- 卒業論文 -

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

平成17年2月9日提出

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

30359 吉田 憲吾

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　研究の背景 1
1.2　研究の目的 2

第 2 章　二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームと関連研究 **3**
2.1　二関節同時駆動機構の定義 3
2.2　二関節筋に関する研究の現状 3
2.2.1　生物と従来ロボットのアーム機構における違い 3
2.2.2　二関節筋に関する既存研究 3
2.3　複数のアクチュエータを組み合わせた機構に関する研究の現状 5
2.3.1　ツインドライブシステムを用いたロボットマニピュレータ 5
2.3.2　DM^2 actuation approach を用いたロボットアーム 5
2.3.3　既存研究との比較 5

第 3 章　二関節筋を用いたアーム機構の特性 **7**
3.1　二関節筋を用いたアーム機構 7
3.2　二関節筋を用いたアーム機構の手先出力 9
3.2.1　手先出力の解析 9
3.2.2　従来機構との比較 9
3.3　二関節筋を用いたアーム機構の手先剛性 12

第 4 章　二関節同時駆動機構を用いたロボットアームのシミュレーション **14**
4.1　ロボットアームのモデルと運動方程式 14
4.1.1　ロボットアームのモデル 14
4.1.2　ラグランジュ法を用いた運動方程式 14
4.2　釣り合いを利用した駆動 15
4.2.1　釣り合いを利用した駆動 15
4.2.2　釣り合いを利用した駆動のシミュレーション 16

第 5 章　二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームの提案 **21**
5.1　二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームの構成 21
5.2　二関節同時駆動機構の構成 21
5.2.1　直動アクチュエータによる二関節同時駆動機構 21
5.2.2　プーリーを使った二関節同時駆動機構 21
5.3　ロボットアームの各パラメタの設定について 23
5.3.1　駆動機構の必要推力の算出 23
5.3.2　駆動機構の必要ストロークの算出 23

5.3.3　実際のパラメータ 24

第 6 章　結論と今後の課題 **25**

6.1　結論 25

6.2　今後の課題と展望 26

参考文献 **27**

発表文献 **28**

謝辞 **29**

第1章　序論

1.1　研究の背景

現在、多数のロボットが提案、開発され、産業界を中心に実際に稼動している。また福祉ロボット、ロボットスーツといった人間と協働するロボットも研究段階ではあるが様々登場してきている。

人間と協働するロボットに求められる事項としては、

正確性 人間程度の正確さがあれば十分であり、工作ロボットのように精密な位置制御は常に必要なわけではない。

素早さ 人間と共同して働くことを考えると、歩行等特定の動作に関しては素早く動くことが可能であることが重要である。

安全性 人とロボットが極めて近い位置関係で活動し、互いに接触するという機会も多い。衝突時等における安全性は最大限重視されなければならない。

といったことが挙げられる。

多くの産業用ロボットにおいては、コントローラによって精密な動作をすることを主眼に制御されており、正確な位置制御、速度制御が膨大な計算量を必要とする手法によって実現されている。しかしながら人間と協働するロボットにおいては、先に述べたようにそれほど正確な制御は要求されないし、計算量が膨大になる点も素早い動きの観点から望ましくない。また、安全性を持たせるために衝突時に力を逃がしてくれるように、剛性の必要ない部分は剛性を減らすなどの、言わゆる柔らかさが必要になると考えられる。

それでは、人間を始めとする生物はどのように、ある程度の正確性を保ち、柔軟性を持った、素早い動作を実現しているのだろうか。実際、生物は一見複雑な運動をほとんど制御無しで実現していることが分かる。人間で言えば、歩行であるとか手を伸ばす、回転させるといった特定の動作はほとんど意識せずに行なっている。このような特性は、生物がその機構によって獲得していると考えられる。

簡単な制御で必要な動作を行なうことができるようになれば、今まで計算量の点で不可能であった素早い動きが実現できるようになる。また、その分のコンピュータリソースを他に振り向けることも可能になる。このために、我々は生物の仕組みをロボットに取りいれ、人間と同じ環境で活動するのに必要十分な正確性、速度、安全性を持つものにする手法を提案する。

1.2 研究の目的

本研究においては、生物に特徴的な仕組みとして二関節筋に注目し、この仕組みを二関節同時駆動機構としてロボットアームに持たせることを考える。

まず、二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームにおいて、手先出力及び手先剛性がアクチュエータの出力とどのような関係があるかを示す。また、簡単なアクチュエータの出力パターンによってどのような運動が実現するかをシミュレーションによって検証する。

また、実際に二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームを設計・製作するにあたり、要求される事項の考察、及び特に二関節同時駆動機構の実現方法について提案する。

第2章　二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームと関連研究

2.1　二関節同時駆動機構の定義

二関節同時駆動機構を以下の条件を満たす物として定義する。

- 二つの関節に対して同時に同一の力を発揮することができること。
- 固定されるのは両関節に対してのみであること。

二つ目の条件は、例えば他の駆動機構もしくは外力、機構の特性等により二つの関節が異なった運動を行なうといった状況が生じうるが、この時に障害とならないようにするために必要である。

生物に特有な二関節筋はこの二関節同時駆動機構の一つであり、特徴的な弾性や粘性を持つ。

2.2　二関節筋に関する研究の現状

2.2.1　生物と従来ロボットのアーム機構における違い

現在一般的なロボットアームの機構としては、関節ごとにトルクを発生するアクチュエータを置くという形状が普通である。しかしながら、人間を始めとした生物の上肢、下肢を見ると、各関節のみに働いてトルクを発生させる筋肉 (一関節筋) に加えて、二つの関節にまたがり収縮する際に両方の関節に対して同時にトルクを発生するような筋肉 (二関節筋) が存在する。(図 2.1)

この二関節筋の存在によって、一方の関節に協働的に働く時、もう片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ができなくなる。このような一見矛盾的で不要に思われる二関節筋が、生物の運動に関して重要な役割を担っているということが近年認識されてきている。

2.2.2　二関節筋に関する既存研究

静力学的な解析を中心とした研究

熊本らによって生物の四肢において特徴的な二関節筋に関しての研究がなされている。ここでは筋肉モデルの提案や、等尺的な条件下においての手先出力、手先剛性等が解析がなされている。結論として二関節筋が四肢末端の位置、力、剛性のに関する特異な制御機能を有していると主張している。[1][2][3]

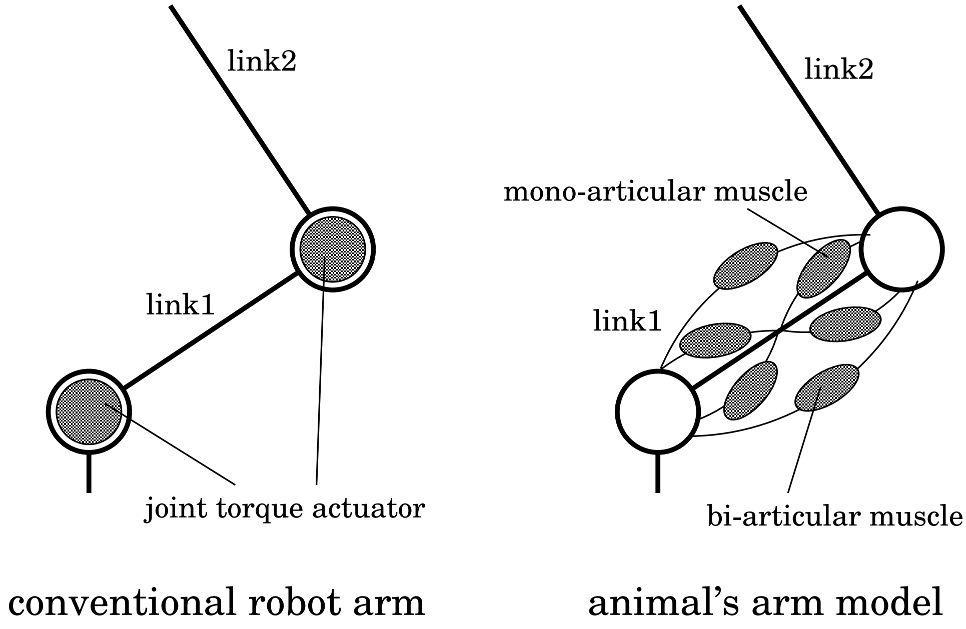


図 2.1: 従来のロボットアームと生物のアームモデル

また同様に熊本らのグループによって、四肢の動作において筋電図学的解析による拮抗一関節筋群および、拮抗二関節筋群の協調活動様相についての報告がなされている。[4][5][6]

大島らによって、複数の動物に関して解剖学的に各筋の出力を取得し、これによって手先の力、剛性にどのような特徴を持たらすかが解析された。この結果動物が歩行や走行などの生活様式に合わせた筋配列を持っていることが示された。[7]

二関節筋を模したアクチュエータを持つロボット

熊本らは、等尺状態における手先の力解析・剛性解析の検証のためにラバチュエータを用いた二関節筋を持つロボットアームを作成している。

また、門田らによって可変弾性アクチュエータ (VEA) を用いて熊本らによる筋力モデルを再現した HIPRO と呼ばれるロボットアームが研究されている。[8]

