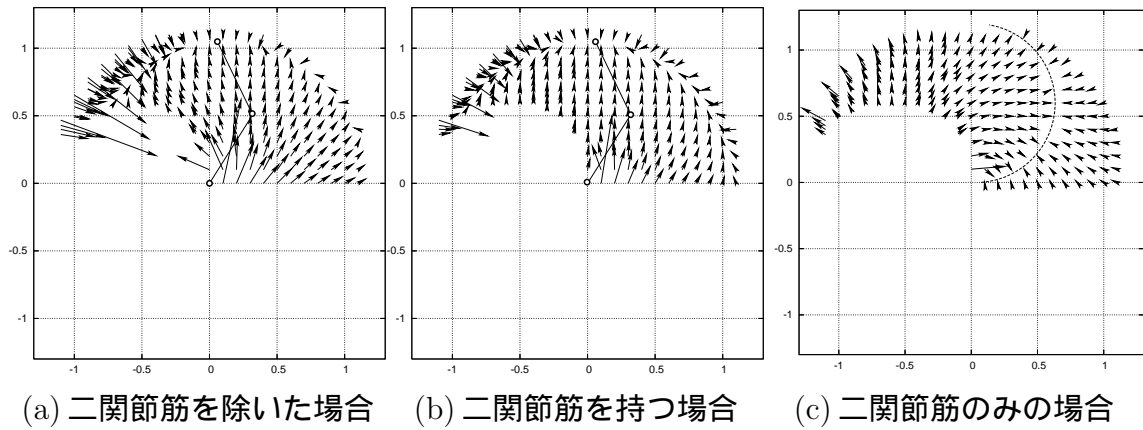


図 4.11: 釣り合い位置と、手先位置を変えた場合の手先出力の変化

ル線図である。各姿勢での力の向きと大きさを矢印を用いてプロットしている。二関節筋を持たない場合は式 (4.15) において、 $S_3 = D_3 = 0$ となる場合である。この場合でも釣り合い位置を持ち、その位置は、式 (4.16) となる。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{kr} \frac{D_1}{S_1} \\ \theta_2 &= \frac{1}{kr} \frac{D_2}{S_2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

また図 4.11(b) は二関節筋を持つ場合のベクトル線図である。式 (4.15) より求めた釣り合いの位置をアームを図示して示した。さらに、(c) は二関節筋のみの場合のベクトル線図であり、この場合は釣り合いの位置は一点に定まらない。

$$\theta_1 + \theta_2 = \frac{1}{kr} \frac{D_3}{S_3} \quad (4.17)$$

このように $\theta_1 + \theta_2$ を一定にするので、図では式 (4.17) の表す軌跡へとベクトルが向かっていることが分かる。

第5章 筋の粘弾性による釣り合いを生かした制御手法

5.1 釣り合いによる制御手法の提案

ヒトをはじめとした生物は、もちろん視覚や平衡等の情報を得てフィードバックを行なっているが、脳で考えて末端を駆動するまでの時間遅れは非常に大きいため、基本的な駆動はフィードフォワードもしくは脊髄レベルの簡単なフィードバックのみに頼っていると考えられる。ここで生物が四肢を動かす際の、最も基本的なフィードフォワード制御を考えた場合、それは各筋への収縮力を指令とするものに行きつくであろう。

しかしながら通常フィードフォワード制御だけでは、外乱に全く対応できないという欠点がある。このため、外乱を抑圧するためにはフィードバックが必要となるわけであるが、この機能を筋の粘弾性が担っていると考える。筋の粘弾性による力は釣り合い位置へと戻そうとする力である。よって収縮力を一定に与えれば、四肢は釣り合い位置へと向かう。また、収縮力を刻々と変化させた場合には、釣り合い位置も刻々と変化し、うまくパラメータを調整することで釣り合い位置の変化にそって四肢を動かすことが可能となる。

さて、釣り合い位置を直交座標系で与えられた場合は、関節角へと式 (5.1) を用いることで変換することが可能である。

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \arctan(y, x) - \arctan(\sqrt{x^2 + y^2 - z^2}, z) \\ \theta_2 &= \arctan(y - l_1 \sin(\theta_1), x - l_1 \cos(\theta_2)) - \theta_1\end{aligned}\quad (5.1)$$

ただし

$$z = \frac{x^2 + y^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1}$$

こうして得た釣り合い位置 θ_1, θ_2 から、式 (4.15) を用いることで、それに対応する各アクチュエータの指令値を求めることが可能である。この際求めなければならないパラメータは6つであるが、 S_1, S_2, S_3 については手先剛性の調整に用いるからあらかじめ設定されているものとする。残りの D_1, D_2, D_3 を求めるが、ここで D_3 を適当に定めれば、式 (5.2) を得ることができる。

$$\begin{aligned}D_1 &= kr\theta_1 S_1 \\ D_2 &= kr\theta_2 S_2 \\ D_3 &= kr(\theta_1 + \theta_2) S_3\end{aligned}\quad (5.2)$$

よって $S_1, S_2, S_3, D_1, D_2, D_3$ を得ることができれば、式 (3.7) と式 (5.2) から式 (5.3) のように $u_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ を求めることができる。

$$u_{f1} = \frac{S_1 + D_1}{2}, u_{e1} = \frac{S_1 - D_1}{2}$$

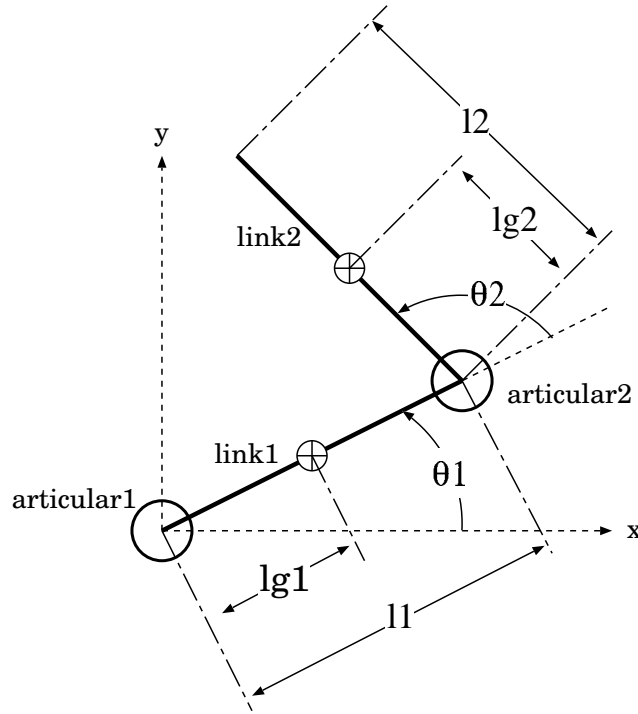


図 5.1: シミュレーションに用いたモデル

$$\begin{aligned} u_{f2} &= \frac{S_2 + D_2}{2}, u_{e2} = \frac{S_2 - D_2}{2} \\ u_{f3} &= \frac{S_3 + D_3}{2}, u_{e3} = \frac{S_3 - D_3}{2} \end{aligned} \quad (5.3)$$

以下のシミュレーションでは、収縮力を一定に与えた場合、収縮力を変化させた場合について検討を行なう。

5.2 提案する制御手法のシミュレーションによる検証

5.2.1 ラグランジュ法を用いたシミュレーション手法

ロボットアームに用いたモデルを図 5.1 に示す。としては、各リンクを細い棒として考え、リンク 1 の長さを $l_1 = 0.6$ 、リンク 2 の長さを $l_2 = 0.6$ とし、各関節座標系の原点からリンクの重心までの距離をそれぞれ l_{g1}, l_{g2} とする。それぞれの重量を m_1, m_2 とし、関節座標系の原点を中心とする慣性モーメントの大きさを I_1, I_2 とする。

各関節の半径は r_1, r_2 とし、それぞれ重量はないものとする。

また、各関節の角度は θ_1, θ_2 とし、各関節に働くトルクをそれぞれ T_1, T_2 とする。ここで水平面での二次元平面運動を考え、重力の影響を考慮しないならば、ラグランジュ法を用いて運動方程式は式 (5.4) のようになる。[25]

