

二関節筋を利用したロボットアームの特性に関する考察

吉田 憲吾*, 堀 洋一 (東京大学)

Consideration on Properties of Robot Arm Using Bi-articular Muscles

Kengo Yoshida and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, we considered properties of robot arm using bi-articular muscles. Conventional robot arm has only actuators similar to mono-articular muscles. Existence of bi-articular muscles can give robots animal like movement. We analyzed output forces at end-point of arm in various directions and proposed the robot arm using bi-articula muscles with more balanced output forces. It will be driven by the characteristic going back to home position.

キーワード: ロボットアーム、一関節筋、二関節筋、フィードフォワード、
(robot arm, mono-articular muscle, bi-articular muscle, feedforward)

1 序論

1.1 研究の背景

現在多数のロボットが提案、開発され、産業界を中心に実際に稼働している。一方、福祉ロボット・ロボットスーツといった人間と協働するロボットも登場しはじめている。これら人間と協働するロボットに特に求められる事項として以下のような点を挙げることができる。

(1) 人間程度の正確さで十分であり、工作ロボットのような精密な動作は必要ない。(2) 人間と協働するため、歩行等の特定の動作は素早く行なわれなければならない。(3) 衝突時等における安全性は最優先で考慮されねばならず、必要のない部分の剛性を減らすなどの柔らかさが必要である。

このように、人間と協働するロボットに必要な特徴というのは、まさに生物の持つ特徴である。それでは人間を始めとする生物はどのように、ある程度の正確性を保ち、柔軟性を持った、素早い動作を実現しているのだろうか。しかもある種の特定の動作については、生物はほとんど制御無しで行なっているのである。我々はこれらの特性を生物がその機構によって獲得しているのではないかと考える。

1.2 二関節筋を持つ生物のアーム

我々はこの生物に特有の機構として、生物のアームに存在する二関節筋に注目した。現在一般的なロボットアームの機構としては、関節ごとにトルクを発生するアクチュエータを置くという形状が普通である。しかしながら、人間を始めとした生物の上肢、下肢を見

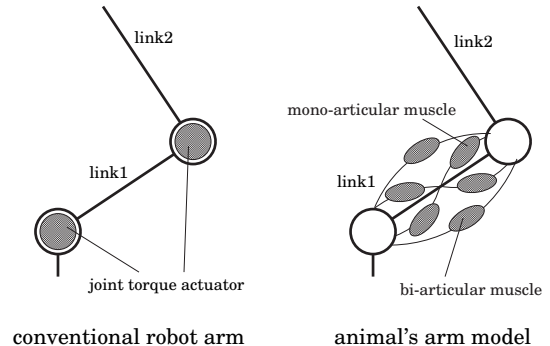


図 1: 従来のロボットアームと生物のアームモデル
Fig. 1 Conventional robot arm model and animal's arm model

ると、各関節のみに働いてトルクを発生させる筋肉（一関節筋）に加えて、二つの関節にまたがり収縮する際に両方の関節に対して同時にトルクを発生するような筋肉（二関節筋）が存在する。（図 1）

この二関節筋の存在によって、一方の関節に協働的に働く時、もう片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ができなくなる。このような一見矛盾的で不要に思われる二関節筋が、生物の運動に関して重要な役割を担っているということが近年認識されてきている。

二関節筋に関する研究として、熊本らにより筋肉のモデルの提案及び、等尺的な条件下においての手先出力、手先剛性等が解析がなされている。結論として二関節筋が四肢末端の位置、力、剛性に関する特異な制

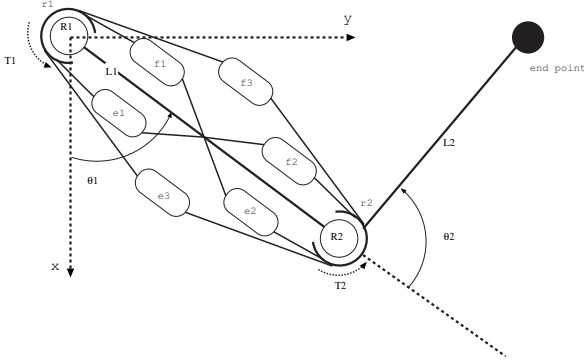


図 2: 生物のアーム機構
Fig. 2 Arm model of animals

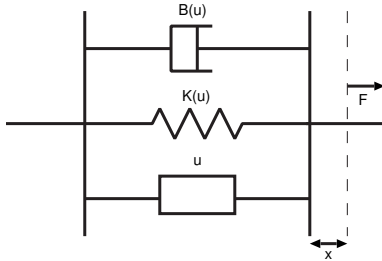


図 3: 筋肉のモデル図
Fig. 3 Model of a muscle

御機能を有していると主張している。[1][2][3]