さらに、二関節筋を応用したロボットとして斎藤らによって災害救助ロボット「Gorilla」が研究されている。このロボットには二関節筋に相当する油圧シリンダのみが登載されおり、足の曲げ伸ばし等限定された動作のみ行なえるようになっている。[9]

既存研究との比較

熊本、大島らによる研究は等尺条件における解析が中心で、これについてロボットによる検証を行なっている。我々は様々な動きの中で、二関節筋がどのように寄与するか、アームの制御をする際にどのようなメリットがあるかという点を追求する。

また、これまでに作成されたロボットとの違いについては、熊本らのロボットはやはり静止状態での解析を確認することが目的で、自由に運動させるには不向きである。HIPRO はアクチュエータを工夫し、熊本らの提唱する筋肉モデルに忠実な物にしており、生物のアームそのものの実現といった方向性を持つ。Gorilla とは動きを限定することで、二関

節筋に相当するアクチュエータのみで動作可能にしているという点で異なる。

我々としては、制御しやすい電気的なアクチュエータを用い、必要ならば弾性や粘性等の要素はコントローラによって実現する。

2.3 複数のアクチュエータを組み合わせた機構に関する研究の現状

2.3.1 ツインドライブシステムを用いたロボットマニピュレータ

モーションコントロールにおいては、静止摩擦と動摩擦によるモード移行が運動に大きく影響し、スティック-スリップ等の問題が発生する。こういった摩擦の影響を改善するためにツインドライブシステムが提案されている。[10]

ツインドライブシステムにおいては、二つのモータと一つの差動機構が利用される。二つのモータが逆向きに回転しており、差動機構によって取り出される二つのモータの速度差がツインドライブシステムの出力となる。二つのモータは常時回転しているため、静止摩擦が生じることはない。また、特性が同じモータを使用することで、クーロン力・粘性摩擦の影響も相殺することができ、摩擦による影響を解決することが可能である。

2.3.2 DM^2 actuation approach を用いたロボットアーム

ロボットが安全性を持つためには、衝突時の衝撃を逃がすためにコンプライアンスを持つ必要があり、外装をラバーで覆うなどの方策では限界があるため、アクチュエータ自体にコンプライアンスを持たせる方法を提案している。しかしながら、これではパフォーマンスが低下し、特に周波数の高い帯域においてトルクを発生することができなくなってしまう。

安全性とパフォーマンスを同時に向上させるために DM^2 actuation approach が提案されている。DM^2 は Distributed Macro-Mini の略であり、これはコンプライアンスを持ったアクチュエータと、持たないアクチュエータを組み合わせ、周波数の低い領域のトルクをコンプライアンスを持ったアクチュエータが発生させ、周波数の高い領域のトルクを通常のサーボモータで発生する組み合わせによって、一つの安全性とパフォーマンスを合わせもったアクチュエータとして扱う手法である。[11]

2.3.3 既存研究との比較

ツインドライブシステムにおいては、制御の障害となる摩擦の影響を減らすという目的において、DM^2 アプローチにおいては、コンプライアンスを持たせつつアクチュエータの高周波数領域におけるパフォーマンスを維持するという目的で、複数のアクチュエータを組み合わせて一つのアクチュエータとして用いるというものであり、この点で根本的に異なる。

二つの研究はアクチュエータそのものの改善であり、ロボットアームの機構としてみると、各関節にトルクを発生させるという点で従来通りである。我々のロボットは二関節同時駆動機構を備えるということで、両関節に同時にトルクを与えるアクチュエータを付加

し、機構そのものの変革となる。

ただし副次的に享受する効果としては、差動を用いることで摩擦等による影響を減らし、性質の良い領域を用いて制御できるといった点で期待できる。また、ロボットが人間と協働する際の安全性を重視し、コンプライアンスを積極的に持たせるという点では、DM^2 アプローチと共通する部分がある。

第3章　二関節筋を用いたアーム機構の特性

3.1　二関節筋を用いたアーム機構

図 3.1 のように生物のアーム機構を模式的に表わす。

ここで図 3.1 の e1,f1 は関節 R1 に働く一関節筋、e2,f2 は関節 R2 に働く一関節筋である。また、e3,f3 は関節 R1,R2 にまたがる二関節筋である。

まず生物の筋肉は図 3.2 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。これを数式で表わすと、出力を F とすれば、

$$F = u - K(u)x - B(u)\dot{x} = u - kux - bu\dot{x} \tag{3.1}$$

と表わすことができる。バネ成分、ダンパ成分の係数は筋肉の出力 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。

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 $T1, T2$ とする。各筋の出力を $F_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ とすると、

$$\begin{aligned} T_1 &= (F_{f1} - F_{e1})r_1 + (F_{f3} - F_{e3})r_1 \\ T_2 &= (F_{f2} - F_{e2})r_2 + (F_{f3} - F_{e3})r_2 \end{aligned} \tag{3.2}$$

と表わされる。

式 (3.1), 式 (3.2) より、各筋の収縮力を $u_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ とすれば

$$\begin{aligned} T_1 &= (u_{f1} - u_{e1})r_1 - k(u_{f1} + u_{e1})r_1^2\theta_1 - b(u_{f1} + u_{e1})r_1^2\dot{\theta}_1 \\ &\quad +(u_{f3} - u_{e3})r_1 - k(u_{f3} + u_{e3})(r_1\theta_1 + r_2\theta_2)r_1 - b(u_{f3} + u_{e3})(r_1\dot{\theta}_1 + r_2\dot{\theta}_2)r_1 \\ T_2 &= (u_{f2} - u_{e2})r_2 - k(u_{f2} + u_{e2})r_2^2\theta_2 - b(u_{f2} + u_{e2})r_2^2\dot{\theta}_2 \\ &\quad +(u_{f3} - u_{e3})r_2 - k(u_{f3} + u_{e3})(r_1\theta_1 + r_2\theta_2)r_2 - b(u_{f3} + u_{e3})(r_1\dot{\theta}_1 + r_2\dot{\theta}_2)r_2 \end{aligned} \tag{3.3}$$

のように表される。

また、e1 と f1、e2 と f2、e3 と f3 はそれぞれ拮抗関係にある。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、

$$\begin{aligned} \frac{E}{E_{max}} + \frac{F}{F_{max}} &= 1 \\ \text{ただし、} 0 \leq E \leq E_{max} &\quad , \quad E_{max} > 0 \\ 0 \leq F \leq F_{max} &\quad , \quad F_{max} > 0 \end{aligned} \tag{3.4}$$

という関係がある。

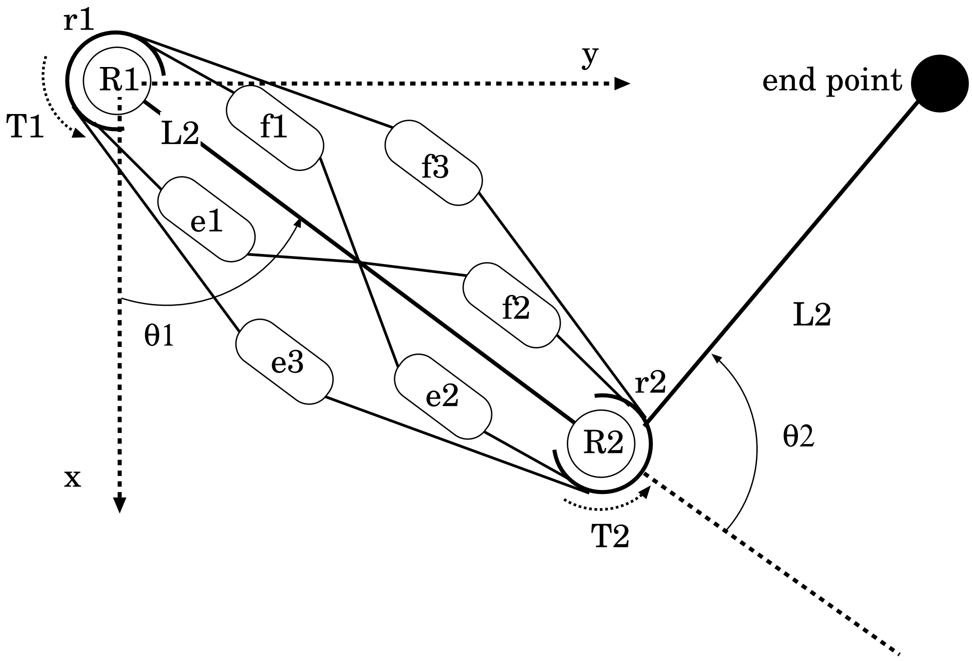


図 3.1: 典型的な生物のアーム機構

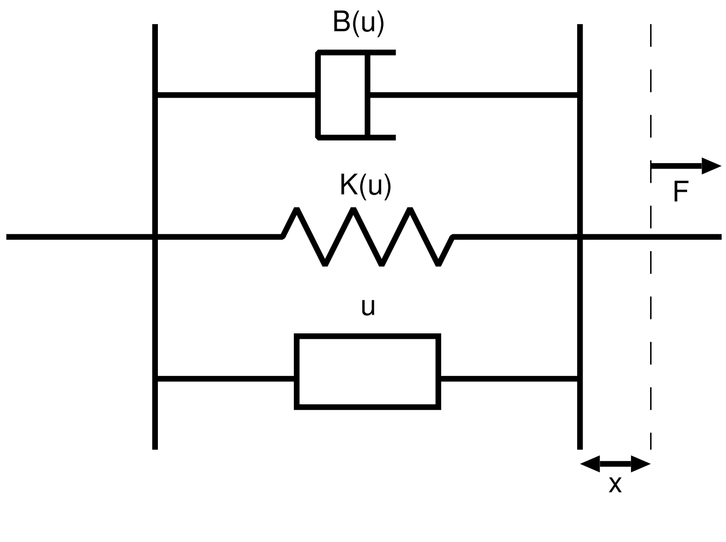


図 3.2: 筋肉の模式図

3.2　二関節筋を用いたアーム機構の手先出力

3.2.1　手先出力の解析

関節 R1,R2 の角度を図 3.1 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

$$J = \begin{pmatrix} -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \\ l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) & l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} \tag{3.5}$$