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

ただし、

$$m_{11} = I_1 + I_2 + 2m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + m_2 l_1^2$$

$$\begin{aligned}
m_{12} &= m_{21} = I_2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2 \\
m_{22} &= I_2 \\
h_{11} &= -m_2 l_1 l_{g2} \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
h_{21} &= m_2 l_1 l_{g2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2
\end{aligned}$$

ここでトルク T_1, T_2 は式 (3.5) のように各筋の出力から求められる。

式 (5.4) を $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ について解き、初期値及び各時間におけるトルクを与えて台形積分を利用してシミュレーションを行なった。

リンクのパラメータを表 5.1 に示す。今回のシミュレーションにおいては特に断りの無い限りこの値を用いた。

表 5.1: リンクモデルの主なパラメータ

l_1	0.6[m]	l_2	0.6[m]
l_{g1}	0.3[m]	l_{g2}	0.3[m]
m_1	2.5[kg]	m_2	1.0[kg]
I_1	0.3[kg · m ²]	I_2	0.12[kg · m ²]
r_1	0.1[m]	r_2	0.1[m]
k	3.0[N/m]	b	3.0[N · s/m]

5.2.2 提案手法のシミュレーション結果

釣り合い位置への駆動

どのような地点にあっても、釣り合い位置へとただちに向かう特性を利用したシミュレーションを示す。筋を一定に出力することで、初期位置から釣り合いの位置まで単純に駆動させる。

まず、 $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ とした場合に、 $D_1 = D_2 = D_3 = 5$ とすれば、 $\theta_1 = 1.01, \theta_2 = 1.01$ が釣り合いの地点となる。初期位置をそれぞれ、 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 、 $\theta_1 = -1.5, \theta_2 = 1.5$ 、 $\theta_1 = 0, \theta_2 = 3$ と変化させて、シミュレーションを試みた。(図 5.2)

目論見通り、ただちに釣り合い位置へと必ず向かうことが分かる。また、これは最もまた図 5.2(C) では、腕を曲げた状態からまっすぐに腕を伸ばすという運動に良く合致していると判断できる。

出力を変えての駆動

釣り合いを利用した駆動について改善のために、筋肉の収縮力の値を大きくしてやることを試みる。筋の収縮力を全体として、それぞれ 1/2 倍、1 倍、2 倍、4 倍と変化させた場合のシミュレーションを図 5.3 に示す。図の (A) は $S_1 = S_2 = S_3 = 5$ 、 $D_1 = D_2 = D_3 = 2.5$ としたものである。図の (B) は $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ 、 $D_1 = D_2 = D_3 = 5$ としたものでこれを基準とする。図の (C) は $S_1 = S_2 = S_3 = 20$ 、 $D_1 = D_2 = D_3 = 10$ とし、図の (D) は $S_1 = S_2 = S_3 = 40$ 、 $D_1 = D_2 = D_3 = 20$ とした。初期位置は $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$ とした。

基本的な挙動は、式 (4.13) で示したように拮抗対と粘性、弾性のパラメータ対象の質量または慣性モーメントで定義される。出力を上げればオーバーシュートを減らすことができるが、あまり大きくしてもアームの速度をそれ以上上げることはできない。基本的に出力 S_x を大きくしていけば、最終的に質量と弾性の項が無視されるようになり、一定の値に収束してしまうためである。

二関節筋を持つ場合、持たない場合の比較

二関節筋を持たないアームについては、式 (4.16) で示したように、釣り合いによる駆動が可能である。二関節筋を持たないアームとの比較を図 5.4 に示す。二関節筋を持つアームでは $S_1 + S_2 + S_3$ 、二関節筋を持たないアームでは $S_1 + S_2$ と、それぞれトータルの出力を揃えることによって比較を行なった。

図 5.4 の (A) が $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ とした二関節筋を持つアームの結果である。(B) は $S_1 = S_2 = 15$ とした二関節筋を持たないアーム、それぞれ $\theta_1 = 1, \theta_2 = 1$ という釣り合いの位置になるよう調整した。

このように二関節筋の存在によって、性能を改善できていることが分かる。二関節筋を持たないアームの場合、各リンクが協調せず、別々に角度を調節されるので、慣性モーメントが小さいリンク 2 が先に静定してしまい、リンク 1 の動揺によって手先は大きく変動してしまう。一方二関節筋を持つ場合は、協調して運動を行なうためにこのような手先の変動を抑えることが可能である。二関節筋が両関節の角度および角速度の和を調節するという機能がある。

連続的に筋収縮力を変えての駆動

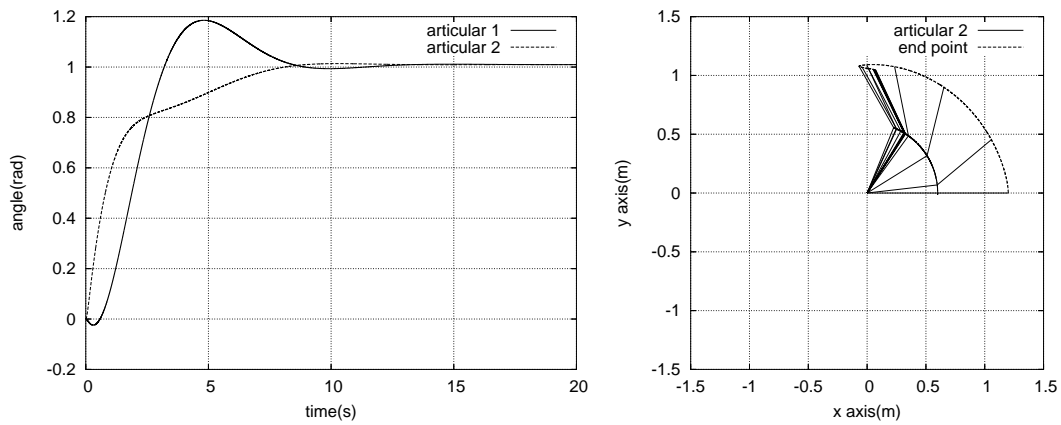
ここまでは筋の収縮力を一定としていくつかのシミュレーションを行なったが、今度は筋の収縮力を刻々と変化させて駆動させる。これによってサイクリックな駆動等より複雑な運動を実現できるようになる。

手先位置の軌跡 $P(t) = [x(t), y(t)]$ を $x(t) = 0.3 + 0.6 \cos(2\pi t/T), y(t) = 0.6 + 0.2 \cos(2\pi t/T)$ という楕円を描く運動をさせた場合の結果を以下に示す。 T は一周するのにかかる周期である。この手先位置の軌跡を釣り合い位置の軌跡として θ_1, θ_2 を求め、それに見合う収縮力を加えることにした。

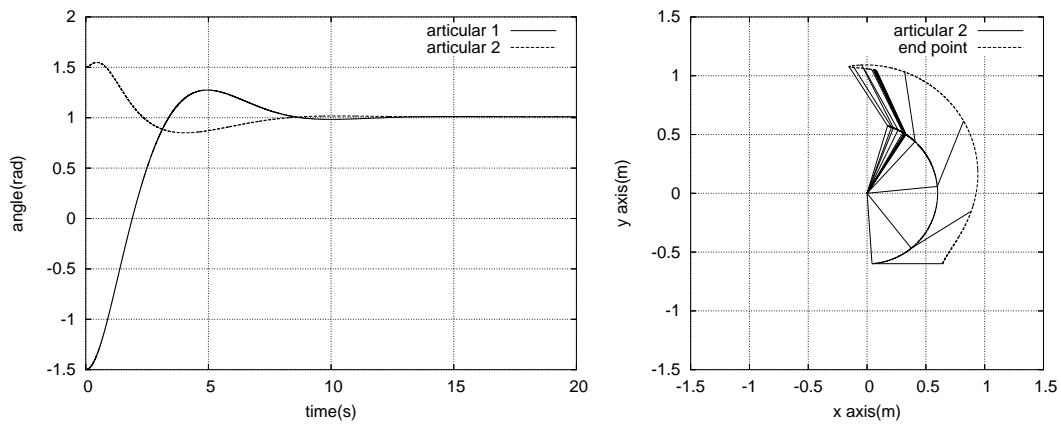
この結果、適切な指令を与えることにより、釣り合いの軌跡に合わせてアームを駆動することを示すことができた。図 5.5 に、 $T = 20, S_1 = S_2 = S_3 = 10$ とした場合の結果を示す。

