

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 ***

Consideration on Properties of Robot Arm Using Bi-articular Muscles

Kengo Yoshida, Yoichi Hori

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. It can be driven by the characteristic going back to home position. And home position can be determined by the contractile forces of Muscle. We attempted simulations of driving robot arm by the contractile forces of Muscle.

Key words: robot arm, mono-articular muscle, bi-articular muscle, feedforward

1. 序論

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。

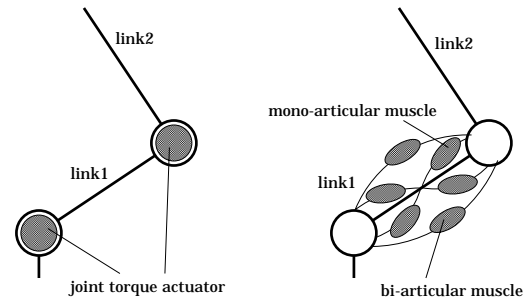
(1) 人間程度の正確さで十分であり、工作ロボットのような精密な動作は必要ない。(2) 人間と協働するため、歩行等の特定の動作は素早く行なわれなければならない。(3) 人間と非常に近い距離で働くので安全性は最優先で考慮されねばならず、必要のない部分の剛性を減らしたり、衝突時に力を逃がすなどの柔らかさが必要である。

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。

1.1 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。(Fig. 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、生物特有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。



conventional robot arm animal's arm model
Fig. 1 Conventional robot arm model and animal's arm model

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

Fig. 2 のように生物のアーム機構を模式的に表わす。

ここで Fig. 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。

まず生物の筋肉は Fig. 3 のように模式的に表すことができ、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。

またこれを式 (1) と表わすことができる。¹⁾

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

* 原稿受付 平成 17 年 6 月 3 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)

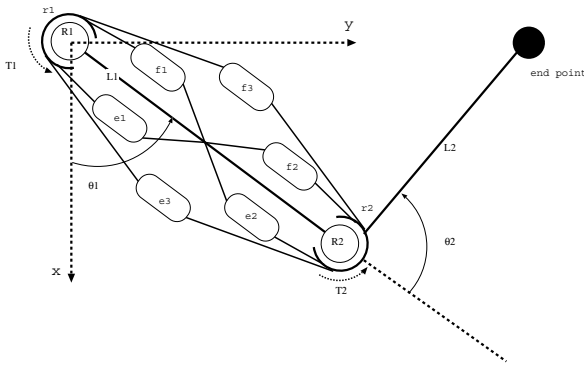


Fig. 2 Arm model of animals

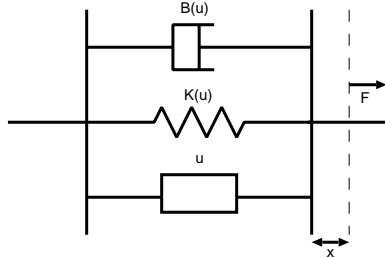


Fig. 3 Model of a muscle

ここでトータル出力を F とし、筋肉の収縮力を u とする。ここで、バネ成分、ダンパ成分の係数は収縮力 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。

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 $F_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ とすると、式 (2) と表わされる。

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

ここで、各拮抗対の筋肉の収縮力の和と差を式 (3) のように定義する。各筋の収縮力は $u_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ とする。

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

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。

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

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。

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

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. 釣り合いによる駆動

3.1 筋の特性による釣り合い位置

それぞれの筋にある収縮力を与えると、筋の弾性によってその釣り合いとなるポイントへ向けて駆動する。式 (4) より、ある筋の収縮力を $T_1 = 0, T_2 = 0$ となる場合の各 θ_1, θ_2 の値を求めると式 (6) を得る。ただし、ここで $r = r_1 = r_2$ とする。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{kr} \frac{(D_1 + D_3)S_2 + (D_1 - D_2)S_3}{S_1 S_2 + S_2 S_3 + S_3 S_1} \\ \theta_2 &= \frac{1}{kr} \frac{(D_2 + D_3)S_1 - (D_1 - D_2)S_3}{S_1 S_2 + S_2 S_3 + S_3 S_1} \end{aligned} \quad \dots \dots (6)$$

