

二関節同時駆動機構を持つロボットアームの実現

吉田 憲吾*, 内田 利之, 堀 洋一 (東京大学)

Realization of Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanism

Kengo Yoshida*, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper we describes our robot arm inspired by animal musculoskeletal system. Animal arm can be simplified to the two joint link model which has six muscles. This model keeps three important elements of animal arm : muscular viscoelasticity, antagonistic muscular pair and bi-articular muscles. The robot replaces each antagonistic muscular pair by DC motor and imitates muscular viscoelasticity. Bi-articular muscles is mimiced by bi-articular muscular driving mechanism. Then we analyze these elements of animal arm in our implementation. Especially we focus on equilibrium position and path tracking control derived from muscular viscoelasticity and antagonistic driving. In early work, we proposed feedforward path tracking algorithm using above properties. We also verify its efficiency.

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 研究の背景と目的 産業の視点から見るとロボットは、製造業における生産財である産業用ロボットと生活分野や公共分野といった新しい領域におけるロボットに大別できる。このうち産業用ロボットは非常に高度な制御技術、センシング技術によって一大産業を築くにいたっている。しかしながら、中長期的には産業用ロボット市場は飽和状態にあると言わざるをえない。

一方、新しいロボットは大学や研究機関を中心に活発に研究開発が進められ、近年は企業による開発、事業展開もみられる。製造業以外の様々な分野における潜在的な需要は大きいとされ、新たな産業としての期待も大きい。当初の目論見に比べればその浸透は全く緩やかである。⁽¹⁾

新しいロボットは産業用ロボットに用いられてきた既存のロボット技術を利用する形で研究が進められてきた。しかし動作環境の違い等から性能面、安全面において新しいロボットは十分な性能を発揮できておらず、生活、医療、といったこれまで人間のみが担い手であった領域において活躍するには不十分である。

従来のロボットは正確なモデル化と高剛性の関節およびリンク、高速なフィードバックといった要素によって高性能化されてきた。しかしながら新しいロボットでは軽量で柔軟な機体、未知領域での動作、歩行等の不安定な状態の維持といった従来のロボット技術の前提とは異なる条件で稼働することが求められる。新しいロボットが必要とする機能は、人間をはじめとする生物が既に獲得している機能であり、生体の機構、制御機能を取り入れることで新しいロボットの発展に大きく寄与できると考えている。

従来のロボット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が、一方ヒトの上肢、下肢を始めとし

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。また、筋は片側にのみ力を発揮するアクチュエータであるから、対を作って拮抗駆動を行なう。さらに筋は特徴的な粘弾性を持っており、これらが生物の機能特性に大きな影響を与えている。

生物のアームモデルの特徴をまとめると、(1) 非線型粘弾性、(2) 拮抗駆動、(3) 二関節同時駆動の3つを大きく抽出できる。本論文では生物の特徴としてこれらを取り入れたロボットアームと、その特性に関して論ずる。

1.2 生物の機構の応用に関する既存研究 Ingen Shenau によって二関節筋が体幹部で発生した力の伝達機構として働いていることが指摘された⁽²⁾。Hogan らによって手先インピーダンスの制御にかん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が示された⁽³⁾⁽⁴⁾。また、Mussa Ivaldi らによって姿勢による手先のスティフネス楕円体の変化が実験的に示された⁽⁵⁾。Kumamoto らは二関節筋が平面運動においてのみ働くことから、3対6筋の実行筋によるモデル化とこれによる手先出力及び手先剛性の特性を解析及び実験によって示した⁽⁶⁾。

二関節筋をはじめとした生体機構を応用したロボットの事例としては、門田らによって二関節筋を含む3対6筋を機械的に実現したロボットアームが提案された⁽⁷⁾。また小田らは二関節筋をバネによって置きかえた跳躍ロボットを開発した⁽⁸⁾。大島らは下腿の二関節筋である腓腹筋をワイヤで置き換えたモデルを提案し、これを実機において検証した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、Niiyama らによって空気圧アクチュエータとバネを組み合わせた下肢ロボット Mowgli が開発され、ロバストな着地運動が可能であることを実証した⁽¹¹⁾。

