-卒業論文-

生物型アームの位置・剛性・力制御に関する制御論的考察

平成 21 年 2 月 16 日提出

指導教員 堀 洋一教授

電気工学科

70365 **小柳 拓也**

目次

第1章　序論

1.1　研究背景 ………………………………………………………………… 2
1.2　研究目的 ………………………………………………………………… 3

第2章　生物型アームの特徴

2.1　筋の粘弾性モデル ……………………………………………………… 4
2.2　生物型アームの実行筋モデル ………………………………………… 6
2.3　筋出力の和と差を取り入れた表現 …………………………………… 6

第3章　生物型アームにおける力制御に関する考察

3.1　筋の収縮と手先の力出力特性 ………………………………………… 7
3.2　拮抗筋群の協調動作と神経回路モデル ……………………………… 8
3.3　二関節筋座標系を用いた力制御手法 ………………………………… 10

第4章　生物型アームの位置制御に関する考察

4.1　生物型１軸マニピュレーターに関する考察 ………………………… 12
4.2　筋の粘弾性を生かした制御手法 ……………………………………… 13
4.3　PD 制御によるモデル化 ……………………………………………… 14
4.4　二関節筋を含めない２軸マニピュレーターの PD 制御モデル … 15
4.5　二関節筋を含めた２軸マニピュレーターの PD 制御モデル …… 17

第5章　生物型アームの手先剛性制御に関する考察

5.1　手先剛性を制御するコントローラの設計 …………………………… 19
5.2　二関節筋が系先端の剛性制御に果たす役割 ………………………… 21

第6章　ロボット工学の基礎知識

5.1　ヤコビ行列の表現 ……………………………………………………… 23
5.2　ヤコビ行列を用いた関節トルクと力変換 …………………………… 24
5.3　２軸マニピュレーターの運動方程式 ………………………………… 25

参考文献 27

謝辞 28

第１章　序論

1.1　研究背景

日本は 2050 年に 2.5 人に一人が 65 歳以上という未曾有の高齢化社会を迎えることが予想されている。また、それに伴う少子化の影響によって、これは高齢者 1 人に対して、1.3 人の生産年齢人口(15 歳～64 歳)という比率になる。[1]少子高齢化は今後世界中で問題となることが予想されている。

このような社会状況を受け、医療・福祉の分野でもロボットを活躍させようという研究が盛んに行われている。実際に実用化に至っているロボットもあり、現在約 300 人の人々が福祉ロボットを使用している。世界で最も使用されている福祉ロボットは英 rehab robotics Ltd が商品化している食事支援ロボット HANDY 1 である。（図 1.1）このロボットは実際に世界で 200 人以上の重度四肢不自由者・児に使用されている。[2]

しかしながら、ロボットを人の生活空間に導入し、さらに多くの仕事を行わせるためには、乗り越えなければならない課題は数多く残っている。ヒトと協同作業し、かつ十分な安全性を保つためには、人に優しいモーションコントロールの実現が必要不可欠である。

そこで我々が注目しているのが、生物に学ぶということである。生物は驚くほど簡単に、ある程度正確で、すばやく、かつ安全な動作を実現しているのである。生物の身体運動は、アクチュエータである筋だけでなく、脳、神経、脊髄を含む総合的なものである。しかしながら、神経を介する情報の伝達に時間がかかることを考慮すると、人間の巧妙な動作に、その特異な構造が寄与していることは間違いないであろう。

生物の特徴を取り入れたロボットもいくつか開発されている。沖電気は、3 対 6 筋に対応するアクチュエータをすべて取り付けた二関節筋装備モデル「HIPRO」を製作している。「HIPRO」は筋肉に変わるアクチュエータとして、可変弾性アクチュエータを開発しており、ヒトや生物が持つ四肢をロボットで再現している。[3]また、二関節筋を装備したロボットレッグによって連続跳躍を可能にしたという報告もなされている。[4][5]

本研究においては、様々な側面から生物型アームの特性について考察を行っている。特にロボットへの応用を意識し、制御論的、ロボット工学的な見地から考察を行うよう勤めた。この取り組みが、今後生物の特徴をロボットに組み込んでいく中で、少しでも貢献できれば幸いである。

1.2　研究目的

生物の特徴を取り入れたマニピュレーターにおいて、その力・位置・剛性制御特性に関して制御論的な立場から考察を行う。ロボット応用へ向けて、ロボット工学上どのような利点があるかを明らかにし、今後生物の特徴をロボットに取り入れる取り組みの一助としたい。

図 1.1 (英)Rehab robotics 社の食事支援ロボット「HANDY1」
手足がうまく動かない人でも自分の意思で食事ができるようになる
出展：Rehab robotics 社 HP[2]

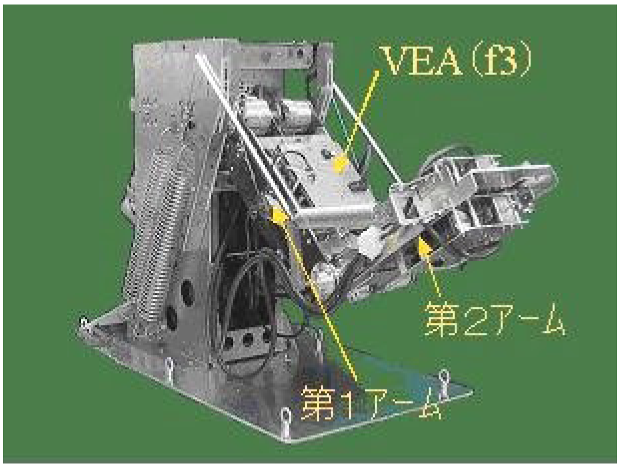


図 1.2 沖電気が開発した二関節筋装備基本モデル「HIPRO」
３対６筋構造をそのままロボットで再現している
出展：二関節筋装備基本モデル「HIPRO」[3]

第２章　生物型アームの特徴

2.1　筋の粘弾性モデル

筋肉の力学特性は、張力-長さ関係、筋力-収縮速度関係、の二つで表される。

図 2.1(左)は張力-長さの関係を表す。グラフから筋が非線形な弾性を持っていることが分かる。また、筋の弾性(張力の変化率)は活動レベルαが大きくなるほど、大きくなっていることが分かる。

図 2.1(右)は筋力-収縮速度の関係を表す。グラフから、筋が非線形な粘性を持っていることが分かる。また、筋の粘性は活動レベルαが大きくなる程大きくなっていることが分かる。

このように筋肉は活動レベルによって変化する粘弾性を持っている。筋の粘弾性を表現するのに様々なモデルが提案されているが、本研究では図 2.2 に表される最も一般的な HILL モデルを用いる。

このとき筋肉の出力は次のように数式化される。

$$F = u - kux - bu\dot{x} \tag{2.1}$$

u:筋収縮力

k:筋の弾性係数

b:筋の粘性係数

x:筋の収縮量

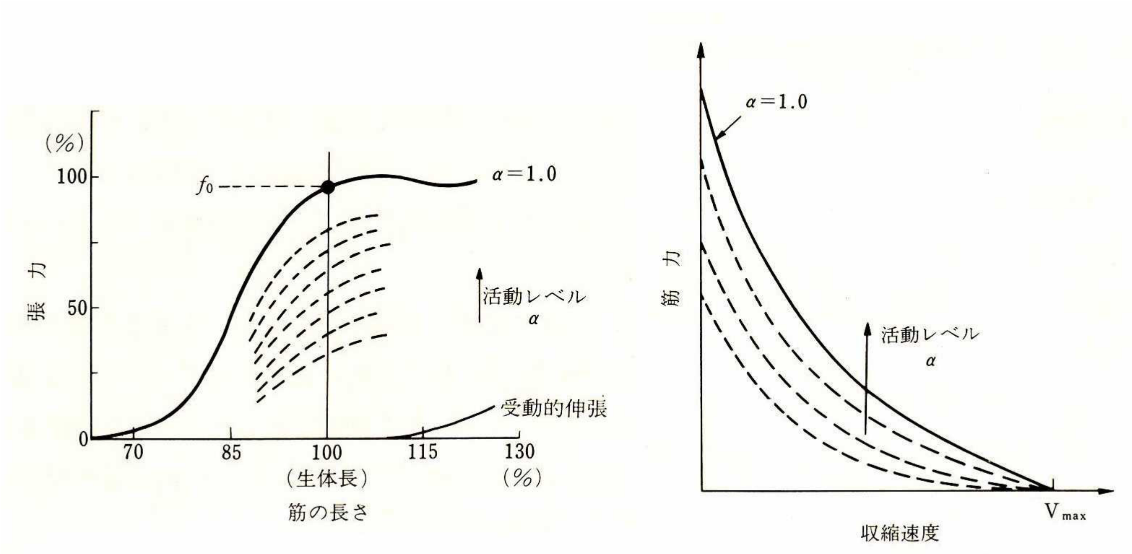


図 2.1 筋肉の特性

(左)張力-長さの関係　(右)筋力-収縮速度の関係

出展: 生体とロボットにおける運動制御[5]