また大島らによって、四肢の動作において筋電図学的解析による拮抗一関節筋群および、拮抗二関節筋群の協調活動様相についての報告がなされている。[4][5][6]

同様に大島らによって、複数の動物に関して解剖学的に各筋の出力を取得し、これによって手先の力、剛性にどのような特徴を持たらすかが解析された。この結果動物が歩行や走行などの生活様式に合わせた筋配列を持っていることが示された。[7]

2 二関節筋を利用したアーム機構のモデル

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 e_1, f_1 は関節 R1 に働く一関節筋、 e_2, f_2 は関節 R2 に働く一関節筋である。また、 e_3, f_3 は関節 R1, R2 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。

まず生物の筋肉は図 3 のように模式的に表わすことができ、バネ成分、ダンパ成分を持ったアクチュエータとして表わされる。

これを数式で表わすと、出力を F とすれば、式 (1) と表わすことができる。

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

バネ成分、ダンパ成分の係数は筋肉の出力 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。

次に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。各筋の出力を $F_x, (x = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3)$ とすると、式 (2) と表わされる。

$$\begin{aligned} T_1 &= (F_{f_1} - F_{e_1})r_1 + (F_{f_3} - F_{e_3})r_1 \\ T_2 &= (F_{f_2} - F_{e_2})r_2 + (F_{f_3} - F_{e_3})r_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、各拮抗対の筋肉の出力の和と差を式 (3) のように定義する。各筋の出力は $u_x, (x = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3)$ とする。

$$\begin{aligned} S_1 &= u_{f_1} + u_{e_1} \quad , \quad D_1 = u_{f_1} - u_{e_1} \\ S_2 &= u_{f_2} + u_{e_2} \quad , \quad D_2 = u_{f_2} - u_{e_2} \\ S_3 &= u_{f_3} + u_{e_3} \quad , \quad D_3 = u_{f_3} - u_{e_3} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

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

である。

式 (1), 式 (2), 式 (3) より、式 (4) が導かれる。

$$\begin{aligned} T_1 &= r_1 D_1 - kr_1^2 \theta_1 S_1 - br_1^2 \dot{\theta}_1 S_1 \\ &\quad + r_1 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_1 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_1 S_3 \\ T_2 &= r_2 D_2 - kr_2^2 \theta_2 S_2 - br_2^2 \dot{\theta}_2 S_2 \\ &\quad + r_2 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_2 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_2 S_3 \end{aligned} \quad (4)$$

最大努力時においては拮抗関係にある筋 e と f の間に、筋 e の出力を E 、出力の最大値を E_{max} とし、筋 f の出力を F 、出力の最大値を F_{max} とすると、式 (5) という関係がある。

$$\frac{E}{E_{max}} + \frac{F}{F_{max}} = 1 \quad (5)$$

ただし

$$\begin{aligned} 0 \leq E \leq E_{max} \quad , \quad E_{max} > 0 \\ 0 \leq F \leq F_{max} \quad , \quad F_{max} > 0 \end{aligned}$$