筆者らは過去の研究において、筋の粘弾性と釣合いを利

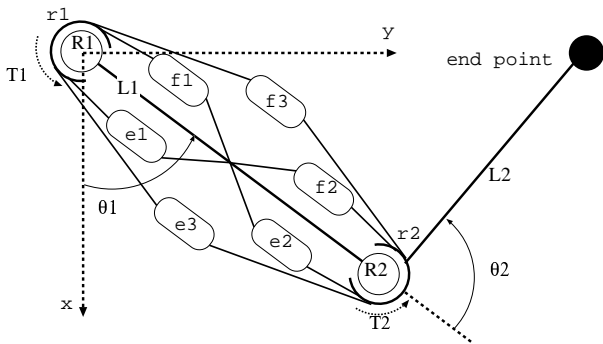


図1 一関節筋及び二関節筋を持つ2リンクアームモデル
Fig.1. Two joint link model with both mono-articular muscles and bi-articular muscles

用したFF軌道追従制御アルゴリズムを提案し、筋収縮力のFF入力のみで軌道追従と外乱抑圧が可能であることを示した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。人間の制御モデルとしてλモデルが知られている。λモデルにおいては、神経系まで含めた系において釣り合い位置が生じることが示されており、Micheauらは足首関節における、体のバランス制御に関して述べている⁽¹⁴⁾。

2. 3対6筋を持つアームモデル

図1に示すように、生物のアームは平面運動に限定した場合の二関節筋を含む2リンクのモデルに単純化することができる⁽⁶⁾。ここでf1,e1は関節R1を駆動する一関節筋、f2,e2は関節R2を駆動する一関節筋、f3,e3は二関節筋である。f1とe1、f2とe2、f3とe3はそれぞれ拮抗対を作り、拮抗駆動を行なう。

アームモデルの各関節トルクは T_1, T_2 は以下のような式(1)と表わすことができる。式より明らかなように、二関節筋は各関節に同時に同じ力を発揮する。

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

ここで、 r_1, r_2 は各関節の半径、 F_{msls} は各筋の出力を示し添字は図1の各筋に対応する。

筋は異なる粘弾性を持つアクチュエータと捉えることができる。各筋の出力 F は式(2)と表わすことができる⁽¹⁵⁾。またこの模式図を図2に示す。

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

ここで、 k, b はそれぞれ弾性、粘性の比例定数である。また u は収縮力であり、筋の活性レベルによって定まる内部的な力である。また粘性及び弾性は収縮力に比例する。収縮力は能動的に指定できる力であり、筋を模擬するロボットアームでも入力指令として用いる。

3. 製作したロボットアーム

図3に製作したロボットアームの外観を示す。このロボッ

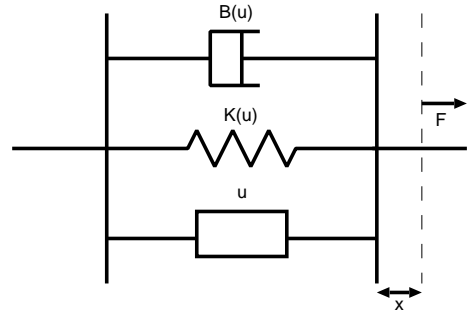


図2 筋の粘弾性モデル
Fig.2. Viscoelastic model of a muscle

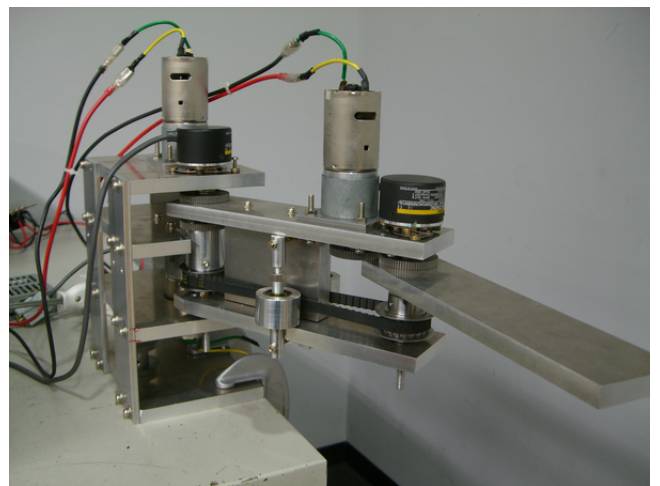


図3 ロボットアームの外観
Fig.3. A photo of actual robot arm

トは前述のモデルの実装の一例となるものであり、生物のアームの持つ3つの特徴を以下のように実現している。

非線型粘弾性 本機では図4のブロックのように式(2)によって示された筋粘弾性を模擬する。筋の収縮力のみを指令として与え、筋の収縮量に関してはエンコーダより各軸の回転角を検出し、これより求める。

