

二関節同時駆動機構を装備したロボットアームの設計と制作

吉田 憲吾 **, 内田 利之 **, 堀 洋一 ***

Design and Manufacturing of The Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanisms

Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori

Recently there are many trials to introduce animal characteristics into robots. Conventional robot arm has only actuators similar to mono-articular muscles. Though animal's arm has not only mono-articular muscles but also bi-articular muscles. Existence of bi-articular muscles can give robots remarkable ability to realize various motions without feedback control, which may provide skillfulness and safety like animals.

In this paper, we described our attempt to make a robot arm based on the principle of bi-articular muscles. Our robot arm has three electrical motors as antagonistic muscular pairs and muscular viscoelasticity are actualized virtually. Purposes of making robot arm are (1)verification of static properties, (2)actual experiment of driving and (3)investigation of antagonistic structure. This robot arm is just a prototype for complete implementation.

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

1. はじめに

1.1 研究の背景

現在産業界においては全世界でおよそ 84 万台、うち日本で 35 万台もの産業用ロボットが活躍している。しかしながらこれらのロボットは基本的に人間と隔離された環境で移動し、姿形も生物とはほど遠い。一方、人間と非常に近い距離で接しながら活動するロボットも、研究開発段階ではあるが登場してきており、これらは生物のフォルムを模したものがほとんどである。さらにこれらは生物と同様の動きを実現したと主張している。

しかしながら、生物型ロボットにおける姿勢制御や各動作の実現方法は、実際の生物のものとは大きく異なっている。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が、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。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フィードフォワードを中心にした非常に単純な制御によってこれらが実現できている。

生物の姿を模したロボットが、生物と同等の運動機能を獲得するために、生物の機構や制御手法を取り入れていく必要があると考える。本論文では、二関節筋の仕組みを備えたロボットアームに関する設計と制作に関する報告を主として述べる。また、拮抗筋アクチュエータとそのパラメータに関する指針について特に示す。

1.2 生体機構を応用したロボットに関する既存研究

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クチュエータ（二関節筋）を持っている。（図 1）

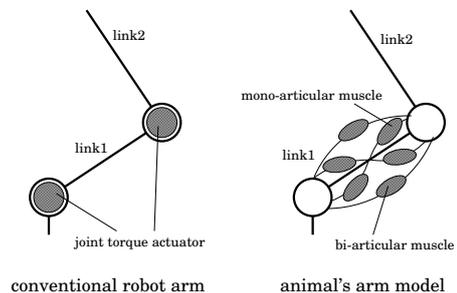


Fig. 1 Conventional robot arm model and animal arm model

二関節筋が存在することによって、一方の関節に協動的に働く時、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 対 6 筋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主張している。また、ラバチュエータを用いたロボットアームが製作され、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⁾

一足の跳躍ロボットとして、下腿部の二関節筋である腓腹筋をワイヤで置き替えたものが Oshima らによって製作され、垂直跳びにおける姿勢制御機能としての二関節筋の役割を検証している。²⁾³⁾

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。⁴⁾

沖電気工業の小田らによって開発された HIPRO ロボット

* 原稿受付 平成 18 年 11 月 25 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)