3 二関節筋を利用したアーム機構の手先出力の解析

3.1 二関節筋を利用したアーム機構の手先出力

関節 R1, R2 の角度を図 2 のように θ_1, θ_2 とし、またリンク L1, L2 の長さをそれぞれ l_1, l_2 とするとヤコビ行列 J は式 (6) と表わされる。

$$J = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (6)$$

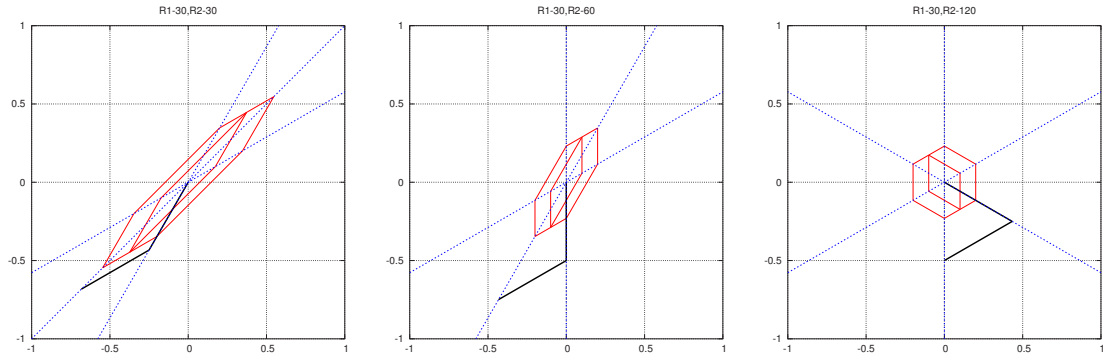


図 4: 二関節筋の仕組みを用いたアーム機構の手先出力

Fig. 4 Output forces at end point of robot arm using bi-articular muscles

Exterior hexagon is output forces with bi-articular muscles and interior quadrangle is output forces without bi-articular muscles

よって、各関節のトルクと手先出力の関係は式 (7) と表わされる。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = (J^T)^{-1} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、式 (2) 及び、式 (7) により、各筋肉の出力が手先に及ぼす力の大きさと向きを式 (8) と示すことができる。ただし $r = r_1 = r_2$ とし、 $\theta_2 = 0, \pi$ の特異点を除く。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} &= \frac{r}{l_1 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} (F_{f1} - F_{e1}) \\ &+ \frac{r}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} (F_{f2} - F_{e2}) \\ &+ \frac{r}{l_2 \sin \theta_2} \begin{pmatrix} -\cos \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \end{pmatrix} (F_{f3} - F_{e3}) \end{aligned} \quad (8)$$

よって、筋 $f1, e1$ による出力の方向はリンク 2 の方向、筋 $f2, e2$ による出力の方向は関節 1 と手先を結ぶ方向、筋 $f3, e3$ による出力の方向はリンク 1 の方向である。

3.2 従来機構と二関節筋を利用したアーム機構の手先出力の比較

各関節に独立にトルクを発生させる従来のアーム機構 (A) と、二関節筋の仕組みを持つアーム機構 (B) について、それぞれ手先出力がどのようになるかを求める。

各関節の角度を様々に変えて、式 (8) に従い解析したものを図示する。手先角度は、R1 の角度を 30 度、R2 の角度を 30 度、60 度、120 度とそれぞれ変えて計算している。

各パラメータは A, B 共通で各腕の長さ l_1, l_2 を $l_1 = l_2 = 1[\text{m}]$ とする。また各関節の半径 r_1, r_2 を $r_1 = r_2 = 0.1[\text{m}]$ とする。

また、A, B それぞれのアクチュエータが発生する最大トルクに関してであるが、A の各関節において発生する最大トルクと、B において一関節筋の効果のみによって発生する最大トルクが等しくなるという条件で解析する。つまり A の結果に二関節筋の効果を加えたものが B の結果である。具体的な数値としては、A の機構においては、各関節において $\pm 0.1[\text{N} \cdot \text{m}]$ の最大トルクを発生させる。B の機構においては、各筋肉が、最大 1N の力を発生する。よって一関節筋 $e1, f1, e2, f2$ によってそれぞれの関節に $\pm 0.1[\text{N} \cdot \text{m}]$ の最大トルクを発生し、二関節筋によってそれぞれの関節に同時に $\pm 0.1[\text{N} \cdot \text{m}]$ を与える。この結果を図 4 に示す。

従来機構に比べて、二関節同時駆動機構を持つアームでは各方向に均等な力を発生することが可能になった。第一関節の角度 θ_1 の方向への力を加えることによって、 $l_1 = l_2, r_1 = r_2$ の条件では、従来機構において力が最小となっていた方向に対して 2 倍の力を得ることができるようになった。

