

二関節同時駆動機構を持つロボットアーム

吉田 憲吾, 堀 洋一 (東京大学)

Robot Arm Using Bi-articular Driving Mechanism

Kengo Yoshida, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Recently there are many trials to introduce animal characteristics into robots. In this paper, we describe our attempt to make a robot arm based on the principle of bi-articular muscles. Conventional robot arm has only actuators similar to mono-articular muscles. Existence of bi-articular muscles can give robots remarkable ability to realize various motions without feedback control, which may provide skillfulness and safety like animals. We suggest a driving mechanism using equilibrium position originated muscular elasticity. And this mechanism realize trajectory tracking as feedforward control in simulations.

キーワード：ロボットアーム、二関節筋、フィードフォワード
Keywords: robot arm, bi-articular muscle, feedforward

1. はじめに

1.1 研究の背景 現在、様々なロボットが研究・開発されており主には産業界にて活躍している。その中で生物の形を模したロボットも多く研究され発表されてきている。しかしながらこれら生物型のロボットは必ずしも生物と同じ駆動方法を用いているわけではない。

多くのロボットは各関節に独立に回転型のアクチュエータを供えているが、ヒトを始めとする生物においては時に関節をまたぎながら、筋肉を複雑に配置して身体を動かしている。また制御の面からも、既存のロボットにおいてはZMPなど膨大な計算を必要とする方法を用いるのに対し、生物においては歩行などの基本的な繰り返し動作については非常に単純な制御によってこれを実現している。

現状を見ると、特に生物の姿を模したロボットに関しては、その対象となる生物の運動性能には遠く及ばない。ロボットが生物に一步近づぐためには、生物の機構を学び取り入れていく必要があるのではないかと考える。

本論文では、生物の優れた特徴をロボットに導入する取り組みとして、二関節筋の仕組みを取り入れたロボットとその弾性を生かした駆動方法に関する提案を行なう。本文中では二関節筋に相当するアクチュエータを二関節同時駆動機構と呼ぶ。これに対し一関節筋に相当するアクチュエータは一関節駆動機構と呼ぶことにする。

1.2 二関節筋の応用に関する既存研究 生体機構の一例としてここでは生物のアームに特有な二関節筋を取りあげる。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。一方ヒトの上半身・下半身を始めとして、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

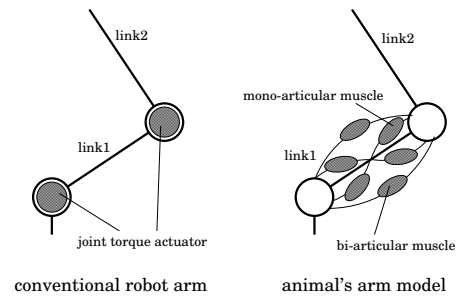


図1 従来のロボットアームモデルと生物のアームモデル

Fig. 1. Conventional robot arm model and animal's arm model

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。

生物のアームは様々な筋が組み合わせられてできているが、二次元運動に限定した場合に機能の面から一関節筋と二関節筋の3筋6対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。Kumamotoらによって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ことが主張されている。⁽¹⁾

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鳥海、Oshimaらによって確かめられた。^{(2) (3)}

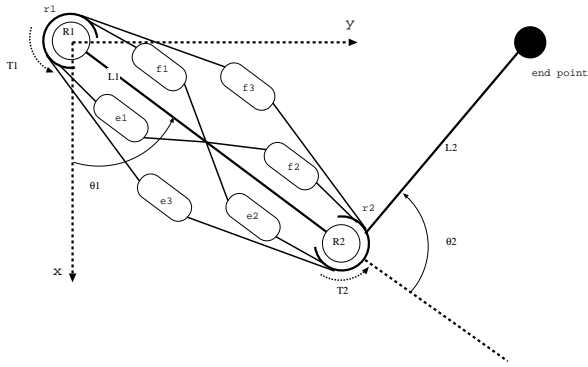


図2 生物のアーム機構
Fig. 2. Arm model of animals

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、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。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 らは腓腹筋等を実装した跳躍ロボットを提案している。

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。^{(4) (5)}

2. 二関節筋構造を持ったアームのモデル

図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。また、 e_1 と f_1 、 e_2 と f_2 、 e_3 と f_3 はそれぞれ拮抗関係にあり、これを拮抗対と呼ぶ。

今回、3対6筋に対応するアクチュエータを配置することによって、生体機構を応用したロボットアームを制作する。この際各筋に対応するアクチュエータにより、各関節におけるトルクが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。各アクチュエータの出力を F_x 、($x = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3$) とすると、式(1)と表わされる。

$$\begin{aligned} T_1 &= (F_{f1} - F_{e1})r_1 + (F_{f3} - F_{e3})r_1 \\ T_2 &= (F_{f2} - F_{e2})r_2 + (F_{f3} - F_{e3})r_2 \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

