

模擬生体アクチュエータ装備協調制御ロボット

東京大学大学院工学系研究科 吉田 憲吾, 内田 利之, 堀 洋一

1. はじめに

近年、ヒューマノイドロボットをはじめとして生物の外観を持つロボットは数多いが、それらは生物とは全く異なる機構・原理によって駆動されている。一般のロボットは正確に同定されたモデルと、十分高速なフィードバックによって制御されている。一方生物はというと、目や三半器官といった感覚器で受けとった情報がフィードバックされているのは明らかであるが、それが実際の運動器官に渡るまでにロボットとは比べものにならない遅れがあり、基本的な制御機能の大部分はフィードフォワードによっていると考えられる。しかしながら、生物は環境やモデルの変化にも強いロバストな制御機能を持っており、その能力はより末端に近い領域に備わっていると考えられる。近年、生物の四肢の制御機能に関して、これをその機構面から明かにしようとする取り組みが活発になされるようになってきた。

Kumamoto らによって生物の四肢の二次元運動の機能の点から、二関節筋と一関節筋からなる 3 対 6 筋の実行筋によるモデル化を行ない、その手先出力及び手先剛性に関する考察及び検証が行なわれた [1]。また二関節筋の仕組みを取り入れたロボットアームとしては門田、小田らによって BiCCOM ロボットアーム、ロボットレッグとして実現され二関節筋の機能が検証された。また大島らによって下腿の二関節筋であるひふく筋による跳躍モデルから、アニマル型跳躍ロボットが開発され跳躍メカニズムの検証がなされた [2]。

我々は特に筋の配列及び筋の粘弾性に着目し、これらが制御機能に及ぼす影響を生物の持つ機構を模擬するロボットによって実証する取り組みを行なっている。2 章では実行筋モデルに基いた筋とアームのモデルに関する説明を行なう。次に 3 章にて我々が製作した模擬生体アクチュエータを備えたロボットアームに関して説明する [3]。さらに 4 章にて提案する駆動手法が実行筋のフィードフォワード制御のみによって、モデルの外乱に対してロバスト性を持っていることを示す。

2. 筋とアームのモデル

図 1 に生物の筋を模式的に表わす。生物の筋は可変の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すことができる。出力を F とすれば式 (1) と表すことができる。

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

パネ成分、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。収縮力 u は筋の活性レベルに比例するため、これ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。

次に実行筋の考えを取り入れたアームモデルを図 2 のように表す。図 2 の e_1, f_1 は関節 R_1 に働く一関節筋、 e_2, f_2 は関節 R_2 に働く一関節筋である。また、 e_3, f_3 は関節 R_1, R_2 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。

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 R_1, R_2 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 (2) と表わされる。

$$T_1 = (F_{f_1} - F_{e_1})r_1 + (F_{f_3} - F_{e_3})r_1$$

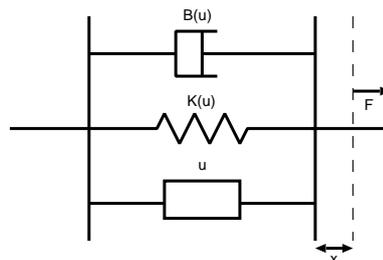


図 1: 筋肉のモデル図

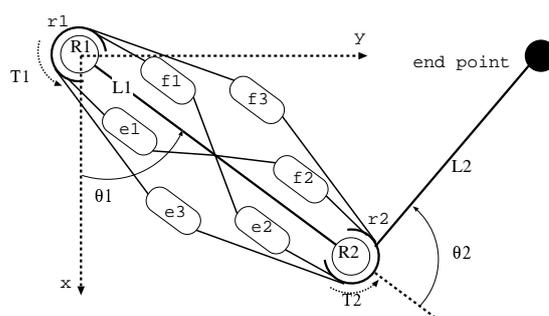


図 2: 3 対 6 筋を持つアーム機構

$$T_2 = (F_{f_2} - F_{e_2})r_2 + (F_{f_3} - F_{e_3})r_2 \quad (2)$$

3. 模擬生体アクチュエータを装備したロボットアーム

3.1. 模擬生体アクチュエータの実現

模擬生体アクチュエータとして二関節同時駆動機構及び、筋の粘弾性を模擬したアクチュエータについて示す。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、二つの関節に跨が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。また通常の電磁アクチュエータは筋の粘弾性を持たないため、ソフトウェアによる制御によって筋の粘弾性を模擬させることを考える。

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。

という点が挙げられる。生物の二関節筋と同様にリニアアクチュエータを直接二つの関節を駆動するように接続する方法、動滑車と直動型アクチュエータを用いる方法 (図 3) などが考えられる。しかしながら、機構が複雑になり、重量がかさ

