

筋粘弾性を模擬する二関節同時駆動機構を備えたロボットアーム

吉田 憲吾 **, 内田 利之 **, 堀 洋一 ***

Research on Robot Arm with Bi-articular Driving Mechanism Emulating Muscular Viscoelasticity

Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori

Recently there are 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 arrangements play in amazing ability of animals.

In this paper we propose a novel FF control algorithm of robot arm with Bi-articular Driving Mechanism. Muscular arrangements of upper arm are simplified to a model consist of four mono-articular muscles and two bi-articular muscles. Each muscle has unique viscoelasticity which is proportional to muscular contractile force. Our robot arm emulates these characteristics. Proposed algorithm calculates appropriate contractile forces to track expected path. We can drive the arm quite well. By simulation, we verify its effectiveness and robustness.

Key words: robot arm, mono-articular muscle, bi-articular muscle, muscular viscoelasticity

1. はじめに

近年、生物の姿を模擬し、生物様の動作が可能なロボットが多数開発、研究されている。しかしながら、これらロボットのアクチュエータの構造、制御手法は生物のものとは大きく異なっている。

従来のロボットは各関節を独立に駆動するアクチュエータを備えているのに対し、生物においては一関節筋と呼ばれる各関節を独立に駆動するアクチュエータの他、二関節筋と呼ばれる二つの関節に跨って同時に力を発揮するアクチュエータを備える。また、筋は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整できるというユニークなアクチュエータである。

次に両者の制御機能においては、互いにフィードフォワード制御が重要な役割を果たしているが、その用いられるところは全く異なっている。従来のロボットの場合、高速なフィードバック制御と、正確なモデルの推定に基づいたフィードフォワード補償を行なうことにより、精密で高速な動作を実現している。一方生物は、その動き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る。もちろん目や三半器官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末端に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。

本論文では、二関節筋に相当する機構および、各アクチュエータが筋粘弾性を模擬するロボットアームにおいて適用可能な新しい手法を提案する。本手法は適切な筋の収縮力を計算してフィードフォワードによって与えるのみで、任意の軌道に追従し、かつモデルの変動等においてもロバスト性を持つ。各筋の収縮力をうまく調節することで、アームの釣り合い姿勢を変動させ、それに従いアームを駆動するが、この際筋の粘

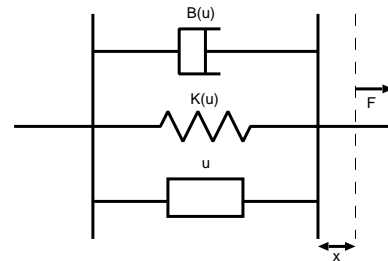


Fig. 1 筋肉のモデル図

弾性が一種のフィードバックとして働くことによってモデル等の変動を許容する。シミュレーションによって本手法の追従性能と、モデル外乱に対するロバスト性の評価を行なう。

筋の粘弾性や拮抗構造といったものを生かす先行研究として、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。¹⁾²⁾

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。³⁾

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。⁴⁾

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。⁵⁾

2. 筋の粘弾性モデルとアームモデル

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、パ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