であるから、各関節のトルクと手先の力の関係は、

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = J^T \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

とすることができる。よって、

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) & -l_1 \cos\theta_1 - l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) & -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} \tag{3.7}$$

ここで、式 (3.2) 及び、式 (3.7) 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。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = & \frac{r}{l_1 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) \\ \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} (F_{f1} - F_{e1}) \\ & + \frac{r}{l_1 l_2 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} -l_1 \cos\theta_1 - l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ -l_2 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} (F_{f2} - F_{e2}) \\ & + \frac{r}{l_2 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} -\cos\theta_1 \\ -\sin\theta_1 \end{pmatrix} (F_{f3} - F_{e3}) \end{aligned} \tag{3.8}$$

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。

3.2.2　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になるかを求める。

各関節の角度を様々に変えて、式 (3.8) 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。

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

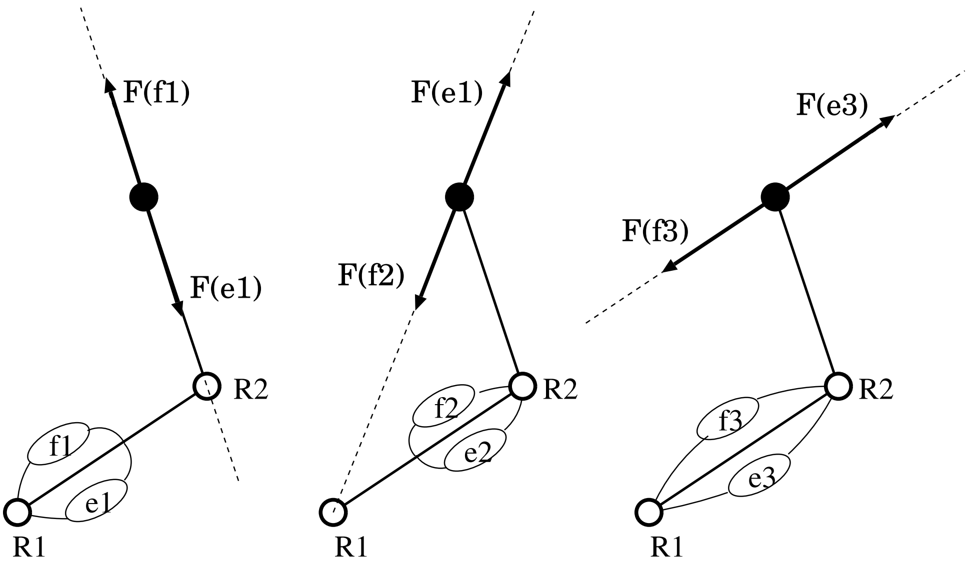


図 3.3: 各筋肉による手先の出力

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。

±0.1[N・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 e1,f1,e2,f2 によってそれぞれの関節に ±0.1[N・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 ±0.1[N・m] を与える。

従来のアーム機構の結果

解析結果を図 3.5 のように示す。図の順序は図 3.4 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 3.6 のように示す。図の順序は従来アーム機構に同じく、図 3.4 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う部分の出力を同等に引き上げることができる。

