

二関節同時駆動機構を持つロボットアームの制作

吉田 憲吾*, 畠 直輝, 堀 洋一 (東京大学)

Design of Robot Arm Using Bi-articular Driving Mechanism
Kengo Yoshida*, Naoki Hata, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

Recently robot researchers are applying animal characteristics into robotics. In this paper, we describe our attempt to make a robot arm based on the principle of bi-articular muscles. It has remarkable ability to realize various motions without feedback control, which may provide skillfulness and safety like animals. Next, CPG (Central Pattern Generator) is investigated as the driving mechanism of robot arm with redundant number of actuators. We try to use CPG as rhythmic oscillators to emulate animal-like movements.

キーワード：ロボットアーム、二関節筋、CPG
(robot arm, bi-articular muscle, CPG)

1. 序 論

1.1 研究の背景 現在、様々なロボットが研究・開発されており主には産業界にて活躍している。その中でヒトやイヌなど生物の形態を模したロボットも多数発表されてきた。しかしながらこれら生物型のロボットは必ずしも生物と同じ駆動方法を用いているわけではない。

多くのロボットは各関節に独立に回転型のアクチュエータを供えているが、ヒトを始めとする生物においては時に関節をまたいだりしながら、筋肉という一種の直動アクチュエータを複雑に配置して身体を動かしている。また制御の面からも、例えば既存のロボットにおいてはZMPなど膨大な計算を必要とする方法を用いて姿勢制御や各種動作を実現しているが、生物においては歩行やはばたきといった基本的な繰り返し動作については非常に単純な制御によってこれを実現している。

現状を見ると、特に生物の姿を模したロボットに関してはまだ、その対象となる生物の運動性能には遠く及ばない。ロボットが生物に一步近づぐためには、生物の機構を学び取り入れていく必要があるのではないかと考える。

本論文では生物に特有な二関節筋の仕組みを取り入れたロボットの制作を通して、いかにして生物の優れた点をロボットに導入するかということとを述べる。二関節筋に相当するアクチュエータを本論文では二関節同時駆動機構と呼ぶ。まず、二関節同時駆動機構を持つロボットアームの特性に関して説明し、次にロボットの実装に関して述べる。最後にこのロボットアームをいかにして駆動するかについての提案を行なう。

1.2 生体機構の応用に関する既存研究 生体機構の一例としてここでは生物のアームに特有な二関節筋を取りあげる。従来のロボットアームでは、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。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

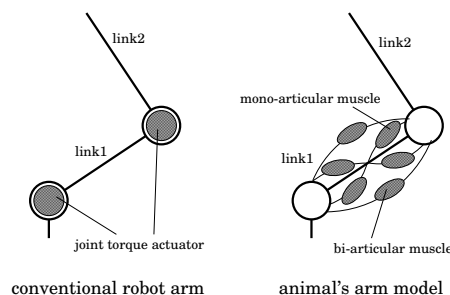


図1 従来のロボットアームモデルと生物のアームモデル
Fig. 1. Conventional robot arm model and animal's arm model

力を発揮するアクチュエータ(二関節筋)を持っている。(図1)

二関節筋が存在することによって、一方の関節に協働的に働く時、もう一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もできなくなる。一見不要にも思われるが、この二関節筋が特に生物の制御機能にとって大きな役割を果たしているとして注目されてきている。

生物のアームは様々な筋が組み合わせられてできているが、二次元運動に限定した場合に機能の面から一関節筋と二関節筋の3筋6対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。Kumamotoらによって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して主張している。⁽¹⁾

また、特に下腿部の二関節筋である腓腹筋(gastrocnemius muscle)はヒトの垂直ジャンプにおいて重要な役割を果たしているとしていくつかの研究がなされている。垂直ジャンプに関するヒトの脚のモデルを図2に示す。

ヒトの跳躍運動は股関節、膝関節、足首関節それぞれの関

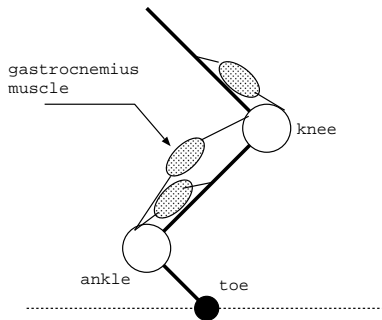


図2 腓腹筋 (gastrocnemius muscle) を含む跳躍モデル
Fig. 2. Jumping leg model equipped with gastrocnemius muscle