* 原稿受付 平成 18 年 8 月 25 日

** 東京大学大学院 工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 東京大学 生産技術研究所 (東京都目黒区駒場 4-6-1)

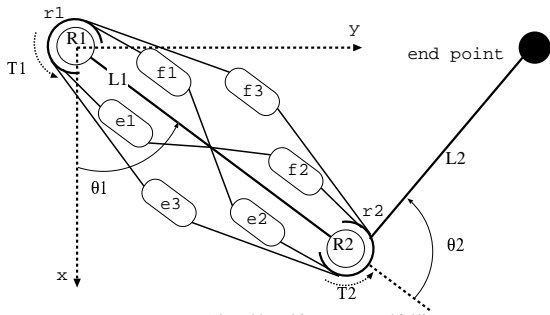


Fig. 2 3 対 6 筋を持つアーム機構

と、出力を F とすれば式 (1) と表わすことができる。

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

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。

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

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。

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

ただし、

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

とする。拮抗対の出力は式 (4) で表わされる。ここで n は拮抗対のインデックスを表すものとする。

$$F_{f_n+e_n} = D_n - kx_n S_n - b\dot{x}_n S_n \quad \dots (4)$$

式 (1),(2),(3) を用いて、このアームに与えるトルクは式 (5) と導かれる。

$$\begin{aligned} T_1 &= r_1 D_1 - kr_1^2 \theta_1 S_1 - br_1^2 \dot{\theta}_1 S_1 \\ &\quad + r_1 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_1 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_1 S_3 \\ T_2 &= r_2 D_2 - kr_2^2 \theta_2 S_2 - br_2^2 \dot{\theta}_2 S_2 \\ &\quad + r_2 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_2 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_2 S_3 \\ &\quad \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

3. 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。⁶⁾

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 (6) 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。

$$\begin{aligned} \theta_{1,m}^* &= \arctan(y_m, x_m) - \arctan(\sqrt{x_m^2 + y_m^2 - z_m^2}, z_m) \\ \theta_{2,m}^* &= \arctan(y_m - l_1 \sin(\theta_{1,m}^*), x_m - l_1 \cos(\theta_{1,m}^*)) - \theta_{1,m}^* \\ \theta_{3,m}^* &= \theta_{1,m}^* + \theta_{2,m}^* \quad \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

ここで

$$z_m = \frac{x_m^2 + y_m^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1} \quad \dots \dots \dots (7)$$

式 (8) 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。

$$I_n \ddot{\theta}_{n,m} = r D_{n,m} - kr^2 \theta_{n,m} S_{n,m} - br^2 \dot{\theta}_{n,m} S_{n,m} \quad (8)$$

式 (9) 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。

$$S_{n,m} = \frac{4kI_n}{b^2 r^2} \quad \dots \dots \dots (9)$$

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 (10) 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。

$$D_{n,m} = kr S_{n,m} \theta_{n,m+1}^* \quad \dots \dots \dots (10)$$

$T_{n,m}$ は各拮抗対に与える時間の長さであるが、これは式 (11) のように定めることにする。 α はこの時滑らかさを定める定数である。

$$T_{n,m} = \frac{\alpha I}{br^2 S_{n,m}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

α 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 4 に示す。また、拮抗対の出力ブロックは以下のように示される。さて本手法によって $S_{n,m}, D_{n,m}$

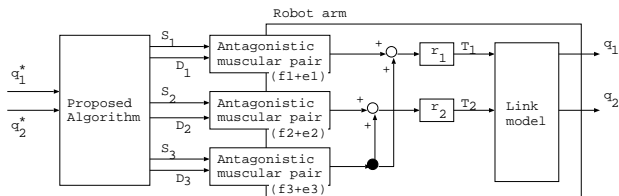


Fig. 3 提案アルゴリズムのブロック図

Table 1 シミュレーションに用いたパラメータ

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]

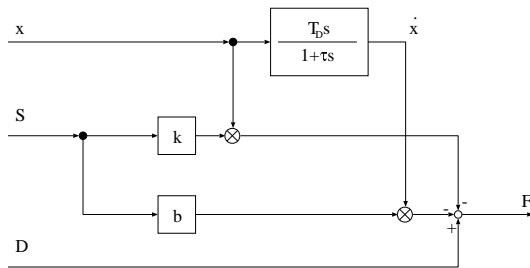


Fig. 4 拮抗対の出力生成ブロック

が定められた時、これは式 (12) で表されるアーム全体釣り合いの式を満たす。

$$\begin{aligned} \theta_{1,m} &= \frac{1}{kr} \frac{(D_{1,m} + D_{3,m})S_{2,m} + (D_{1,m} - D_{2,m})S_{3,m}}{S_{1,m}S_{2,m} + S_{2,m}S_{3,m} + S_{3,m}S_{1,m}} \\ \theta_{2,m} &= \frac{1}{kr} \frac{(D_{2,m} + D_{3,m})S_{1,m} - (D_{1,m} - D_{2,m})S_{3,m}}{S_{1,m}S_{2,m} + S_{2,m}S_{3,m} + S_{3,m}S_{1,m}} \\ &\dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