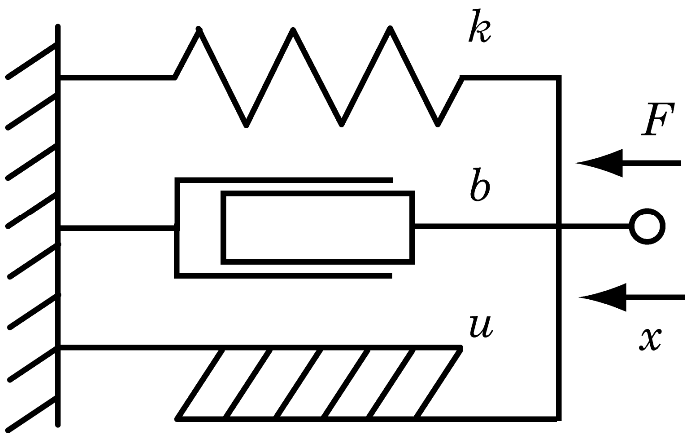
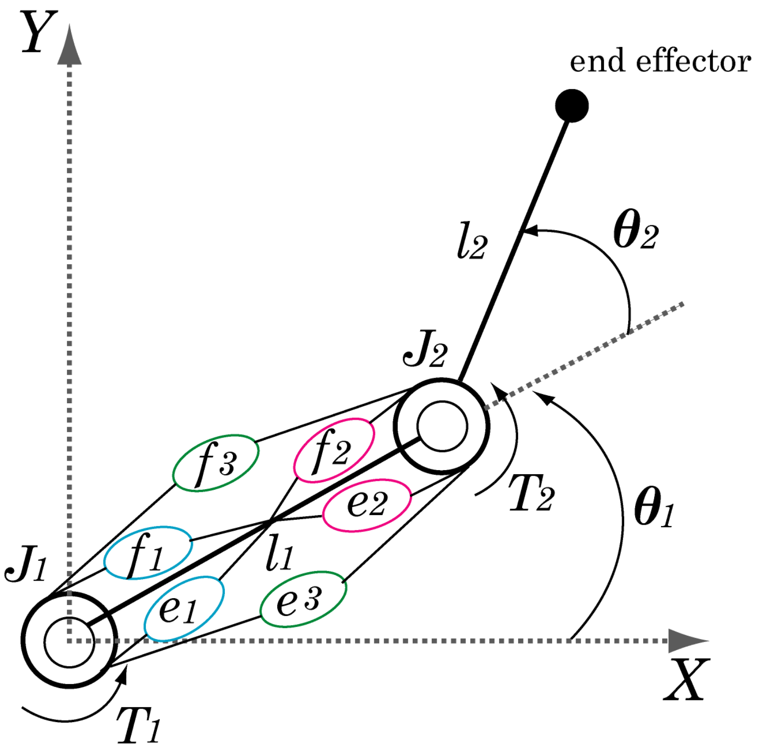


図 2.2 筋モデルの模式図



l_1	リンク 1 の長さ
l_2	リンク 2 の長さ
T_1	関節 J1 におけるトルク
T_2	関節 J2 におけるトルク
θ_1	関節 J1 の角度
θ_2	関節 J2 の角度
r_1	関節 J1 の半径
r_2	関節 J2 の半径

図 2.3 生物型アームの 3 対 6 筋構造モデル

2.2　生物型アームの実行筋モデル

人間の場合を考えると分かりやすいが、生物のアームは多数の関節と筋肉からなり、非常に複雑な構造をとっている。熊本らは、拮抗二関節筋群は四肢第 1 リンク、第 2 リンクが形成する 2 次元平面内の屈伸運動のためだけに用意された筋であると述べている。[3]また、拮抗二関節筋群が関わる屈伸運動平面内の運動に関与することのできる拮抗 1 関節筋群は、この運動平面内に含まれる筋、あるいは筋束に限られることから、3 対 6 筋構造のモデルを提案した。[6]

図 2.3 に 3 対 6 筋構造のアームのモデルを示す。図 2.3 において e1,f1 は関節 J1 に働く一関節筋、e2,f2 は関節 J2 に働く一関節筋である。また、e3,f3 は関節 R1,R2 に働く。e1 と f1、e2 と f2、e3 と f3 はそれぞれ拮抗関係にある。

2.3　筋出力の和と差を取り入れた表現

図 2.3 より、各関節に発生するトルクは次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_1 &= (F_{f1} - F_{e1})r_1 + (F_{f3} - F_{e3})r_1 \\ T_2 &= (F_{f2} - F_{e2})r_2 + (F_{f3} - F_{e3})r_2 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ただし、2.1 節から

$$\begin{gathered} F_m = u_m - ku_m x - bu_m \dot{x} \\ (m = f1, e1, f2, e2, f3, e3) \end{gathered} \tag{2.3}$$

であるとする。F_m を代入して整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} r_1 D_1 + r_1 D_3 \\ r_2 D_1 + r_2 D_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} kr_1^2 (P_1 + P_3) & kr_1 r_2 P_3 \\ kr_1 r_2 P_3 & kr_2^2 (P_3 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \\ &\quad - \begin{pmatrix} br_1^2 (P_1 + P_3) & br_1 r_2 P_3 \\ br_1 r_2 P_3 & br_2^2 (P_2 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{2.4}$$

また、

$$\begin{aligned} &D_1 = u_{f1} - u_{e1}, P_1 = u_{f1} + u_{e1} \\ &D_2 = u_{f2} - u_{e2}, P_2 = u_{f2} + u_{e2} \\ &D_3 = u_{f3} - u_{e3}, p_3 = u_{f3} + u_{e3} \end{aligned} \tag{2.5}$$

としている。このようにすると、3 対 6 筋の生物型アームは筋収縮力の差 D_1, D_2, D_3 と、筋収縮力の和 S_1, S_2, S_3 の 6 つを入力とする系に見ることができる。このように筋収縮力の和と差による表現を取り入れることで、筋の出力と粘弾性を分かりやすく取り扱うことができるようになる。

第３章　生物型アームにおける力制御に関する考察

3.1 筋の収縮と手先の力出力特性

関節トルクと系先端の力出力との関係はヤコビ行列を用いて次のように表される。（第６章参照）

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \left(J^T\right)^{-1} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

また、図 2.3 のような２軸マニピュレーターの場合、ヤコビ行列は次のようになる。

$$J = \begin{pmatrix} -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \\ l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) & l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

また、各筋肉の出力を F_m (*m=f1,e1,f2,e2,f3,e3*)とすると、各関節に発生するトルクは

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1(F_{f1}-F_{e1}) + r_1(F_{f3}-F_{e3}) \\ r_2(F_{f2}-F_{e2}) + r_2(F_{f3}-F_{e3}) \end{pmatrix} \tag{3.3}$$