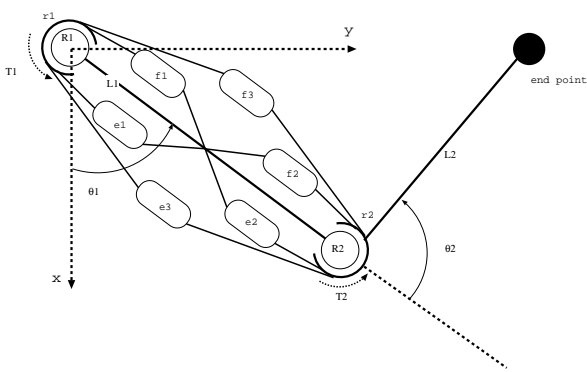


図3 生物のアーム機構
Fig. 3. Arm model of animals

節におけるトルクをうまく体全体の直動運動に変換するということが肝要である。鳥海らはワイヤを腓腹筋に対応するように配置した実験器を用いて、姿勢制御と跳躍力に対して大きな影響があることを実験的に確かめた。また Oshima は足、下腿部、大腿部の3リンクにモデルに関してその筋配置による影響を述べた。(2) (3)

二関節筋を取り入れたロボットの例としては前述の Kumamoto らによって制作された、アクチュエータとしてラバチュエータを用いたロボットアームがまず挙げられる。これによって等尺条件化におけるアームの手先出力や粘弾性の特性が確認された。また Oshima らは腓腹筋等を実装した跳躍ロボットを提案している。

一方沖電気工業の小田らによって開発された HIPRO ロボットは、筋肉の諸特性を機械的に実現し二次元平面上における生物のアームを模擬するものである。また二関節筋による粘弾性の調整機構を利用して上手く着地することのできる跳躍ロボットも発表している。(4) (5)

2. 二関節同時駆動機構を持つロボットアームのモデル
図3のように生物のアーム機構を模式的に表わす。

ここで図3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。

今回、3対6筋に対応するアクチュエータを配置することによって、生体機構を応用したロボットアームを制作する。この際各筋に対応するアクチュエータにより、各関節におけるトルクが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 、($x = e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3$) とすると、式(1)と表わされる。

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

動的な計算に用いるロボットアームのモデルとしては、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。

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(2)のように運動方程式を得ることができる。(6)

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} (2)$$

ただし、

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

3. 二関節同時駆動機構を有するロボットアームの実装

3.1 二関節同時駆動機構の実現 従来のロボットは各関節に単関節駆動機構を持っているとすることができる。生物の特性を取り入れる試みとして二関節筋に相当する二関節同時駆動機構を加えて3対6筋に相当する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として理想的には、

- 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。

といった点が挙げられる。これを満たす機構としては例えば図4のように動滑車と直動型アクチュエータを用いた物などいくつか考えられる。

3.2 ロボットアームの設計 実際の設計に関しては、実装の容易さなどいくつかの実務的な要素を考慮にいれなければならない。今回は畠が学位論文の中で提案した

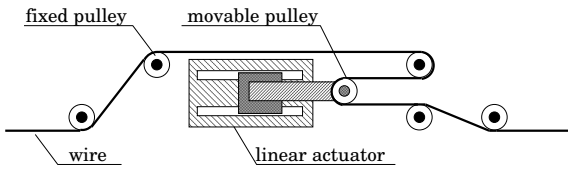


図4 プーリーを組み合わせた二関節同時駆動機構
Fig. 4. bi-articular driving mechanism using pulleys

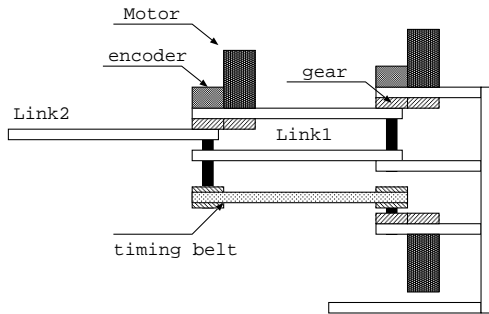


図5 ロボットアーム外観図
Fig. 5. Outline view of robot arm

表1 制作するロボットの主なパラメータ
Table 1. Major parameters of robot arm

リンク 1(上板、下板) 寸法 [mm]	200 × 50 × 10
リンク 1(上板、下板) 重量 [g]	270
リンク 2 寸法 [mm]	200 × 50 × 10
リンク 2 重量 [g]	270