これにより二関節同時駆動機構を持つアームでは、アクチュエータの個数は従来機構に比べて多くなるものの、アクチュエータ自体は出力の小さなものを使うようになる。従来機構で用いたアクチュエータに比べて、2 分の 1 の出力のアクチュエータを組み合わせて、力が小さくなってしまふ部分の出力を同等に引き上げることができる。

4 二関節筋を利用したアーム機構のシミュレーション

4.1 モデル及び運動方程式

まず、ロボットアームのモデルとして、各リンクは幅や厚みのない細い棒として定義する。リンク 1 の長さを l_1 、リンク 2 の長さを 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 l_{g1}, l_{g2} とする。それぞれの重量を m_1, m_2 、関節座標系の原点を中心とする慣性モーメントの大きさを I_1, I_2 とする。

各関節の半径は r_1, r_2 とし、それぞれ重量はないも

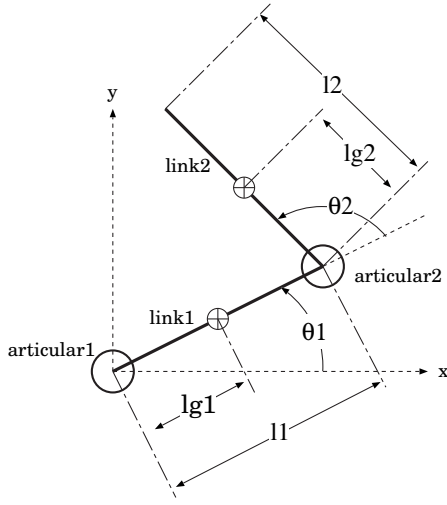


図 5: シミュレーションに用いるモデル

Fig. 5 Simulation model

のとする。また、各関節の角度を θ_1, θ_2 とする。モデルを図 5 のように図示する。

ここで、各関節に働くトルクをそれぞれ T_1, T_2 とし、重力の影響を受けない水平面内の運動のみを考えることにすれば、ラグランジュ法を用いることで式 (9) のように運動方程式を得ることができる。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} m_{11} &= I_1 + I_2 + 2m_2l_1l_{g2} \cos \theta_2 + m_2l_1^2 \\ m_{12} &= m_{21} = I_2 + m_2l_1l_{g2} \cos \theta_2 \\ m_{22} &= I_2 \\ h_{11} &= -m_2l_1l_{g2} \sin \theta_2 (2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ h_{21} &= m_2l_1l_{g2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{aligned}$$

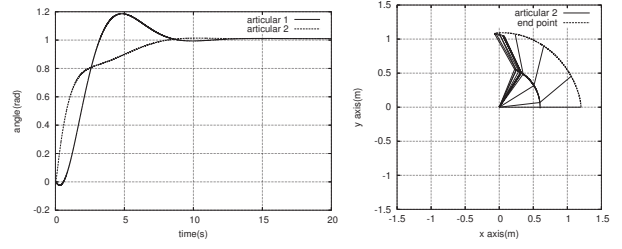
ここでトルク T_1, T_2 は式 (4) のように各筋の出力から求めるようにする。式 (9) を $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ について解き、初期値及び各時間におけるトルクを与えて台形積分を利用してシミュレーションを行なった。

4.2 釣り合いを利用した駆動

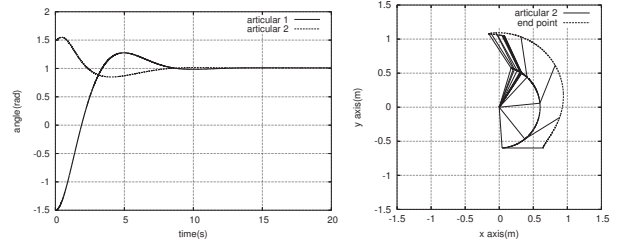
式 (4) を用いて、ある θ_1, θ_2 において $T_1 = 0, T_2 = 0$ となる条件を求めると、式 (10) を得る。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{kr} \frac{(D_1 + D_3)S_2 + (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \\ \theta_2 &= \frac{1}{kr} \frac{(D_2 + D_3)S_1 - (D_1 - D_2)S_3}{S_1S_2 + S_2S_3 + S_3S_1} \quad (10) \end{aligned}$$