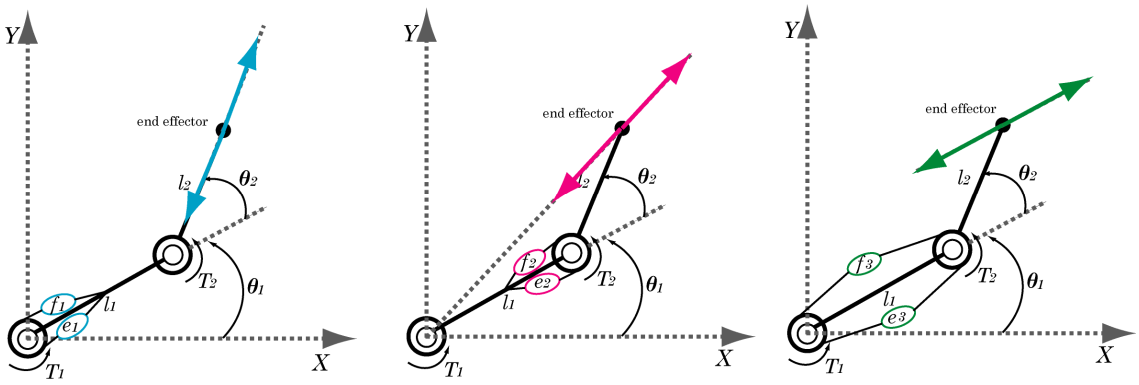
となる。これらの式を整理すると、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} &= \frac{1}{l_1 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} r_1 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ r_1 \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} (F_{f1}-F_{e1}) \\ &+ \frac{1}{l_1 l_2 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} -r_2 l_1 \cos\theta_1 - r_2 l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) \\ -r_2 l_1 \sin\theta_1 - r_2 l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} (F_{f2}-F_{e2}) \\ &+ \frac{1}{l_1 l_2 \sin\theta_2} \begin{pmatrix} r_1 l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) - r_2 l_2 \cos(\theta_1+\theta_2) - r_2 l_1 \cos\theta_1 \\ r_1 l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) - r_2 l_2 \sin(\theta_1+\theta_2) - r_2 l_1 \sin\theta_1 \end{pmatrix} (F_{f3}-F_{e3}) \end{aligned} \tag{3.4}$$

となる。また、$l_1 = l_2 = l$、$r_1 = r_2 = r$ として式(3.4)を整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} &= \frac{r}{l \sin\theta_2} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) \\ \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} (F_{f1}-F_{e1}) \\ &+ \frac{r}{l \sin\theta_2} \begin{pmatrix} -\cos\theta_1 - \cos(\theta_1+\theta_2) \\ -\sin\theta_1 - \sin(\theta_1+\theta_2) \end{pmatrix} (F_{f2}-F_{e2}) \\ &+ \frac{r}{l \sin\theta_2} \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{pmatrix} (F_{f3}-F_{e3}) \end{aligned} \tag{3.5}$$

これによりそれぞれの筋肉が系先端において力を発揮する方向が分かる。関節 1 の単関節筋(F_{f1},F_{e1})は$(\theta_1+\theta_2)$の方向に、関節 2 の単関節筋(F_{f2},F_{e2})は$(\theta_1+\theta_2/2)$の方向に、二関節筋(F_{f3},F_{e3})は(θ_1)の方向に力を発揮する。（図 3.1）



(a)関節 1 の単関節筋　(b)関節 2 の単関節筋　(c)二関節筋

図 3.1 各筋肉の力出力方向

3.2 拮抗筋群による協調動作と神経回路モデル

藤川・大島らは、静的な状態において最大努力で系先端に力を発揮した場合、力を発揮させる方向によって拮抗筋群が活動レベルを交替する現象が起こることを筋電によって示した。また、理論的な計算により、この筋活動の様相を解析し、筋電による実験結果と同様の結果になることを示している。[7][8]

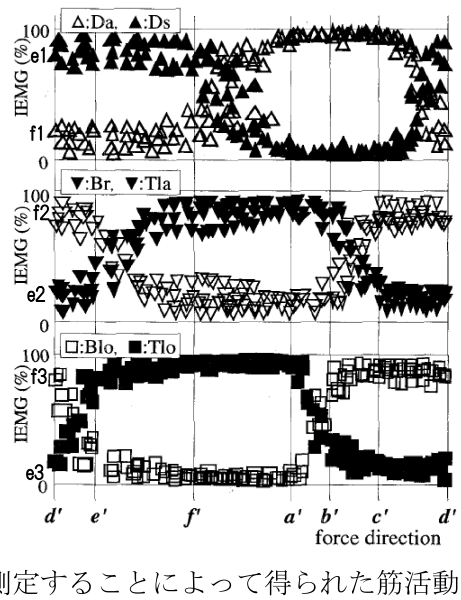
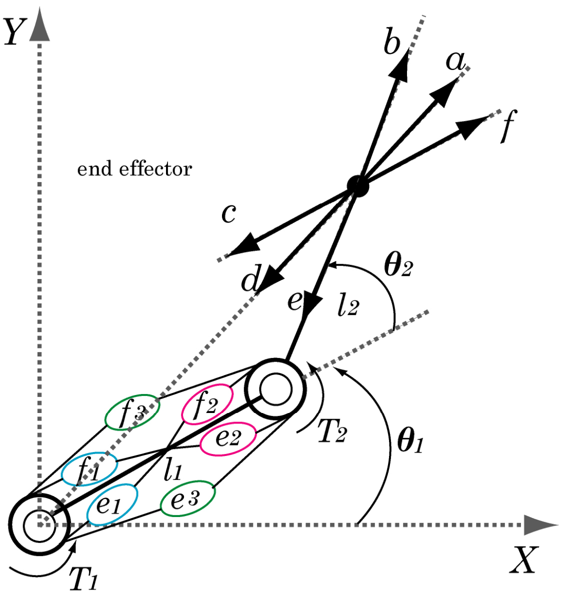


図 3.2 筋電を測定することによって得られた筋活動の交替パターン

縦軸は個々の筋の最大の活動状態を 100%としたときの活動レベル、横軸は力を発揮する方向を表している

出展：ヒト上肢における系先端の出力と拮抗筋群の協調活動[7]



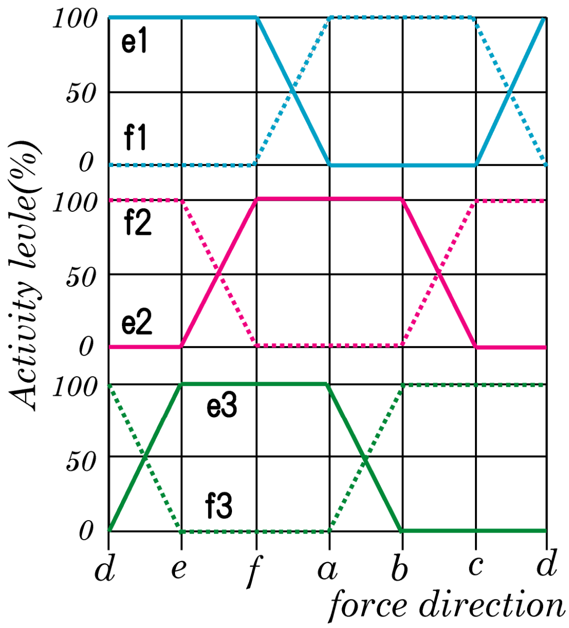


図 3.3 理論的解析によって得られた筋活動の交替パターン

筋電によって得られた活動パターンとほぼ同様の結果が得られる。

さらに藤川らは、図 3.3 に示すような拮抗筋群の協調活動様相は単純な神経回路網で実現可能であることを述べ、神経回路網を模倣した系先端の力制御器を提案している。空気圧アクチュエータを駆動源とするマニピュレーターにこの力制御器を実装し、その有用性を確認している。また、このような力制御器は簡単に機械的に製作することが可能であり、プログラムも簡単に組むことができるので、ロボットへの応用を容易にする、と述べている。