各アクチュエータに筋と同様の粘弾性を持たせるようにする。まず、生物の筋は図3と模式的に表わすことができ、バネ成分及びダンパ成分を持ったアクチュエータとして表わされる。これを数式で表現すると出力を F とすれば、式(2)と表わすことができる。

$$F = u - K(u)x - B(u)\dot{x} = u - kux - bu\dot{x} \quad \dots (2)$$

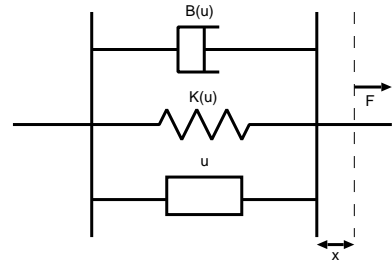


図3 筋肉のモデル図
Fig. 3. Model of a muscle

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。筋の成分のうち能動的に指定できるのは収縮力 u であり、他は受動的な成分である。筋の性質を持つアクチュエータについては、収縮力 u をある種の指令値と見なし、これに応じた出力 F を得るものとして扱う。

このような3対6筋に相当するアクチュエータを持ったロボットアームは、手先剛性を手先出力とは独立に設定できるようになる。この際には各拮抗対の指令値の和によって手先剛性を定めることができるから、各アクチュエータの指令値をそれぞれ u_x 、($x = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3$) とおき、拮抗対の和と差を式(3)のように定義する。

$$\begin{aligned} S_1 &= u_{f1} + u_{e1}, D_1 = u_{f1} - u_{e1} \\ S_2 &= u_{f2} + u_{e2}, D_2 = u_{f2} - u_{e2} \\ S_3 &= u_{f3} + u_{e3}, D_3 = u_{f3} - u_{e3} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ただし、

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

である。式(2)、式(1)、式(3)より、式(4)が導かれる。

$$\begin{aligned} T_1 &= r_1 D_1 - kr_1^2 \theta_1 S_1 - br_1^2 \dot{\theta}_1 S_1 \\ &\quad + r_1 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_1 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_1 S_3 \\ T_2 &= r_2 D_2 - kr_2^2 \theta_2 S_2 - br_2^2 \dot{\theta}_2 S_2 \\ &\quad + r_2 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_2 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_2 S_3 \\ &\quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

3. 弾性を生かした駆動方法

3.1 釣り合い位置の導出 各アクチュエータの指令値を適当に定めると、これに応じた各関節角を定めることができアームはその釣り合い位置に向かって動こうとする。各指令値を変化させることによって釣り合い位置も変化するため、これに応じて動かすということが可能である。

式(4)より、 $T_1 = T_2 = 0$ となるような θ_1, θ_2 を求めると式(5)を得る。ただし、 $r = r_1 = r_2$ とする。

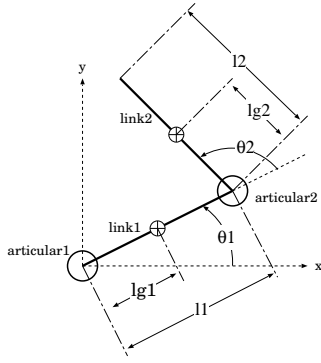


図4 シミュレーションに用いたモデル

Fig. 4. Model for simulation

$$\theta_1 = \frac{1}{kr} \frac{(D_1 + D_3)S_2 + (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1}$$

$$\theta_2 = \frac{1}{kr} \frac{(D_2 + D_3)S_1 - (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \dots\dots (5)$$

また逆に、釣り合い位置 θ_1, θ_2 が与えられた場合に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も可能である。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。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6を得ることができる。

$$D_1 = -kr \left(\frac{S_1S_3}{S_2} \theta_1 + \frac{(S_1 + S_3)S_2}{S_1} \theta_2 \right)$$

$$D_2 = -kr \left(\frac{(S_2 + S_3)S_1}{S_2} \theta_1 + \frac{S_2S_3}{S_1} \theta_2 \right)$$

$$D_3 = -kr \left(\frac{\theta_1}{S_2} + \frac{\theta_2}{S_1} \right) \dots\dots\dots (6)$$

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と式6から式7のように $u_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ を求めることができる。

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

$$u_{f2} = \frac{S_2 + D_2}{2}, u_{e2} = \frac{S_2 - D_2}{2}$$

$$u_{f3} = \frac{S_3 + D_3}{2}, u_{e3} = \frac{S_3 - D_3}{2} \dots\dots\dots (7)$$

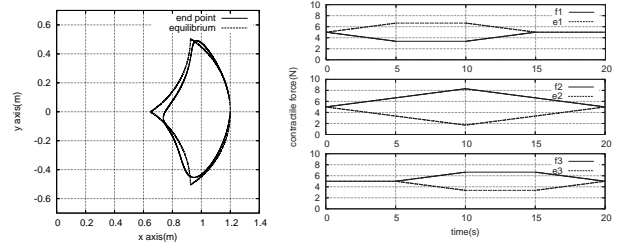
3.2 弾性による釣り合いを生かした駆動のシミュレーション 動的な計算に用いるロボットアームのモデルとして、各リンクを幅や厚みのない棒として定義する。リンク1, リンク2の長さをそれぞれ l_1, l_2 とし、各関節座標系の原点からリンクの重心までの距離をそれぞれ l_{g1}, l_{g2} とする。それぞれの重量を m_1, m_2 、関節座標系の原点を中心とする慣性モーメントの大きさを I_1, I_2 とする。(図4)

