

6つの神経素子によるロボットマニピュレータの駆動方法

吉田 憲吾 **, 畠 直輝 ***, 堀 洋一 ***

Robot Manipulator Locomotion with Six Neurons

Kengo Yoshida, Naoki Hata, Yoichi Hori

Recent robotics researchers are applying animal characteristics into robotics. CPG (Central Pattern Generator) is one of animal specific mechanism, which has a role of rhythmic oscillators for cyclic activities (walking, wingbeat, etc.). In this paper, we try to use CPG consisting of six neurons to drive a robot arm based on the principle of bi-articular muscles. This robot arm has six virtual actuators and six neurons which are corresponding each actuators. Appropriate inhibitory connections between the neurons can generate animal-like movements.

Next, We describe our attempt to make a robot arm equipped with bi-articular driving mechanism. It has remarkable abilities to realize various motions without feedback control, which may provide skillfulness and safety like animals locomotion.

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

1. はじめに

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、主としては産業界において活躍している。その中でヒトやイヌなどの生物の携帯を模したロボットも多数発表されてきている。しかしながら、これら生物型のロボットは確かに姿勢は生物に似ていると言えるが、その駆動方法などに関して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。

例えば、多くのロボットは各関節に独立の回転型アクチュエータを供えている。しかしながら、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が複雑に配置されて身体を動かしているのである。また制御の面からは、現状のロボットの多くがZMPなどを始めとする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こなしているのに対し、生物においては歩行や羽搏きといった基本的な繰り返し動作に関しては非常に単純な制御によってこれを実現している。

生物の姿を模したロボットはまだまだ、その対象である生物に運動性能などの面で遠く及んでいない。ここでロボットが一つ生物に近付くためには、生物の機構をよく学び、その仕組みを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、いわゆる3対6筋を持ったアームの駆動方法としてCPGに着目し、各筋に対応する6つの神経素子を組み合わせさせたCPGに関して、それによってどのような筋出力が得られるかという事の報告を行なう。また、二関節同時駆動機構を供えたロボットアームの実装に関しても述べる。

1.2 生体機構の応用に関する既存研究

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力を発揮するア

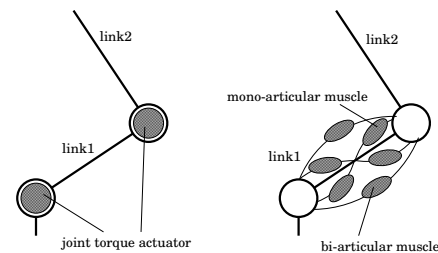


Fig. 1 従来のロボットアームモデルと生物のアームモデル

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⁾

二関節筋の仕組みを応用したロボットに関する取り組みとしては、Kumamotoらによってラバチュエータを用いたロボットアームが制作され、等尺条件化における手先出力・粘弾性の検証がなされた。¹⁾ また、東京電機大学の斎藤らによって災害救助用ロボットとしてGorillaが開発され、脚に二関節の仕組みを生かした油圧アクチュエータを供えている。²⁾

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。³⁾⁴⁾

* 原稿受付 平成18年 2月 27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)

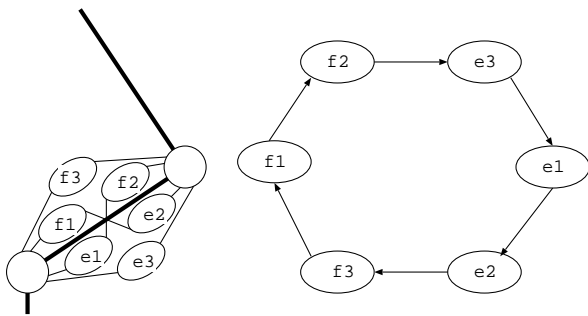


Fig. 2 CPGの結合モデル (1)

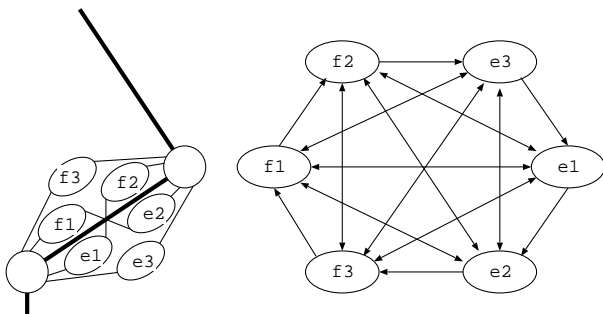


Fig. 3 CPGの結合モデル (2)