次に周期の長さや収縮力の強度を変えて比較した場合図 5.6 を示す。

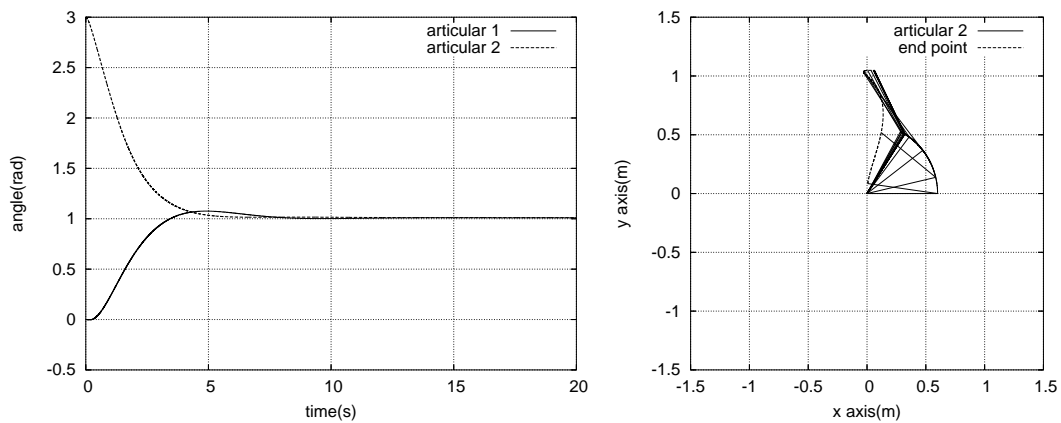
まず、完全に軌跡を一致させるためには周期を十分ゆっくりと変化させてやる必要がある。また、収縮力の強度に関してはある程度以上の強度では軌跡の形はほとんど変えずに、剛性を高めることができるという結果となった。今回 $\frac{T}{2} < t < T$ 程度の部分で若干軌跡からずれるということになったが、これは力を発揮しにくい場所であるということがまず言える。次に、実際の運動では収縮力による釣り合いポイントの移動が先行して、過去の釣り合いポイントを追うように手先が追従していくので、方向が急激に変わる部分ではよりゆっくりと動かす必要があるということも言える。よって、さらに学習等を加えることでこれらの問題は解決していくことができる。



(A) 初期位置 ($\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$)

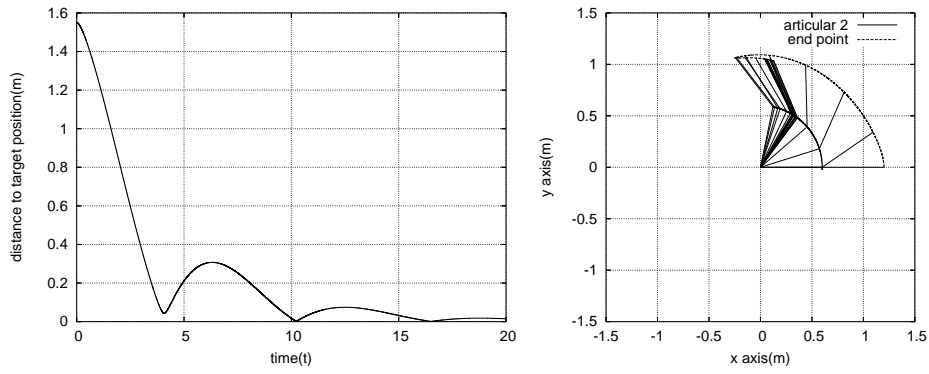


(B) 初期位置 ($\theta_1 = -1.5, \theta_2 = 1.5$)

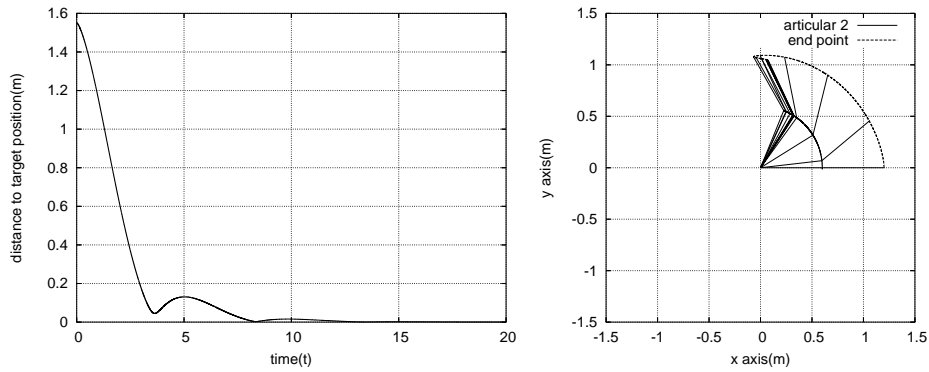


(C) 初期位置 ($\theta_1 = 0, \theta_2 = 3$)

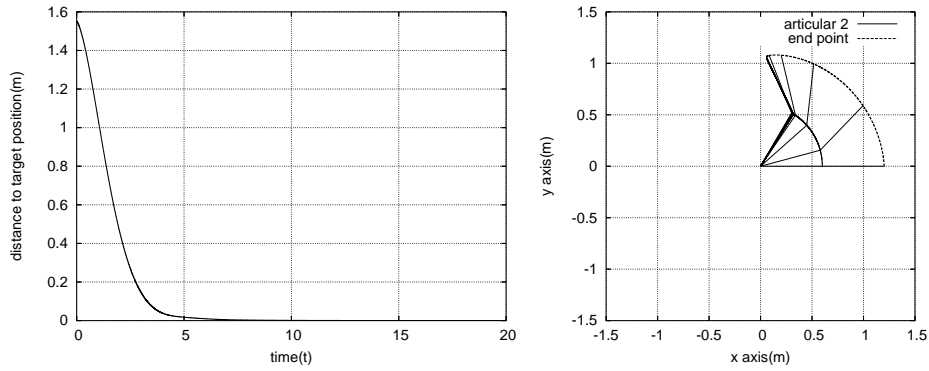
図 5.2: 筋の収縮力を一定とした場合のシミュレーション結果



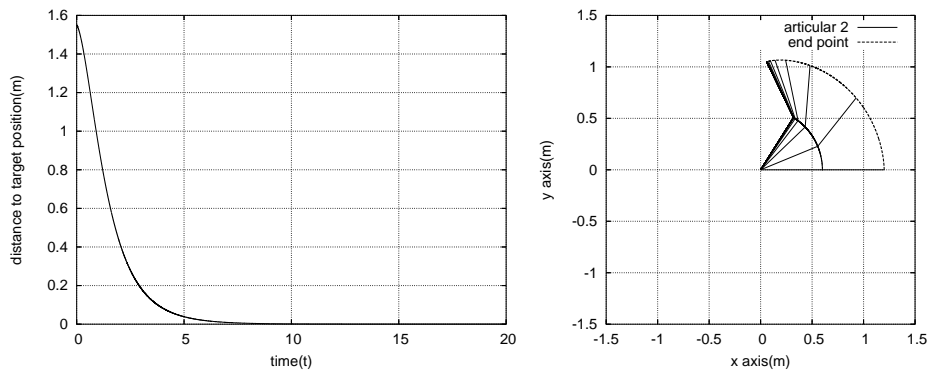
(A) $S_1 = S_2 = S_3 = 5, D_1 = D_2 = D_3 = 2.5$



