

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

吉田 憲吾*, 内田 利之, 堀 洋一 (東京大学)

Realization of Robot Arm with Bi-articular Driving Mechanism and its Control Using Muscular Viscoelasticity
Kengo Yoshida*, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

Conventional robot arm has one actuator in each joint and it drives only one joint. Though animal's arm has both mono-articular muscles and bi-articular muscles. Mono-articular muscle works only one joint. Bi-articular muscle works on both two joints. This bi-articular muscle plays an important roll in skillful control ability of animals. In this paper we describe our trial to make a robot arm based on the principle of bi-articular muscles. It has bi-articular driving mechanism and viscoelasticity similar to muscle. Furthermore we propose a control method using muscular viscoelasticity. This method is a kind of feedforward control and ensure robustness with muscular viscoelasticity. We show its effectiveness by simulation.

キーワード：ロボットアーム、二関節筋、粘弾性、フィードフォワード
(robot arm, bi-articular muscle, viscoelasticity, feed-forward)

1. はじめに

1.1 研究の背景 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歩ヒトに近づき、ヒトとロボットが協働する社会が実現できる。

1.2 生体機構を応用したロボットに関する既存研究 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

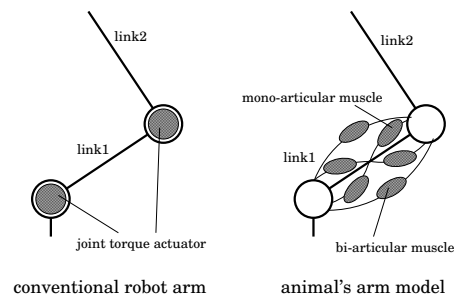


Fig. 0. Conventional robot arm model and animal arm model

図 1 従来のロボットアームと生物の四肢の構造の比較

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 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 対 6 筋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。また、ラバチュエータを用いたロボットアームが

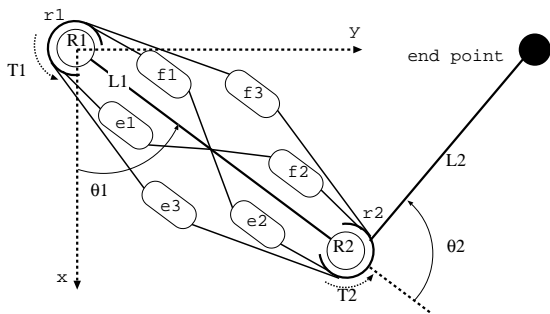


図2 生物のアーム機構

Fig. 2. Arm model of animals

製作され、等尺条件化における手先出力・粘弾性の検証がなされた。^(?)

一足の跳躍ロボットとして、下腿部の二関節筋である腓腹筋をワイヤで置き替えたものが Oshima らによって製作され、垂直跳びにおける姿勢制御機能としての二関節筋の役割を検証している。^(?)^(?)

また、東京電機大学の斎藤らによって災害救助用ロボットとして Gorilla が開発され、脚に二関節の仕組みを生かした油圧アクチュエータを供えている。^(?)

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。^(?)^(?)

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 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。また、e1 と f1、e2 と f2、e3 と f3 はそれぞれ拮抗関係にあり、これを拮抗対と呼ぶ。

まず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。各アクチュエータの出力を F_x ($x = e1, e2, e3, f1, f2, f3$) とすると、式(1)と表わされる。

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

各筋は特有の粘弾性を持っている。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。

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

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

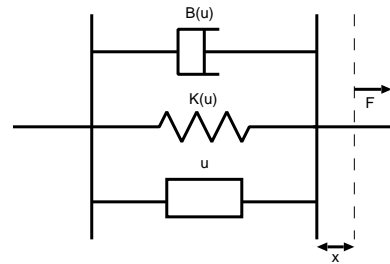


図3 筋肉のモデル図

Fig. 3. Model of a muscle

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。

さてこのように3対6筋を持つアームにおいては、手先剛性を手先出力とは独立に設定できるというのは大きな特徴である。この際、各拮抗対の収縮力の和によって手先剛性を定め、その後各拮抗対の差を調整することによって手先出力の方向を定めることができるから、

各筋の収縮力をそれぞれ u_x ($x = e1, e2, e3, f1, f2, f3$) とおき、拮抗対の和と差を式(3)のように定義する。

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

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。

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

3. 二関節同時駆動機構を備えたロボットアーム

3.1 二関節同時駆動機構の実装

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われている。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

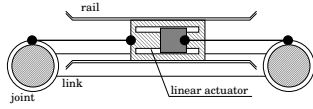


Fig. 3. Bi-articular drivibng mechanism which is connected to each joint directly