しかしながら、このような神経回路網を模した力制御器には、ロボットへの応用上、次のような問題点が挙げられる。

（1） 力出力の方向と、筋肉の活動レベルは簡単な形で関連付けされるが、力の大きさとの関係は不明瞭であること。

（2） 制御装置とは別に機械的な制御装置を作らなければならないこと。

3.3 二関節筋座標系を用いた力制御手法

式(2.4)より、3 対 6 筋構造における各関節におけるトルクは次のように表される。

$$
\begin{aligned}
\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} r_1 D_1 + r_1 D_3 \\ r_2 D_1 + r_2 D_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k r_1^2 \left(P_1 + P_3\right) & k r_1 r_2 P_3 \\ k r_1 r_2 P_3 & k r_2^2 \left(P_3 + P_3\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \\
&\quad - \begin{pmatrix} k r_1^2 \left(P_1 + P_3\right) & k r_1 r_2 P_3 \\ k r_1 r_2 P_3 & k r_2^2 \left(P_2 + P_3\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix}
\end{aligned}
\tag{3.6}
$$

この式において、$r_1 = r_2 = r$ として

$$
\begin{aligned}
\tau_1 &= r D_1 - k r^2 P_1 \theta_1 - b r^2 P_1 \dot{\theta}_1 \\
\tau_2 &= r D_2 - k r^2 P_2 \theta_2 - b r^2 P_2 \dot{\theta}_2 \\
\tau_3 &= r D_3 - k r^2 P_3 \left(\theta_1 + \theta_2\right) - b r^2 P_3 \left(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\right)
\end{aligned}
\tag{3.7}
$$

τ_1, τ_2, τ_3 ：各拮抗対が発生するトルク

とすると、関節に発生するトルクは次のように表すことができる。

$$
\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_1 + \tau_3 \\ \tau_2 + \tau_3 \end{pmatrix}
\tag{3.8}
$$

いま、系先端に次のような力を発生させるとする。

$$
\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \cos\theta_f \\ f \sin\theta_f \end{pmatrix}
\tag{3.9}
$$

このとき、系先端の力と関節トルクの関係はヤコビ行列を用いて

$$
\begin{aligned}
\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} &= J^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) & l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) \\ -l_2 \sin\left(\theta_1 + \theta_2\right) & l_2 \cos\left(\theta_1 + \theta_2\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \cos\theta_f \\ f \sin\theta_f \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} l_1 f \sin\left(\theta_f - \theta_1\right) + l_2 f \sin\left(\theta_f - \theta_1 - \theta_2\right) \\ l_2 f \sin\left(\theta_f - \theta_1 - \theta_2\right) \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} l_1 f \sin\left(\theta_f - \theta_1\right) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_2 f \sin\left(\theta_f - \theta_1 - \theta_2\right) \\ l_2 f \sin\left(\theta_f - \theta_1 - \theta_2\right) \end{pmatrix}
\end{aligned}
\tag{3.10}
$$

式(3.8)に表される関係から、

$$
\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_1 f \sin(\theta_f - \theta_1) \\ 0 \\ l_2 f \sin(\theta_f - \theta_1 - \theta_2) \end{pmatrix} \tag{3.11}
$$

とすることができる。

このように表すと、手先に出力する力、各筋肉が発生するトルクとの関係が非常に簡単な形で表される。従って、二関節筋を座標変換に用いることで、筋の協調活動様相を用いなくても、非常に簡単に手先の力出力と関節トルクの関係を表すことができる。

また、これは二関節筋を持たない、各関節にアクチュエータを持つ従来型のロボットアームでも適用することができる。ソフトウェア的に二関節筋を取り入れることによって、手先の力と関節トルクの関係が非常に簡単な式で計算できるようになる。

第４章　生物型アームの位置制御に関する考察

4.1 生物型１軸マニピュレーターに関する考察

まず、簡単のため生物の特徴を取り入れた１軸のマニピュレーターについて考える。対象とする１軸マニピュレーターを図 4.1 に示す。

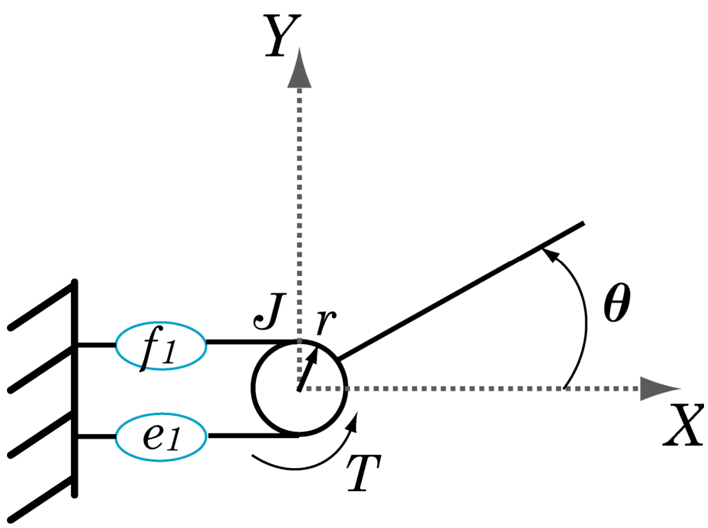


図 4.1 生物の特徴を取り入れた１軸マニピュレーターのモデル

f1,e1 は筋肉を表しており、拮抗駆動をしている。それぞれの筋の出力を第２章で示したように

$$
\begin{aligned}
F_{f1} &= u_{f1} - ku_{f1}x_{f1} - bu_{f1}x_{f1} \\
F_{e1} &= u_{e1} - ku_{e1}x_{fe} - bu_{e1}x_{e1}
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

u_{f1}, u_{e1}：筋の収縮力

k,b：筋の弾性係数、粘性係数

x_{f1}, x_{e1}：筋の収縮量

とする。また、

$$
\begin{aligned}
x_{f1} &= r \cdot \theta \\
x_{e1} &= -r \cdot \theta
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

r ：関節のプーリ半径

である。

従って、関節に発生するトルクは次のように表すことができる。

$$
\begin{aligned}
T &= r \cdot F_{f1} - r \cdot F_{e1} \\
&= \left(u_{f1} - u_{e1}\right) r - kr^2 \left(u_{f1} + u_{e1}\right) \theta - br^2 \left(u_{f1} + u_{e1}\right) \dot{\theta} \\
&= D_1 r - P_1 kr^2 \theta - P_1 br^2 \dot{\theta}
\end{aligned} \tag{4.3}
$$

$$
\begin{aligned}
D_1 &= u_{f1} - u_{e1} \\
P_1 &= u_{f1} + u_{e1}
\end{aligned} \tag{4.4}
$$

これは、筋出力の差と筋出力の和の２つの量を入力とする系に見ることができる。これをブロック線図で表すと次のようになる。

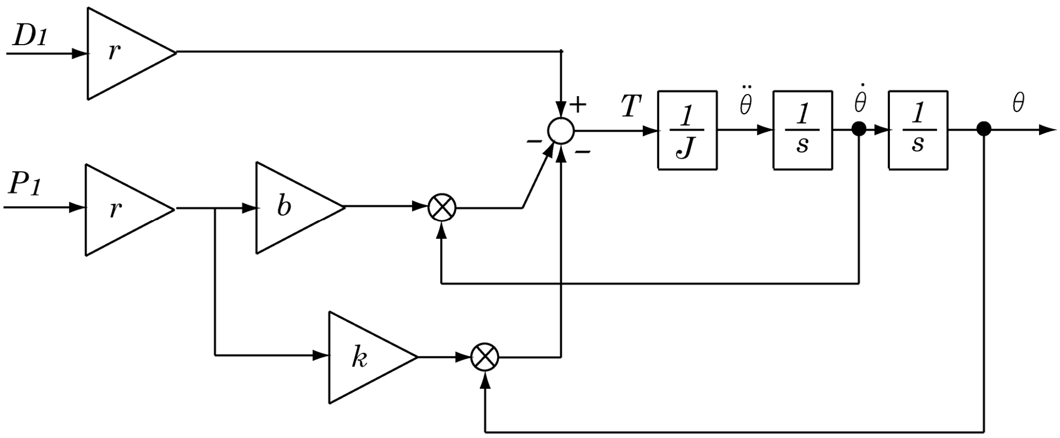


図 4.2 生物の特徴を取り入れた１軸マニピュレーターのブロック線図

4.2 筋の粘弾性を生かした制御手法

吉田は二関節同時駆動機構を備えたマニピュレーターにおいて、筋の粘弾性を生かした位置制御手法を提案している。この手法においては、筋肉の平衡点を位置目標とすることで、低速ではあるがモデル外乱に強いことを示している。[9]
回転の運動方程式から、

$$
\begin{aligned}
I\ddot{\theta} &= T \\
&= D_1 r - P_1 kr^2 \theta - P_1 br^2 \dot{\theta}
\end{aligned} \tag{4.5}
$$