表2 モータのパラメータ
Table 2. Parameters of electric motor

製造 (型番)	タミヤ (540K75)
本体寸法 [mm]	φ36 × 50
重量 [g]	270
最大電圧 [V]	12
最大効率トルク [kg · cm]	7.5

表3 エンコーダのパラメータ
Table 3. parameter of rotary encoder

製造 (型番)	オムロン (E6H-CWZ6C)
本体寸法 [mm]	φ40 × 26
重量 [g]	120
分解能 [パルス/回転]	1000

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なうことにする。(7)

制作するロボットアームの外観を図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、第一関節を駆動する一関節筋拮抗対、第二関節を駆動する一関節筋拮抗対、二関節筋拮抗対という3つ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、

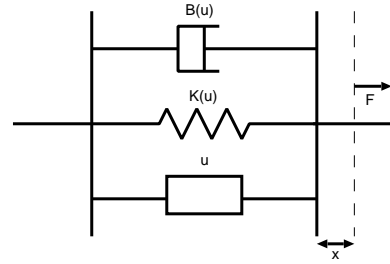


図6 筋肉のモデル図
Fig. 6. Model of a muscle

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。

表1にロボットアームの基本的なパラメータを示す。アクチュエータとして表2、エンコーダとしては表3を用いる。

4. 二関節同時駆動機構を有するロボットアームの駆動方法

4.1 生物の持つ駆動方法 生物の仕組みを取り入れたロボットアームの設計を前章で示した。このアームをどのように駆動するかという点はどのように設計するかという点以上に重要である。我々は機構だけでなく駆動方法も生物より取り入れてくることを考える。生物は特定の運動に関してはほとんどフィードフォワード的にこれをこなしている。生物の仕組みをロボットが取り入れたことで、生物様の駆動を簡単な制御で実現できると考えている。

まず、生物のアームの持つ弾性に着目し、これによって生じる釣り合いを利用した駆動方法に関する提案を行なう。生物の筋は独特の粘弾性を持っており、これらによって構成されるアームもその出力において粘弾性の成分を持つ。Kumamoto らは3対6筋の存在によってその粘弾性が手先出力と独立に制御できるという点を指摘している。(1)

次に生物の脊髄中に存在するリズム生成機構であるCPG(Central Pattern Generator) を利用した生物様の駆動方法を提案する。CPG はもともと神経生理学の分野において生物の行動を生成するものとして発見されたものであるが、現在ロボットのリズムを持った運動等への適用が目目されている。研究例としては、Taga らによるCPGの引き込み特性を用いた矢上面内の二次元二足歩行の安定な制御系の構築、多足ロボットへの応用として木村らの四足ロボット「鉄犬」による不安定路面の安定走行と、歩容の安定的な変化に関する研究が挙げられる。(8)(9)(10)

4.2 筋の弾性による釣り合いを生かした駆動方法

4.2.1 釣り合い位置の導出 生物の筋は図6と模式的に表わすことができ、バ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と出力を F とすれば、式(3)と表わすことができる。

$$F = u - K(u)x - B(u)\dot{x} = u - kux - bu\dot{x} \dots \dots (3)$$

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。

アクチュエータに機械的もしくはソフトウェア的に式 (3) を満たすように、アクチュエータの出力を F 、これに対する指令値を u とすればロボットアームについても同様に粘弾性を持つことができるようになる。3 対 6 筋に対応するアクチュエータへの指令値をそれぞれ u_x , ($x = e1, e2, e3, f1, f2, f3$) とおき、拮抗対の和と差を式 (4) のように定義する。

$$\begin{aligned} S_1 &= u_{f1} + u_{e1}, D_1 = u_{f1} - u_{e1} \\ S_2 &= u_{f2} + u_{e2}, D_2 = u_{f2} - u_{e2} \\ S_3 &= u_{f3} + u_{e3}, D_3 = u_{f3} - u_{e3} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、