(B) $S_1 = S_2 = S_3 = 10, D_1 = D_2 = D_3 = 5$

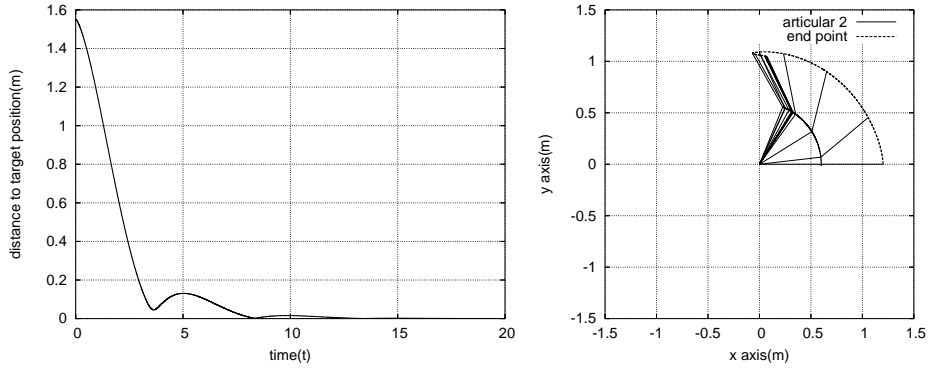


(C) $S_1 = S_2 = S_3 = 20, D_1 = D_2 = D_3 = 10$

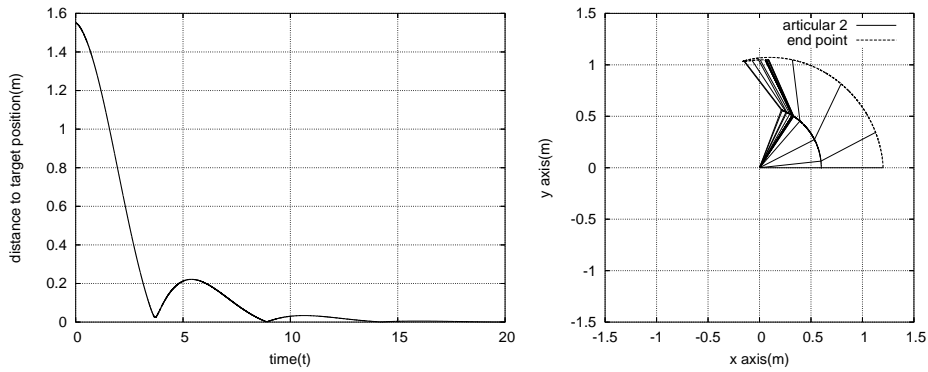


(D) $S_1 = S_2 = S_3 = 40, D_1 = D_2 = D_3 = 20$

図 5.3: 収縮力の比を一定とし、収縮力を変えた場合の比較シミュレーション結果
各段の左側のグラフは釣り合い位置と手先との距離、右側のグラフは手先と関節 2 の軌跡である。

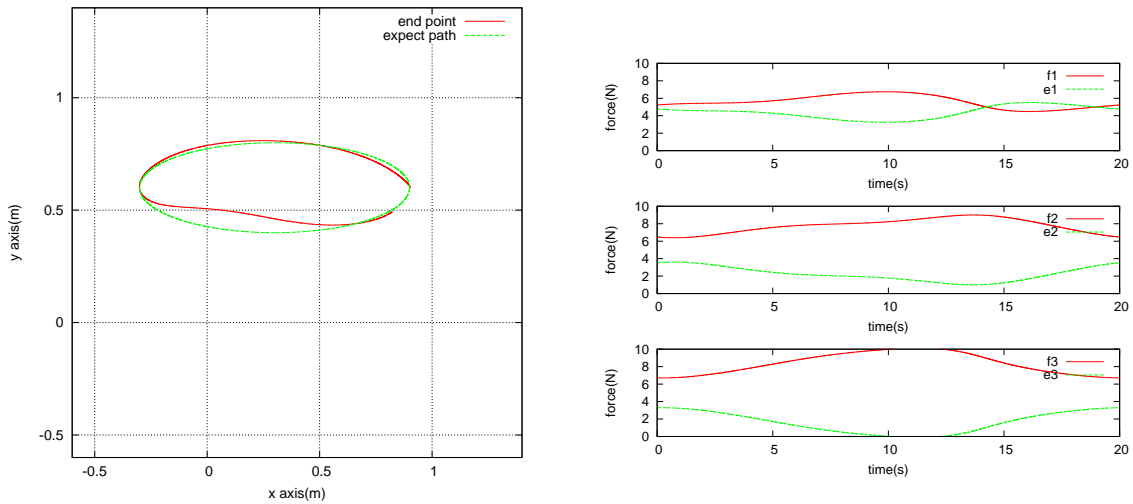


(A) 二関節筋あり, $S_1 = S_2 = S_3 = 10$



(B) 二関節筋なし, $S_1 = S_2 = 15$

図 5.4: 二関節筋の有無による比較シミュレーション結果
各段の左側のグラフは釣り合い位置と手先との距離、右側のグラフは手先と関節 2 の軌跡である。



changing contractile forces($T = 20, S_1 = S_2 = S_3 = 10$)

図 5.5: 連続的に収縮力を変えた駆動のシミュレーション結果

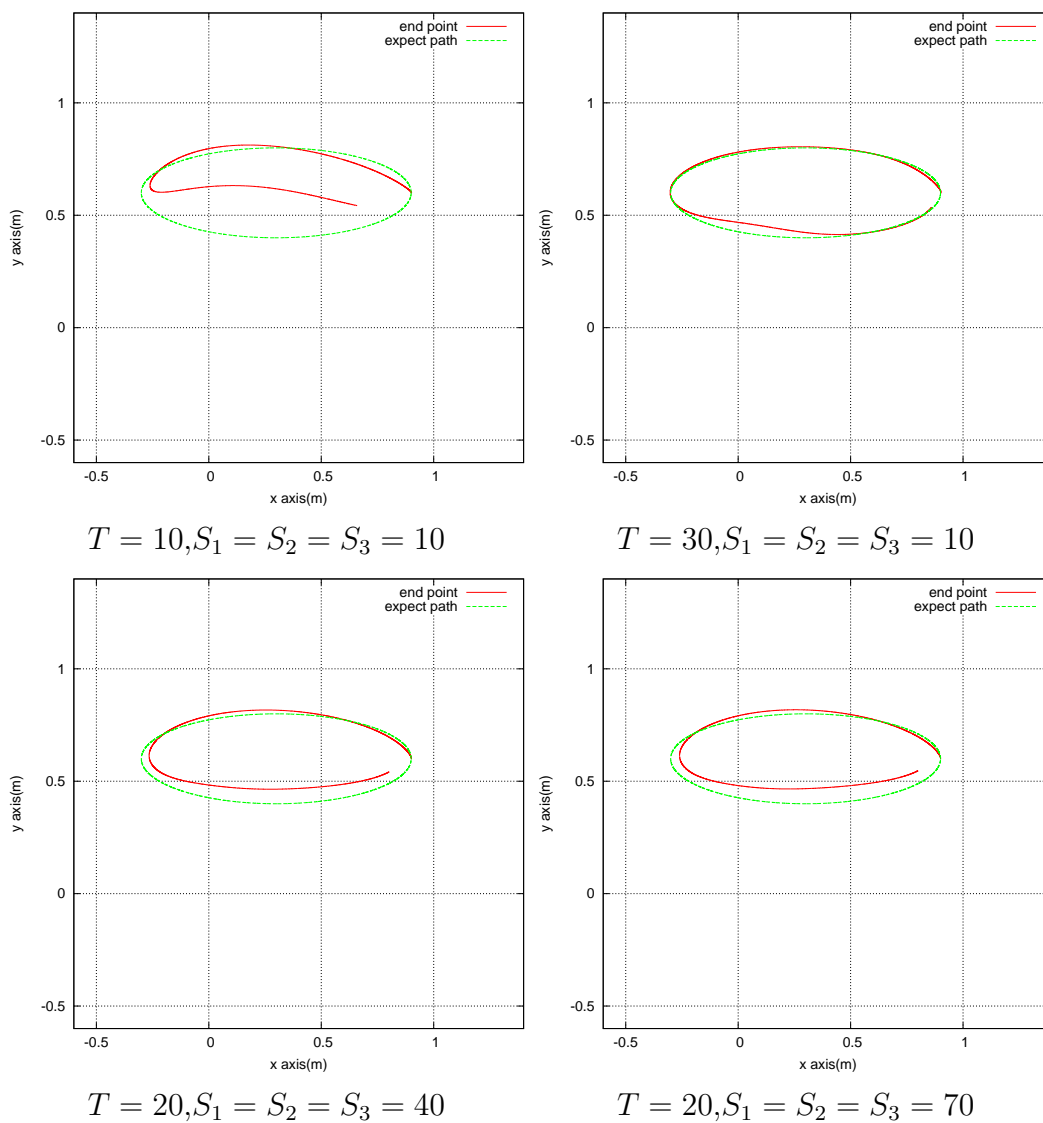


図 5.6: シミュレーション結果の比較

第6章 ロボットアームの実装

6.1 3対6筋を実現するロボットアームの提案

6.1.1 単関節駆動機構と二関節同時駆動機構

ロボットアームのアクチュエータとして、単一の関節のみに働くものを単関節駆動機構とし、二つの関節に跨がって同時に同じ大きさの力を加えることができるものを二関節同時駆動機構と呼ぶことにする。