4. シミュレーションによる検証

4.1 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、特に断わりがない場合表 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、その後に 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 (13) のように楕円として与える。

$$\left(\frac{x-0.3}{0.6}\right)^2 + \left(\frac{y-0.6}{0.2}\right)^2 = 1 \dots \dots \dots (13)$$

4.2 シミュレーションによる結果

まず図 5 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 点取っており、一周の周期はおよそ 8.6 秒である。

次にモデルを様々に変化させて本手法がフィードフォワードながら、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 6 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 倍にすると変化の厳しい領域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厳しい領域以降では大きく外れてしまうことが分かる。

提案手法は筋粘弾性を活かすものであり、二関節筋の有無に限らず適用可能である。参考に二関節筋の有無によって追従結果にどのような差異があるかを示す。比較条件は一周の周期を 6 秒とし、それぞれの仮定の慣性モーメントの和を等しくする条件でシミュレーションを試みた。ノミナル値に近い場合には差異はほとんどないが、ノミナル値から実際の値が大きく外れている領域においては二関節筋を備えるほうが、比較的良好な結果を示していることが見てとれる。

5. まとめと今後の課題

本論文では筋の粘弾性を活かすことで、収縮力のフィードフォワードのみでロバストな追従が可能であることを示した。提案手法の利点としては、モデルの差異を吸収できること、簡単な計算で容易に実装可能であること等が挙げられ、動特性を考慮することで我々の以前の手法に比べて速度の面で改善を行なうことができた。

しかしながら、非常な正確性であったり、速度パターン、指令値からの遅れ等の問題点は存在し、また、重力や摩擦の補償、大まかなフィードバックといった改善も可能であろう。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、計算コストやロバスト性を勘案するに十分な性能を有していると考えられる。今後の課題として、開発中のロボットによる実験で本手法の有効性を確認する。また、前述した問題点、改善点の解決を図る。

参考文献

- 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 Subverting 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) 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

