

# 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

吉田 憲吾, 古関 隆章, 堀 洋一 (東京大学)

Novel Control Algorithm of Robot Arm Emulating Muscular Viscoelasticity

Kengo Yoshida, Takaaki Koseki, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Recently we can see many trials to introduce animal characteristics into robots. Both animals and conventional robots use FF control when they act. However their control mechanism is quite different. We consider on the important role that muscular viscoelasticity and locations play in amazing ability of animals.

In this paper we propose a novel control algorithm of robot arm to emulate muscular viscoelasticity. Muscle has unique viscoelasticity which is proportional to muscular contractile force. When contractile forces are given to each muscles, the arm goes back to equilibrium position due to muscular elasticity. Proposed algorithm utilizes this characteristic. It is shown that, by deciding the required contractile forces and some related parameters, we can drive the arm quite well. By simulation, we verify its effectiveness and robustness.

キーワード：ロボットアーム、筋粘弾性、フィードフォワード、二関節筋

Keywords: robot arm, muscular viscoelasticity, feedforward, bi-articular muscle

## 1. はじめに

生物はアクチュエータとして筋肉を用いている。筋肉の特徴として、可変の粘弾性を持っており、これを筋の活性レベルによって調節できるという点が挙げられる。また筋配列の面からは、まず各筋が拮抗対を作ることで剛性と出力とを別個に指定できるようになる。さらに二関節筋と呼ばれる関節を跨ぐ筋の存在は有用な性質をアームに付加する。

さて、生物はその動作の大部分をフィードフォワードによる制御によって行なっていると考えられている。もちろん、目や三半規管といった器官で得た情報をフィードバックしているのは明らかであるが、これらからのフィードバックが届くまでにはある程度の遅れを要するから、生物の巧みな動きの担保としてフィードフォワード制御部分に何らかの仕組みが存在すると考えられる。

本論文において、我々は何らかの軌道が与えられた場合にこれにフィードフォワード制御によって上手く追従するアルゴリズムを提案する。この提案手法は筋の粘弾性に着目し、各筋の収縮力をうまく調節することでアームの釣り合い位置を移動させ、それに従ってアームを動かすものであり、以前の研究における手法を発展させたものである。最後に、シミュレーションによってフィードフォワードながらモデルや環境等の変化に強いことを確かめる。<sup>(7)</sup>

筋の粘弾性や拮抗構造といったものを生かす研究としては、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。<sup>(1) (2)</sup>

また 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。<sup>(3)</sup>

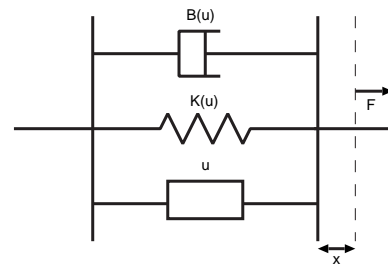


図1 筋肉のモデル図

Fig. 1. Model of a muscle

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。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。<sup>(4)</sup>

伊藤らによって筋骨格系の義肢への応用の研究がなされ、特に筋の粘弾性モデルを用いて拮抗対の特性を明らかにした。<sup>(5)</sup>

## 2. モデルと提案手法のアルゴリズム

2.1 筋の粘弾性とアームモデル 各筋は特有の粘弾性を持っている。まず、生物の筋は図1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(1)と表わすことができる。

$$F = u - K(u)x - B(u)\dot{x} = u - kux - bu\dot{x} \quad \cdot \cdot (1)$$

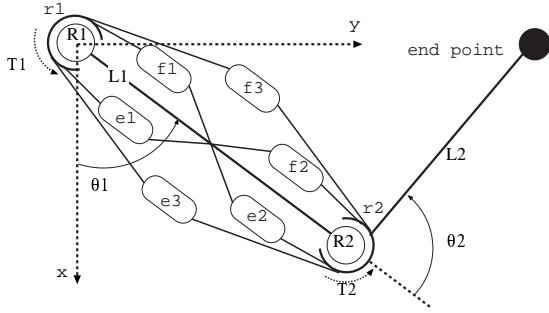


図2 3対6筋を持つアーム機構

Fig. 2. Arm model equipped with three antagonistic muscular pairs

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。

次に筋をアクチュエータとして扱うアームであるが、二関節筋も含めて取りあつかえるようにするため図2のように3対6筋を持つアームモデルとして表す。

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(2)と表わされる。

$$\begin{aligned} T_1 &= (F_{f1} - F_{e1})r_1 + (F_{f3} - F_{e3})r_1 \\ T_2 &= (F_{f2} - F_{e2})r_2 + (F_{f3} - F_{e3})r_2 \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