図 4 直接各関節を結ぶ二関節同時駆動機構

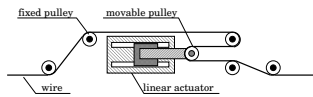


Fig. 4. Bi-articular drivibng mechanism using movable pulleys

図 5 動滑車を用いる二関節同時駆動機構

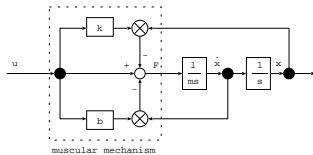


Fig. 5. Block diagram to realize viscoelasticity of muscle

図 6 筋の粘弾性を実現するメカニズム

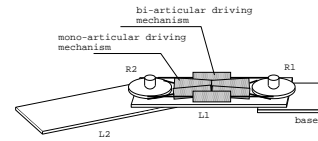


Fig. 6. Robot arm which has a antagonistic pair of bi-articular driving mechanism and two antagonistic pairs of mono-articular driving mechanism

図 7 完全な 3 対 6 筋の構造を持つロボットアームの例

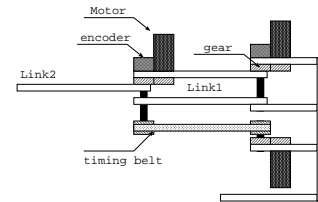


Fig. 7. Outline view of our robot arm

図 8 今回制作するロボットアームの概形

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 4 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 5 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。

3・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。^(?) 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、その特性をできるだけ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 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。

3・3 二関節同時駆動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 (図 7) 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。^(?)

制作するロボットアームの外観を図 8 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 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)、今回制作する図 8 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

表 1 各アームモデルの比較
Table 1. Comparison of each arms

A is animal's arm. B1(Fig. 7) and B2(Fig. 8) are robot arms using bi-articular driving mechanism. B2 is what we attempt to make now. C is conventional robot arm.

: existing, : virtually existing, × : no existing.

-	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				×

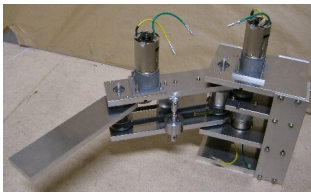


Fig. 8. A photo of robot arm which we are working on

図 9 ロボットアームの機械部分

Table 1. Major parameters of robot arm

表 2 ロボットアームの主要なパラメータ

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)

一部の機能を仮想的に実現している。

3.4 実際の設計と制作 図9のようにロボットアームを製作した。図8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。

3.5 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10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。⁽⁷⁾次に、antagonistic muscle module(図6)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。

表 3 コントローラに用いた部品
Table 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)

$$\begin{pmatrix} i_1^* \\ i_2^* \\ i_3^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_i & 0 & K_i \\ 0 & K_i & 0 \\ 0 & 0 & K_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1^* \\ F_2^* \\ F_3^* \end{pmatrix} \dots \dots (5)$$

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。ここまでは制御用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、言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。

4. 粘弾性を生かした制御手法

5. 結 論

参考文献

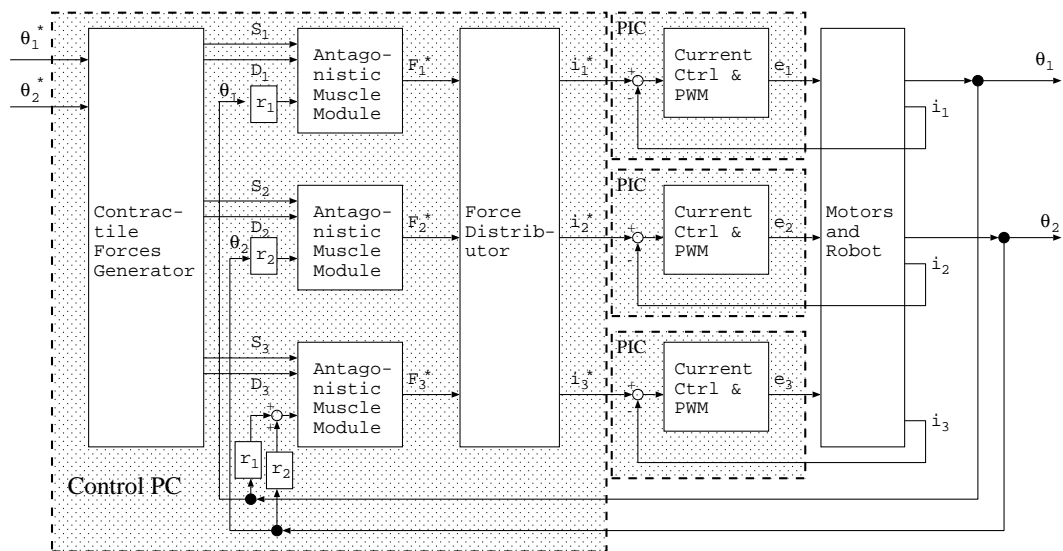


図 10 全体の制御ダイアグラム

Fig. 10. Control diagram