I ：関節まわりの慣性モーメント

$$
\ddot{\theta} = \dot{\theta} = 0 \tag{4.6}
$$

として、式(4.5)より釣り合いの位置を求めると

$$
\theta = \frac{D_1}{krP_1} \tag{4.7}
$$

この式より釣り合いの位置は角速度、角加速度によらず P_1、D_1 の比によって決まることが分かる。
釣り合いの位置を位置目標(θ^*)とした場合、P_1 は剛性を決めるパラメータとして別に決まるとすると、

$$D_1 = krP_1\theta^* \tag{4.8}$$

として、D_1 を決めことができる。
筋の粘弾性を生かした位置制御手法のシミュレーション結果を図 4.3 に示す。このシミュレーションでは、位置目標を $\theta^* = \pi/6$ として与えている。時間 1[s]で位置目標を与えたときの収束の様子を示している。また、$k = b = 1$、$l = 0.5$、$r = 0.05$ とし、アームの重さは 1[kg]としている。

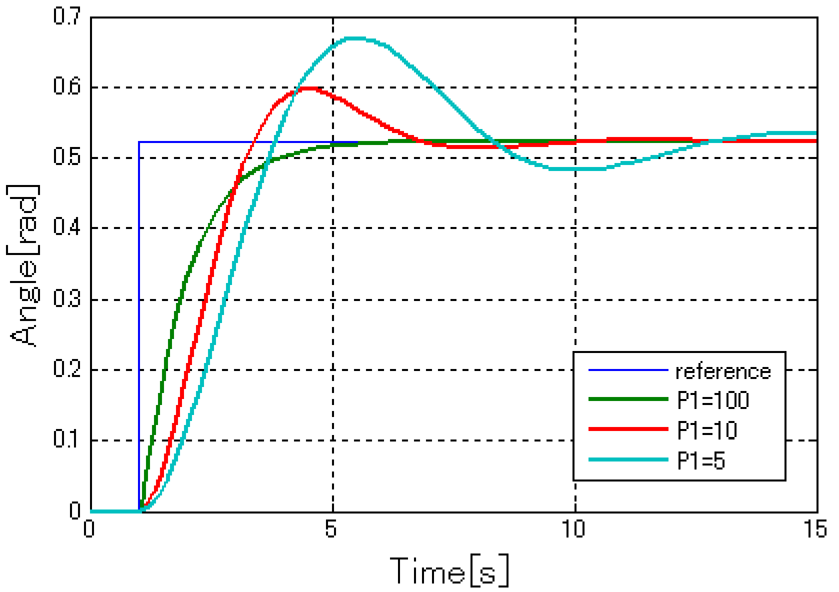


図 4.3 筋の粘弾性を生かした位置制御手法のシミュレーション

4.3 PD 制御によるモデル化

式(4.8)において、位置目標値を平衡点とすると、

$$D_1 = krP_1\theta^* \tag{4.9}$$

が成り立つ。これより、式(4.5)から、

$$\begin{aligned} T &= kr^2P_1\theta^* - kr^2P_1\theta - br^2P_1\dot{\theta} \\ &= kr^2P_1\left(\theta^* - \theta\right) + br^2P_1\left(\dot{\theta}^* - \dot{\theta}\right) - br^2P_1\dot{\theta}^* \end{aligned} \tag{4.10}$$

とすることができる。これは、次に表すブロック線図と等価である。

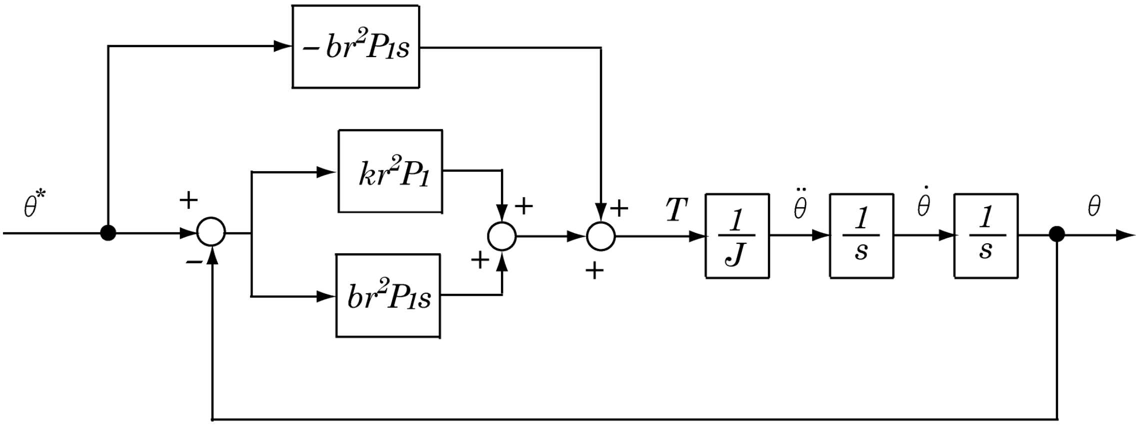


図 4.3 生物の特徴を取り入れた１軸マニピュレーターと等価なブロック線図

これは PD 制御に等しい。フィードフォワード項として粘性摩擦項が負に入っており、この系が非常に遅いスピードで収束することを表している。また、筋肉の粘弾性がフィードバックとして働いている。

4.4 生物型２軸マニピュレーターの PD 制御モデル

２リンク構造のマニピュレーターにおいても、１軸のマニピュレーターと同様に PD 制御系としてみることができる。まず、図 4.4 のように二関節同時駆動筋を持たない場合、各関節に発生するトルクは、

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} rF_{f1} - rF_{e1} \\ rF_{f2} - rF_{e2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} D_1 r \\ D_2 r \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} kr^2P_1 & 0 \\ 0 & kr^2P_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} br^2P_1 & 0 \\ 0 & br^2P_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix}\end{aligned} \tag{4.11}$$

と表すことができる。$\ddot{\theta}_1 = \dot{\theta}_1 = 0, \ddot{\theta}_2 = \dot{\theta}_2 = 0$ として平衡点を求める。

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \frac{D_1}{krP_1} \\ \theta_2 &= \frac{D_2}{krP_2}\end{aligned} \tag{4.12}$$

同様にして、

$$\begin{aligned}D_1 &= krP_1\theta_1^* \\ D_2 &= krP_2\theta_2^*\end{aligned} \tag{4.13}$$

とすると、式(4.11)に表されるトルクは

$$
\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kr^2P_1 & 0 \\ 0 & kr^2P_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \theta_1^* - \theta_1 \\ \theta_2^* - \theta_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} br^2P_1 & 0 \\ 0 & br^2P_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1^* - \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2^* - \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} br^2P_1 & 0 \\ 0 & br^2P_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \tag{4.14}
$$

とすることができる。これは、

$$
\begin{aligned}
K_P &= \begin{pmatrix} kr^2P_1 & 0 \\ 0 & kr^2P_2 \end{pmatrix} \\
K_D &= \begin{pmatrix} br^2P_1 & 0 \\ 0 & br^2P_2 \end{pmatrix} \\
C_{FF} &= \begin{pmatrix} br^2P_1 & 0 \\ 0 & br^2P_2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.15}
$$