次に各筋にある収縮力を与えた場合にロボットアームの様々な姿勢においてどのような方向に力を発揮するかを示す。Fig. 4 に示すように (a) は二関節筋を持たない場合のベクトル線図である。各姿勢での力の向きと大きさを矢印を用いてプロットしている。二関節筋を持たない場合は式 (6) において、 $S_3 = D_3 = 0$ となる場合である。この場合でも釣り合い位置を持ち、その位置は、式 (7) となる。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{kr} \frac{D_1}{S_1} \\ \theta_2 &= \frac{1}{kr} \frac{D_2}{S_2} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (7)$$

また Fig. 4(b) は二関節筋を持つ場合のベクトル線図である。式 (6) より求めた釣り合いの位置をアームを図示して示した。さらに、(c) は二関節筋のみの場合のベクトル線図であり、この場合は釣り合いの位置は一点に定まらない。

$$\theta_1 + \theta_2 = \frac{1}{kr} \frac{D_3}{S_3} \quad \dots \dots \dots (8)$$

このように $\theta_1 + \theta_2$ を一定にするので、図では式 (8) の表す軌跡へとベクトルが向かっていることが分かる。

さて、各筋の収縮力の和及び差を決めてやることにより、一定のポイントへと向かう性質を生かした駆動のシミュレーションを行なう。しかしながら、 θ_1, θ_2 の二つのパラメータを求めれば良いのに対し、指定できるパラメータは $S_1, S_2, S_3, D_1, D_2, D_3$ の6つがある。剛性楕円の形状は、 S_1, S_2, S_3 の3つで定めるからこれを一定と置き、 D_1, D_2, D_3 を適宜定めることにする。

3.2 シミュレーションに用いるモデルと運動方程式

ロボットアームに用いたモデルを Fig. 5 に示す。としては、各リンクを細い棒として考え、リンク 1 の長さを $l_1 = 0.6$ 、リンク 2 の長さを $l_2 = 0.6$ 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 とし、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のとする。

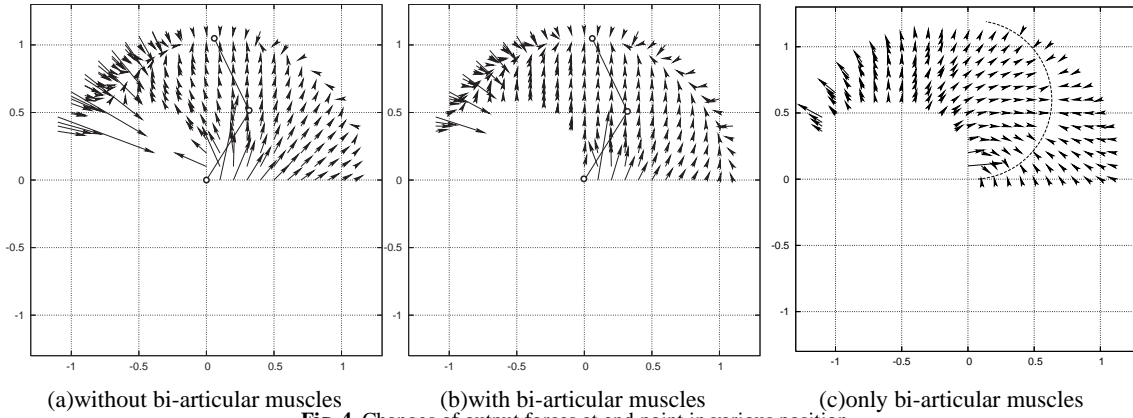


Fig. 4 Changes of output forces at end point in various position

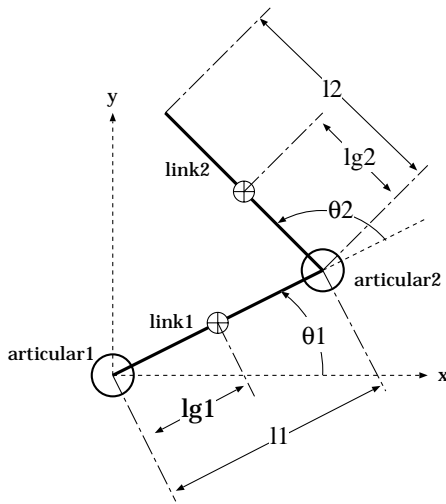


Fig. 5 Simulation model

また、各関節の角度は θ_1, θ_2 とし、各関節に働くトルクをそれぞれ T_1, T_2 とする。ここで水平面での二次元平面運動を考え、重力の影響を考慮しないならば、ラグランジュ法を用いて運動方程式は (9) のようになる。⁸⁾