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

である。式 (3), 式 (1), 式 (4) より、式 (5) が導かれる。

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

式 (5) より、 $T_1 = T_2 = 0$ となるような θ_1, θ_2 を求めると式 (6) を得る。ただし、 $r = r_1 = r_2$ とする。

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

各アクチュエータの指令値を適当に定めると、それに応じた各関節角を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。各指令値を変化させることによって釣り合い位置も変化するため、それに応じて動かすということが可能である。

4.2.2 弾性による釣り合いを生かした駆動のシミュレーション 図 7 に上記のシミュレーション結果を示す。指令の値を変化させることによって指令による釣り合い位置の軌跡を辿るように駆動させることが可能である。シミュレーションではいくつか姿勢を決めてその地点における釣り合いとなる指令値を定める。姿勢間は指令値を直線的につなぐ。

$(\theta_1, \theta_2) = (0, 0), (-1, 1), (-1, 2), (0, 1)$ という 4 点を選び、これを周回するように定めた。シミュレーションに用いたリンクのモデルは表 4 のように示す。各姿勢間の移行時間 τ [s] をそれぞれ図 7(A) は $\tau = 5$ とし、(B) を $\tau = 3$ とした。

この結果、十分にゆっくりな運動な場合には指令値によって定まる釣り合い位置の軌跡にそって駆動するということが確認できた。

表 4 シミュレーションに用いたパラメータ
Table 4. 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]
I_1	0.3[kg · m ²]	I_2	0.12[kg · m ²]
r_1	0.1[m]	r_1	0.1[m]

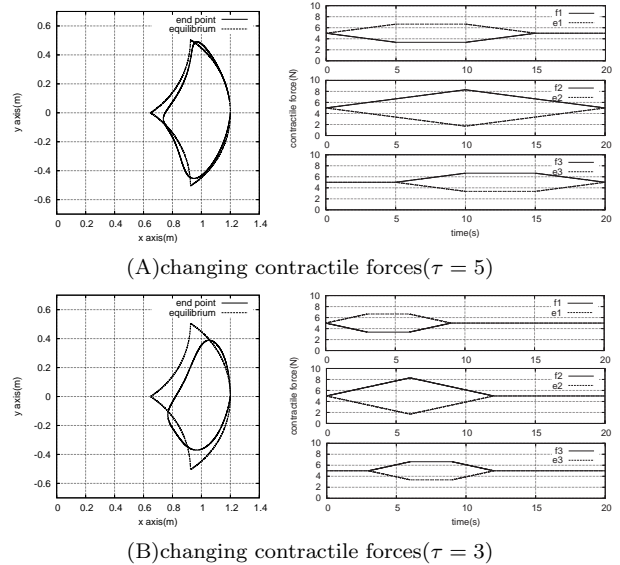


図 7 弾性による釣り合いを生かした駆動のシミュレーション結果

Fig. 7. Simulation result of Driving robot arm using equilibrium

4.3 CPG を生かした生物様の駆動方法

4.3.1 CPG のモデル CPG の数学モデルとしては様々な提案がなされているが、ここでは Matsuoka によるモデルを用いてシミュレーションを行なう。CPG は一般的に相互抑制的に結合された神経振動子の集まりとして構成される。各神経素子は疲労特性を持ち、各素子に一定の入力を与えると自励振動をはじめるといったものである。⁽¹¹⁾

N 個の素子が結合した CPG の一般的な形について述べる。 i 番目の素子は下記のように表わすことができる。

$$\frac{1}{\tau_{i1}} \dot{x}_i = -x_i - \beta_i f(v_i) - \sum_{j=0}^N \gamma_{ij} f(x_j) + u_i \dots\dots (7)$$

$$\frac{1}{\tau_{i2}} \dot{v}_i = -v_i + f(x_i) \dots\dots\dots (8)$$

各パラメータの説明であるが、 x_i は素子の出力を表わす。また、 v_i は素子の疲労を表わすものである。 β_i は疲労特性を定めるパラメータである。 γ_{ij} は i 番目から j 番目への素子の結合係数である。 $\tau_{1i}, \tau_{2i}, \beta_i$ は全て正であり、 γ_{ij} は $i = j$ の時に 0、 $i \neq j$ の時に正の値を取る。 $f(x) = \max(x, \Theta)$ であって、 Θ はある閾値である。