としたときの、図 4.5 に示す PD 制御と等価である。

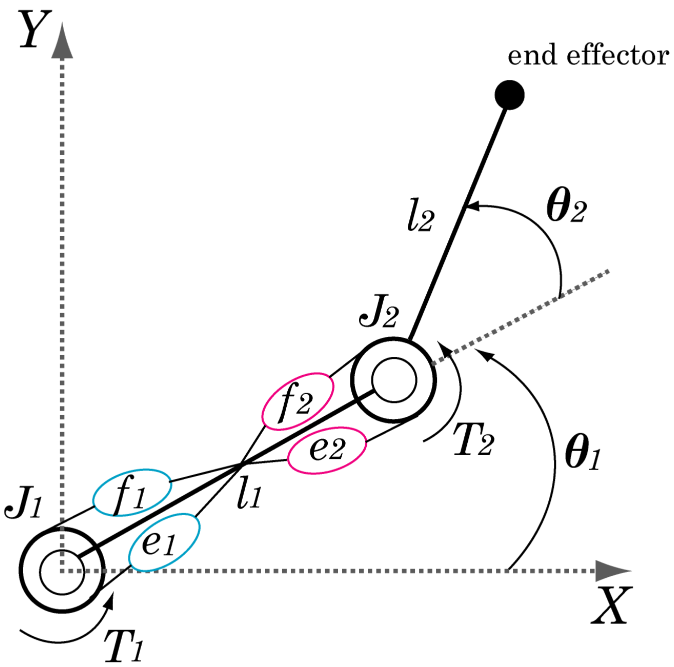


図 4.4　２対４筋構造

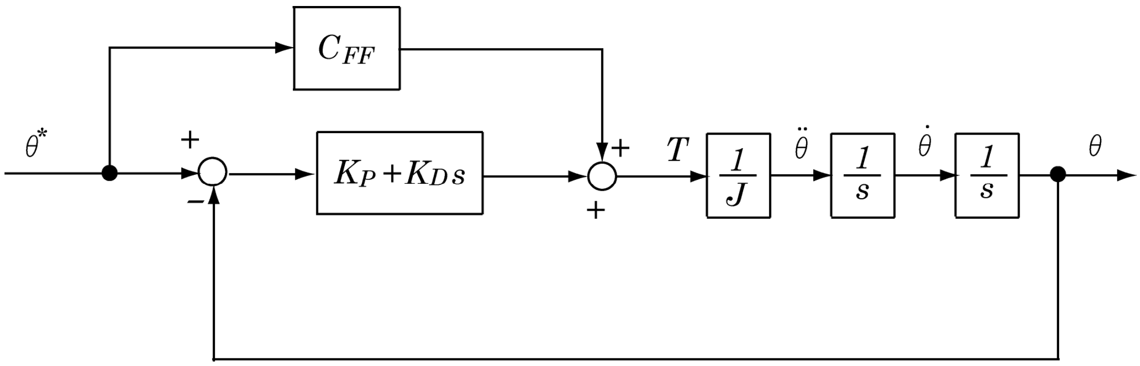


図 4.5　PD 制御のブロック線図

4.5 二関節筋を含めた２軸マニピュレーターの PD 制御モデル

二関節筋を含めた場合でも、その位置制御特性は簡単な PD 制御として表すことができる。図 2.3 に示すような 3 対 6 筋構造において、各関節に発生するトルクは式(2.4)から、

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rD_1 + rD_3 \\ rD_1 + rD_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} kr^2(P_1 + P_3) & kr^2 P_3 \\ kr^2 P_3 & kr^2(P_3 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} br^2(P_1 + P_3) & br^2 P_3 \\ br^2 P_3 & kr^2(P_2 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \tag{4.16}$$

$\ddot{\theta}_1 = \dot{\theta}_1 = 0, \ddot{\theta}_2 = \dot{\theta}_2 = 0$ とすると

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kr^2(P_1 + P_3) & kr^2 P_3 \\ kr^2 P_3 & kr^2(P_3 + P_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} rD_1 + rD_3 \\ rD_1 + rD_3 \end{pmatrix} \tag{4.17}$$

となり、θ_1, θ_2 に対してパラメータが３つ P_1, P_2, P_3 存在するので平衡点は一意に定まらない。従って、

$$\theta_1 = \frac{D_1}{krP_1}, \theta_2 = \frac{D_2}{krP_2}, \theta_1 + \theta_2 = \frac{D_3}{krP_3} \tag{4.18}$$

のように、平衡点を選ぶ。平衡点を位置目標とした場合、

$$\begin{aligned} D_1 &= krP_1\theta_1^* \\ D_2 &= krP_2\theta_2^* \\ D_3 &= krP_3(\theta_1^* + \theta_2^*) \end{aligned} \tag{4.19}$$

により、P_1, P_2, P_3 が決まる。

式(4.16)と式(4.19)から

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kr^2(P_1+P_3) & kr^2P_3 \\ kr^2P_3 & kr^2(P_3+P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1^* - \theta_1 \\ \theta_2^* - \theta_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} br^2(P_1+P_3) & br^2P_3 \\ br^2P_3 & br^2(P_2+P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1^* - \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2^* - \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} br^2(P_1+P_3) & br^2P_3 \\ br^2P_3 & br^2(P_2+P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \tag{4.20}$$

とすることができる。これは、

$$\begin{aligned} K_P &= \begin{pmatrix} kr^2(P_1+P_3) & kr^2P_3 \\ kr^2P_3 & kr^2(P_3+P_3) \end{pmatrix} \\ K_D &= \begin{pmatrix} br^2(P_1+P_3) & br^2P_3 \\ br^2P_3 & br^2(P_2+P_3) \end{pmatrix} \\ C_{FF} &= \begin{pmatrix} br^2(P_1+P_3) & br^2P_3 \\ br^2P_3 & br^2(P_2+P_3) \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{4.21}$$

としたときの、図 4.5 に示すブロック線図と等価である。

第５章　生物型アームの手先剛性制御特性に関する考察

5.1　手先剛性を制御するコントローラの設計

いま、ロボットマニピュレーターが P 制御によって制御されているものとする。

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = K_p \begin{pmatrix} \theta_1^{ref} - \theta_1 \\ \theta_2^{ref} - \theta_2 \end{pmatrix} \tag{5.1}$$

$\theta_1^{ref}, \theta_2^{ref}$ は関節角度の目標値である。十分な時間が経ち、誤差が無いとする。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_1^{ref} \\ \theta_2 &= \theta_2^{ref} \end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned} x &= x^{ref} \\ y &= y^{ref} \end{aligned} \tag{5.3}$$

x^{ref}, y^{ref} は作業空間上での手先の目標値とする。このとき、図 5.1 に示すような手先剛性を実現する Kp を求める。手先の剛性は二次元平面上で定義されるので、楕円体で表現することができる。この楕円体を剛性楕円と呼ぶ。剛性楕円は長軸 k_1,短軸 k_2,楕円体の傾き θ_e の三つのパラメータによって定義される。

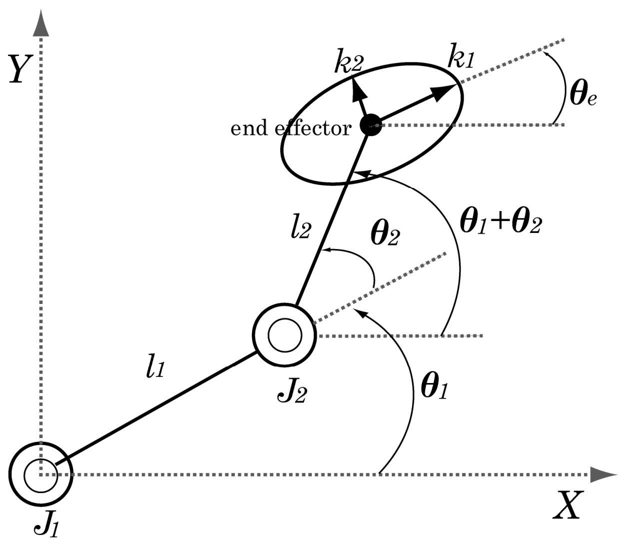


図 5.1　剛性楕円

今、系先端に外力

$$f = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \tag{5.4}$$

が加わり、関節角、手先の座標において次のように誤差が生じたとする。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_1^{ref} + \Delta\theta_1 \\ \theta_{12} &= \theta_{12}^{ref} + \Delta\theta_{12} \end{aligned} \tag{5.5}$$

$$\begin{aligned} x &= x^{ref} + \Delta x \\ y &= y^{ref} + \Delta y \end{aligned} \tag{5.6}$$