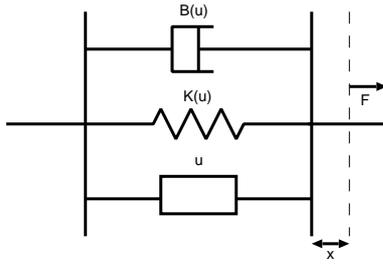


Fig. 2 Model of a muscle

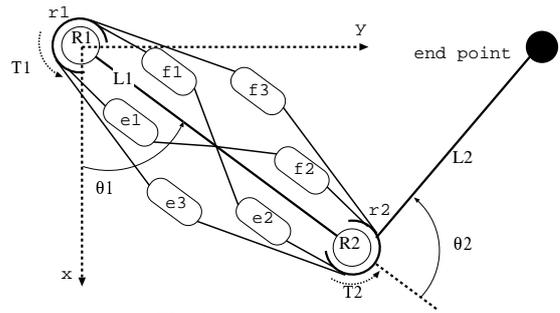


Fig. 4 Arm model of animals

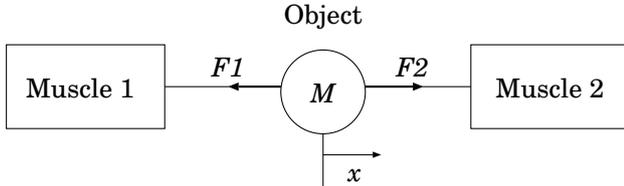


Fig. 3 Antagonistic pair of muscles and object

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。⁵⁾⁶⁾

2. 二関節筋の仕組みを持つロボットアームのモデル

2.1 生物の筋のモデル

各アクチュエータに筋と同様の粘弾性を持たせるようにする。まず、生物の筋は図2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(1)と表わすことができる。

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

バネ成分、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。

筋は一方向にのみ力を発揮するアクチュエータであるが、この筋を拮抗的に配置することで、両方向へ力を発揮することができる。今一次元において質量 M の物体を引き合う構造を考え、図3のように各筋を拮抗的に配置する。また各収縮力を u_e, u_f として、それぞれの和と差を $S = u_f + u_e, D = u_f - u_e$ とし一定とする。この時、運動方程式は式2となる。

$$M\ddot{x} = D - kSx - bS\dot{x} \quad \dots (2)$$

この運動方程式を解くと式3となる。

$$x(t) = Ae^{\alpha t} + Be^{\beta t} + \frac{D}{kS} \quad \dots (3)$$

ただし

$$A = \frac{x_0 - \frac{x_0}{\beta} - \frac{D}{kS}}{1 - \frac{\alpha}{\beta}}, \quad \alpha = \frac{-bS + \sqrt{(b^2S - 4Mk)S}}{2M}$$

$$B = \frac{x_0 - \frac{x_0}{\alpha} - \frac{D}{kS}}{1 - \frac{\beta}{\alpha}}, \quad \beta = \frac{-bS - \sqrt{(b^2S - 4Mk)S}}{2M}$$

式3の $\frac{D}{kS}$ 項がいわば釣り合いの位置であり、 $t \rightarrow \infty$ とすれば、振動的 ($b = 0$) にならない限り釣り合い位置に収束す

る。また、 $-1 \leq \frac{D}{S} \leq 1$ であるから $-\frac{1}{k} \leq x \leq \frac{1}{k}$ がこのアクチュエータが安定的に動作できる範囲である。よって可動範囲は k による。

また望ましい挙動を示すのは、 $(b^2S - 4Mk)S = 0$ からわずかに負となる範囲である。よって想定する物体の重量の最大値を M_{max} とし、この時に対応させる収縮力の和を S_{max} として、 $\sqrt{\frac{4M_{max}k}{S_{max}}}$ 程度に設定するのが望ましいと考えられる。

2.2 3対6筋を持つアームのモデル

図4のように生物のアーム機構を模式的に表わす。

ここで図4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。

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 $T1, T2$ とする。各アクチュエータの出力を $F_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ とすると、式(4)と表わされる。

$$T_1 = (F_{f1} - F_{e1})r_1 + (F_{f3} - F_{e3})r_1$$

$$T_2 = (F_{f2} - F_{e2})r_2 + (F_{f3} - F_{e3})r_2 \quad \dots (4)$$

アクチュエータに機械的もしくはソフトウェア的に式(1)を満たすようにしてやれば、ロボットアームについても生物のアームと同様の粘弾性を持つことができるようになる。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。筋の性質を持つアクチュエータについては、収縮力 u 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。