拮抗駆動 DCモータを各拮抗対と見たることにより、3個のDCモータによって3対6筋を表す。ということで各拮抗対に関しては、出力が釣り合っている際にはモータの出力が0となる。ただし、二関節筋と一関節筋の間の拮抗駆動に関しては備えている。

二関節同時駆動 プーリとタイミングベルトによる機構によって、二関節筋同様に両関節に力伝達する⁽¹²⁾。ただし、この機構は完全なものではないため、ソフトウェアによる補償を必要とする。

全体の制御システムは図5に示される。上位の制御系(high-level controller)からは筋収縮力が計算されて、渡される。Muscular Unitおよび、計算された筋の出力を各モータに配分するためのForce Distributorを通じてトルク指令としてモータに出力される。各モータは理想的に振る舞う

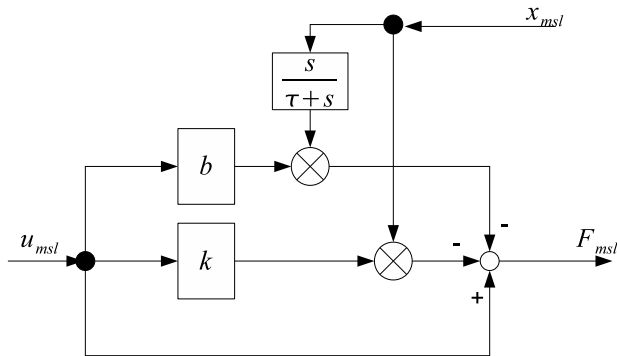


図 4 粘弾性を作る制御ブロック

Fig. 4. Block diagram to realize muscular viscoelasticity

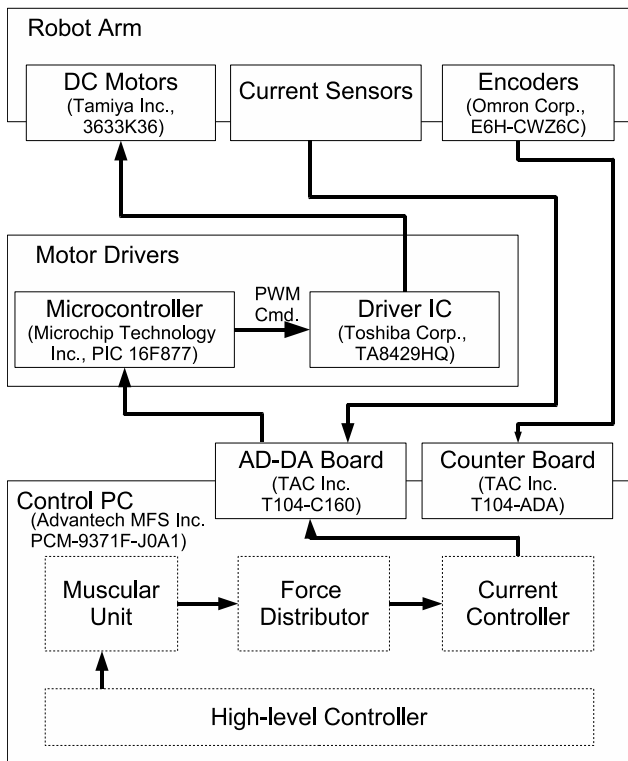


図 5 全体のコントロールシステム

Fig. 5. Whole control system of proposed robot arm

よう電流制御が施される。

4. 筋の粘弾性と釣り合い特性の解析と検証

4.1 提案した FF 軌道追従アルゴリズムの外乱抑圧性能の検証 釣り合い特性を活かした FF 軌道追従アルゴリズムの外乱抑圧性能に関して以下に検証を行なう。提案手法は目標軌道から適当な中間点を抽出し、各中間点の間をなめらかに通過するように、その間の筋収縮力の組を求めるものである。今、各拮抗対の収縮力の和を S_n 、差を D_n とする。各拮抗対が駆動する慣性モーメントを I_n とすれば、式 3 のような運動方程式を定めることができる⁽¹³⁾。