このとき式(5.1)から、

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_3 \end{pmatrix} = K_p \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{pmatrix} \tag{5.7}$$

また、剛性楕円の定義より、

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = R(\theta_e) \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \tag{5.8}$$

*R(θe)*は回転行列であり、

$$R(\theta_e) = \begin{pmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{pmatrix} \tag{5.9}$$

である。また、関節角度の微小変化と手先の位置の微小変化との関係、関節トルクと手先の力との関係はヤコビ行列を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix} \tag{5.10}$$

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = (J)^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \tag{5.11}$$

式(5.8)、式(5.10)、式(5.11)より、

$$K_p = (J)^T R(\theta_e) \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} J \tag{5.12}$$

として *Kp* を求めることができる。

実際にこの方法にて *Kp* を求めると、次のようになる。

$$K_p = \begin{pmatrix} K_{p11} & K_{p12} \\ K_{p21} & K_{p22} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
K_{p11} &= l_1^2 k_1 (\sin\theta_1 + \sin\theta_{12})\{\sin(\theta_{12}+\theta_e) + \sin(\theta_1+\theta_e)\} \\
&\quad + l_1^2 k_2 (\cos\theta_1 + \cos\theta_{12})\{\cos(\theta_{12}+\theta_e) + \cos(\theta_1+\theta_e)\} \\
K_{p12} &= l_1 l_2 k_1 (\sin\theta_1 + \sin\theta_{12})\sin(\theta_{12}+\theta_e) + l_1 l_2 k_2 (\cos\theta_1 + \cos\theta_{12})\cos(\theta_{12}+\theta_e) \\
K_{p21} &= l_1 l_2 k_1 \{\sin(\theta_{12}+\theta_e) + \sin(\theta_1+\theta_e)\}\sin\theta_{12} + l_1 l_2 k_2 \{\cos(\theta_{12}+\theta_e) + \cos(\theta_1+\theta_e)\}\cos\theta_{12} \\
K_{p22} &= l_2^2 k_1 \sin\theta_{12} \cdot \sin(\theta_{12}+\theta_e) + l_2^2 k_2 \cos\theta_{12} \cdot \cos(\theta_{12}+\theta_e)
\end{aligned}$$

................................(5.13)

5.2　二関節筋が手先剛性の制御に果たす役割

式(2.4)より、二関節筋を含めた生物型アームの、筋出力と関節トルクとの関係は次のようになっている。

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} r_1 D_1 + r_1 D_3 \\ r_2 D_1 + r_2 D_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k r_1^2 (P_1 + P_3) & k r_1 r_2 P_3 \\ k r_1 r_2 P_3 & k r_2^2 (P_3 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \\
&\quad - \begin{pmatrix} b r_1^2 (P_1 + P_3) & b r_1 r_2 P_3 \\ b r_1 r_2 P_3 & b r_2^2 (P_2 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{5.14}$$

この式において、関節の剛性を表しているのは第二項である。また、この第二項が、生物型アームの位置制御特性で、P ゲインの役割を果たすことを第 4 章にて述べた。

従って、5.2 節で求めた *Kp* と見比べると、二関節筋をハードウェア的に装備した場合には、

$$K_{p21} = K_{p12} \tag{5.15}$$

なる束縛がつく。もちろん、角度情報を二つの関節で共有した場合では *Kp* はソフトウェア上で自由に設計することができるが、いまは、二関節筋をばねなどで代替し、角度情報を共有しない場合を考える。このとき、剛性楕円にどのような制限が付くか考える。

式(5.15)より、

$$\begin{aligned}
&k_1 (\sin\theta_1 + \sin\theta_{12})\sin(\theta_{12}+\theta_e) + k_2 (\cos\theta_1 + \cos\theta_{12})\cos(\theta_{12}+\theta_e) \\
&= k_1 \{\sin(\theta_{12}+\theta_e) + \sin(\theta_1+\theta_e)\}\sin\theta_{12} + k_2 \{\cos(\theta_{12}+\theta_e) + \cos(\theta_1+\theta_e)\}\cos\theta_{12}
\end{aligned} \tag{5.16}$$

これを整理すると

$$\therefore (k_1 + k_2)\sin\theta_e \sin\theta_2 = 0 \tag{5.17}$$

$k_1 > 0, k_2 > 0$ であるから、式(5.17)を満たす剛性楕円の傾きは、

$$\theta_e = 0, \pi \tag{5.18}$$

したがって、二関節筋は系先端の剛性を、水平方向に強くする働きを持っていると考えられる。（図 5.2）

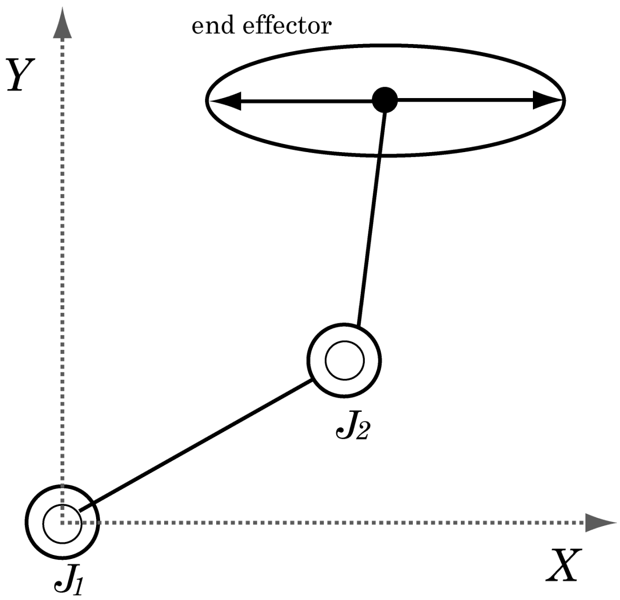


図 5.2 二関節筋が強める剛性の方向

第６章　ロボット工学の基礎知識

6.1 ヤコビ行列の表現

マニピュレーターでは、１つの座標系での回転や変位の微小変化がほかの座標系の微小変化としてどのように影響するかを知る必要が出てくる。そこで関節角度の微小変化を $dq=[d\theta_1\ d\theta_2]^T$、作業座標上での位置変化 $dP=[dx\ dy]^T$ との関係をヤコビ行列 J で表すことにする。（図 6.1）

$$dP = J \cdot dq \tag{6.1}$$

この関係から、ロボットのヤコビ行列は次のように与えられる。

$$J = \frac{dP}{dq} \tag{6.2}$$

図 6.1 に示す２軸のマニピュレーターでは、

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y &= l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \tag{6.3}$$

であることから、ヤコビ行列は次のように表される。

$$\begin{aligned} J &= \begin{pmatrix} \dfrac{\partial x}{\partial \theta_1} & \dfrac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \dfrac{\partial y}{\partial \theta_1} & \dfrac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin\theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{6.4}$$