従来のロボットは各関節に一つの単関節駆動機構のみを供えていると言うことができる。生物の特性を取り入れる試みとして、二関節同時駆動機構を加えて3対6筋に相当するようなアクチュエータを持たせるようにする。二関節同時駆動機構として満たさなければならない要件であるが、理想的には

- 跨がった二つの関節に対して同時に同じ力を発生させること
- 各関節のそれぞれの回転に対して、リンク等に拘束されることなく機構自体が移動できること。

といった点が挙げられる。生物の二関節筋と同様にリニアアクチュエータを図6.1のように接続すれば良い。アクチュエータの固定子、可動子と各関節が接続され固定子に関してはレールなどの機構によってリンクからは自由に動くことができる。

固定子がリンクに固定された機構としては例えば図6.2のように動滑車と直動型アクチュエータを用いた物などが考えられる。しかしながら、機構が複雑になったり、重量がかさむ、アクチュエータで比較的大きな出力が必要となるといった問題点もあってただちに実現できるわけではない。

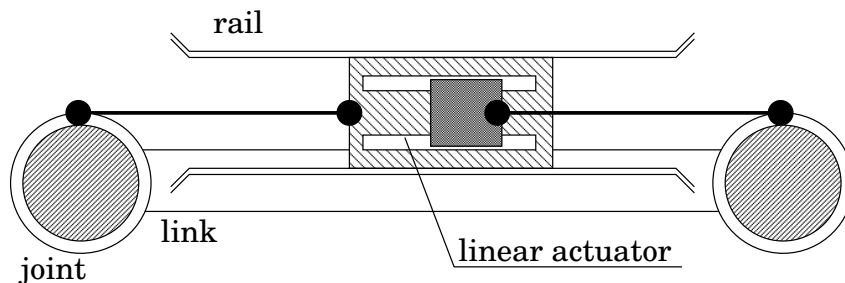


図 6.1: 直接各関節を結ぶ二関節同時駆動機構

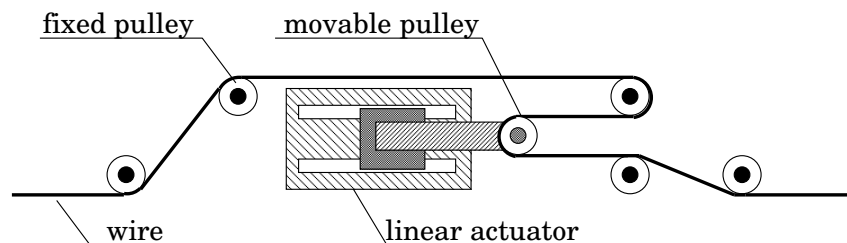


図 6.2: 動滑車を用いる二関節同時駆動機構

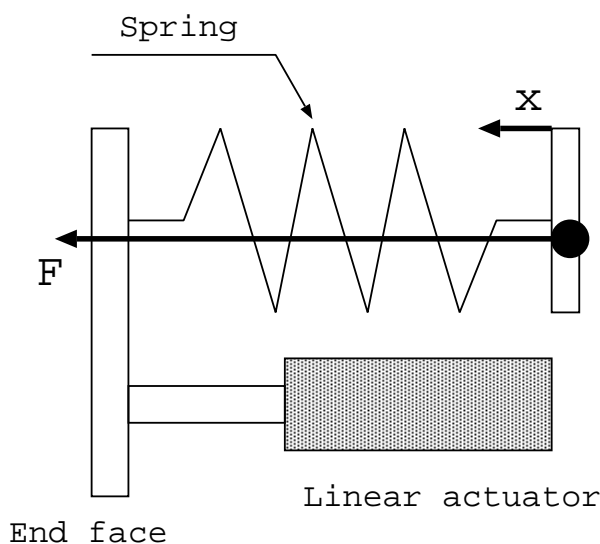


図 6.3: HIPRO ロボットに搭載された、可変弾性アクチュエータ (VEA)

6.1.2 筋の粘弾性の実現

特に本研究においては両機構が筋肉と同様の粘弾性を備えさせることを考える。弾性の実現方法として、小田らによる HIPRO ロボットのように機械的にバネ等を組み合わせることで実現する試みも存在する。[12] 図 6.3 に示すように HIPRO ロボットに用いられる可変弾性アクチュエータ (VEA) は、主にコイルバネとリニアアクチュエータからなり、アクチュエータで片方の端面を操作してやることで、任意の弾性率を調整することができる機構である。機械的にバネ成分を持っているので、遅れ時間なく弾性成分を実現するという利点があり、実験によると 5Hz までの範囲でほぼ任意の弾性を実現することができている。しかしながら、さらに粘性までも機械的にうまく実現することや、その特性をさらに広い出力領域に渡って実現するのも同様に難しい。

よって本研究では、エンコーダ等と組み合わせることによって位置、速度を計測しこれらをフィードバックする図 6.4 のような制御ブロックで仮想的に実現させることにする。そのために制御性に優れた電磁アクチュエータを用いて 1msec 以内の早いフィードバックループを組むことで、粘性・弾性を実現する。

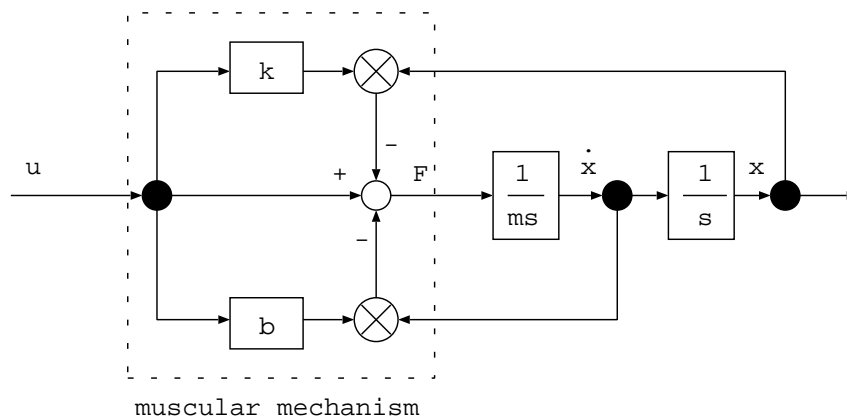


図 6.4: 筋の粘弾性を実現するダイアグラム

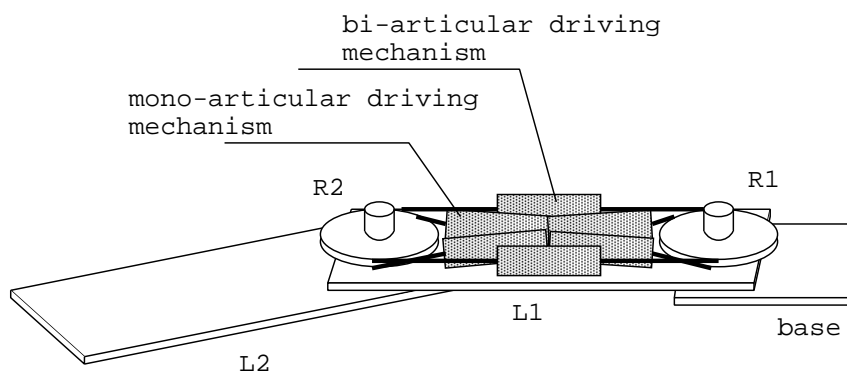


図 6.5: 完全な3対6筋の構造を持つロボットアームの例

6.1.3 3対6筋に相当する機構を備えたロボットアーム

本研究における制作の目的としては、(1)3対6筋に相当する機構を備えたロボットアームの静的、動的特性の検証を行なう。(2)複数のモータを組み合わせた時に生じるであろう振動等の問題点の解決に関する知見を得る。ということが挙げられ、完全な二関節同時駆動機構ロボット(図 6.5)へ至るプロトタイプとして位置づける。