このような3対6筋に相当するアクチュエータを持ったロボットアームは、手先剛性を手先出力とは独立に設定できるようになる。この際には各拮抗対の指令値の和によって手先剛性を定めることができるから、各アクチュエータ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(5)のように定義する。

$$S_1 = u_{f1} + u_{e1}, \quad D_1 = u_{f1} - u_{e1}$$

$$S_2 = u_{f2} + u_{e2}, \quad D_2 = u_{f2} - u_{e2}$$

$$S_3 = u_{f3} + u_{e3}, \quad D_3 = u_{f3} - u_{e3} \quad \dots (5)$$

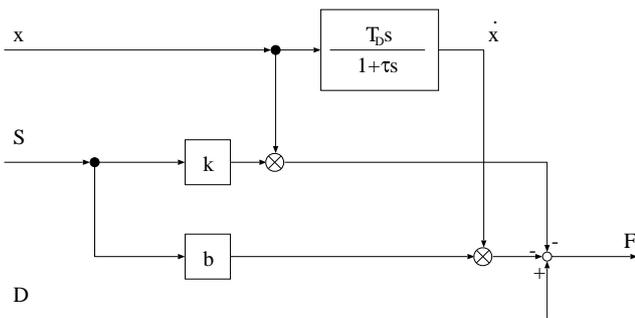


Fig. 5 Block diagram to realize viscoelasticity of antagonistic muscular pair

ただし、

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

である。式 (1), 式 (4), 式 (5) より、式 (6) が導かれる。

$$\begin{aligned} T_1 &= r_1 D_1 - k r_1^2 \theta_1 S_1 - b r_1^2 \dot{\theta}_1 S_1 \\ &\quad + r_1 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_1 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_1 S_3 \\ T_2 &= r_2 D_2 - k r_2^2 \theta_2 S_2 - b r_2^2 \dot{\theta}_2 S_2 \\ &\quad + r_2 D_3 - k(r_1 \theta_1 + r_2 \theta_2) r_2 S_3 - b(r_1 \dot{\theta}_1 + r_2 \dot{\theta}_2) r_2 S_3 \\ &\quad \dots \dots \dots \quad (6) \end{aligned}$$

3. 二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの設計

3.1 単関節駆動機構と二関節同時駆動機構

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。

特に本研究においては両機構が筋肉と同様の粘弾性を備えさせることを考える。しかしながらアクチュエータを使ったとしても生物の筋と完全に同じ特性を持つ機構を作り出すのは困難である。よってエンコーダ等と組み合わせて図 5 のような制御ブロックで仮想的に実現させることにする。

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われている。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。

といった点が挙げられる。生物の二関節筋と同様にリニアアクチュエータを図 6 のように接続すれば良い。アクチュエータの固定子、可動子と各関節が接続され固定子に関してはレールなどの機構によってリンクからは自由に動くことができる。

固定子がリンクに固定された機構としては例えば図 7 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が考えられる。しかしながら、機構が複雑になったり、重量がかさむ、アクチュエータで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。

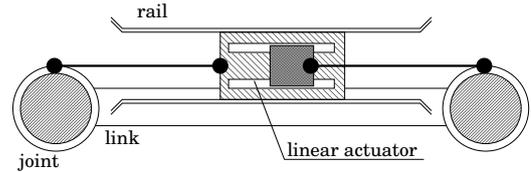


Fig. 6 Bi-articular driving mechanism which is connected to each joint directly

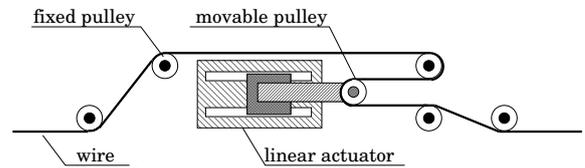


Fig. 7 Bi-articular driving mechanism using pulleys

3.2 3 対 6 筋に相当する機構を備えたロボットアーム

制作の目的としては、(1) 3 対 6 筋に相当する機構を備えたロボットアームの静的、動的特性の検証を行なう。(2) 複数のモータを組み合わせた時に生じるであろう振動等の問題点の解決に関する知見を得る。ということが挙げられ、完全な二関節同時駆動機構ロボット (図 8) へ至るプロトタイプとして位置づける。

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、ソフトウェアの一部機能を補完することにした。今回は島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。⁷⁾

制作するロボットアームの外観を図 9 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。

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 9 で示すロボットアーム (C)、従来のロボットアーム (D) につ