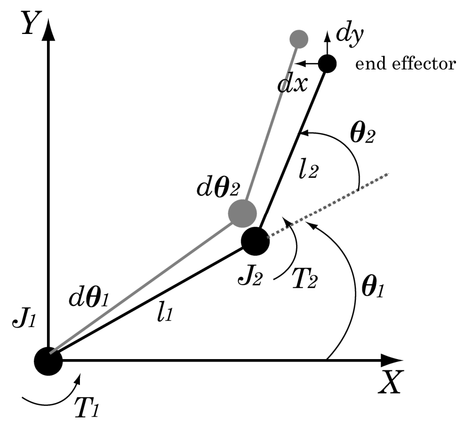


図 6.1　２軸マニピュレーターにおける関節角と位置の微小変化

このヤコビ行列を用いることにより関節角度とエンドエフェクタの位置姿勢が線形な関係で表されるのでロボットの運動学の計算が非常に簡略化される。

6.2 ヤコビ行列を用いた力と関節トルクの変換

また、エンドエフェクタにおける力と関節におけるトルクの関係もヤコビ行列を用いて表すことができる。

今図 6.2 のようにマニピュレーターの先端に外力 $f=[f_x \ \ f_y]^T$ が加わり、$dP=[dx \ \ dy]^T$ の微小変位が発生したとする。このときの微小仕事 dW は

$$dW = f^T dP \tag{6.5}$$

となる。これが関節におけるトルク $T=[T_1 \ \ T_2]^T$ とそのために起こった微小回転 $dq=[d\theta_1 \ \ d\theta_2]^T$ による仕事と等しくなるので、

$$f^T dP = T^T dq \tag{6.6}$$

従って、

$$\begin{aligned} T^T &= f^T \frac{dP}{dq} = f^T J \\ T &= J^T f \end{aligned} \tag{6.7}$$

このように、ヤコビ行列を使ってエンドエフェクタ部に発生する力を関節トルクに変換することができる。

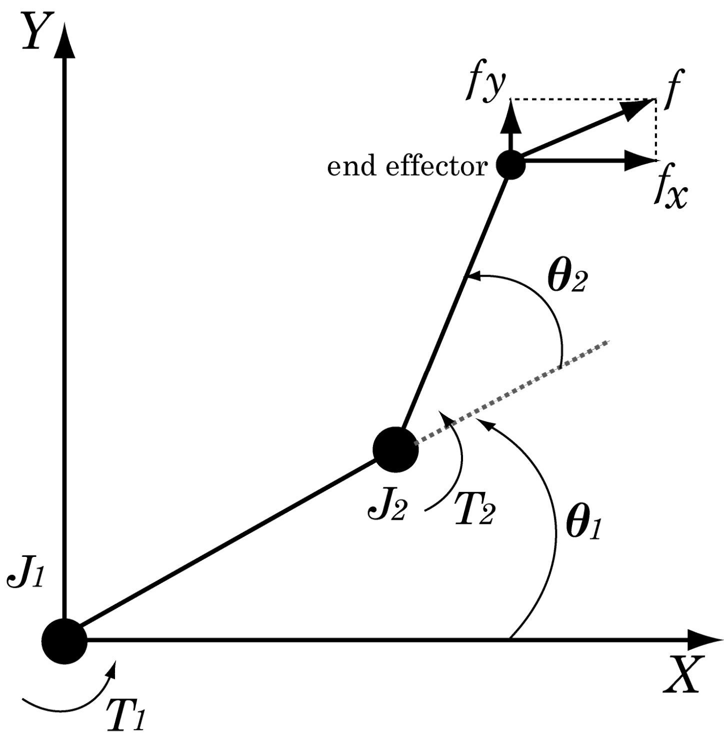


図 6.2 力と関節トルク変換

6.3 ２軸マニピュレーターの運動方程式

２軸マニピュレーターの動力学モデルを図 6.3 に示す。

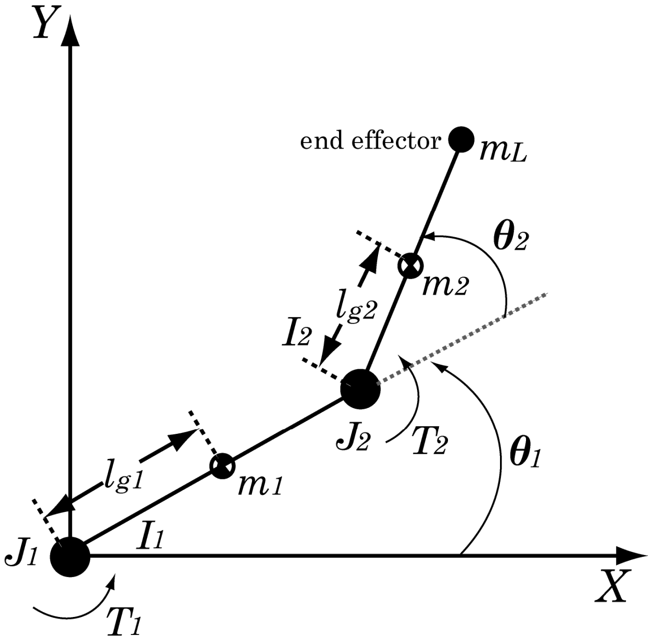


図 6.3 ２軸マニピュレーターの動力学モデル

m_1, m_2：リンク１、リンク２の質量

m_L：把持物体の質量

l_{g1}, l_{g2}：リンク１、リンク２の重心までの距離

I_1, I_2：リンク１、リンク２の重心回りの慣性モーメント

ラグランジュの運動方程式より、２軸マニピュレーターの運動方程式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = M(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta}) + C(\theta) \tag{6.8}$$

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 + a_3 \cos\theta_2 & a_2 + a_3 \cos\theta_2 \\ a_2 + a_3 \cos\theta_2 & a_2 \end{pmatrix}$$
$$B(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} -a_3 \left(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2\right)\sin\theta_2 \\ a_3\dot{\theta}_1^2 \sin\theta_2 \end{pmatrix} \tag{6.9}$$
$$C(\theta) = \begin{pmatrix} a_4 \cos\theta_1 + a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ a_5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

$M(\theta)$は慣性効果を、$B(\theta,\dot{\theta})$はコリオリ力、中心力などの非線形効果を、$C(\theta)$は重力ポテンシャルによる効果をそれぞれ表している。[10]-[13]

参考文献

[1]“平成 20 年度版　高齢社会白書”、内閣府政策統治官(共生社会政策担当)、2008

[2] Rehab robotics Ltd、“Rehab robotics 社ホームページ”、http://www.fastuk.org/home.php

[3] 門田健志、鈴木健也、深井善朗、“二関節筋装備基本モデル「HIPRO」”、精密工学会生体応用制御・応用技術専門委員会第１回　Workshop、2005. 10

[4] 高山仁志、田熊隆史、細田耕、“二関節筋を含めた筋骨格構造を持つロボットによる連続跳躍の実現”、ロボティクス・メカトロニクス講演会 08’予稿集、vol. CD-ROM、2008(2P2-I17)

[5] 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

[6] 熊本水頼、“ヒューマノイド工学”、東京電気大学出版局、2006

[7] 藤川智彦、大島徹、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）、vol. 63、No. 607、pp769-776、1997

[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”、日本機械学会論文集（C編）、vol. 65、No. 632、pp253-260、1999

[9] 吉田憲吾、古関隆章、堀洋一、“筋の粘弾性を模擬した新しいロボットアームの制御手法”、平成 19 年度電気学会産業応用部門、2007. 8、大阪

[10] 小林尚登、“ロボット制御の実際”、計測自動制御学会、1997

[11] 川崎晴久、“ロボット工学の基礎”、森北出版株式会社、1991

[12] 渡辺嘉二郎、小俣善史、“ロボット入門”、オーム社、2006

[13] 小林一行、“ロボットモデリング”、オーム社、2007

謝辞

まず始めにこの１年間指導教員としてお世話になった堀洋一先生にお礼申し上げます。呉世訓助教には多数の助言を頂き、大変感謝しております。

さらに、堀研究室の諸先輩方には研究活動のみならず、大変お世話になりました。修士論文で忙しい中時間を割いてくれた小林さん、いつも気に掛けてくれた居村さん、そして直接指導してくれた吉田さん、の３人の先輩方には特に感謝しております。