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式(8)のように運動

表1 シミュレーションに用いたパラメータ

Table 1. Parameters of simulation model

| | | | |
|----------|---------------------------|----------|----------------------------|
| 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] |



changing contractile forces($\tau = 5$)

図5 弾性による釣り合いを生かした駆動のシミュレーション結果

Fig. 5. Simulation result of Driving robot arm using equilibrium

方程式を得ることができる。⁽⁶⁾

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} \quad (8)$$

ただし、

$$m_{11} = I_1 + I_2 + 2m_2l_1l_{g2} \cos \theta_2 + m_2l_1^2$$

$$m_{12} = m_{21} = I_2 + m_2l_1l_{g2} \cos \theta_2, m_{22} = I_2$$

$$h_{11} = -m_2l_1l_{g2} \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)$$

$$h_{21} = m_2l_1l_{g2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2$$

ここで各パラメータとしては、表1のものを用いる。また各拮抗対の和の値については、 $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ [N]として与えることにした。

図5に上記のシミュレーション結果を示す。アクチュエータの指令値を変化させることによって釣り合い位置が変わり、その軌跡を辿るように駆動させることが可能である。シミュレーションでは、いくつか姿勢を決めてその地点に向かうための指令値を式6,7から生成し、姿勢間は直線的につなぐことにした。 $(\theta_1, \theta_2) = (0, 0), (-1, 1), (-1, 2), (0, 1)$ という4点を選び、これを周回するように定めた。

θ_1, θ_2 の値を連続して与えることにより、アクチュエータの指令値を

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。

4. 制作するロボットアーム

4.1 二関節同時駆動機構 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

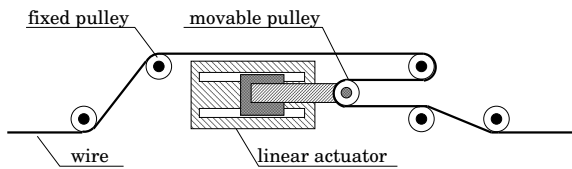


図6 プーリーを組み合わせた二関節同時駆動機構

Fig. 6. bi-articular driving mechanism using pulleys

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。これを完全に満たす機構としては、例えば図6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いくつか考えられる。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。

4.2 ロボットアームの設計と制作 制作の目的としては、(1)3対6筋に相当する機構を供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。今回は島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。⁽⁷⁾ 制作するロボットアームの外観を図7のように示す。また基本的なパラメータとして表2に寸法等を示す。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。

5. まとめと今後の課題

本論文では二関節筋の仕組みを二関節同時駆動機構として取り入れたロボットアームの弾性による釣り合いを生か

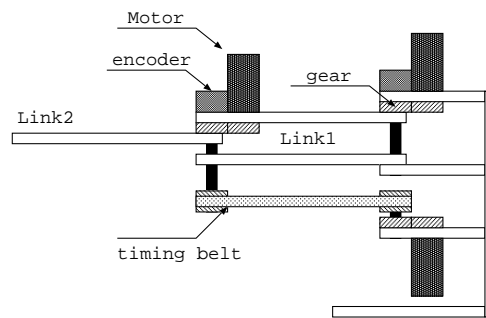


図7 ロボットアーム外観図

Fig. 7. Outline view of robot arm

表2 制作するロボットの主なパラメータ

Table 2. Major parameters of robot arm

| | | |
|----------|-------------------|--------|
| リンク1(上板) | 200 × 50 × 10[mm] | 270[g] |
| リンク1(下板) | 200 × 50 × 10[mm] | 270[g] |
| リンク2 | 200 × 50 × 10[mm] | 270[g] |
| モータ | タミヤ (540K75) | |
| エンコーダ | オムロン (E6H-CWZ6C) | |

した駆動方法に関して述べ、シミュレーションによって示した。また二関節同時駆動機構を持つロボットアームの制作に関して提案を行なった。

今後の課題としては実際に実機による実験で二関節筋の仕組みを持ったアームの特性や駆動に関して確認をするといったことが挙げられる。また目標として、生物の特徴である(1)必要十分な正確性、(2)素早い動作、(3)柔らかさを備えることによる安全性といったものをロボットが取り入れることを目指していく。

文 献

- (1) Minayori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto: "Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles - Mechanical engineering model analyses", *Human Movement Science*, 13, 5, pp. 611-634, 1994
- (2) 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着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
- (3) 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
- (4) 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 二関節筋実用 Workshop, 2003
- (5) 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
- (6) 川崎 晴久: "ロボット工学の基礎", 森北出版株式会社, 1991.
- (7) 島 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