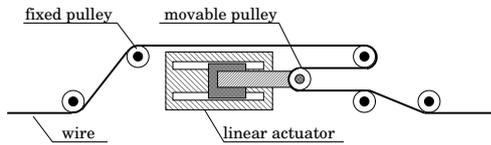


図 3: 動滑車を用いる二関節同時駆動機構

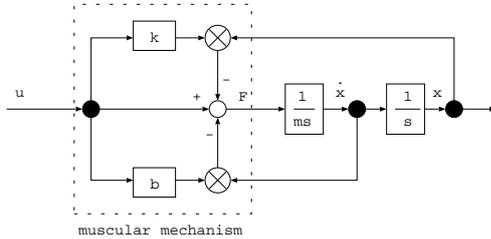


図 4: 筋の粘弾性を実現するメカニズム

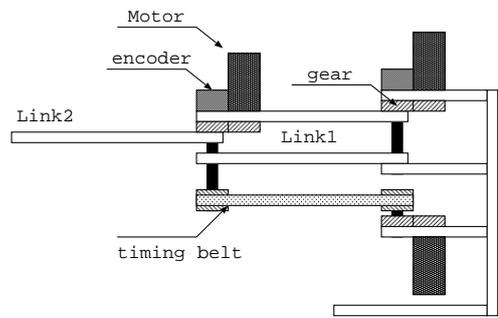


図 5: 今回制作するロボットアームの概形

表 1: 各アームモデルの比較

-	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				×

む、アクチュエータに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。

次に式 (1) で表わされるような筋の粘弾性を模擬するアクチュエータの実現について示す。単純な機構のまま、粘性、弾性を同時に実現し、広い範囲で特性が実現できるようにするため、電磁アクチュエータを図 4 で示すようなブロック図を用いて制御する。通常は変位をエンコーダで取得し、そこから変位の速度を計算しフィードバックする。図中 ⊗ とある記号は入力値を掛け合わせて出力することを示す。

3.2. 模擬生体アクチュエータを備えたロボットアーム

今回製作したロボットアームは図 2 のモデルを完全に実現するロボットアームへ至るプロトタイプとして位置づける。実行筋モデルを備えたアームの静的・動的な特性の検証ももちろんであるが、他に冗長にアクチュエータを組み合わせるロボットに関する実務的な知見を得ることも目標とする。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うことにする。

制作したロボットアームの模式図を図 5 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、2 組の一関節筋による拮抗対、1 組の二関節筋による拮抗対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。

また、全体の制御ダイアグラムを図 6 に示す。図中 Contractile Force Generator で、フィードフォワード入力となる筋の収縮力を生成する。 S_n, D_n とあるのは拮抗対の収縮力の和と差であり、拮抗対の出力と粘弾性の取り扱いを容易にするために導入した。その後 Antagonistic Muscle Module とあるのが拮抗対の粘弾性を実現するブロックである。図 4 は単体の筋に対応するが、これを拮抗対に拡張したものとなっている。今回製作した二関節同時駆動機構は完全なものではないので、Force Distributor によって各モータに出力を振り分ける。各モータは電流制御がほどこされて制御される。

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 5 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一部の機能を仮想的に実現している。表中 ⊗ は存在する、× は存在しない、は仮想的に実現する、ということを示す。

図 8 に示されるように実際にロボットアームを製作した。図 5 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。ロボットの本体はアルミ製で各リンクの長さは 200mm 全高はおよそ 250mm である。アクチュエータとしては DC モータ (540K75, Tamiya) を使い、エンコーダと電流センサを備える。制御はリアルタイム OS である Art-linux を使い、各モータドライバに指令を与える。

4. 筋の粘弾性を生かした駆動手法

各筋の収縮力を適当に定めると、それに応じた釣り合い位置を一意に定めることができ、アームはその釣り合い位置に向かって動こうとする。収縮力の与え方を変化させることによって釣り合い位置を変化させ、それに沿って駆動させるということが可能である。この性質をうまく活かし、任意の軌道に対して追従制御を行なう新しいアルゴリズムを提案する。

任意の軌道が与えられた際にこれを適当な区間に分割し、それぞれに筋の収縮力を定める。各関節が仮想的な質量を駆動するとし、各拮抗対に関する運動方程式を式 (3) のように考える。

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

ここで、 I_n は n 番目の拮抗対が駆動する仮想的な慣性モーメント、 $S_{n,m}, D_{n,m}$ はそれぞれ n 番目の拮抗対の m 番目の区間における収縮力の和、及び差である。式 (3) を元に収縮力の和を適切な追従、外乱抑制の性能が得られるように定め、収縮力の差を目標位置となる釣り合い位置から定める。

この手法をシミュレーションで確認した結果を図 7 に示す。筋の収縮力をフィードフォワードで与えるのみならず、モデルの変化にも強く、与えられた軌道を追従できることを