単体の素子に一定の入力を与えると始め、素子が興奮して出力が上昇するが、やがて沈静化して一定の出力に落ち

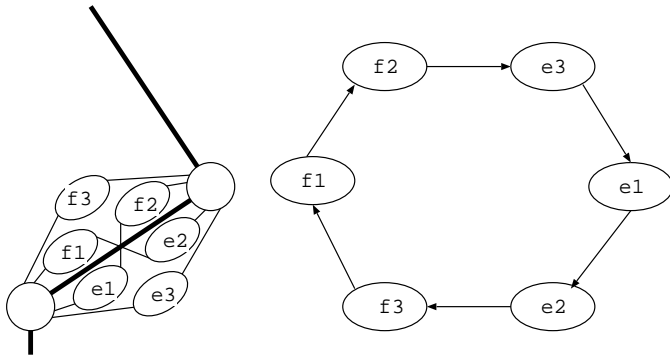


図 8 CPG の結合モデル (1)
Fig. 8. Neuron ring of CPG (1)

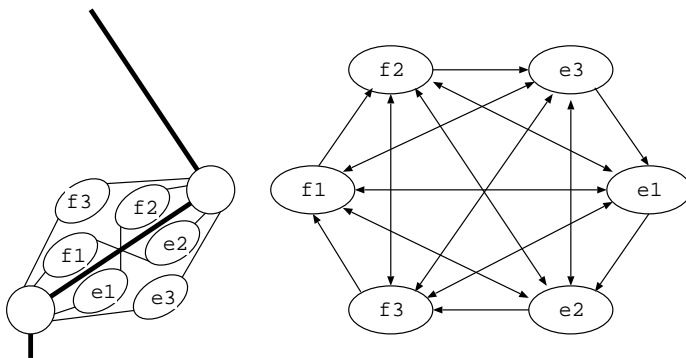


図 9 CPG の結合モデル (2)
Fig. 9. Neuron ring of CPG (2)

つく。相互抑制的に結合がなされると、一方の興奮に対して一方が鎮静化し、逆に鎮静化すると他方が興奮するため、周期的な振動を生ずるようになる。

4.3.2 CPG の 3 対 6 筋を持つロボットアームへの応用 3 対 6 筋に対応する 6 つの素子の輪からなる CPG を用いてどのような指令値を発生させることができるかを示す。CPG は例として以下のように図 8、図 9 と構成した。各アクチュエータに対応する神経素子の並びは、手先における出力方向による。各構成とも、 $\tau_{i1} = 1, \tau_{i2} = 0.83$ とし、 $\beta_i = 2.5$ とする。 $t > 0$ の時 $u_i = 1$ のステップ入力を与える。閾値 $\theta = 0$ とする。

結合モデル (1) では輪になった素子をそれぞれ一方に抑制的に結合する。また、結合モデル (2) では (1) のモデルに対し、さらに隣接しない素子との相互の抑制結合を加えて出力させる。結合係数 γ_{ij} の値を表 5 と表 6 に示す。この結果図 10 と図 11 のように位相差を持って指令値を発生させることができた。

結合係数を様々に変えることで、様々な指令値を求めることができる。また、駆動結果から素子への入力や係数に対してフィードバックを返してやることで性能の改善や学習機能を持たせることが可能である。

表 5 結合モデル (1) の γ_{ij} の値

Table 5. γ_{ij} parameters of neuron ring (1)

i/j	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	2.5
2	2.5	0	0	0	0	0
3	0	2.5	0	0	0	0
4	0	0	2.5	0	0	0
5	0	0	0	2.5	0	0
6	0	0	0	0	2.5	0

表 6 結合モデル (2) の γ_{ij} の値

Table 6. γ_{ij} parameters of neuron ring (2)

i/j	1	2	3	4	5	6
1	0	0	2.5	2.5	2.5	2.5
2	2.5	0	0	2.5	2.5	2.5
3	2.5	2.5	0	0	2.5	2.5
4	2.5	2.5	2.5	0	0	2.5
5	2.5	2.5	2.5	2.5	0	0
6	0	2.5	2.5	2.5	2.5	0