ロボットアームの制作にあたっては、実装の容易さなどいくつかの実務的な要素を加味し、完全な二関節同時駆動機構ではなく、ソフトウェア的に一部機能を補完することにした。今回は畠が学位論文の中で提案した回転型のアクチュエータとタイミングベルトを用いる機構を元に制作を行なうことにする。[26]

制作するロボットアームの外観を図 6.6 のように示す。ギアの噛み合いの調整機構や、タイミングベルトの緩みの調整機構は省いてある。このロボットアームでは回転型のアクチュエータを3つ用いて、第一関節を駆動する一関節筋拮抗対、第二関節を駆動する一関節筋拮抗対、二関節筋の拮抗対という3つの役割を果たすようにする。

二関節同時駆動機構に関しては第一関節 R1 の側の軸を、単関節駆動の軸と同一線上に配置する。ただし、単関節駆動の軸とはそれぞれ独立である。一方第二関節 R2 の側では二関節同時駆動機構も単関節駆動の軸も共通の物を使う。

最後に制作するロボットアームで実現できることについてまとめ、表 6.1 に示すことにする。表では、生物のアーム (A)、完全な3対6筋を持つロボットアーム (B)、今回制作

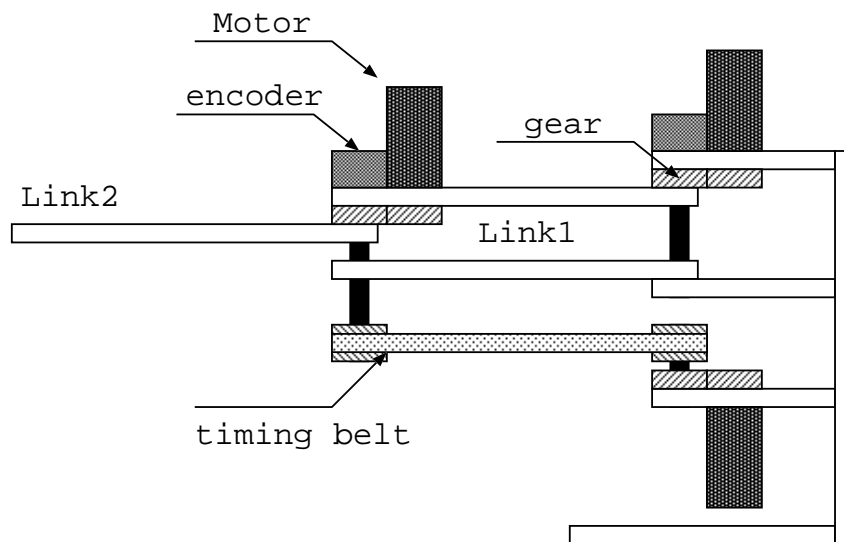


図 6.6: 今回制作するロボットアームの外形

表 6.1: 各ロボットアームモデルの比較

-	A	B1	B2	C
(1) 単関節駆動機構				
(2) 二関節同時駆動機構				×
(3) 拮抗対の構造				×
(4) 筋の粘弾性				×

A は生物のアームモデルである。また、B1(図 6.5) および B2(図 6.6) は二関節同時駆動機構を用いたロボットアームであり、B2 は今回我々が制作するモデルである。C は従来のロボットアームである。□ : 存在, ○ : 仮想的に実現, × : 無し

する図 6.6 で示すロボットアーム (C)、従来のロボットアーム (D) について以下の四点を評価する。四点とは (1) 単関節駆動ができるかどうか、(2) 二関節同時駆動ができるかどうか、(3) 拮抗対が存在するか、(4) 筋の粘弾性が存在するか、である。表の通り、今回制作するロボットアームでは一部の機能を仮想的に実現している。

6.2 ロボットアームの設計と制作

6.2.1 機械部分の設計と制作

図 6.7 のようにロボットアームを製作した。図 6.6 を実装したものであるが、強度を保つために二関節筋部分をリンクの内部に収納するなどの工夫をしている。

以下にロボットアーム本体部分に関する諸元を示す(表 6.2)。モータはタミヤ製の 540K75 をそれぞれの拮抗対用に 3 個用いる。制御用に各軸の回転角を求めるためのエンコーダと、各モータの電流を測定するセンサを備える。

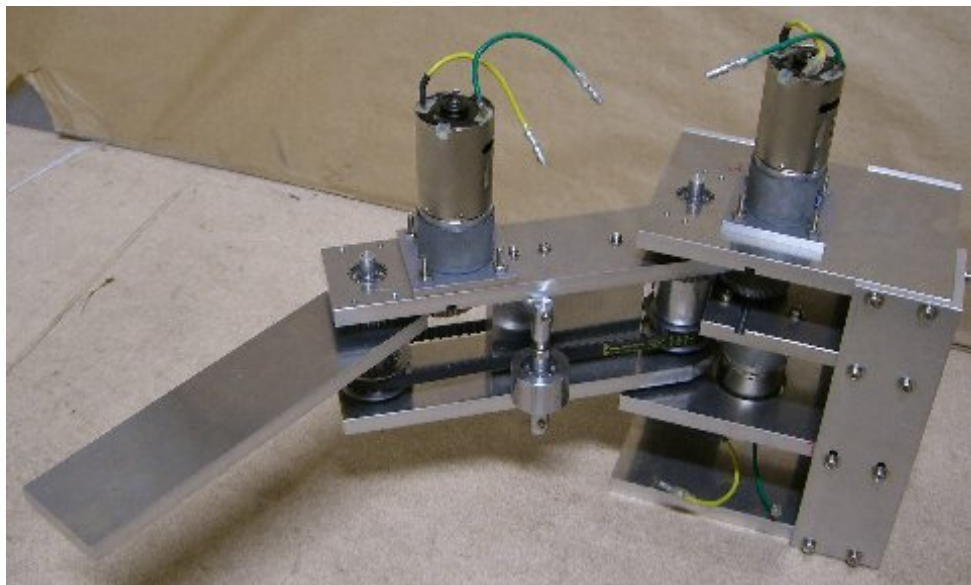


図 6.7: ロボットアームの機械部分

表 6.2: Major parameters of robot arm

Total height	about 250[mm]
Total length	about 500[mm]
Link1(upper,bottom)	200 × 50 × 10[mm] 270[g]
Link2	200 × 50 × 10[mm] 270[g]
Motor	TAMIYA(540K75)
Encoder	OMRON(E6H-CWZ6C)
Current sensor	U_RD(HCS-20-SC-A-2.5)

6.2.2 ロボットアームの制御機構

次にモータの駆動、コントローラに関してであるが図 6.8 に示すようなブロックで表わされる。目標軌道等から最適な収縮力の和と差の組を、contractile force generator によって生成する。

次に、antagonistic muscle module(図 6.9) を用いて収縮力及びエンコーダより取得した関節角度から各拮抗対が出力すべき力を計算する。さらに完全な二関節同時駆動機構は備えていないために、これの補償を行なうために、force distributor を用いて分配をする。force distributor はゲインを K_i として以下のような行列として表現することができる。

$$\begin{pmatrix} i_1^* \\ i_2^* \\ i_3^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_i & 0 & K_i \\ 0 & K_i & 0 \\ 0 & 0 & K_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1^* \\ F_2^* \\ F_3^* \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