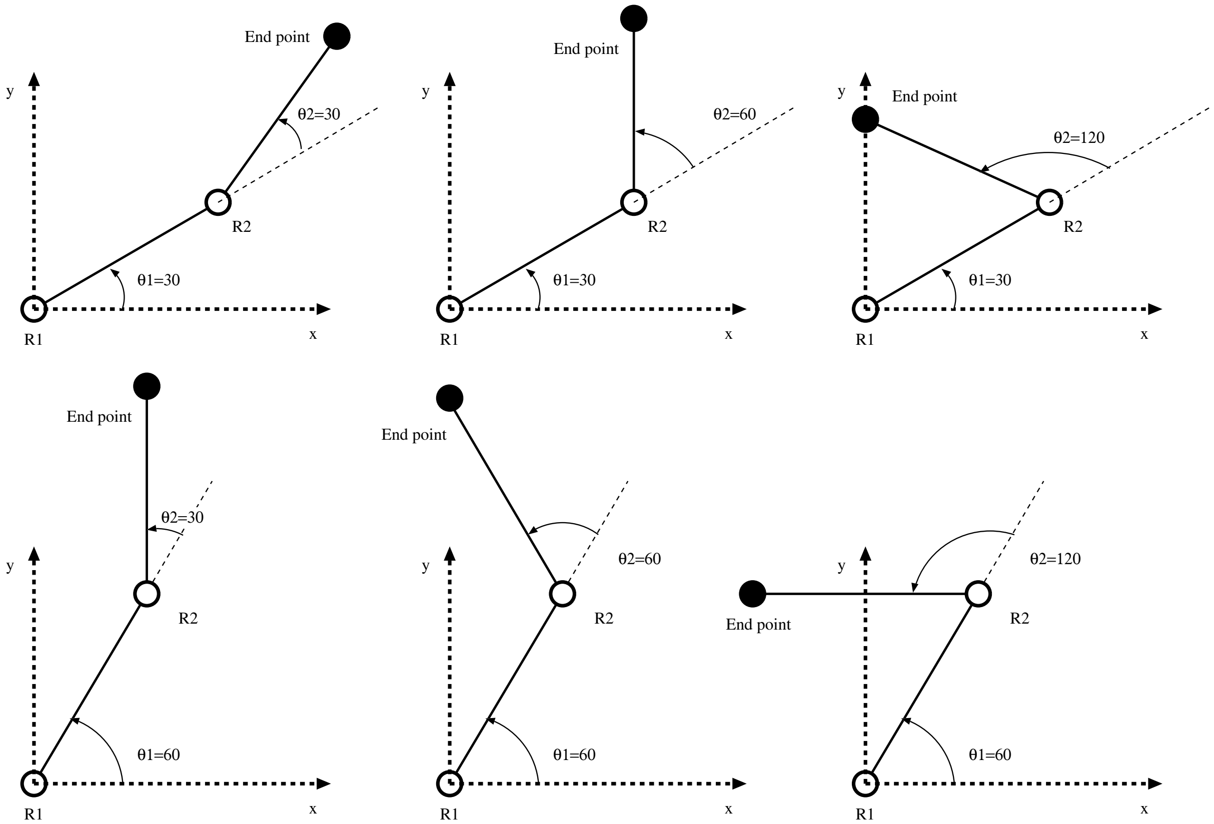


図 3.4: 解析を行なうアーム角度

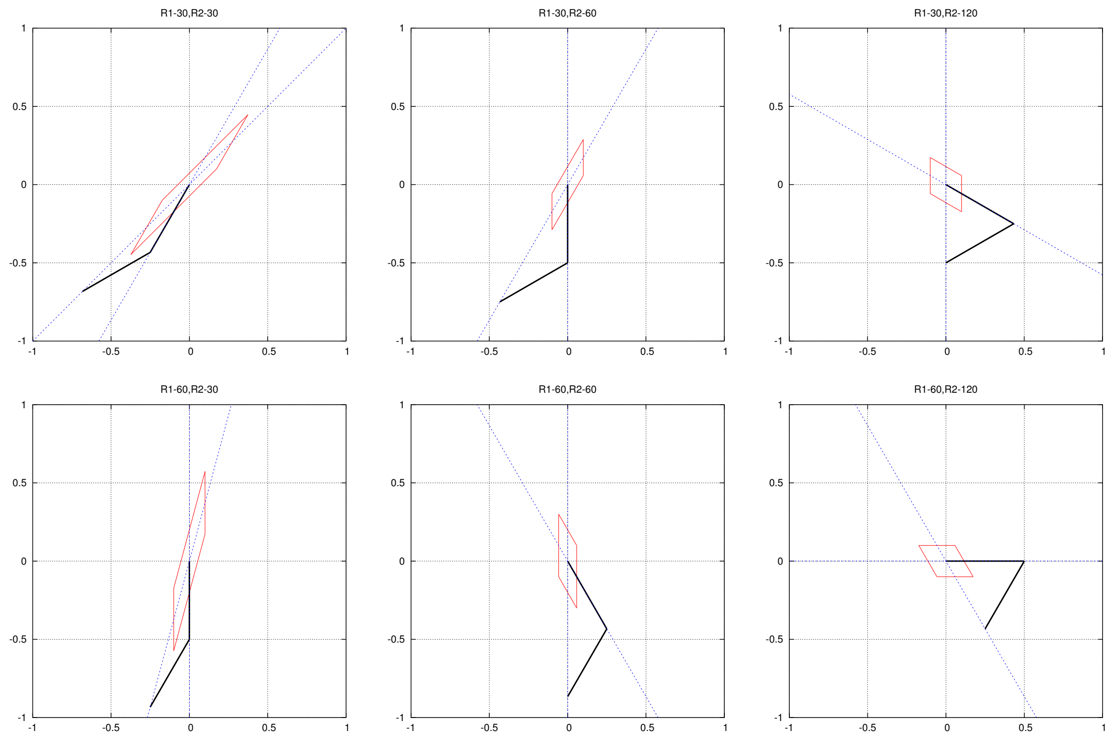


図 3.5: 従来のアーム機構の手先出力

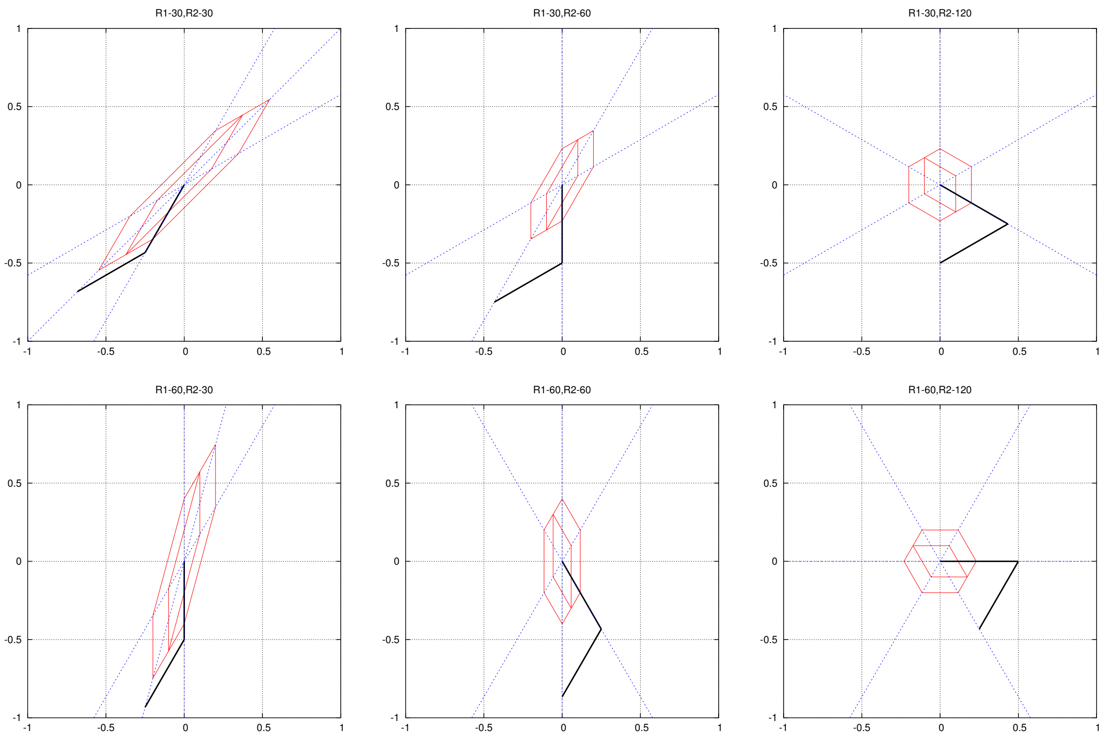


図 3.6: 二関節筋の仕組みを用いたアーム機構の手先出力
内側の四角形が二関節筋を除いた場合のアーム機構の手先出力である。つまり、従来機構の手先出力となる。

3.3　二関節筋を用いたアーム機構の手先剛性

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

$$\begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha & \beta \\ -\gamma & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

ただし、

$$\alpha = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad , \quad \beta = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2),$$
$$\gamma = l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad , \quad \delta = l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

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

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha & -\gamma \\ \beta & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

ここで、式 (3.3) より、微少な関節角度の変化によるトルクの変化を求めると

$$\begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} & \frac{1}{C_3} \\ \frac{1}{C_3} & \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

ただし

$$
\begin{aligned}
C_1 &= -\frac{1}{kr^2(u_{f1}+u_{e1})}, C_2 = -\frac{1}{kr^2(u_{f2}+u_{e2})} \\
C_3 &= -\frac{1}{kr^2(u_{f3}+u_{e3})}
\end{aligned}
\tag{3.12}
$$

である。式 (3.9), 式 (3.10), 式 (3.11) より、手先の微少な変位と、手先の力の関係は

$$
\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{pmatrix} \tag{3.13}
$$

ただし

$$
\begin{aligned}
a_{11} &= \alpha^2 C_A - 2\alpha\gamma C_B + \delta^2 C_C \\
a_{12} &= -\alpha\beta C_A + (\alpha\delta + \beta\gamma) C_B - \gamma\delta C_C \\
a_{22} &= \beta^2 C_A - 2\beta\delta C_B + \delta^2 C_C \\
C_A &= \frac{C_1(C_2+C_3)}{C_1+C_2+C_3}, C_B = \frac{-C_1C_2}{C_1+C_2+C_3} \\
C_C &= \frac{C_2(C_1+C_3)}{C_1+C_2+C_3}
\end{aligned}
$$

手先のポテンシャルエネルギーを Ep とすれば、

$$
Ep = \begin{pmatrix} \Delta x & \Delta y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \tag{3.14}
$$

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

$$
\left(\frac{\cos\psi}{A^2} + \frac{\sin\psi}{B^2}\right)\Delta x^2 + \left(\frac{\sin\psi}{A^2} + \frac{\cos\psi}{B^2}\right)\Delta y^2 + 2\sin\psi\cos\psi\left(\frac{1}{A^2} - \frac{1}{B^2}\right)\Delta x \Delta y = 1 \tag{3.15}
$$

と表わされ、式 (3.14) を展開すると

$$
\frac{a_{22}}{(a_{11}a_{22}-a_{12}^2)Ep}\Delta x^2 + \frac{a_{11}}{(a_{11}a_{22}-a_{12}^2)Ep}\Delta y^2 - \frac{2a_{12}}{(a_{11}a_{22}-a_{12}^2)Ep}\Delta x \Delta y = 1 \tag{3.16}
$$

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り、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。

第4章　二関節同時駆動機構を用いたロボットアームのシミュレーション

4.1　ロボットアームのモデルと運動方程式

4.1.1　ロボットアームのモデル

まず、ロボットアームのモデルとして、各リンクは幅や厚みのない細い棒として定義する。リンク1の長さを l_1, リンク2の長さを l_2 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、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 $r1, r2$ とし、それぞれ重量さはないものとする。また、各関節の角度を θ_1, θ_2 とする。モデルを図 4.1 のように図示する。

4.1.2　ラグランジュ法を用いた運動方程式

ここで、各関節に働くトルクをそれぞれ T_1, T_2 とし、重力の影響を受けない水平面内の運動のみを考えることにすれば、ラグランジュ法を用いることで

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \boldsymbol{M}(\theta_1, \theta_2) \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \boldsymbol{h}(\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2) \tag{4.1}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M}(\theta_1, \theta_2) &= \begin{pmatrix} I_1 + I_2 + 2m_2 l_1 l_{g2} \cos\theta_2 + m_2 l_1^2 & I_2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos\theta_2 \\ I_2 + m_2 l_1 l_{g2} \cos\theta_2 & I_2 \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{h}(\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2) &= \begin{pmatrix} -m_2 l_1 l_{g2} \sin\theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^{\,2}) \\ m_2 l_1 l_{g2} \sin\theta_2 \dot{\theta}_1^{\,2} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

のように運動方程式を得ることができる。

ここでトルク T_1, T_2 は式 (3.3) のように各筋の出力から求めるようにする。式 (4.1) を $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}$ について解き、

$$\begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \boldsymbol{M}(\theta_1, \theta_2)^{-1} \{ \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} - \boldsymbol{h}(\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2) \} \tag{4.2}$$

について、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。

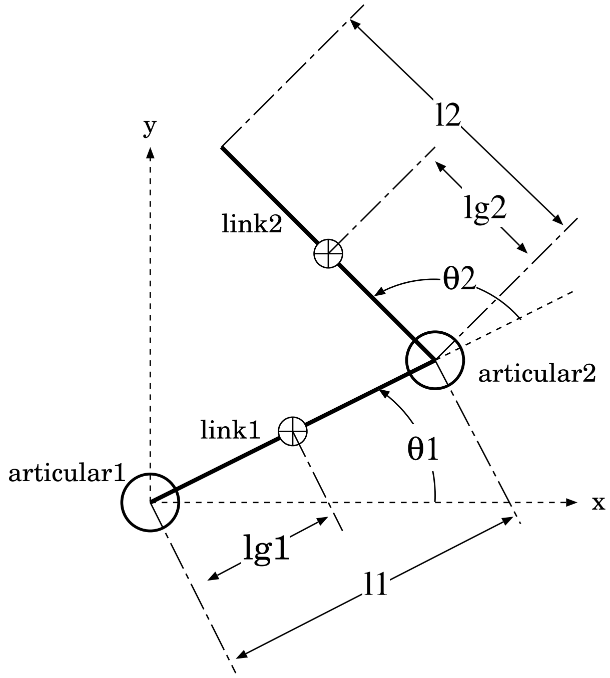


図 4.1: シミュレーションのモデル

4.2 釣り合いを利用した駆動

4.2.1 釣り合いを利用した駆動

各筋にそれぞれ一定の力を与えつづけると、最終的に釣り合いの位置に至る。ここで、各筋の出力を (u_x ただし、$x = f1, e1, f2, e2, f3, e3$) として、各拮抗対の出力の和、差を定義する。

$$\begin{aligned} S_1 &= u_{f1} + u_{e1} \quad , \quad D_1 = u_{f1} - u_{e1} \\ S_2 &= u_{f2} + u_{e2} \quad , \quad D_2 = u_{f2} - u_{e2} \\ S_3 &= u_{f3} + u_{e3} \quad , \quad D_3 = u_{f3} - u_{e3} \end{aligned} \tag{4.3}$$