2. CPGによるマニピュレータの駆動方法

2.1 生物の持つ駆動方法

人間をはじめとする様々な生物は脊髄中にCPG(Central Pattern Generator)と呼ばれるリズム発生機構を供えている。もともとCPGは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注目されている。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。⁵⁾⁶⁾⁷⁾

2.2 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ものである。⁸⁾

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。

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

$$\frac{1}{\tau_{i2}} \dot{v}_i = -v_i + f(x_i) \dots \dots \dots (2)$$

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。 $\tau_{i1}, \tau_{i2}, \beta_i$ は全て正であり、 γ_{ij} は*i=j*の時に0、*i≠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。

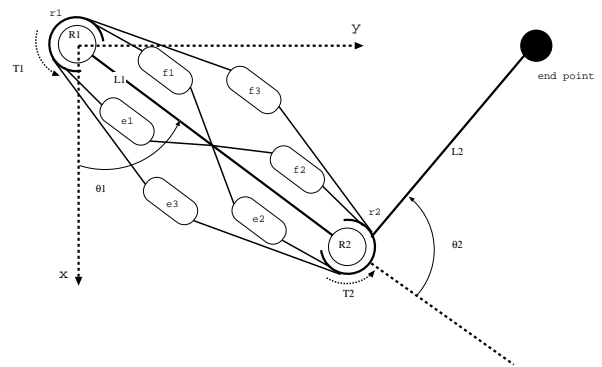


Fig. 5 生物のアーム機構

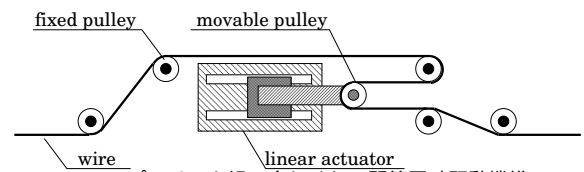


Fig. 6 プーリーを組み合わせた二関節同時駆動機構

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。

2.3 CPGの3対6筋を持つロボットアームへの応用

3対6筋のロボットアームに対応する神経素子を組み合わせ、どのような指令値を発生させることができるかという試みを示す。それぞれが各筋に対応する6個の神経素子を組み合わせ、CPGを作成する。結合例として図2、図3を示す。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。この結果を図4に示す。(A)は結合モデル(1)の結合係数 γ_{ij} とその出力結果である。また、(B)は結合モデル(2)における結合係数 γ_{ij} とその出力結果を示している。このように位相差を持って様々な指令値を発生させることができた。さらにモデル(2)において結合係数を調節することで、力の方向に応じて拮抗対の出力を入れ変えていくような指令値(図4のC)を生成することができる。

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。

3. 二関節筋を持ったロボットアームの制作

3.1 二関節同時駆動機構の実現

図5のように生物のアーム機構を模式的に表わす。

ここで図5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

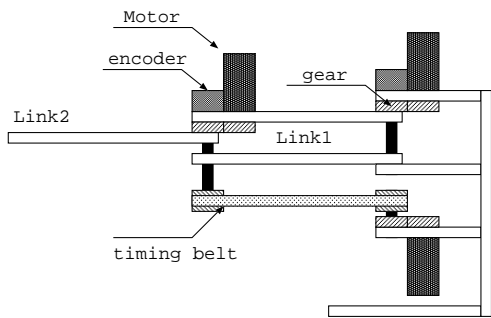


Fig. 7 ロボットアーム外観図

Table 1 制作するロボットの主なパラメータ

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

たがる二関節筋である。

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 6 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。今回は皇が学位論文の中で提案した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。⁹⁾

制作するロボットアームの外観を図 7 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、二関節筋の拮抗対という 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、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. まとめ

本論文ではいわゆる 3 対 6 筋を持ったロボットアームの駆動方法として CPG に注目した。6 つの筋に対応するように 6 つの神経素子を用いて CPG を形成させ、その素子の結合をい