さらに各筋の収縮力を  $u_x$  ( $x = e1, e2, e3, f1, f2, f3$ ) とそれぞれおき、拮抗対の和と差を式(3)のように定義する。拮抗対の和によって粘性および弾性を調整し、拮抗対の差によって力を出力する。

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

ただし、

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

である。式(1),(2),(3)を用いて、このアームに与えるトルクは式(4)と導かれる。

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

2.2 筋の粘弾性を模擬したロボットアームの制御手法 任意の経路に対し、それを追従するための、新しい制御アルゴリズムを提案する。これは拮抗対の粘弾性による釣り合いをうまく生かし、特に二関節筋を含んだアームを上手く動作させることのできる手法である。

以前の研究では、経路を分割する非常に細かい点に対し計算を行っていたのに対し、ある程度荒く取った点に対しても上手く計算できるようになった。また、これまで試行錯誤によって求めていたパラメタの大部分に関して、意味付けを行ない効率的に設定できるようにした。<sup>(7)</sup>

さて、ここで手先が辿るべき任意の点列  $X_m = [x_m, y_m]^T$  が与えられた場合、 $\theta_{n,m}^*$  と各関節が取るべき値を式(5)で計算する。ここで添字の  $m$  は点列の  $m$  番目を意味し、 $n$  は拮抗対のインデックスである。

$$\begin{aligned} \theta_{1,m}^* &= \arctan(y_m, x_m) - \arctan(\sqrt{x_m^2 + y_m^2 - z_m^2}, z_m) \\ \theta_{2,m}^* &= \arctan(y_m - l_1 \sin(\theta_{1,m}^*), x_m - l_1 \cos(\theta_{1,m}^*)) - \theta_{1,m}^* \\ \theta_{3,m}^* &= \theta_{1,m}^* + \theta_{2,m}^* \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで

$$z_m = \frac{x_m^2 + y_m^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(7)は各拮抗筋とそれぞれの駆動する慣性モーメント  $I_n$  で見た場合の運動方程式である。

$$I_n \ddot{(\theta_{n,m})} = r D_{n,m} - k r^2 \theta_{n,m} S_{n,m} - b r^2 \dot{\theta}_{n,m} S_{n,m} \quad (7)$$

式(8)のように、 $S_n$  をシステムが臨界制動となるように定める。

$$S_{n,m} = \frac{4k I_n}{b^2 r^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

また、このケースでは各関節は静定時間が過ぎれば一定となる。よって式(9)のように  $D_{n,m}$  を所定の位置となるように定めることができる。

$$D_{n,m} = k r S_{n,m} \theta_{n,m+1}^* \quad \dots\dots\dots (9)$$

$T_{n,m}$  は各拮抗対に与える時間の長さであるが、これは式(10)のように定めることにする。 $\alpha$  はこの時滑らかさを定める定数である。

$$T_{n,m} = \frac{\alpha I}{b r^2 S_{n,m}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$\alpha$  が1に定められる時、 $T_{n,m}$  はシステムの立ち上がり時間に等しい。もし、中間点が適切に与えられれば、ロボット

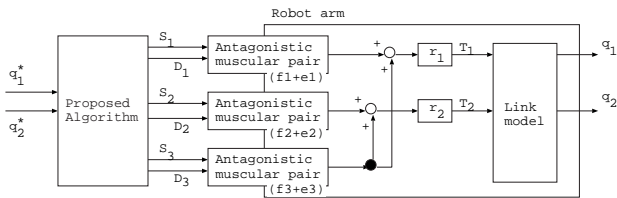


図3 提案アルゴリズムのブロック図

Fig.3. Block diagram of proposed algorithm

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]
$lg_1$	0.3[m]	$lg_2$	0.3[m]
$m_1$	2.5[kg]	$m_2$	1.0[kg]
$r_1$	0.1[m]	$r_1$	0.1[m]
$k$	3.3[N/m]	$b$	5.0[N · s/m]