ただし、

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

である。これより、式 (3.3) を式 (4.3) を用いて以下のように表すことができる。ただし、$r = r_1 = r_2$ とする。

$$\begin{aligned} T_1 &= rD_1 - kr^2\theta_1 S_1 - br^2\dot{\theta}_1 S_1 + rD_3 - kr^2(\theta_1 + \theta_2)S_3 - br^2((\dot{\theta}_1) + (\dot{\theta}_2))S_3 \\ T_2 &= rD_2 - kr^2\theta_2 S_2 - br^2\dot{\theta}_2 S_2 + rD_3 - kr^2(\theta_1 + \theta_2)S_3 - br^2((\dot{\theta}_1) + (\dot{\theta}_2))S_3 \end{aligned} \tag{4.4}$$

θ_1, θ_2 において $T_1 = 0, T_2 = 0$ となる条件を求めると、

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{kr}\frac{(D_1 + D_3)S_2 + (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \\ \theta_2 &= \frac{1}{kr}\frac{(D_2 + D_3)S_1 - (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \end{aligned} \tag{4.5}$$

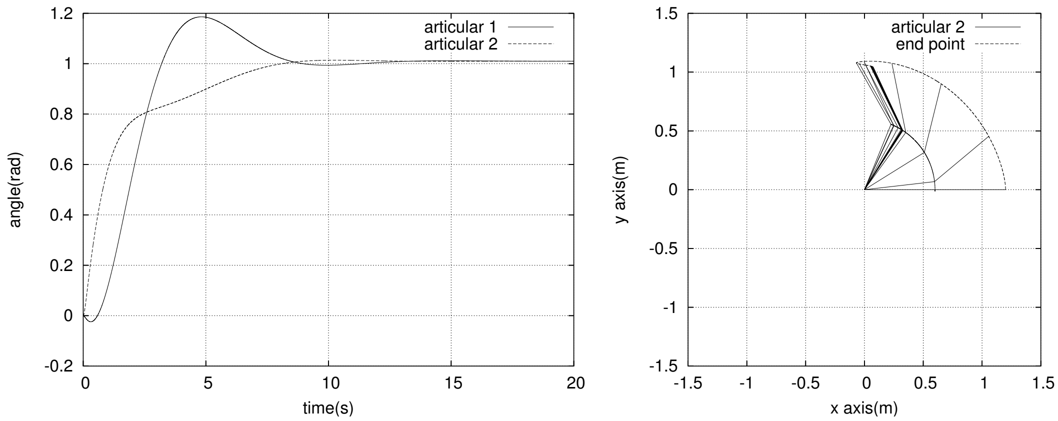


図 4.2: 釣り合いを利用した駆動 初期位置 $(\theta_1 = 0, \theta_2 = 0)$

とそれぞれ、筋肉の出力の和、差によって表わすことができる。出力の和 S_1, S_2, S_3 によって、剛性楕円の形状を求めることができるから、ここではあらかじめ S_1, S_2, S_3 を決めていくつかの例についてシミュレーションすることにする。しかしながら、それでもまだ自由度が一つ余ってしまうので、適宜 D_1, D_2, D_3 を決める。

4.2.2 釣り合いを利用した駆動のシミュレーション

モデルとなるロボットアームのパラメータであるが、各リンクの長さを $l_1 = l_2 = 0.6$[m]、各関節座標系の原点から各リンクの重心までの距離を $l_{g1} = l_{g2} = 0.3$[m]、各リンクの重量を $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0$[kg]、慣性モーメントは質量が細長い棒であるリンクに一様に存在するとして、$I_1 = 3, I_2 = 1.2$[kg・m^2] とし、各関節の半径は $r_1 = r_2 = 0.1$[m] とする。また、バネ定数 $k = 3.3$[N/m], 粘性定数 $b = 5$[N・t/m] とする。サンプリングタイムは 0.001 秒としてシミュレーションを行なった。

初期位置を変えた場合の比較

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。

どのような初期位置からでも、ただちに釣り合い位置へと向かうことが分かる。ただし遠い位置から移動した場合には、オーバーシュートが大きくなる傾向がある。また図 4.4 のように、腕を曲げた状態からは、まっすぐに腕を伸ばすという運動になることがわかる。

筋肉の出力を変化させた場合の比較

釣り合いによる駆動の改善のために、筋肉の出力をあげることを試みた。筋の出力を全体として、それぞれ 1 倍、1/2 倍、2 倍、4 倍と変化させた場合のシミュレーションを図 4.5 に示す。図の (A) 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

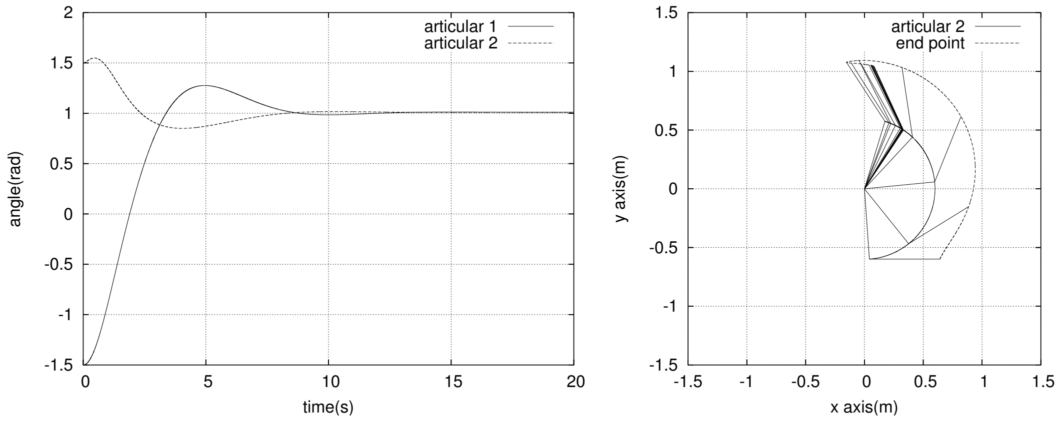


図 4.3: 釣り合いを利用した駆動 初期位置 $(\theta_1 = -1.5, \theta_2 = 1.5)$

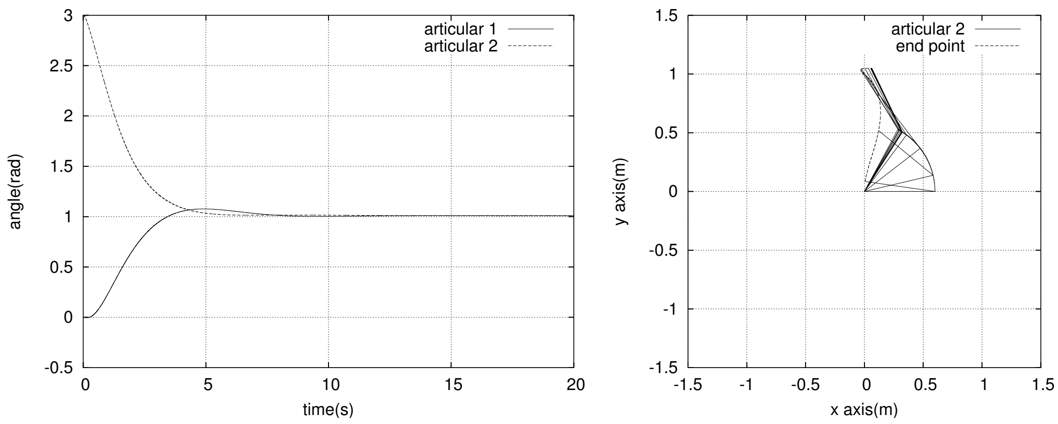


図 4.4: 釣り合いを利用した駆動 初期位置 $(\theta_1 = 0, \theta_2 = 3)$

準とする。図の (B) 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 (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。

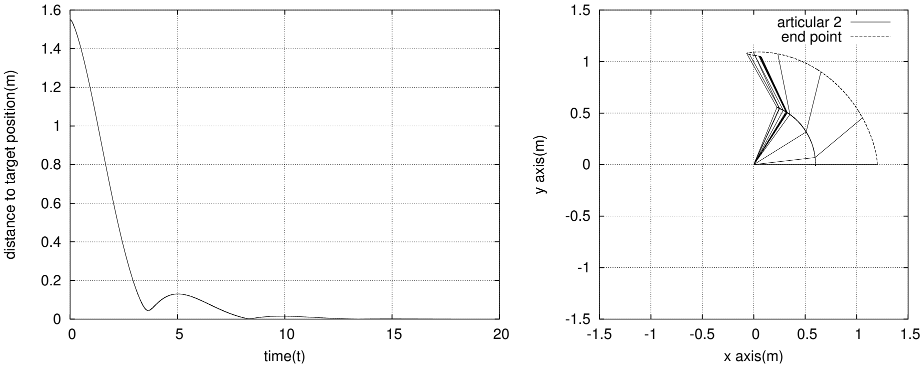
　このように、出力を上げた場合にはオーバーシュートを小さくすることが可能だが、立ち上がりの時間はそれ程短くなる訳ではない。というのは、粘性要素が筋の出力に比例するために、アームの速度が抑えられてしまうからである。