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_2	0.1[m]
k	3.3[N/m]	b	5.0[N · s/m]

$$I_n \ddot{\theta}_{n,m} = r D_{n,m} - k r^2 \theta_{n,m} S_{n,m} - b r^2 \dot{\theta}_{n,m} S_{n,m} \quad (3)$$

ここで、 $\theta_{n,m}$ は m 番目から $m+1$ 番目に向かう拮抗対の関節角を、 $\theta_{n,m}^*$ を、 m 番目の中間点の位置を示す。式 (4) 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。

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

釣り合い位置が $\theta_{n,m}^*$ に重なるように $D_{n,m}$ を定める。

$$D_{n,m} = k r S_{n,m} \theta_{n,m+1}^* \dots \dots \dots (5)$$

各拮抗対に収縮力を与える時間は、式 (6) のように定義する。 α はこの時滑らかさを定める定数である。ここでは $\alpha = 1$ とし、これはシステムの立ち上がり時間に等しい。

$$T_{n,m} = \frac{\alpha I}{b r^2 S_{n,m}} \dots \dots \dots (6)$$

シミュレーションモデルとしては、各リンクを幅や厚みのない一様な棒としたモデルを用い、各パラメータは表 1 とする。目標となる軌道は $(\frac{x-0.3}{0.6})^2 + (\frac{y-0.6}{0.2})^2 = 1$ とし、中間点を均等に 40 点取ってアルゴリズムを適用した。この結果を図 6 に示す。まずアームの重量とノミナルモデルが一致する場合に関して提案手法を適用したものを図の (A) に示した。またこの際に入力されたトルクを記録し、これをフィードフォワード入力したものを図の (B) に示す。次に、実際のアームの重量をノミナルモデルに比べて m_1, m_2 とともに 1.1 倍として (C) 及び (D) において比較を行なった。提案手法に関しては 2 倍、10 倍としたものを重ねて表示している。単にトルクをフィードフォワードしたのみでは、外乱によって完全に目標軌道から外れていってしまうが、収縮力をフィードフォワードする場合には、良好な外乱抑圧特性が得られていることが分かる。

4.2 様々な入力パターンによる特性変化

上記のように釣り合い位置を目標位置とするように収縮力を定めれば、あらゆる位置から簡易に point to point 制御を行なうことが可能である (図 7)。しかしながら、式 (4),(5),(6) のアルゴリズムでは、目標値までの動作の挙動を同じくするように定めているので同じ軌道で例えば早く運動するといったことは困難である。 α の値を変更する場合、動作の滑らかさや追従性が悪くなるといった問題が生じる。また、 S_n を今回定めるよりも大きくなるように定めても、粘性項が $b S_n$ によるため、速度が一定以上大きくなれないという問題が生じる。入力値のパターンをうまく調整することで簡便性を損なわずに様々な運動を実現できると考えられる。