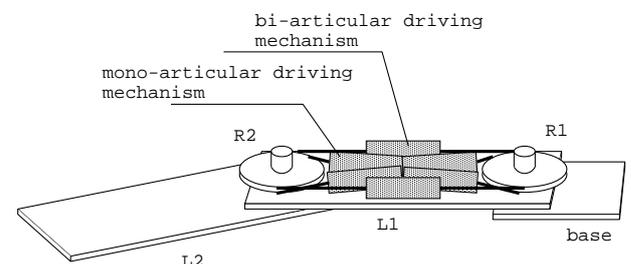


Fig. 8 Robot arm which has a antagonistic pair of bi-articular driving mechanism and two antagonistic pairs of mono-articular driving mechanism

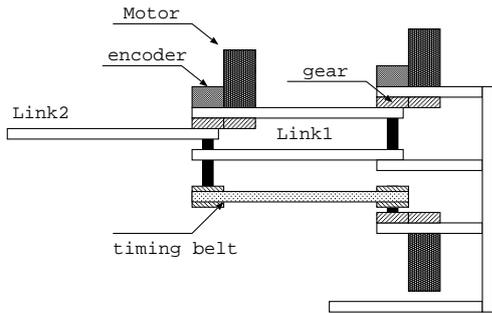


Fig. 9 Outline view of robot arm

Table 1 Comparison of each arms

A is animal's arm. B1(Fig. 8) and B2(Fig. 9) are robot arms using bi-articular driving mechanism. B2 is what we attempt to make now. C is conventional robot arm.

- : existing, ○ : virtually existing, × : no existing.

	A	B1	B2	C
(1)driving mono-articular				
(2)driving bi-articular				×
(3)antagonistic pair				×
(4)muscular viscoelasticity				×

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。

4. 二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの製作

図 10 のようにロボットアームを製作した。図 9 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。

以下にロボットアーム本体部分に関する諸元を示す(表 2)。モータはタミヤ製の 540K75 をそれぞれの拮抗対用に 3 個用いる。制御用に各軸の回転角を求めるためのエンコーダと、各モータの電流を測定するセンサを備える。

次にモータの駆動、コントローラに関してであるが図 11 に示すようなブロックで表わされる。目標軌道等から最適な収縮力の和と差の組を、contractile force generator によって生成する。⁸⁾ 次に、antagonistic muscle module(図 5) を用いて収縮力及びエンコーダより取得した関節角度から各拮抗対が出力すべき力を計算する。さらに完全な二関節同時駆動機構は備えていないために、この補償を行なうために、force distributor を用いて分配をする。force distributor はゲインを K_i として

Table 2 Major parameters of robot arm

Total height	about 250[mm]
Total length	about 500[mm]
Link1(upper,bottom)	200 × 50 × 10[mm] 270[g]
Link2	200 × 50 × 10[mm] 270[g]
Motor	TAMIYA(540K75)
Encoder	OMRON(E6H-CWZ6C)
Current sensor	U_RD(HCS-20-SC-A-2.5)

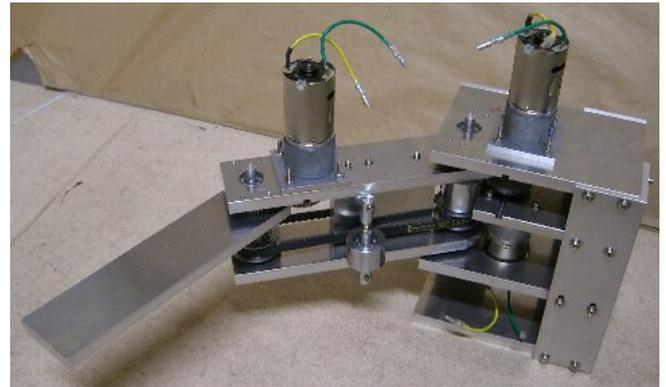


Fig. 10 A photo of robot arm which we are working on

Table 3 Parts of Controller

CPU board	Advantech(PCM-9371F-J0A1)
Counter board	TAC(TI04-C160)
AD-DA board	TAC(TI04-ADA)
Current Controller and PWM	Microchip(16F877)
H-bridge	Toshiba(2SK2312)
Gate driver	Nihon Pulse(FDM2B)
	Toshiba(2SK1484)