このようにして作成した電流指令値を電流制御器へ出力する。ここまでを制御用 PC にて行なう。電流制御器と PWM の生成器に関しては PIC(16F877) を用いて、各モータごとに作成する。

本ロボットアームの制御系では、最も小さなループとしてモータの電流制御を行なっている。また、ロータリーエンコーダからの情報をフィードバックすることで、仮想的に筋

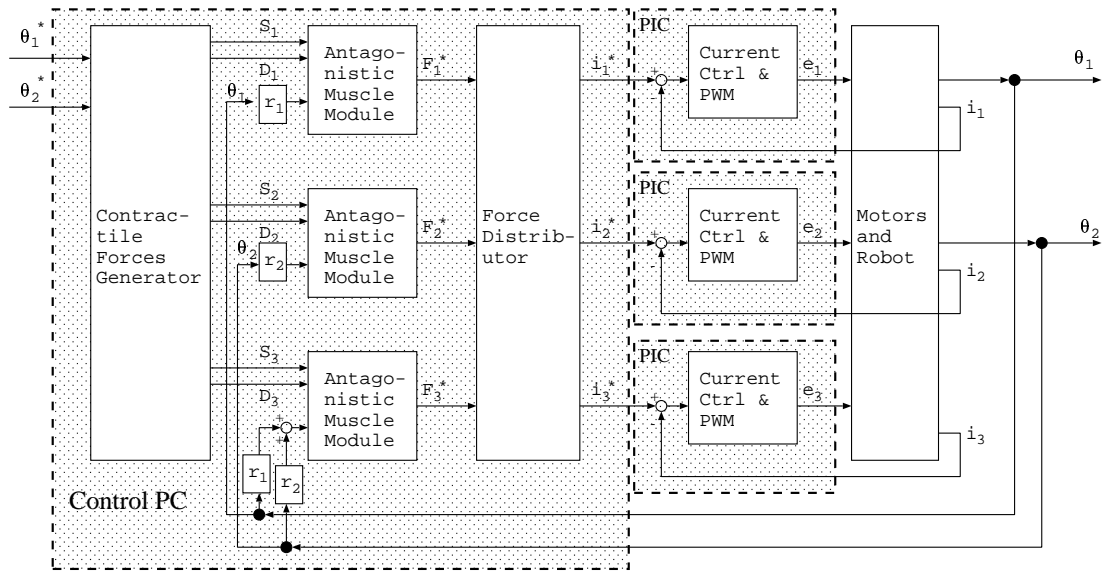


図 6.8: Control diagram

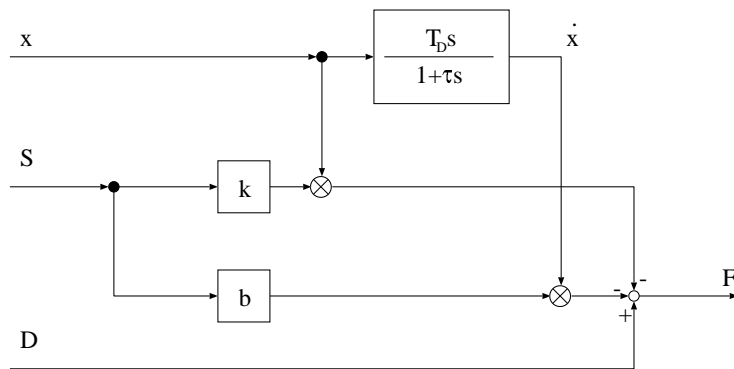


図 6.9: 収縮力の和と差を入力して拮抗対の粘弾性を実現するダイアグラム

肉の特性を実現している。例えば電磁アクチュエータを用いて筋肉に見せかけるためには、これらのフィードバック系は必要不可欠である。contractile force generator が、いわゆるヒトが持つフィードフォワード系であり、まずはフィードフォワードのみでの駆動ができることを示していく。

表 6.3: Parts of Controller

CPU board	Advantech(PCM-9371F-J0A1)
Counter board	TAC(T104-C160)
AD-DA board	TAC(T104-ADA)
Current Controller and PWM	Microchip(16F877)
H-bridge	Toshiba(2SK2312)
Gate driver	Nihon Pulse(FDM2B)
	Toshiba(2SK1484)

第7章 結論

7.1 本論文のまとめ

7.1.1 静的、動的特性及び粘弾性を利用した制御手法に関するまとめ

本論文では、水平面内を駆動する2リンクのロボットアームに関して、一関節筋および二関節筋の3対6筋を備えた場合に静的側面、動的側面の両方からその特性についてアプローチし、粘弾性による釣り合いを生かした新しい制御手法に関する提案を行なった。

まず静的特性としては二関節筋を備えることによって、手先出力の改善を行なうことができるということを示すことができた。二関節筋を持たない場合、特に手先を伸ばした状態においては、出力が非常に弱くなる方向がでてしまうが、二関節筋を持たせることによってこの部分を効率的に改善することが可能になる。また手先剛性、手先粘性の面に関しては、3対6筋の存在によって手先出力とは独立に調節可能であることを示した。ただし、今回の筋モデルでは剛性と粘性を独立に調節することはできない。

また、二関節筋を持つことでより多数のアクチュエータを持つことになるが、3対6筋に相当するアクチュエータを所持することによって冗長性を備え、例え一つのアクチュエータが故障しても他のアクチュエータでカバーすることによって、完全に機能を失わないようにすることができる。

次に動的特性とそれを生かした制御手法としては、筋の粘弾性による釣り合いと、これを利用した制御手法に関して提案を行なった。筋の粘弾性による釣り合い位置と過渡状態を示し、手先位置と手先出力の関係を明らかにした。また、これを利用して釣り合いによる駆動手法を示し、シミュレーションによって有効性を確かめた。

7.1.2 二関節同時駆動機構を用いたロボットアームに関するまとめ

二関節筋を二関節同時駆動機構として実装したロボットアームについて、その設計法およびその位置付けについて述べた。

他の実装モデルとの比較のなかで明らかなように粘弾性に関しては、望ましい特性を機械的に作成するのは困難であるため、ある程度早い周期の制御ループによってソフトウェア的に実現したほうが良い。

本機は完全な3対6筋のモデルへいたるプロタイプモデルとして、回転型アクチュエータとギヤ、タイミングベルトを組み合わせた拮抗機構がうまく制御できるか、望む粘弾性をうまく早い制御で実現できるかといったことの検証を行なう。直道アクチュエータに比べると、回転型アクチュエータはコスト、性能等の点で有利のため、特に一関節筋部分を回転型アクチュエータで実装でき、必要な粘弾性を得ることができれば、その恩恵は大きい。

7.2 今後の課題

7.2.1 二関節筋の特性を生かした制御手法に関する課題

本研究では、粘弾性を利用した制御手法を提案したものの、剛性の調整機構に関してはうまく生かしきれていない。ただし、剛性の調整に関してはあまり厳密にやろうとすれば、非常に計算量が大きくなり、簡便に制御できるという長所を自ら削ってしまうことになりかねないので、うまい手法を考案する必要がある。

次に、筋肉のモデルとして粘弾性が収縮力に比例するモデルを用いているが、このために粘性は弾性と独立には制御することができない。また、本研究で用いた筋のモデルは一次のテイラー展開を、筋の自然長、収縮速度が0のまわりで行なったものである。より複雑なモデルや異なったモデルを使う、もしくは筋のモデルから離れるといった展開も考えうる。

さらに応用アプリケーションとして考えた場合、歩行、走行、跳躍といった運動の制御への応用が考えられるが、この場合には2リンクの構造では不足であるから、さらにリンク数を増やし水平面内から、3次元へと拡張していく必要がある。歩行(走行・跳躍)モデルの安定性と筋の粘弾性、さらに冗長な筋配置がどのように関わっていくかというのは非常に重要なテーマである。

7.2.2 二関節筋の仕組みを持つロボットアームに関する課題

ロボットアームが二関節筋の仕組みをどのように取り込むかという問題は、単なる実装の問題を超えた重要なテーマである。一つには機械的な粘弾性を持つべきなのか、制御性能の良いアクチュエータを用いてソフトウェア的に作り出すのかという問題である。また二関節筋の役割を果たすモータに関しても、従来型のロボットアームのように一関節筋に相当するアクチュエータのみ持って、二関節筋の機能は一関節筋に振り分けるのか、二関節筋に相当するアクチュエータをさらに持つのかという問題がある。