二関節筋を持たないアームとの比較

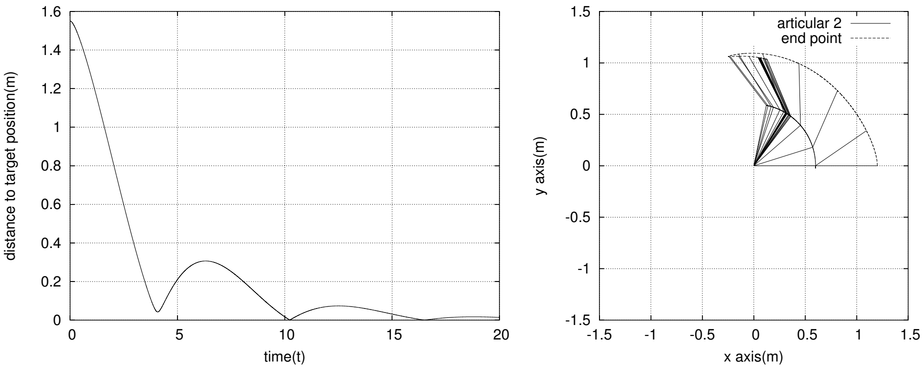
　二関節筋を持たないアームとの比較を図 4.6 に示す。二関節筋を持たないアームの出力であるが、式 (3.4) のように互いに拮抗関係にある筋肉の出力が制限を受けるため、それぞれ出力の和である S_1, S_2, S_3 をそろえることによって比較を行なう。

　図 4.6 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 $S_1 = S_2 = 10$ とした二関節筋を持たないアーム、(C) は $S_1 = S_2 = 15$ とした二関節筋を持たないアーム、(D) は $S_1 = S_2 = 20$ とした二関節筋を持たないアームの結果である。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。

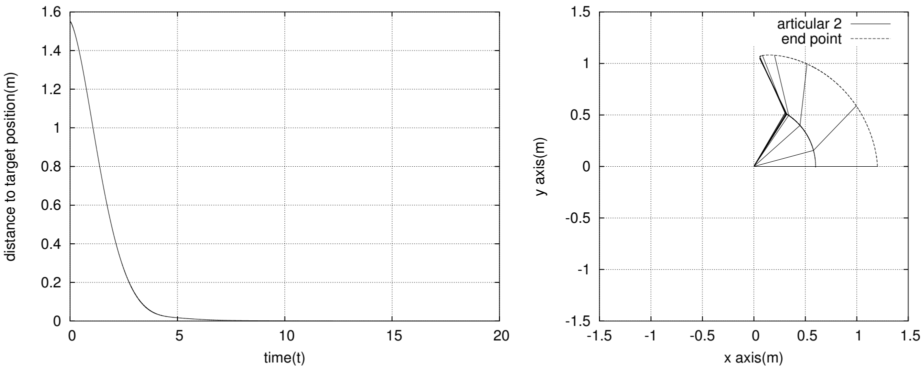
　このように、二関節筋が存在することで、およそ二倍の出力を持つ一関節筋アームと同等の性能を持つことができる。二関節筋を持たないアームの場合、各リンクが協調せず、別々に角度を調節されるので、慣性モーメントが小さいリンク 2 が先に静定してしまい、リンク 1 の動揺によって手先は大きく変動してしまう。一方二関節筋を持つ場合は、協調して運動を行なうためにこのような手先の変動を抑えることが可能である。



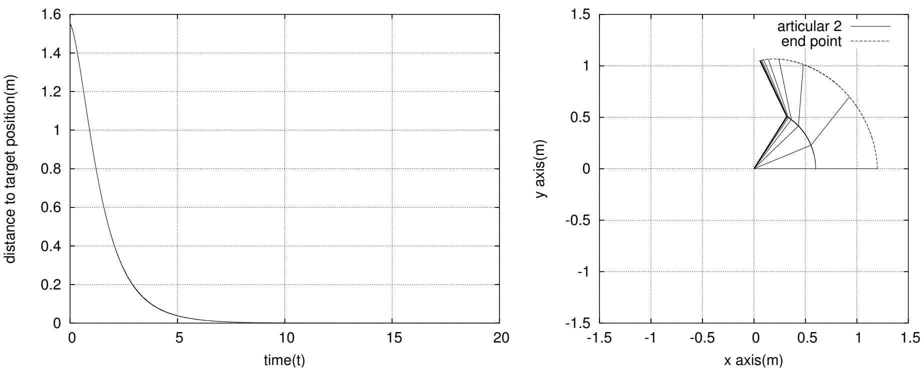
(A)$S_1 = S_2 = S_3 = 5, D_1 = D_2 = D_3 = 2.5$



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

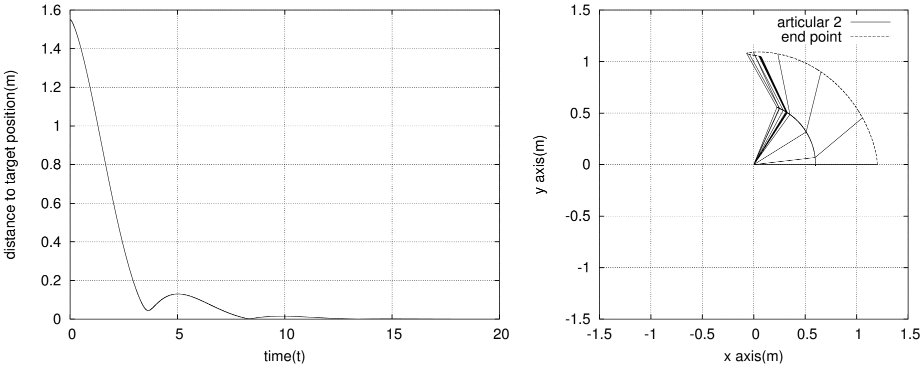


(C)$S_1 = S_2 = S_3 = 20, D_1 = D_2 = D_3 = 10$

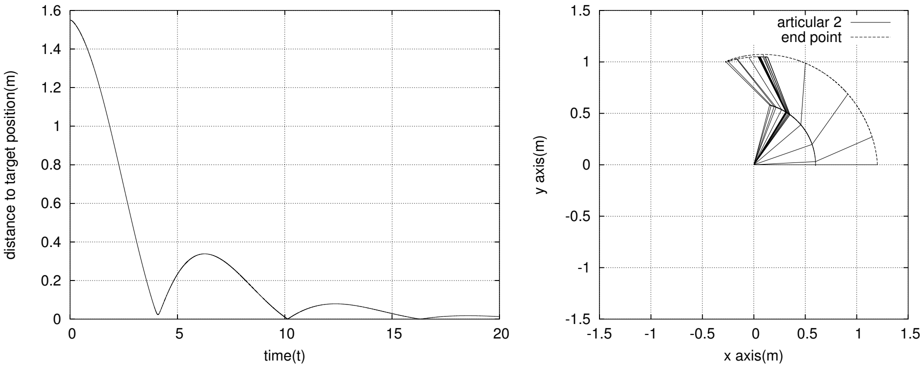


(D)$S_1 = S_2 = S_3 = 40, D_1 = D_2 = D_3 = 20$

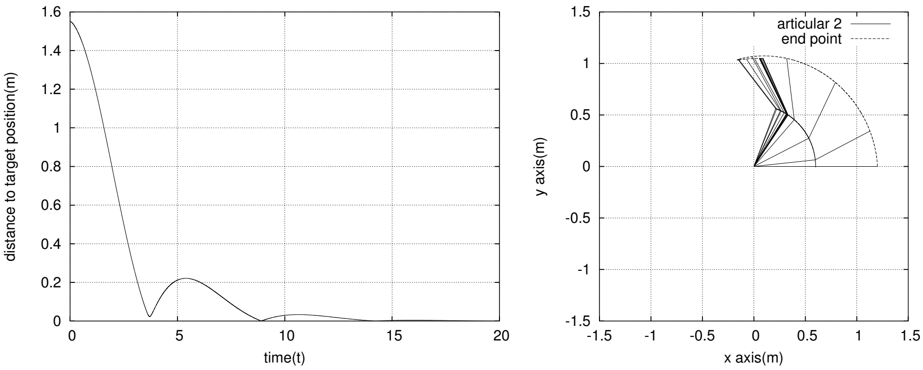
図 4.5: 釣り合いを利用した駆動 筋肉の出力による比較
各段の左側のグラフは釣り合い位置と手先との距離、右側のグラフは手先と関節 2 の軌跡である