以下のような行列として表現することができる。

$$\begin{pmatrix} i_1^* \\ i_2^* \\ i_3^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_i & 0 & K_i \\ 0 & K_i & 0 \\ 0 & 0 & K_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1^* \\ F_2^* \\ F_3^* \end{pmatrix} \dots (7)$$

このようにして作成した電流指令値を電流制御器へ出力する。ここまでを制御用 PC に行なう。電流制御器と PWM の生成器に関しては PIC(16F877) を用いて、各モータごとに作成する。

本ロボットアームの制御系では、最も小さなループとしてモータの電流制御を行なっている。また、ロータリーエンコーダからの情報をフィードバックすることで、仮想的に筋肉の特性を実現している。例えば電磁アクチュエータを用いて筋肉に見せかけるためには、これらのフィードバック系は必要不可欠である。contractile force generator が、いわゆるヒトが持つフィードフォワード系であり、まずはフィードフォワードのみでの駆動ができることを示していく。

5. まとめと今後の課題

本論文では二関節同時駆動機構を提案し、その実装について説明した。二関節同時駆動機構を備えたロボットアームとして、3つの拮抗対をそれぞれ回転型のモータで表し、これにソフトウェア的に補正を加えることで仮想的に3対6筋として実現した。

ひとまずロボットの機械および回路を完成させた。引き続き実験機の動作確認を行ない。静的特性、動的特性の検証を行なっていきたい。

参考文献

- 1) Minayori Kumamoto, Toru Oshima and 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

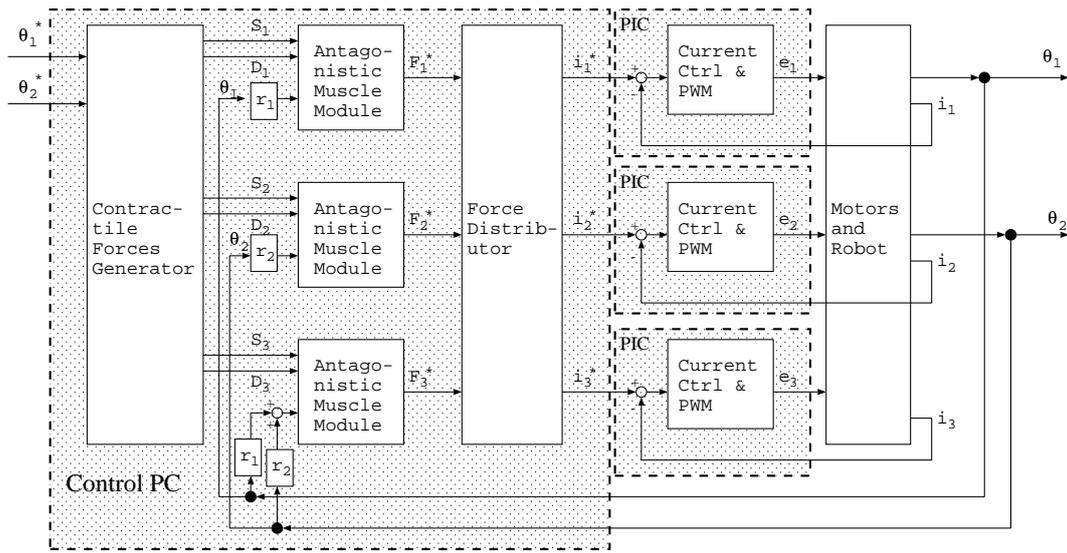


Fig. 11 Control diagram

- 2) 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
- 3) 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
- 4) 斎藤之男, 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 Workshp, 2003
- 5) 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
- 6) 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
- 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) 吉田 憲吾, 堀 洋一, "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", 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会第 2 回例会, 2005