アクチュエーターそのものに目を向けてみると、現在のところ制御性能のよい直動アクチュエータは、重量比のパワーがどうしても小さくなる。また、盛んに研究されている高分子アクチュエータを始めとする直動アクチュエータは、線形性の面で問題がある場合が多い。特にソフトウェア的に粘弾性を実現する場合、制御性能の良さというものが大きく関わってくるが、これをどのように扱っていくかというのも課題の一つである。

最後に、二関節筋に相当するアクチュエータを備えたモデルの場合、冗長性を持つことになる。この冗長性を上手く生かす例として、一つのアクチュエータが故障した際にこれを検出し、残りのアクチュエータでカバーするために切り替えて上手く制御する問題が考えられる。これをリアルタイムで巧みに行なっていく総合的なシステムというのも、ヒトと協働するロボットが備えなくてはならない重要な機能であると考えられる。

二関節筋の仕組みを備えるロボットの研究はまだ始まったばかりであり、材料、機構、制御と様々な側面から解決すべき課題は多く、これまでの手法ではうまく対応しきれない場合も多い。しかしながら、これらの問題解決を通して二関節筋をはじめとした生物の仕組みを取り入れていくことで、人間と協働するロボットの実現に大きく近づくことができると考えている。

参考文献

- [1] “2006 年度版ものづくり白（ものづくり基盤技術振興基本法第 8 条に基づく年次報告）”, 経済産業省, 2006
- [2] 熊本水頼, ”ヒューマノイド工学”, 東京電機大学出版局, 2006
- [3] G. J. van Ingen Shenau, M. F. Bobbert and R. H. Rozendal, “The unique action of bi-articular muscles in complex movements”, *Journal of Anatomy*, 155, pp. 1-5, 1987
- [4] Neville Hogan, “Adaptive Control of Mechanical Impedance by Coactivation of Antagonist Muscles”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.AC-29, No.8, pp. 681-690, 1984
- [5] Neville Hogan, “On the stability of Manipulators Performing Contact Tasks”, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 6, pp. 677-686, 1988
- [6] F. A. Mussa Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi, “Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subservicing Arm Posture in Humans”, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 10, pp. 2732-2743, 1985
- [7] Mizuyori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto, “Control properties induced by existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles -Mechanical engineering model analyses”, *Human Movement Science* 13, pp611-634, 1994
- [8] 藤川 智彦, 大島 徹, 熊本 水頼, 横井 信安, “ヒト上肢における系先端の出力と拮抗筋群の協調活動”, *日本機会学会論文集 (C 編)*, 65 巻, 632 号, pp. 1557-1564, 1999
- [9] 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, ”一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性-筋の収縮力とロボットアームの粘弾性-”, *精密工学会誌*, vol. 66, No. 1, pp. 141-146, 2000
- [10] 鳥海 清司, 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, 百生 登, “ヒトの腓腹筋である二関節筋の装備が跳躍運動に及ぼす影響”, *日本機械学会論文集 (C 編)*, 69 巻, 688 号, pp. 3263-3268, 2003
- [11] Toru Oshima, Noboru Momose, Kiyoshi Toriumi, “Jump mechanism using coordination in knee and ankle joint and application to leg orthosis” , *The 2005 International Power Electronics Conference*, 2005
- [12] 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 生体機構制御・応用技術専門委員会 二関節筋実利用 Workshop*, 2003

- [13] 小田 高広, 鴫田 守, 門田 健志, 鈴木 健也, 深井 善朗, 島田 耕吉, “協調制御モデル - 「二関節筋装備型ロボットレッグ」”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 第4回例会, 2005
- [14] 福井 勉, 岩崎 裕子, “リハビリテーション領域における単関節筋トレーニングの応用”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 二関節筋実利用 Workshop, 2004
- [15] 大島 徹, 藤川 智彦, 熊本 水頼, “一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実効筋力評価 -出力分布の簡便な測定法-”, 精密工学会誌, vol. 67, No. 6, pp. 944-948, 2001
- [16] 田島 孝光, 大島 徹, “ヒューマンフレンドリーな次世代操舵システムの研究”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第4回例会, 2005
- [17] Kiyotoshi Matsuoka, “Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation”, Biological Cybernetics, vol. 52, pp. 367-376, 1985
- [18] G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment”, Biological Cybernetics, Vol. 65, pp. 147-159, 1991
- [19] G. Taga, “A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion”, Biological Cybernetics, Vol. 73, pp. 97-111, 1995
- [20] 多賀 徹太郎, “歩行の創発”, 日本ロボット学会誌, vol. 15, No. 5, pp. 680-683, 1997
- [21] 宮腰 清一, 多賀 徹太郎, 國吉 康夫, “神経振動子を用いた三次元2足足踏みシミュレーション -ヒューマノイドの実世界内行動を目指して-”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 87-93, 2000
- [22] 木村 浩, 張 祖光, “脚式移動におけるCPG(Central Pattern Generator)の役割 -適応的な歩行・走行生成の統一的理解に向けて”, 計測と制御, Vol. 44, No. 9, pp. 602-608, 2005
- [23] 稲垣 伸吉, 湯浅 秀男, 鈴木 健了, 新井 民夫, “波動CPGモデルを用いた多脚歩行ロボットの歩容生成と移動速度制御”, 日本ロボット学会誌, vol. 22, No. 2, pp. 230-238, 2004
- [24] 富士通ホームページ, “富士通ホームページ”, <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2003/03/27.html>, 2003
- [25] 川崎 晴久, “ロボット工学の基礎”, 森北出版株式会社, 1991
- [26] 畠 直輝, “制御工学応用による移動用福祉機器の高機能化に関する研究”, 東京大学大学院 学位論文, 2004

発表文献

- [1] 吉田憲吾, 堀洋一, ”二関節筋を利用したロボットアームの特性に関する考察”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-64, 2005.3
- [2] 吉田憲吾, 堀洋一, ”二関節筋を利用したロボットアームの特性に関する考察”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会, 第2回例会, 2005.6
- [3] 吉田憲吾, 堀洋一, ”二関節筋を利用したロボットアームの特性に関する考察”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会, 第5回例会, 2006.3
- [4] 吉田憲吾, 堀洋一, ”二関節同時駆動機構を持つロボットアームの製作”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-06-09, 2006.3
- [5] 吉田憲吾, 堀洋一, ”二関節同時駆動機構を持つロボットアーム”, 電気学会産業応用部門大会, JIASC-06-2-41, 2006.8
- [6] 吉田憲吾, 内田 利之, 堀洋一, ”二関節同時駆動機構を装備したロボットアームの設計と制作”, 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, 2006.11
- [7] Kengo Yoshida, Naoki Hata, Toshiyuki Uchida and Yoichi Hori, ”A Novel Design and Realization of Robot Arm Based on the Principle of Bi-articular Muscles”, IEEE-ICIT 2006, 2006.12, Mumbai
- [8] 吉田憲吾, 内田 利之, 堀洋一, ”二関節筋を利用したロボットアームの特性に関する考察”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-07-65, 2007 (発表予定)

謝辞

まず始めに卒論よりの3年間にわたってご指導いただきました堀洋一先生に御礼申し上げます。また、実験機の制作に関する的確なサポートおよびアドバイスを頂きました内田利之技術専門職員、電気系工作室の渋谷武夫助手に御礼申し上げます。

現・国立リハビリテーションセンターの畠研究員、堀研究室の呉世訓助手には研究上の重要な助言をいただきました。さらに堀研究室の皆様には研究活動のみに留まらず、大変お世話になりました。特に同期の中村則仁さん、趙莉さんとは互いに切磋琢磨し、おかげでこの2年間で非常に有意義なものになりました。

二関節筋の原理・応用に関しては、精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会において熊本水頼先生を始め諸先生方に様々なご指導、ご助言を賜りました。ここに改めて御礼申し上げます。