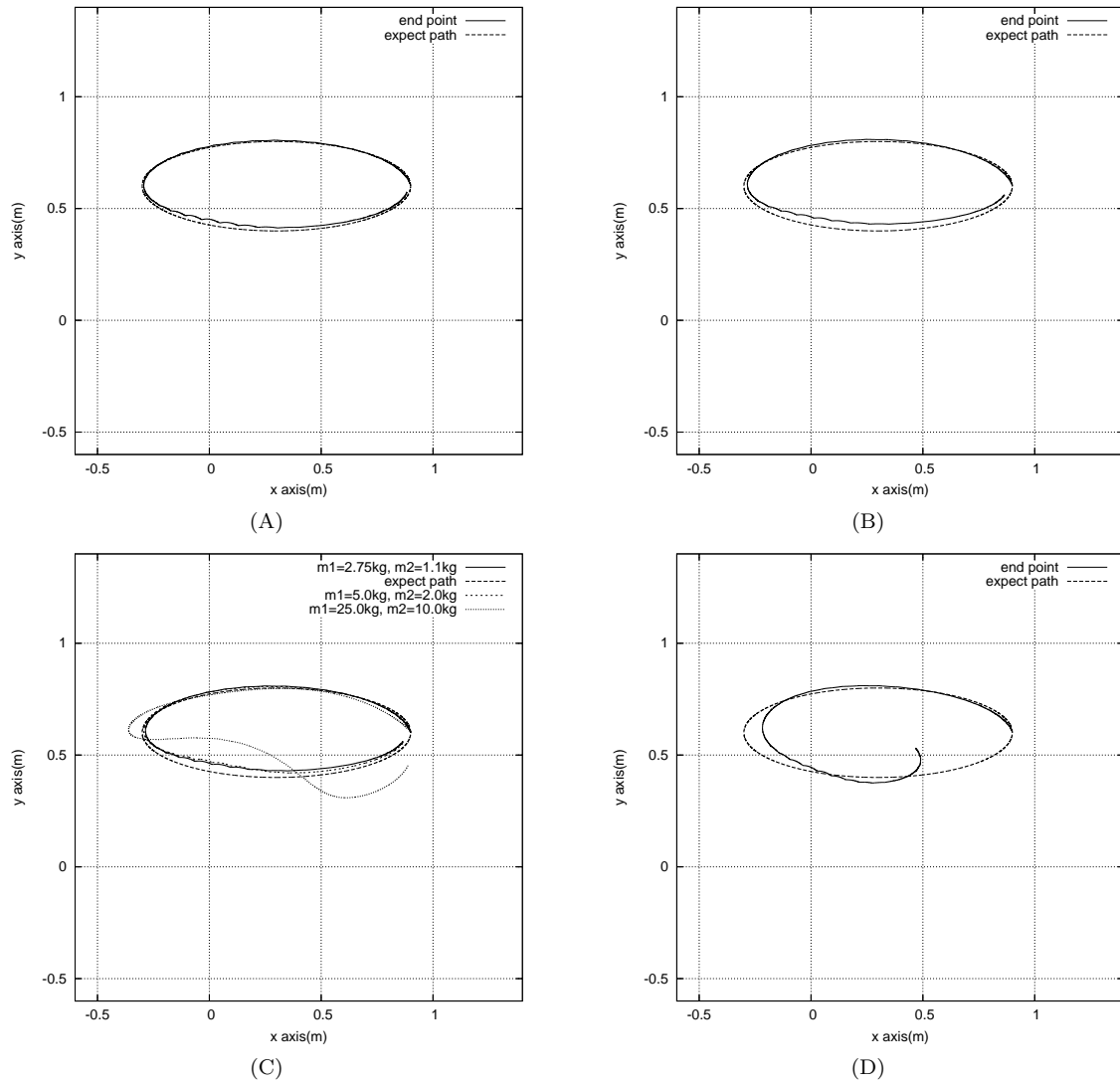


図 6 収縮力を FF する手法とトルクを FF する手法の比較

Fig. 6. A Comparison between feedforward contractile force algorithm and feedforward torque algorithm
 (A) and (C) use proposed algorithm which feedforward contractile force. In (B) and (D), recorded torque is feedforwarded. In (A) and (B), actual mass equals to nominal mass. In (C) and (D), actual mass is changed.

以下に試行錯誤的に作成したいくつかのパターンについて述べる。図 8 のように、手先の目標位置が $x, y = 0, 0.6$, $(\theta_1, \theta_2 = 0.5, 2.1)$, 初期位置が $x, y = 1.2, 0$ ($\theta_1, \theta_2 = 0, 0$) となるように調節したパターンを各自入力する。ここで、(A) は前述のアルゴリズムで生成したパターン、(B) はここで得た収縮力を 1/10 したパターン、(C) は 0.5 秒まで 1/10 の収縮力を入力し、その後 1 倍の収縮力に切り替えたもの、(D) は途中で収縮力を入力するのをやめ、完全に慣性で運動させるようにしたもの、とした。(A),(B) の比較から明らかのように、収縮力を弱めることで系の運動は振動的となるためアームはうまく静定せずに動揺してしまう。しかしながら、粘性項が大きくなり過ぎて速度を殺すことはないため、立ち上がりにはメリットがある。そこで、(C) のよ

うに立ち上がりの収縮力を減らし、ある程度目標に近づいたところで収縮力を与えるという方法を取ることで、立ち上がりの速さと、静定の速さを実現することができる。(D) は途中慣性で動く部分を設けたものであるが、比較的慣性モーメントの大きい R1 に関してはうまく立ち上がることができているが、全体としては余り改善していない。