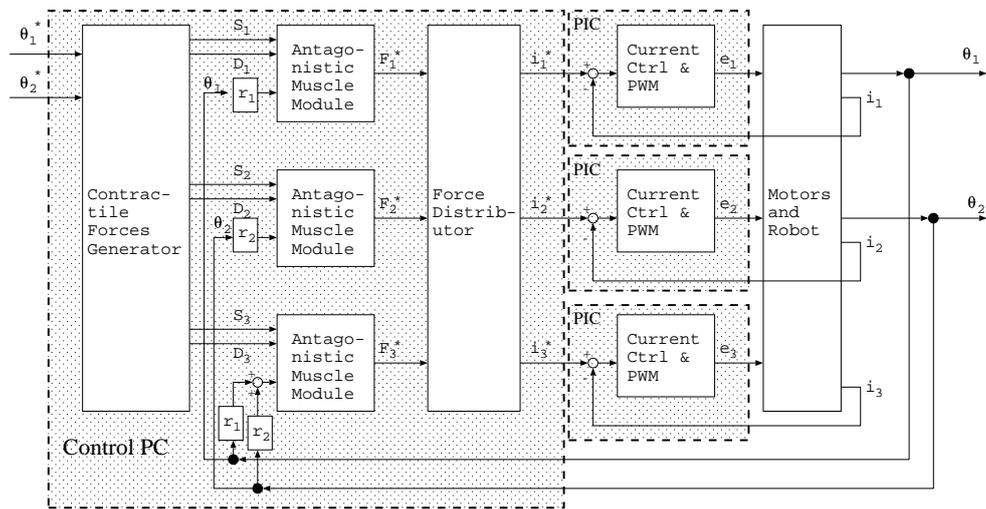


図 6: 全体の制御ダイアグラム

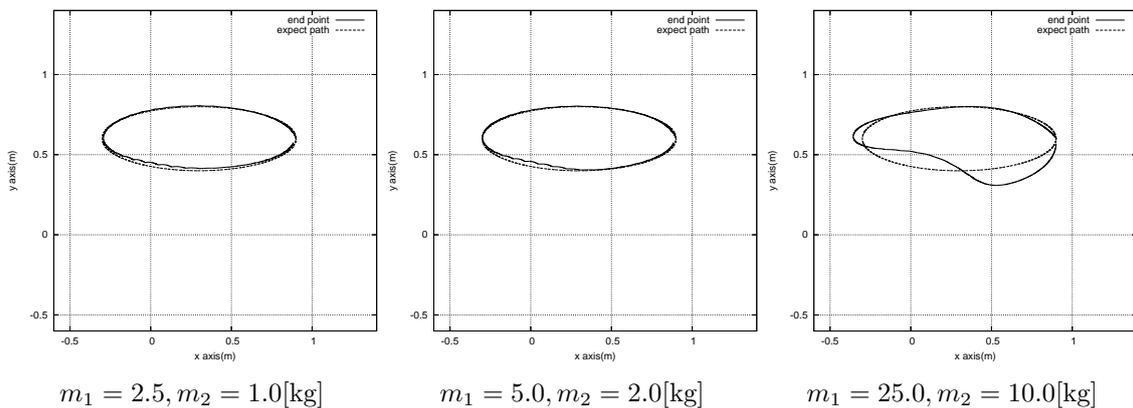


図 7: リンクの質量を変化させた場合のシミュレーション結果

示した。これは筋の粘弾性がそれぞれフィードバック的に働き目標軌道から外れた際に、そちらに戻そうとする力が働くためである。シミュレーションではリンク L_1, L_2 の重量をそれぞれ $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0$ [kg] としてフィードフォワード入力を作成し、実際には重量を 1 倍、2 倍、10 倍と変えて行なった。シミュレーションではモデルが想定した重量の倍になっても、十分に追従することのできる性能を示している。

5. まとめ

本稿では模擬生体アクチュエータを備えたロボットアームの製作に関して、二関節筋を模擬する二関節同時駆動機構および、筋の粘弾性を持つアクチュエータの仮想的な実現について紹介した。また、このような筋の粘弾性を持つアクチュエータを備えたロボットアームにとって有効な、フィードフォワードアルゴリズムを説明し、これが良好な軌道追従特性、外乱抑圧特性を持つことをシミュレーションによって示した。

参考文献

- [1] 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, pp611-634, 1994

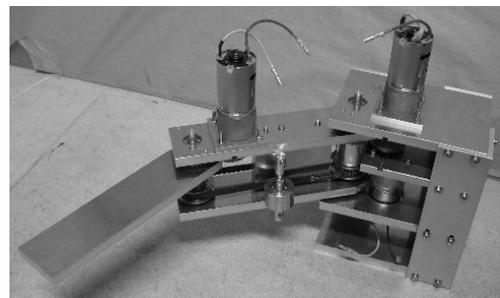


図 8: ロボットアームの機械部分

- [2] 熊本 水頼, "ヒューマノイド工学", 東京電機大学出版会, 2006
- [3] 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. 12