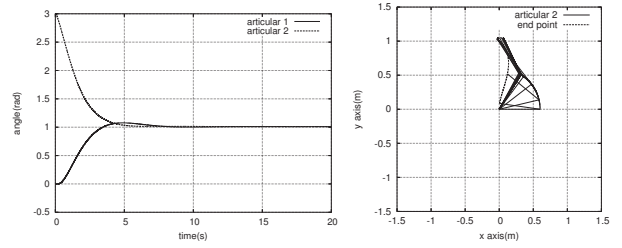
よって、各拮抗対の出力の和、差を決めてやることで釣り合い位置を求め、各筋から一定の出力を与えてやれ



(A) Starting position : $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$



(B) Starting position : $\theta_1 = -1.5, \theta_2 = 1.5$



(C) Starting position : $\theta_1 = 0, \theta_2 = 3$

図 6: 釣り合いを利用した駆動

Fig. 6 Drive of robot arm using “equilibrium”

ば最終的には釣り合いの位置に至る。これを利用して簡単な出力でロボットアームを駆動できることを示す。

出力の和 S_1, S_2, S_3 によって、剛性楕円の形状を求めることができるから、ここではあらかじめ S_1, S_2, S_3 を決めていくつかの例についてシミュレーションすることにする。しかしながら、それでもまだ自由度が一つ余ってしまうので、適宜 D_1, D_2, D_3 を決めることにする。

モデルとなるロボットアームのパラメータについては、各リンクの長さを $l_1 = l_2 = 0.6[\text{m}]$ 、各関節座標系の原点から各リンクの重心までの距離を $l_{g1} = l_{g2} = 0.3[\text{m}]$ 、各リンクの重量を $m_1 = 2.5, m_2 = 1.0[\text{kg}]$ 、慣性モーメントは質量が細長い棒であるリンクに一樣に存在するとして、 $I_1 = 3, I_2 = 1.2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ とし、各関節の半径は $r_1 = r_2 = 0.1[\text{m}]$ とする。また、バネ定数 $k = 3.3[\text{N/m}]$ 、粘性定数 $b = 5[\text{N} \cdot \text{t/m}]$ とする。サンプリングタイムは 0.001 秒としてシミュレーションを行なった。

さまざまな初期位置からの駆動

ある地点からある地点までホームポジション (釣り合い位置) に戻る特性を利用して駆動させることを考

える。筋を一定に出力すれば、初期位置から釣り合いの位置まで駆動させることが可能である。

まず、 $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ とした場合に、 $D_1 = D_2 = D_3 = 5$ とすれば、 $\theta_1 = 1.01, \theta_2 = 1.01$ が釣り合いの地点となる。初期位置をそれぞれ、 $\theta_1 = \theta_2 = 0, \theta_1 = -1.5, \theta_2 = 1.5, \theta_1 = 0, \theta_2 = 3$ と変化させて、シミュレーションを試みた。(図6)

どのような初期位置からでも、ただちに釣り合い位置へと向かうことが分かる。ただし遠い位置から移動した場合には、オーバーシュートが大きくなる傾向がある。また図6(C)のように、腕を曲げた状態からは、まっすぐに腕を伸ばすという運動になることがわかる。

筋肉の出力を変えての駆動

釣り合いを利用した駆動の改善のために、筋肉の出力をあげることを試みる。筋の出力を全体として、それぞれ1/2倍、1倍、2倍、4倍と変化させた場合のシミュレーションを図7に示す。図の(A)は $S_1 = S_2 = S_3 = 5, D_1 = D_2 = D_3 = 2.5$ としたものである。図の(B)は $S_1 = S_2 = S_3 = 10, D_1 = D_2 = D_3 = 5$ としたものでこれを基準とする。図の(C)は $S_1 = S_2 = S_3 = 20, D_1 = D_2 = D_3 = 10$ とし、図の(D)は $S_1 = S_2 = S_3 = 40, D_1 = D_2 = D_3 = 20$ とした。初期位置は $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0$ とした。