収縮力を入力として用いることで、アームの軌道追従制御を簡便に行なうことができるが、収縮力を大きくすると粘性項も同時に増大するという筋の特徴から速度と追従性を同時に求めるのは難しい。本提案では積極的に収縮力の和の大きさを変更することで、これらのある程度解決することができる可能性を示した。

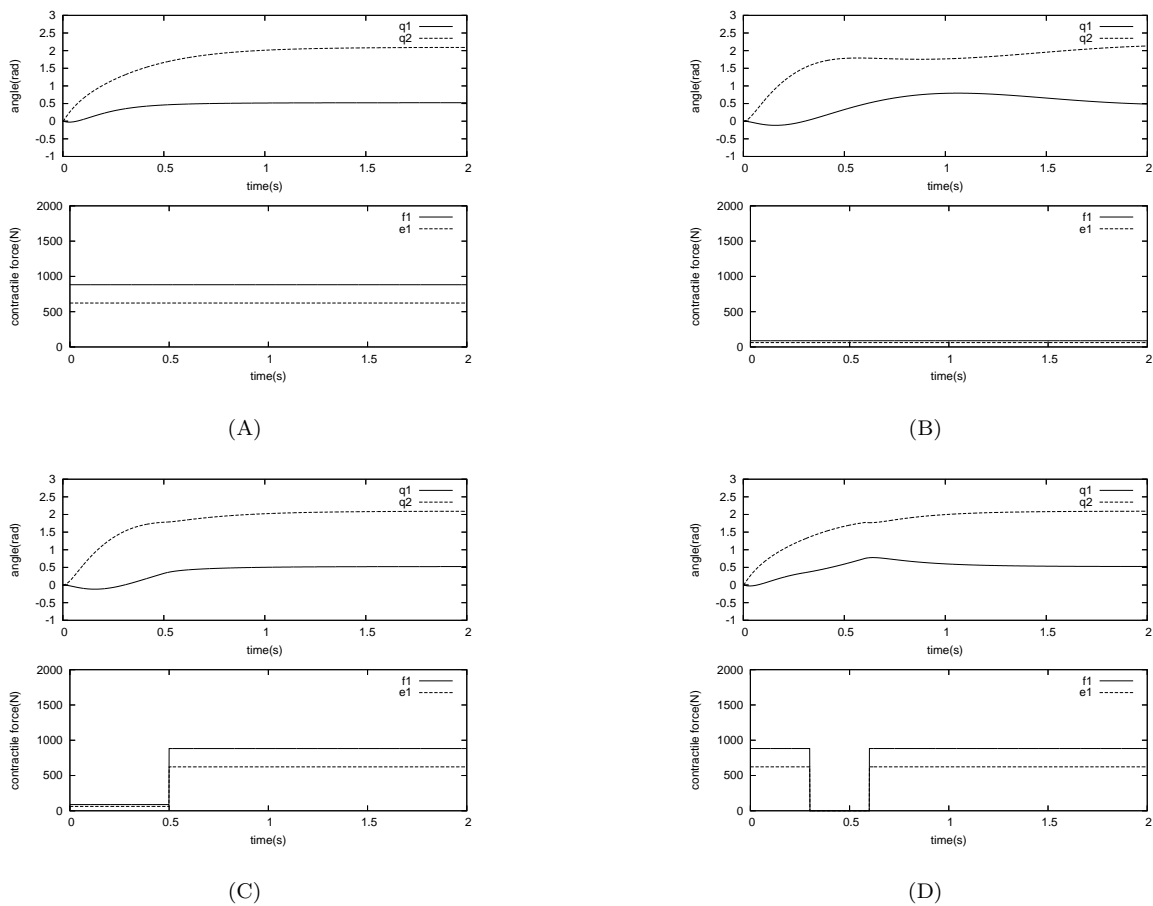


図 8 様々な収縮力パターンを与えた際のシミュレーション結果
 Fig. 8. Simulation results which various contractile force patterns are given