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

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られる。

式 (9) を $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ 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。

3.3 釣り合いによる駆動のシミュレーション

リンクのパラメータを table1 に示す。今回のシミュレーションにおいては特に断りの無い限りこの値を用いた。

Table 1 Specification of link 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]
I_1	0.3[kg · m ²]	I_2	0.12[kg · m ²]
r_1	0.1[m]	r_1	0.1[m]

3.3.1 目標位置への駆動

どのような地点にあっても、釣り合い位置へとただちに向かう特性を利用したシミュレーションを示す。筋を一定に出力することで、初期位置から釣り合いの位置まで駆動させる。

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。(Fig. 6)

目論見通り、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 Fig. 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。

3.3.2 出力を変えての駆動

釣り合いを利用した駆動について改善のために、筋肉の収縮力の値を大きくしてやることを試みる。筋の収縮力を全体として、それぞれ 1/2 倍、1 倍、2 倍、4 倍と変化した場合のシミュレーションを Fig. 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。

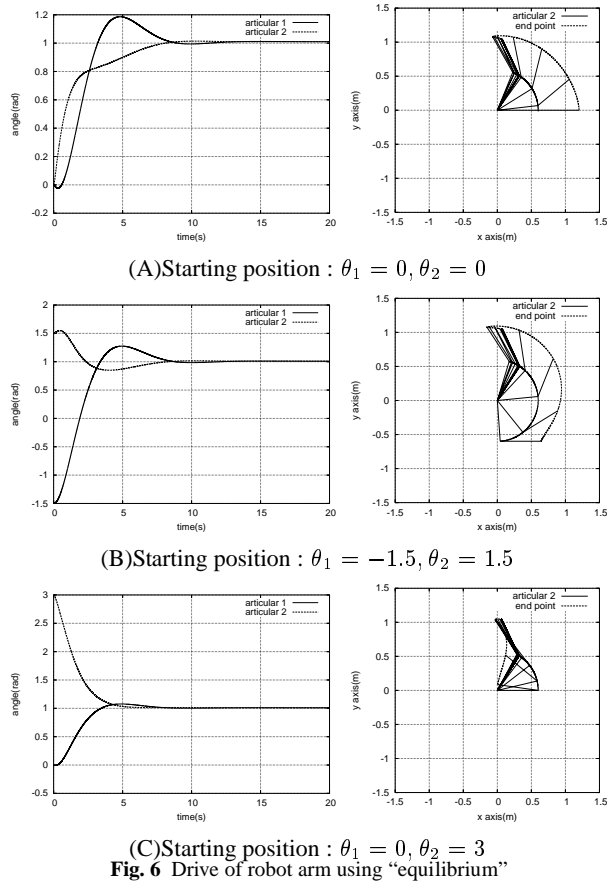


Fig. 6 Drive of robot arm using "equilibrium"

3.3.3 二関節筋を持つ場合、持たない場合の比較

二関節筋を持たないアームについては、式(7)で示したように、釣り合いによる駆動が可能である。二関節筋を持たないアームとの比較を Fig. 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。

Fig. 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。

3.3.4 連続的に筋収縮力を変えての駆動

これまで筋の収縮力を一定としていくつかのシミュレーションを行なったが、今度は筋の収縮力を刻々と変化させて駆動させる。サイクリックな駆動等より複雑な運動を実現できるようにする。

いくつかの姿勢を決めて、そこが釣り合いとなるような筋の収縮力を求める。さらに各点間において収縮力を線形に変化させて補完することで入力する収縮力を作成する。 $\theta_1 = 0, \theta_2 = 0, \theta_1 = -1, \theta_2 = 1, \theta_1 = -1, \theta_2 = 2, \theta_1 = 0, \theta_2 = 1$ という四点を選び、これを周回するように収縮力を入力する。