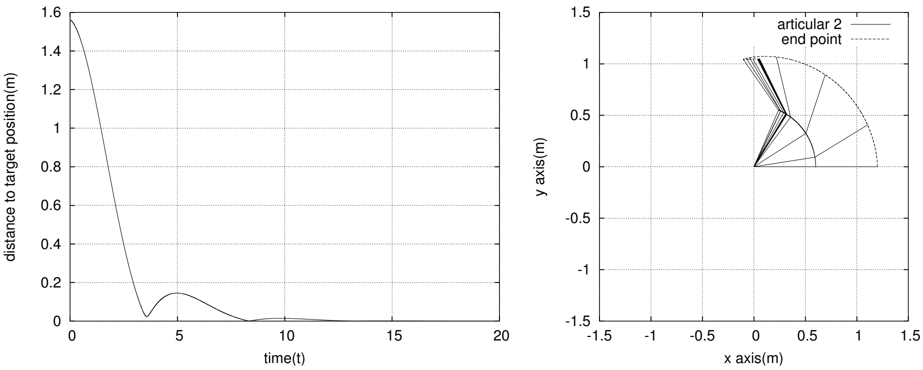
(A) 二関節筋あり、$S_1 = S_2 = S_3 = 10$



(B) 二関節筋なし、$S_1 = S_2 = 10$



(C) 二関節筋なし、$S_1 = S_2 = 15$



(D) 二関節筋なし、 $S_1 = S_2 = 20$

図 4.6: 釣り合いを利用した駆動 二関節筋を持たないアームとの比較
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

第5章　二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームの提案

5.1　二関節同時駆動機構を持たせたロボットアームの構成

解析及びシミュレーションによって示された結果の検証を行なうために、二関節同時駆動機構を持たせた2リンクのロボットアームを提案する。全体図は以下のようになる。重力の影響を無視できるようにするために、試作機においては水平面内においてのみリンクの伸縮が可能とする。図5.1のように、各関節に相当するプーリをR1,R2とし、リンクをL1,L2とする。また、P1とP2は各関節の軸である。

生物の四肢における3対6筋の拮抗筋群に対応するように、関節駆動機構を用いることにする。ということで、関節R1にのみ働く単関節駆動機構の対をe1,f1とし、関節R2にのみ働く単関節駆動機構の対をe2,f2とする。さらに、両関節に対する二関節同時駆動機構の対をe3,f3としてそれぞれ配置する。

単関節駆動機構の配置であるが、L1に全ての駆動機構を配置する方法もあるが、重量の観点から単関節駆動機構はL1から外して、L2やベース部分に配置しても良い。ここではL1に全てのアクチュエータを配置したケースについて図5.2に示す。

5.2　二関節同時駆動機構の構成

5.2.1　直動アクチュエータによる二関節同時駆動機構

図5.3のように、直動アクチュエータを用いて、二関節同時駆動機構を構成する例である。直動アクチュエータはレールに乗せるなどして、自由に動くことができるようにする。ワイヤは直動アクチュエータの可動部分、固定部分にそれぞれ取りつけ、各ワイヤの先は両関節へと至る。

5.2.2　プーリーを使った二関節同時駆動機構

動滑車、定滑車を組み合わせることによって一本のワイヤを伸び縮みさせて力を発生させる機構が図5.4である。アクチュエータとしては、この例では直動アクチュエータを利用している。直動アクチュエータに動滑車をとりつけ、これを移動させることによって同時に力を発生することができる。ワイヤの両端は両関節にそれぞれ接続する。

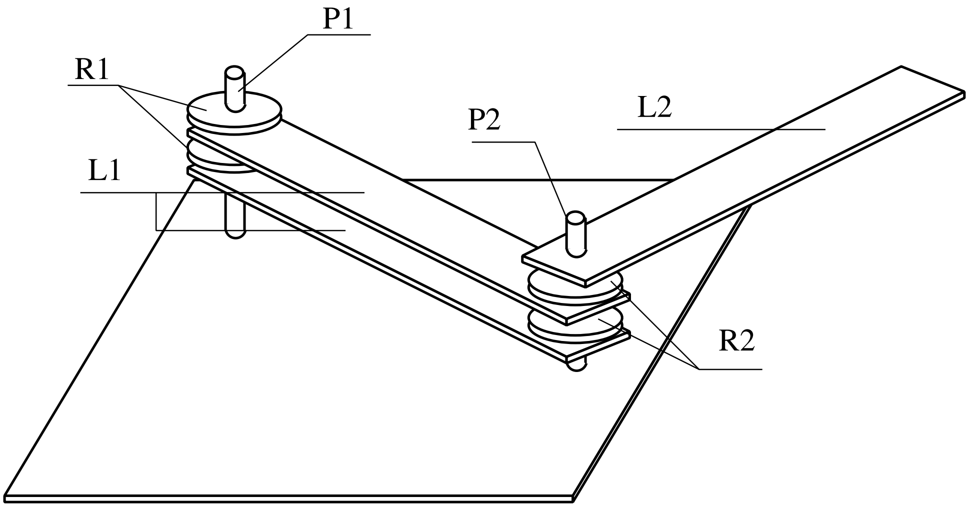


図 5.1: 試作機の外観

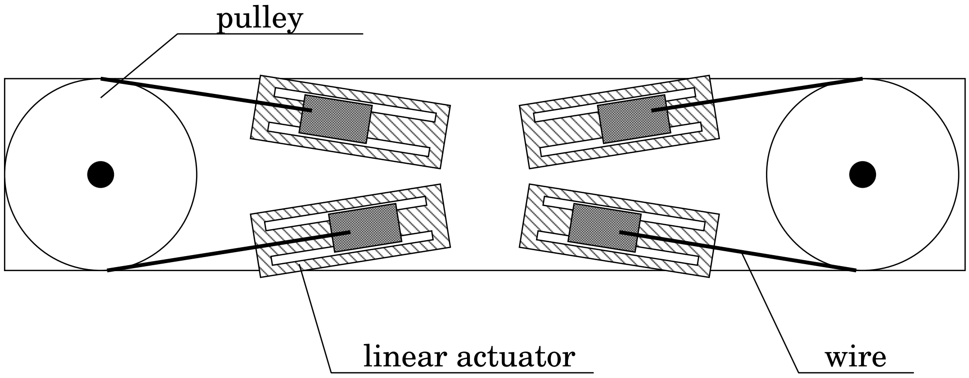


図 5.2: 単関節駆動機構の配置

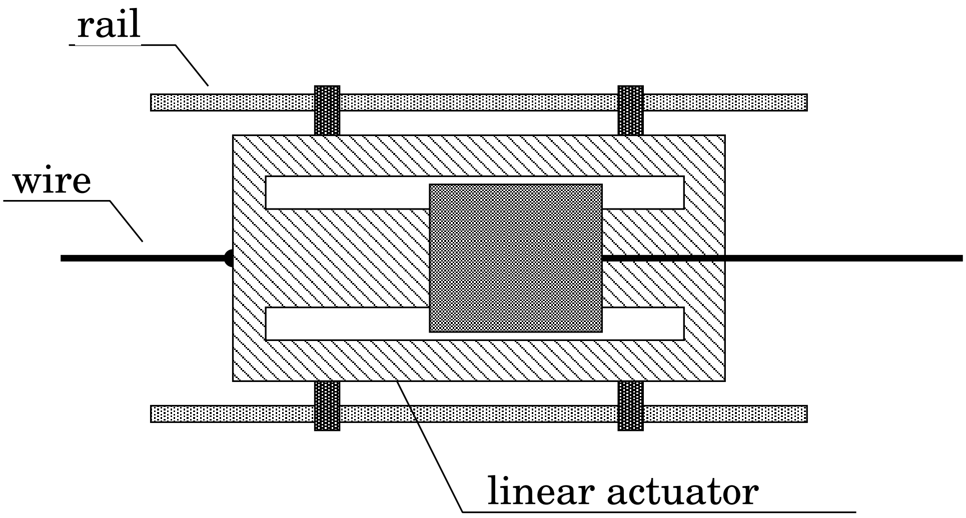


図 5.3: 直動アクチュエータによる二関節同時駆動機構

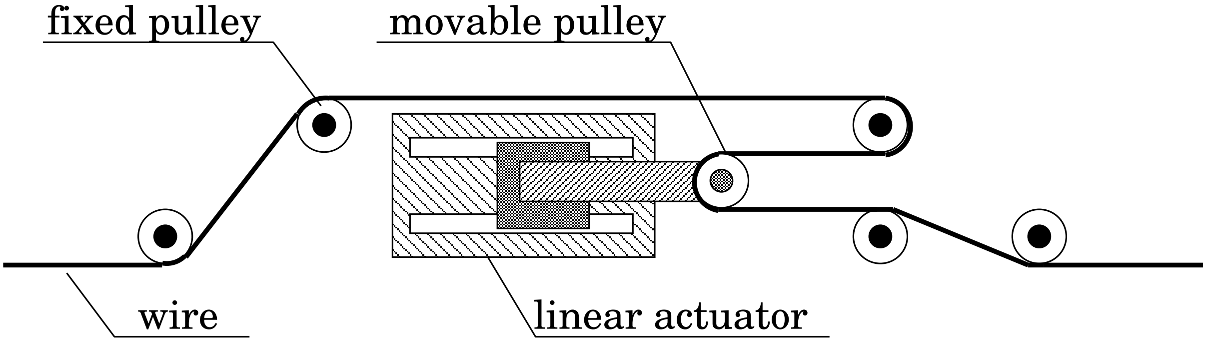


図 5.4: プーリーを使った二関節同時駆動機構

5.3 ロボットアームの各パラメタの設定について

5.3.1 駆動機構の必要推力の算出

単関節駆動機構の発する力を F_m とし、重量を m_m とする。二関節同時駆動機構についても、簡単のために出力、重量ともに同様とする。また、機構の重量としてリンク L1,L2 の長さを l_{L1},l_{L2}、幅を w_{L1},w_{L2}、重量を m_{L1},m_{L2} とする。関節 R1,R2 の半径を r_{R1},r_{R2}、重量を m_{R1},m_{R2} とする。