このように、出力を上げた場合にはオーバーシュートを小さくすることが可能だが、立ち上がりの時間はそれ程短くなる訳ではない。というのは、粘性要素が筋の出力に比例するために、アームの速度が抑えられてしまうからである。

二関節筋を持つアームと持たないアームの比較

二関節筋を持たないアームについては、式(10)において、 $S_3 = 0, D_3 = 0$ とした時のものであるから、各筋の出力に対する釣り合いの位置を持つ。よって同様に釣り合いを生かした駆動が可能である。

二関節筋を持たないアームとの比較を図8に示す。二関節筋を持つアームでは $S_1 + S_2 + S_3$ 、二関節筋を持たないアームでは $S_1 + S_2$ と、それぞれトータルの出力を揃えることによって比較を行なった。

図8の(A)が $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ とした二関節筋を持つアームの結果である。(B)は $S_1 = S_2 = 15$ とした二関節筋を持たないアーム、それぞれ $\theta_1 = 1, \theta_2 = 1$ という釣り合いの位置になるよう調整した。

このように二関節筋の存在によって、性能を改善できていることが分かる。二関節筋を持たないアームの場合、各リンクが協調せず、別々に角度を調節されるので、慣性モーメントが小さいリンク2が先に静定してしまい、リンク1の動揺によって手先は大きく変動してしまう。一方二関節筋を持つ場合は、協調して運動を行なうためにこのような手先の変動を抑えることが可能である。

5 まとめ

本論文では、二関節筋を利用したロボットアームに関して、静力学的な解析による手先出力に関する考察、

及びシミュレーションによる簡単な筋出力による駆動の解析を行なった。

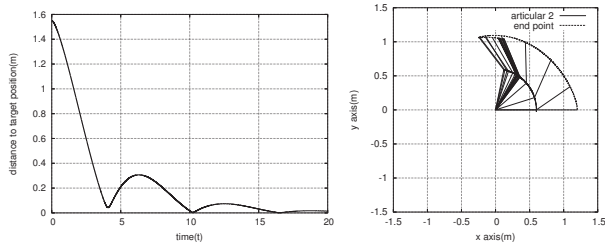
まず手先における出力についてであるが、従来機構に比べ、二関節筋を利用したロボットアームにおいては、手先出力が広い方向に対して大きくなるという結果が得られた。特に最大出力を発揮できる方向以外への広がりが見られ、手先が第一関節に近い場合は、各方向へほぼ均等に出力がみられる。また、手先が遠い場合においては、従来機構において極端に出力の差が生じてしまっていたが、これを改善することが可能となった。

シミュレーションによる解析の結果、式(1)の筋肉モデルを実現するアクチュエータを用いることで、釣り合い位置を指定して駆動するということが可能であることを示した。また、筋肉モデルにおける出力を上げることで、安定な運動を可能にすることを示した。また、二関節筋を持たないアーム機構と比較して、各リンクの協調によって手先位置を調整する際の動揺を自然に抑制することを示した。

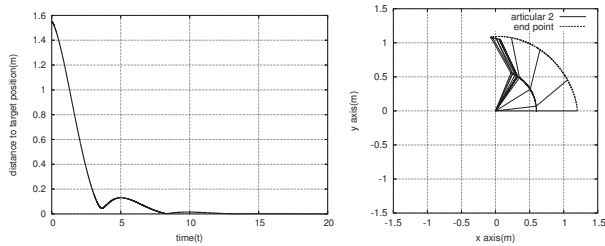
二関節筋を利用したロボットアームのメリットとしては、(1)各方向に対して従来より均等に力を発揮することができる、(2)3筋6対に対応するアクチュエータを持つ場合には、手先の出力と剛性を同時に調整できる、(3)冗長性を持つため、一つのアクチュエータが故障しても十分に動くことができる、といった点が挙げられ、福祉ロボットなど人と協働するロボットとして適していると考えられる。