Table 2 モータのパラメータ

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

Table 3 エンコーダのパラメータ

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

ろいろに変えることで様々な指令パターンを得られることを示した。

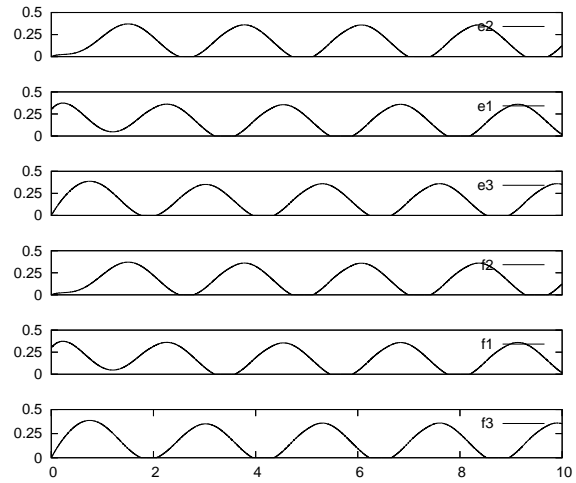
また、二関節筋の仕組みを二関節同時駆動機構として実現し、3 つの回転型アクチュエータがそれぞれ一関節筋、二関節筋の拮抗対に対応するタイプのロボットアームの制作に関して説明した。ロボットアーム自体は現在制作中である。

今後の課題としては、まずロボットアームを完成させ、駆動のためのドライバ等の整備もする必要がある。これを用いて静的な特性に関する実験、駆動に関する実験を行なう。CPG に関しては引き込み特性などその特有な性質をより引き出すために、これからさらに調査・研究を進めていく。

参考文献

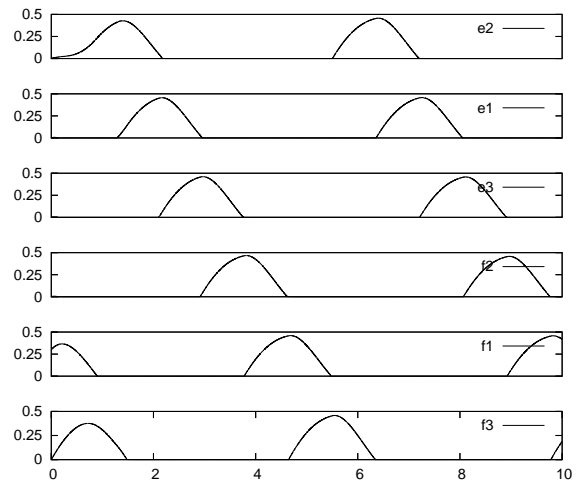
- 1) Minayori Kumamoto, Toru Oshima, Tomohisa Yamamoto: "Control properties induced by the existence of antagonistic pairs of bi-articular muscles - Mechanical engineering model analyses", *Human Movement Science*, 13, 5, pp. 611-634, 1994
- 2) 齋藤之男, 西田皓也, 音琴浩, "二関節筋用アクチュエータを応用した災害救助用ロボットの研究", 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 二関節筋実利用 Workshop, 2003
- 3) 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
- 4) 小田高広, 鶴田守, 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
- 5) 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
- 6) G. Taga, "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion", *Biological Cybernetics*, Vol. 73, 1995, pp. 97-111
- 7) 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
- 8) Kiyotoshi Matsuoka, "Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation", *Biological Cybernetics*, vol. 52, 1985, pp. 367-376
- 9) 皇直輝, "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

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



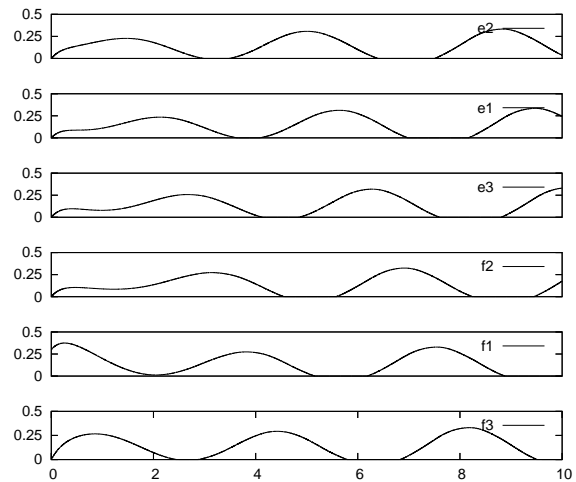
(A) 結合モデル (1) の γ_{ij} の値と出力結果

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



(B) 結合モデル (2) の γ_{ij} の値と出力結果

i/j	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1.0	1.2	1.0	1.0
2	1.0	0	0	1.0	1.2	1.0
3	1.0	1.0	0	0	1.0	1.2
4	1.2	1.0	1.0	0	0	1.0
5	1.0	1.2	1.0	1.0	0	0
6	0	1.0	1.2	1.0	1.0	0



(C) 交代パターンの γ_{ij} の値と出力結果
Fig. 4 結合を変化させた場合の各素子の出力