R1 に接続する単関節駆動機構 e1,f1 の出力のみによって、R2 の角度を 0rad に保って運動する場合を考える。R1 の角度を 0rad から $\frac{\pi}{4}$rad まで f1 の最大出力で加速し、e1 の最大出力で減速して $\frac{\pi}{2}$rad で停止する。この動作にかかる時間を $2T$ として、動作時間と単関節駆動機構の出力の関係を求めることにする。関節 R1 を中心とした慣性モーメントの大きさは、

$$\begin{aligned} I &= (m_{L1}+6m_m)\{\frac{1}{12}\left(l_{L1}^2+w_{L1}^2\right)+\left(\frac{l_{L1}}{2}\right)^2\} \\ &+ m_{L2}\{\frac{1}{12}\left(l_{L2}^2+w_{L2}^2\right)+\left(l_{L1}+\frac{l_{L2}}{2}\right)^2\} \\ &+ \frac{1}{2}m_{R1}r_{R1}^2 \\ &+ m_{R2}\left(\frac{1}{2}r_{R2}^2+l_{L1}^2\right) \end{aligned} \tag{5.1}$$

よって、回転の運動方程式は、

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2}=r_{R1}F_m \tag{5.2}$$

となり、T と F_m の関係は

$$F_m=\frac{\pi}{2}\frac{I}{rT^2} \tag{5.3}$$

とすることができる。

5.3.2 駆動機構の必要ストロークの算出

各関節 R1,R2 の可動角をそれぞれ Θ_1,Θ_2 とする。各駆動機構の必要ストロークは、

$$x_{e1} \;=\; x_{f1}=\Theta_1 r_1$$

$$\begin{aligned} x_{e2} &= x_{f2} = \Theta_2 r_2 \\ x_{e3} &= x_{f3} = \Theta_1 r_1 + \Theta_2 r_2 \end{aligned} \tag{5.4}$$

という関係式で表わされる。

5.3.3 実際のパラメータ

人の上肢サイズのロボットアームを作成することを考える。つまり、各リンクの長さが400〜600mm 程度、各関節の半径を 50〜100mm 程度とする。また、各可動角を R1 は 90 度、R2 は 150 度とし、必要推力の算定に用いる時間を 2 秒とする。

提案した二関節同時駆動機構を用いれば、リニアアクチュエータ自体のストロークは式 (5.4) で算出したものの半分で済む。表 5.1 にロボットアームのパラメータの一例を示す。

リンク 1(L1)		**リンク 2(L2)**	
長さ	600mm	長さ	600mm
幅	200mm	幅	200mm
重量	2kg	重量	1kg
関節 1(R1)		**関節 2(R2)**	
半径	50mm	半径	50mm
重量	0.5kg	重量	0.5kg
リニアアクチュエータ		**諸性能**	
ストローク	100mm	R1 可動角	90 度
推力	20N	R2 可動角	150 度
重量	0.5kg	90 度の移動時間	2 秒

表 5.1: ロボットアームのパラメータ

第6章　結論と今後の課題

6.1　結論

本論文では、二関節同時駆動機構に関する静力学的な解析、いくつかの条件下においてのシミュレーションを行なった。

まず、静力学的な解析に関しては、手先における出力と剛性に関して行なった。

まず手先における出力についてであるが、従来機構に比べ、二関節同時駆動機構を用いたロボットアームにおいては、手先出力が広い方向に対して大きくなるという結果が得られた。特に最大出力を発揮できる方向以外への広がりが見られ、手先が第一関節に近い場合は、各方向へほぼ均等に出力がみられる。また、手先が遠い場合においては、従来機構において極端に出力の差が生じてしまっていたが、これを改善することが可能となった。

次に手先における剛性楕円の形状についてであるが、二関節同時駆動機構を持たないロボットアームでは自由度が足りず、長軸、短軸、傾きの 3 つのパラメータを自由に調整することができなかったが、3 対 6 筋に対応する機構を取りいれることによってこれを自由に設定することが可能となることを確認した。

シミュレーションによる解析の結果、式 (3.1) の筋肉モデルを実現するアクチュエータを用いることで、釣り合い位置を指定して駆動するということが可能であることを示した。また、筋肉モデルにおける出力を上げることで、安定な運動を可能にすることを示した。また、二関節筋を持たないアーム機構に比較して、各リンクの協調によって手先位置を調整するさいの動揺を自然に抑制することを示した。

二関節同時駆動機構を持つロボットアームのメリットは、

- 各方向に対して従来より均等に力を発揮することができ、小さなアクチュエータを一つ (一組) 加えることでそれを実現できる。
- 3 対 6 筋に対応するロボットアームにおいては、剛性と手先出力を同時に独立に調整することが可能となり、柔らかなロボットが実現できる。
- 冗長性を持つため、一つのアクチュエータが故障したとしても、性能は落ちるものの活動を続けることが可能。

といったものがあり、福祉ロボットなど人と協働するロボットとして適していると考えられる。

6.2 今後の課題と展望

これまでの研究において浮かび上がった課題を以下に挙げる。

- 剛性を設定にするにあたって、現状のままでは導出が複雑になりすぎる。簡単に制御するというメリットを十分発揮することができない。各作業において適切な剛性をどのように設定するか。
- 静止状態では、熊本らのモデルが良く当てはまるが、運動を行なう状態ではどのようなモデルを用いるのが最適であるか。
- 単純なパターンのみでは、十分な運動性能を得ることができない。アーム自身や、作業に対してこれを適当に変更、設定せねばならない。どのような方法でこれを実現するか。

このような課題をふまえ今後の研究としては、第5章で提案したロボットアームを詳しく設計し製作する。また、本論文で示した解析、シミュレーションの検証を行なう。さらに、ロボットアームを自在に運動させる方法について様々な手法を検討・導入し、生物の巧みな動きをロボットにおいて実現することを目指す。

参考文献

[1] Mizuyori Kumamoto, Toru Oshima, Yamamoto Tomohisa, ”Control properties induced by existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles - Mechanical engineering model analyses”, Human Movement Science 13 (1994) pp611-634

[2] 大島徹, 熊本水頼, ” 二関節筋機能を有するロボットアーム”, 日本機会学会論文集 (C 編) 61 巻 592 号 1995 pp122-129

[3] 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”, 精密工学会誌 vol.66 No.1 2000 pp141-146

[4] 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行筋力評価”, 精密工学会誌 vol.66 No.12 1999 pp1772-1777

[5] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, 横井信安, “拮抗筋群による協調制御機能”, 日本機械学会論文集 (C 編), 64 巻 607 号 1997 pp135-142

[6] 大島徹, 藤川智彦, 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” 日本機械学会論文集 (C 編)65 巻 632 号 1994 pp253-260

[7] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, ” 動物の筋配列による四肢先端の運動学的解析”, 日本機械学会論文集 (C 編), 65 巻 635 号 1997 pp237-244

[8] 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 2004.10.30 pp11-16

[9] 斎藤之男, 西田皓也, 音琴浩, ” 二関節筋用アクチュエータを応用した災害救助ロボットの研究”, 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 2004.10.30 pp17-22

[10] 林田宣宏, 矢向高弘, 村上俊之, 大西公平, “ツインドライブシステムを用いたセンサレスバイラテラルロボットマニピュレータ”, 精密工学会誌 vol.67 No.11 2001 pp1834-1838

[11] Michael Zinn, Oussama Khatib, Bernard Roth and J.Kenneth, “A New Actuation Concept for Human-Friendly Robot Design”, IEEE Robotics&Automation Magazine June 2004 pp12-21

[12] 川崎 晴久, ” ロボット工学の基礎”, 森北出版株式会社, 1991

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(発表予定)

謝辞

堀研究室での楽しく有意義な一年は、あっという間に過ぎていきました。

まず、一年間ご指導下さった堀洋一先生に感謝申し上げます。そして技官の内田利之さん、秘書の越智由里子さんに御礼申し上げます。

博士課程の畠直輝さんには研究テーマを決めてからこれまでご指導いただき、たくさんの助力、助言をいただきました。坂東信尚さん、呉世訓さんにも研究活動のみならず様々な場面で助けていただきました。福祉チームの福井龍さんからは特に二関節筋の仕組みや特性に関して様々教えていただきました。

同じ卒論生の中村君とは初めての研究活動の中、お互い励ましあってなんとかここまで辿りつくことができました。そして、堀研究室の皆さんとは本当に充実した時を過ごすことができました。堀研究室で学んだことは研究だけに留まりません。本当にありがとうございました。

最後に、研究会等でお会いした際に激励を頂いた、京都大学名誉教授の熊本水頼先生にお礼申し上げます。

来年度は修士課程に進学し、堀研究室でさらに二年間この研究テーマを掘り下げていくつもりです。この一年の経験を今後の研究活動に生かせるよう努力いたします。今後ともどうぞご指導、ご鞭撻の程よろしくお願いいたします。