参考文献

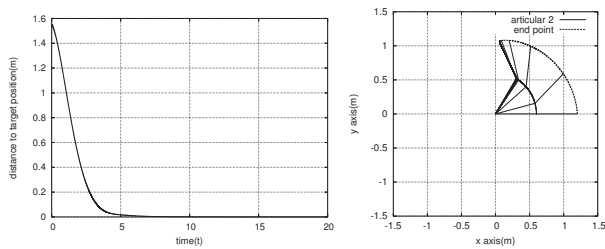
- [1] Minayori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto: "Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles - Mechanical engineering model analyses", *Human Movement Science*, 13, 5, pp. 611-634, 1994.
- [2] 大島徹, 熊本水頼, "二関節筋機能を有するロボットアーム", 日本機械学会論文集(C編), 61巻, 592号, pp. 122-129, 1995.
- [3] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼: "一関節筋および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性", 精密工学会誌, vol. 66, No. 1, pp. 141-146, 2000.
- [4] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼: "一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実行筋力評価", 精密工学会誌, vol. 65, No. 12, pp. 1772-1777, 1999.
- [5] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, 横井信安: "拮抗筋群による協調制御機能", 日本機械学会論文集(C編), 64巻, 607号, pp. 135-142, 1997.
- [6] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, 横井信安: "ヒト上肢における系先端の出力と拮抗筋群の協調活動", 日本機械学会論文集(C編), 65巻, 632号, pp. 253-260, 1994.
- [7] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼: "動物の筋配列による四肢先端の運動学的解析", 日本機械学会論文集(C編), 65巻, 635号, pp. 237-244, 1997.
- [8] 川崎 晴久: "ロボット工学の基礎", 森北出版株式会社, 1991.



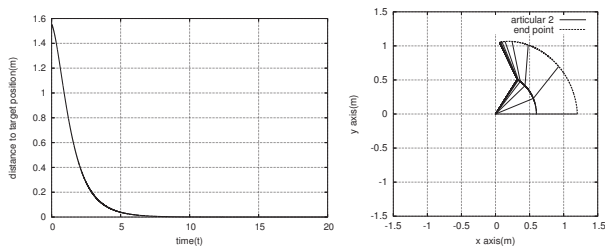
(A) $S_1 = S_2 = S_3 = 5, D_1 = D_2 = D_3 = 2.5$



(B) $S_1 = S_2 = S_3 = 10, D_1 = D_2 = D_3 = 5$



(C) $S_1 = S_2 = S_3 = 20, D_1 = D_2 = D_3 = 10$

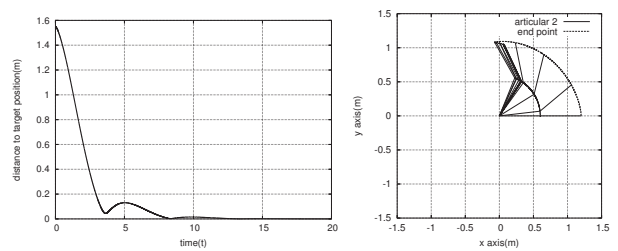


(D) $S_1 = S_2 = S_3 = 40, D_1 = D_2 = D_3 = 20$

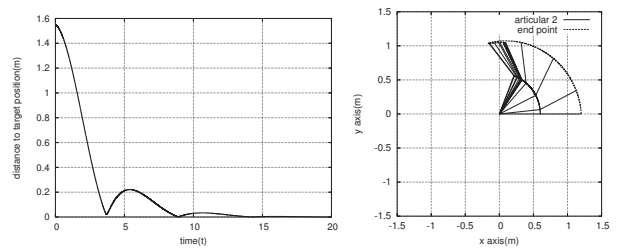
図 7: 釣り合いを利用した駆動 筋肉の出力を変化させての比較

Fig. 7 Drive of robot arm using “equilibrium”
changing outputs of muscles

Graphs left side are described the distance between target position and end point of arm by time. Graphs right side are described the trajectory of arm.



(A) with bi-articular muscles, $S_1 = S_2 = S_3 = 10$



(B) without bi-articular muscles, $S_1 = S_2 = 15$

図 8: 釣り合いを利用した駆動 二関節筋を持たないアームとの比較

Fig. 8 Drive of robot arm using “equilibrium” comparing with robot arm without bi-articular muscles

Graphs left side are described the distance between target position and end point of arm by time. Graphs right side are described the trajectory of arm.