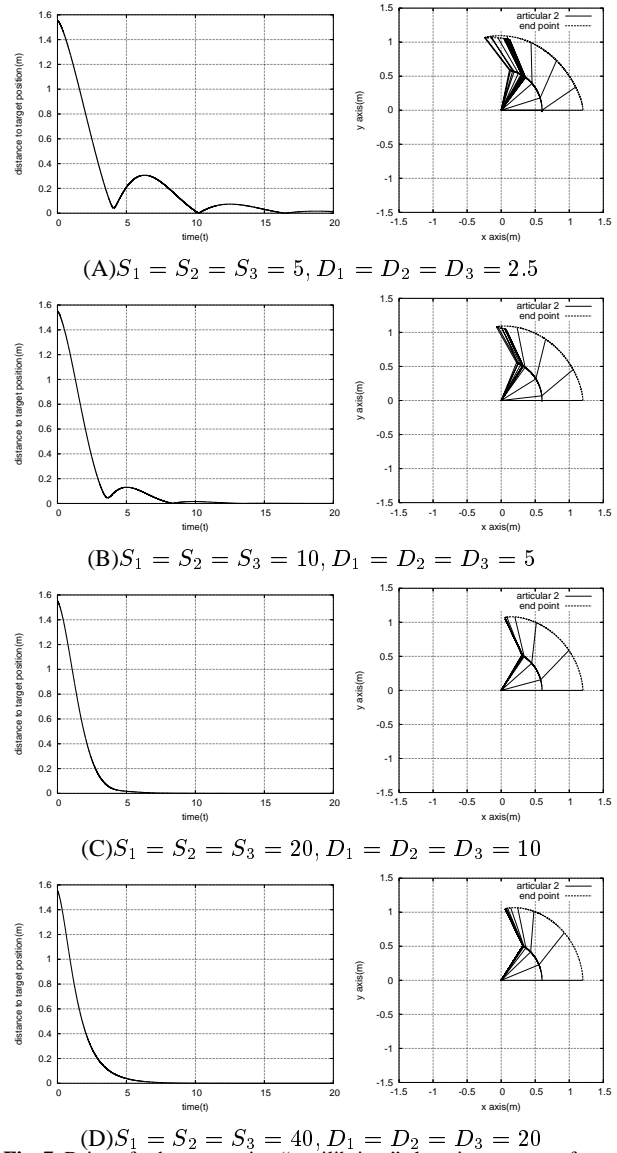


Fig. 7 Drive of robot arm using "equilibrium" changing outputs of muscles

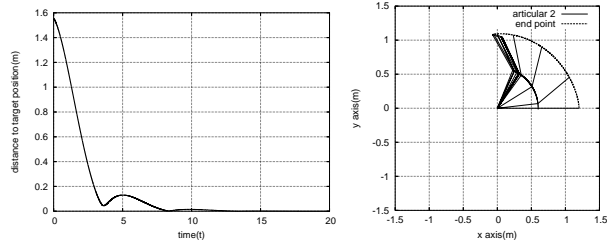
Graphs left side are described the distance between target position and end point of arm by time. Graphs right side are described the trajectory of arm.

この結果を Fig. 9 に示す。収縮力を切り替える時間を τ 秒として、(A) は $\tau = 5$ 、(B) は $\tau = 3$ 、(C) は $\tau = 2$ 、(D) は $\tau = 1$ とした場合の結果を表す。

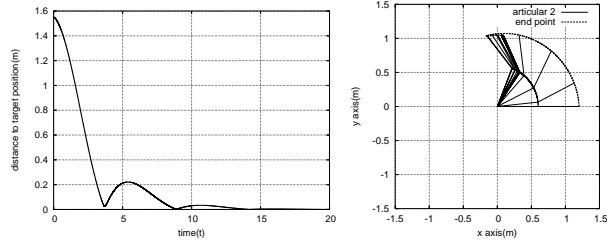
このように筋肉の切り替えのスピードが遅い場合は、収縮力によって決まる釣り合いのポイントに沿うように移動するが、切り替えのスピードが速くなると端まで辿りつけなくなり、釣り合い位置の軌道内部で小さな周回運動をするようになる。また (D) のように切り替えが速すぎる場合にはその軌道は完全に潰れてしまう。

4. 結論と今後の課題

本論文ではシミュレーションによって二関節筋を持ったアームがどのような運動ができるかを示した。筋にある収縮力を加えると、その釣り合いポイントへ向かう性質を利用して駆動ができる。一定の収縮力を与えてやることによって、様々な位置から目標となる釣り合い位置へ駆動させることができ



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



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

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.