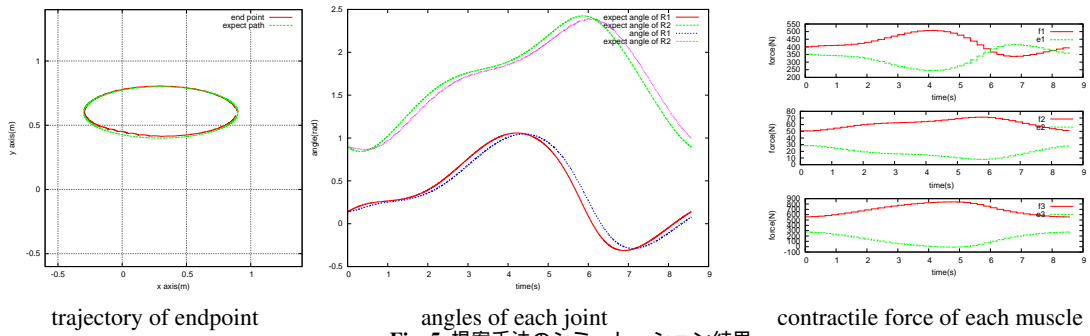


Fig. 5 提案手法のシミュレーション結果

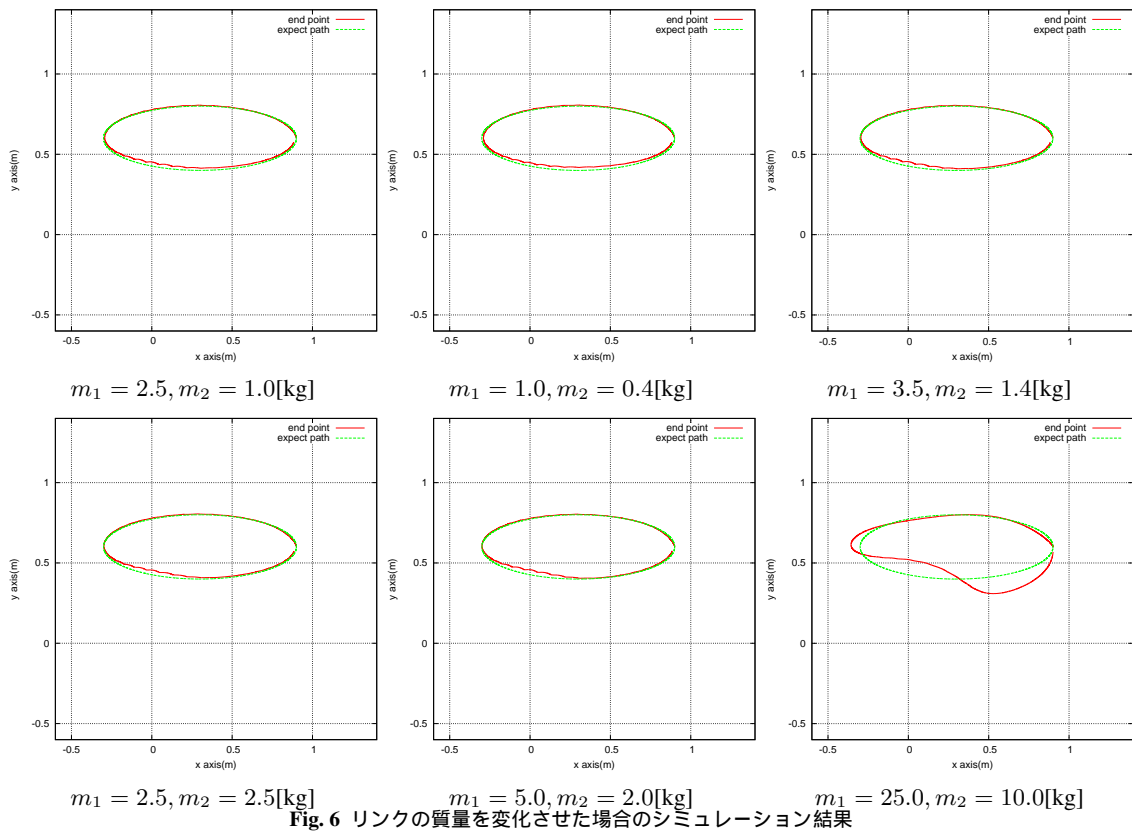


Fig. 6 リンクの質量を変化させた場合のシミュレーション結果

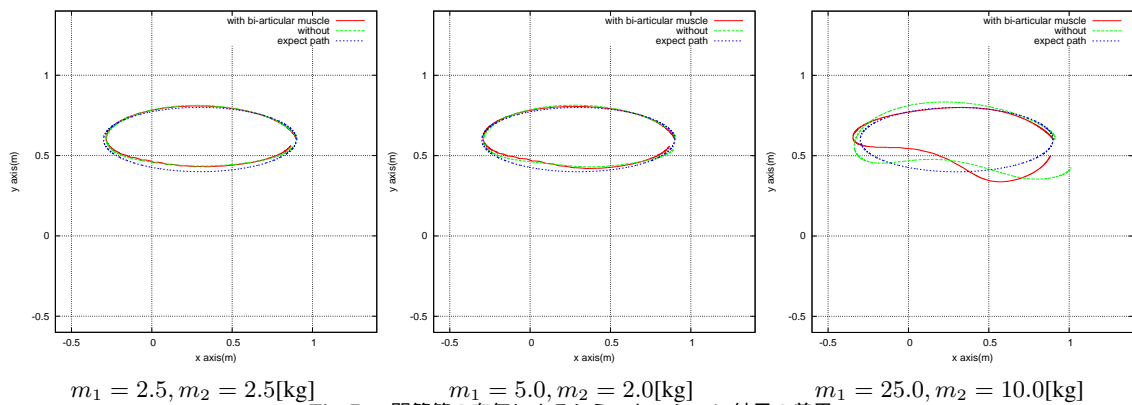


Fig. 7 二関節筋の有無によるシミュレーション結果の差異