5. まとめ

本論文では生物の特徴である非線型粘弾性、拮抗駆動、二関節同時駆動に関して述べ、これを実装したロボットアーム及び特性を活かした駆動法の検証等に関して述べた。駆動法に関しては、トルクのみをフィードフォワード入力する手法との比較によって、収縮力の入力によって筋粘弾性が外乱抑圧と軌道追従に大きな役割を果たしていることを明らかにした。また、素早い動きの実現のためにいくつかの簡易なパターンの入力で、アルゴリズムの簡便性を損なわずに性能の改善を図り、一定の効果が期待できることを確認した。

参考文献

- (1) Ministry of Economy, Trade and Industry, “White Paper on manufacturing“, 2007 (in Japanese)
 経済産業省, “ものづくり白書”, 2007
- (2) G. J. van Ingen Shenau, M. F. Bobbert and R. H. Rozendal, “The unique action of bi-articular muscles in complex movements”, *Journal of Anatomy*, 155, pp. 1-5, 1987
- (3) 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
- (4) Neville Hogan, “On the stability of Manipulators Performing Contact Tasks”, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 6, pp. 677-686, 1988
- (5) 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
- (6) Mizuyori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto, “Control properties induced by existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles-Mechanical engineering model analyses”, *Human Movement Science* 13, pp. 611-634, 1994
- (7) Kenji Kadota, Kenya Suzuki, Zenrou Fukai and Takahiro Oda, “Study on the basic robot platform model HIPRO using bi-articular muscles functions

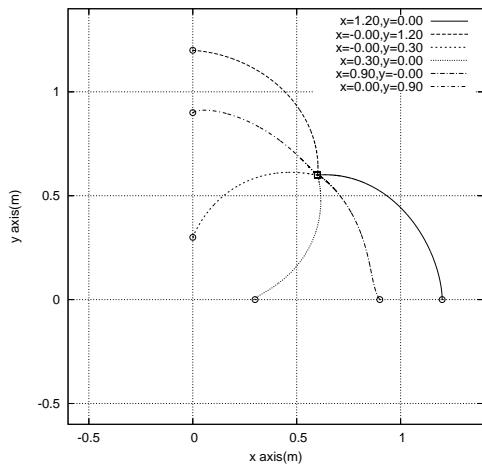


図7 一定の収縮力を与えた際の手先の奇跡

Fig. 7. Trajectories of end point when constant contractile forces are given

△ means initial position of end point of arm. □ is equilibrium position derived by contractile forces. In each case end point move to equilibrium position clearly.

- Evaluation of bi-articular muscles functions by the robot arm using VEA - “, The Japan Society for Precision Engineering, Committee of Biological Control System and Its Applied Technology, 2004.10

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 二関節筋実利用 Workshop, 2003

- (8) Takahiro Oda, Mamoru Tokita, Kenji Kadota, Kenya Suzuki, Zenrou Fukai and Koukichi Simada, “Coordination control model - Robot Leg using bi-articular muscle functions - ”, The Japan Society for Precision Engineering, Committee of Biological Control System and Its Applied Technology, 2005.8

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

- (9) Toru Oshima, Noboru Momose and Kiyoshi Toriumi, “Jump mechanism using coordination in knee and ankle joint and application to leg orthosis” , The 2005 International Power Electronics Conference, 2005
- (10) Seiji Toriumi, Toru Oshima, Tomohiko Fujikawa, Mizuyori Kumamoto and Noboru Momose, “Effect of the Bi-articular Gastrocnemius Muscle of

Human on the Jump Movement of the Model”, Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol. 69, No. 688, pp. 3263-3268, 2003

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備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

- (11) Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, Yasuo Kuniyoshi, “A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007
- (12) Kengo Yoshida, Naoki Hata, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “A Novel Design and Realization of Robot Arm Based on the Principle of Bi-articular Muscles”, Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2006
- (13) Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, “Novel FF Control Algorithm of Robot Arm Based on Bi-articular Muscle Principle - Emulation of Muscular Viscoelasticity for Disturbance Suppression and Path Tracking -”, IEEE IECON 2007, 2007
- (14) Philippe Micheau, Aymeric Kron, Paul Bourassa, “Evaluation of the lambda model for human postural control during ankle strategy”, Biological Cybernetics, 89, pp. 227-236, 2003
- (15) K. Ito and T. Tsuji, “The bilinear characteristics of Muscle-Skeletomotor system and the application to prosthesis control”, The Transactions of the Electrical Engineers of Japan 105-C(10), pp. 201-208, 1985
- 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