アームはパスをスムーズに追従することができる。ここまでのアルゴリズムの流れを図3に示す。さて本手法によって  $S_{n,m}, D_{n,m}$  が定められた時、これは式(11)で表されるアーム全体釣り合いの式を満たす。

$$\begin{aligned} \theta_{1,m} &= \frac{1}{kr} \frac{(D_{1,m} + D_{3,m})S_{2,m} + (D_{1,m} - D_{2,m})S_{3,m}}{S_{1,m}S_{2,m} + S_{2,m}S_{3,m} + S_{3,m}S_{1,m}} \\ \theta_{2,m} &= \frac{1}{kr} \frac{(D_{2,m} + D_{3,m})S_{1,m} - (D_{1,m} - D_{2,m})S_{3,m}}{S_{1,m}S_{2,m} + S_{2,m}S_{3,m} + S_{3,m}S_{1,m}} \\ &\dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

### 3. シミュレーションによる検証

3.1 シミュレーションに用いたモデル 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一様な棒として定義する。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  $lg_1, lg_2$  とする。それぞれの重量を  $m_1, m_2$  とする。

ここで各パラメータとしては、特に断わりのない場合表1のものを用いる。まず表1のパラメータを用いて制御パラメータを調節し、その後  $m_1, m_2$  の値を変化させて制御手法のロバスト性を確認する。

シミュレーションはラグランジュ法を用いて行い、水平面上での運動を考えることにする。また目標値となる軌道は式(12)のように楕円として与える。

$$\left(\frac{x-0.3}{0.6}\right)^2 + \left(\frac{y-0.6}{0.2}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots (12)$$

3.2 シミュレーションによる結果 まず図4のようにシミュレーションの結果を示す。このように粘弾性を生かしてうまく軌道追従制御をすることができた。この時、 $\alpha = 1$  とし中間点は均等に40点取っている。

次にモデルを様々に変化させて本手法がフィードフォー

ドながら、筋の粘弾性によってモデル化誤差に対するロバスト性を確保していることを示す。まず、与える収縮力のパターンは  $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0$  [kg] と仮定して作成し、同じパターンをリンクの質量をいろいろに変えて与えた。この時の結果を図5に示す。リンクの質量を0.4倍, 1.4倍した場合に関してはほとんど問題なく、リンク2のみ質量を増加させた場合もほぼ同様である。ただし、2倍にすると変化の激しいところで多少追従が悪くなる。さらに10倍にした場合には変化の激しい部分以降で大きくずれてしまうことが分かる。

### 4. まとめと今後の課題

このように、筋の粘弾性を生かすことでロバストな軌道追従制御ができることを示した。本手法においては、モデルの差異等を吸収しながら、簡単な計算で制御できることを示すことができたが、いくつかの問題点も明らかになっている。一つは、やはり弾性を利用して釣り合いに沿って動かす手法のため、非常な正確性を期待できないということ、また速度パターンも含めて正確に制御するのは本手法では困難であることがあげられる。また、指令値に対していくらか遅れて追従する手法であるということ、摩擦等の存在する現実の系に対しては本手法のみでは誤差が残ることも問題点としてあげられると考えている。ただし、本手法が対象とする領域、つまりヒトが普段生活する環境にロボットが入って活動するような領域においては、十分な正確性、有効性を確保できていると考えている。というのも既存手法の正確性を担保しているものがモデルの正確性であったり、十分に短い周期のフィードバックと高速な計算であるからである。

今後の課題としては開発中のロボットアームによって、本手法を実際に実験して確かめるといった点が挙げられる。また、さらに正確性や速度の設定など本手法の改善の余地は多いと考えている。

### 文 献

- (1) 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
- (2) Neville Hogan, "On the stability of Manipulators Performing Contact Tasks", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 6, pp. 677-686, 1988
- (3) F. A. Mussa Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi, "Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subserving Arm Posture in Humans", The Journal of Neuroscience, Vol. 5, No. 10, pp. 2732-2743, 1985
- (4) 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
- (5) 伊藤 宏司, 辻 敏夫, "筋骨格系の双線型特性と義肢制御への応用", 電気学会論文誌 C, Vol. 105, No. 10, pp. 201-208, 1985
- (6) 川崎 晴久: "ロボット工学の基礎", 森北出版株式会社, 1991.
- (7) 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", 平成18年電気学会産業応用部門大会, 2006.8, 名古屋