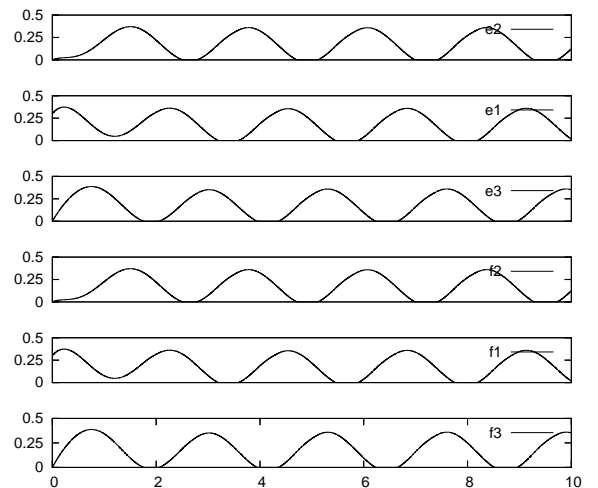


図 10 結合モデル (1) の出力

Fig. 10. Outputs of neuron ring (1)

5. 結論と今後の課題

本論文では二関節筋を二関節同時駆動機構としてロボットアームに取り入れるための、制作方法と駆動の方法について述べた。実務上の観点から、3 つの回転型アクチュエータが一関節筋、二関節筋のそれぞれの筋肉対として対応するようなロボットを制作することにした。駆動方法としては筋の弾性をアクチュエータが実現することによって実現することのできる、ロボットアームの弾性による釣り合いを利用した駆動方法について説明し、シミュレーションを行なった。また、CPG を 3 対 6 筋に対応するように配置して、6 個の神経振動子の組み合わせでいろいろなリズムを持った指令値を発生できることを示した。

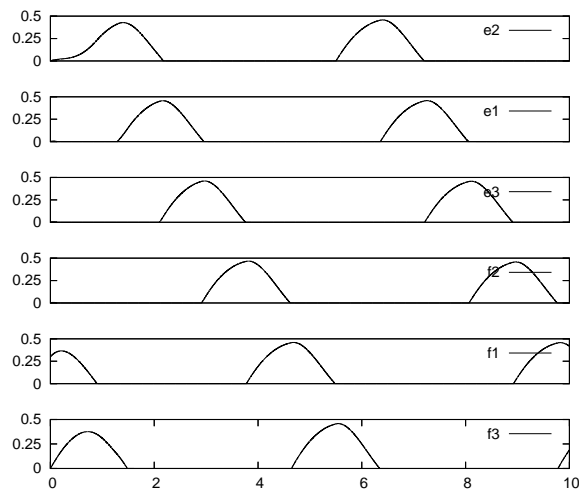


図 11 結合モデル (2) の出力
Fig. 11. Outputs of neuron ring (2)

今後の課題としては、ここで設計を示したロボットアームを実際に制作する必要がある。また、この作成したロボットを用いて 3 対 6 筋に対応するアクチュエータを持つロボットの特性に関する実験や、前述の駆動方法を実際に適用してみるといったことを検討している。

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) 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
- (3) Toru Oshima, Noboru Momose, Kiyoshi Toriumi, "Jump mechanism using coordination in knee and ankle joint and application to leg orthosis", *The 2005 International Power Electronics Conference*, 2005
- (4) 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 Workshp*, 2003
- (5) 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
- (6) 川崎 晴久: "ロボット工学の基礎", 森北出版株式会社, 1991.
- (7) 畠 直輝, "制御工学応用による移動用福祉機器の高機能化に関する研究", *東京大学大学院 学位論文*, 2004
- (8) G. Taga, Y. Yamaguchi, and H. Shimizu "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment", *Biological Cybernetics*, Vol. 65, 1991, pp. 147-159
- (9) G. Taga, "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion", *Biological Cybernetics*, Vol. 73, 1995, pp. 97-111
- (10) 木村 浩, 張 祖光, "脚式移動における CPG(Central Pattern Generator) の役割 - 適応的な歩行・走行生成の統一的理解に向けて", *計測と制御*, Vol. 44, No. 9, 2005, pp.602-608
- (11) Kiyotoshi Matsuoka, "Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation", *Biological Cybernetics*, vol. 52, 1985, pp. 367-376