た。また、収縮力を大きくしてやることで、その駆動を改善できることを示した。

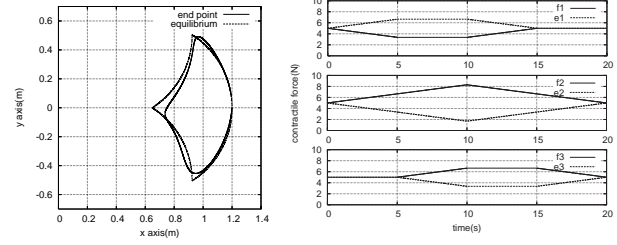
二関節筋を持つアームと持たないアームの比較において、二関節筋を持つ場合には各関節を協調的に動作させることによって、トータルの出力を揃えた場合に手先の動揺を半分程度にまで抑えることが可能であることを示した。さらに、収縮力を変化させた場合にその釣り合い位置の軌道に対して、アームがどのように運動するかを示した。

二関節筋を持ったロボットアームの特徴としては (1) 手先出力の出力を改善し、特に出力が小さくなってしまっていた方向へ大きく出せるようになる。(2) 手先剛性を手先出力とは独立に設定できる。(3) 駆動時にも手先の動揺を抑えるなど有利に働く。といった点を挙げることができる。

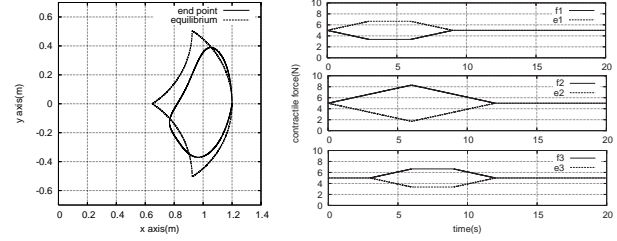
福祉ロボットや、ロボットスーツといった人間と協働するロボットの要求事項を解決するものとして、二関節筋の仕組みを生かした機構は有望である。今後は実機の製作と実験を通じて、二関節筋の特徴を生かせるような制御法、人間やその他の物体との衝突や接触の中でどのような特性を持っているかなどを検証していこうと考えている。

参考文献

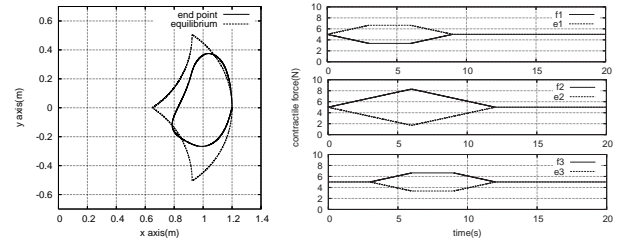
- 1) Minayori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto: “Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles - Mechanical engineering model analyses”, *Human Movement Science*, 13, 5, pp. 611-634, 1994.
- 2) 大島徹, 熊本水頼, ”二関節筋機能を有するロボットアーム”, 日本機械学会論文集 (C 編), 61 巻, 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



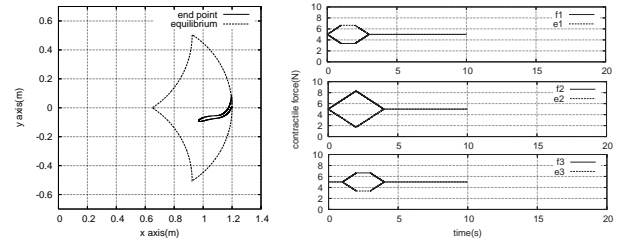
(A) changing contractile forces ($\tau = 5$)



(B) changing contractile forces ($\tau = 3$)



(C) changing contractile forces ($\tau = 2$)



(D) changing contractile forces ($\tau = 1$)

Fig. 9 Drive of robot arm using “equilibrium” changing contractile forces of muscle

Graphs left side are described the trajectory of end point and equilibrium point. Graphs right side are described the changes of contractile forces of muscle.

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.