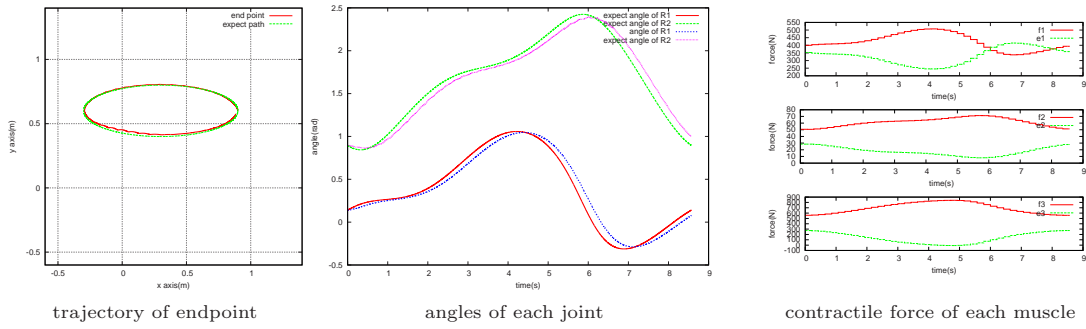


図4 提案手法のシミュレーション結果

Fig. 4. Simulation result of driving robot arm using muscular viscoelasticity  
Left image is trajectory of endpoint.

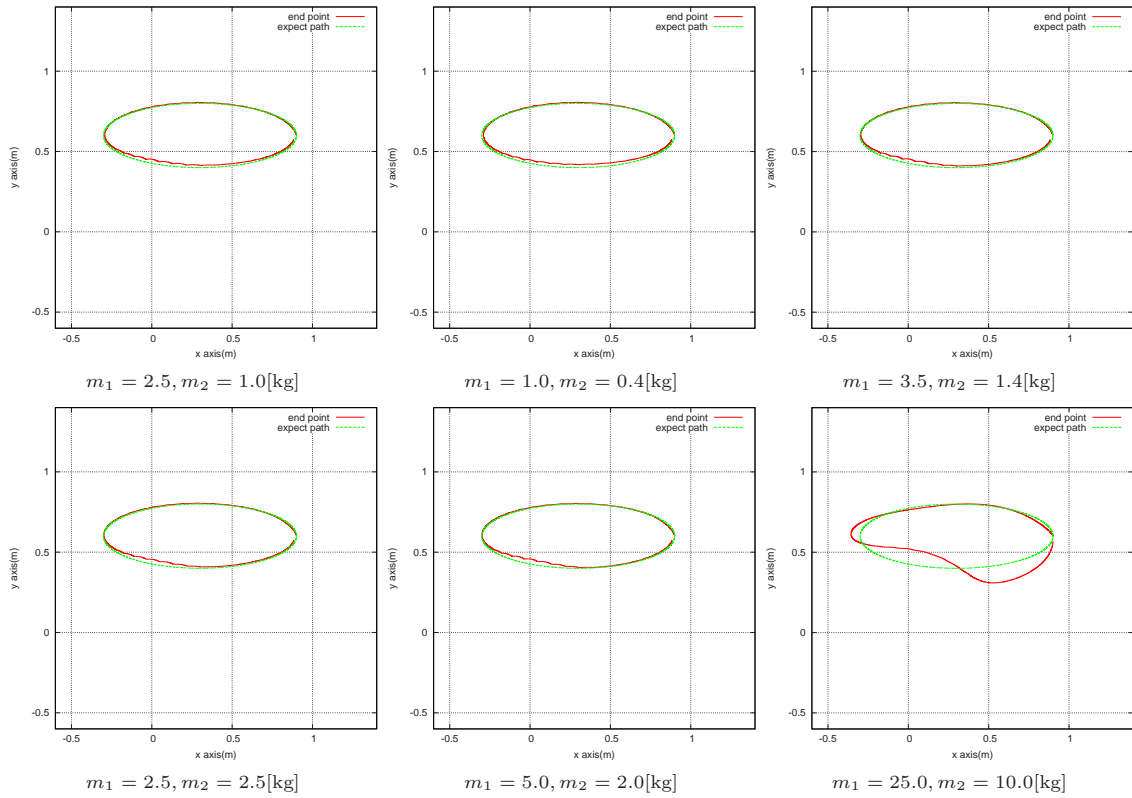


図5 リンクの質量を変化させた場合のシミュレーション結果

Fig. 5. Simulation result of changing mass of each link  
Left image is trajectory of endpoint.