

二関節同時駆動機構を備えるロボットアームの静・動特性の実験的考察

吉田 憲吾, 内田 利之, 呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学)

Experimental Study on Static and Dynamic Properties of Robot Arm Equipped with Bi-articular Driving Mechanism

Kengo Yoshida, Toshiyuki Uchida, Sehoon Oh, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

This paper describes verification on static and dynamic properties of robot arm equipped with bi-articular driving mechanism. Conventional robot arm only has actuators which drive one joint independently. Bi-articular driving mechanism drives both two joint simultaneously. It mimics animal bi-articular muscles.

For verification of the static property, output force at end point of the robot arm is measured in the experiments. Experimental results agree with the simulation results. Existence of bi-articular driving mechanism improves total range of output force. Moreover as verification of dynamic property, the experiment proves that the proposed robot arm can drive two joints with any two motors out of three motors. These experiments verified that the proposed bi-articular driving mechanism can work in static and dynamic situations. The robot arm equipped with bi-articular driving mechanism is proved to have some advantages which animals have.

キーワード：ロボットアーム, 冗長性, 二関節筋, 筋骨格系

Keywords: robot arm, redundancy, bi-articular muscle, musculoskeletal system

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的 現在、産業界を中心に多くの産業用ロボットが活躍している。一方、ヒューマノイド等の人間の生活範囲で協働することを期待されるロボットも様々提案されてきている。前者では、人間とは隔離された既知の環境で働くことを前提に、高速かつ精密な動作を求められるのに対し、後者ではむしろ未知環境への対応であったり、衝突時の安全性といった、生物のようないわゆる巧みな動きが求められる。さて、これら従来のロボットと生物とを比べると、その構造や制御手法において大きな違いがあることが分かる。本研究では特に生物の四肢の構造に着目し、この構造の制御的な役割を明らかにして応用することで、ロボットにおける巧みな動きの実現を目指す。

従来のロボット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が、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）。また、筋は片側にのみ力を発揮するアクチュエータであるから、対を作って拮抗駆動を行なう。さらに筋は特徴的な粘弾性を持っており、これらが生物の機能特性に大きな影響を与えている。

本論文ではこの二関節筋を機械的に実現した二関節同時駆動機構を備えたロボットアーム⁽¹⁾について、機構の動作、また機構を加えることによる効果の実験的な検証を行

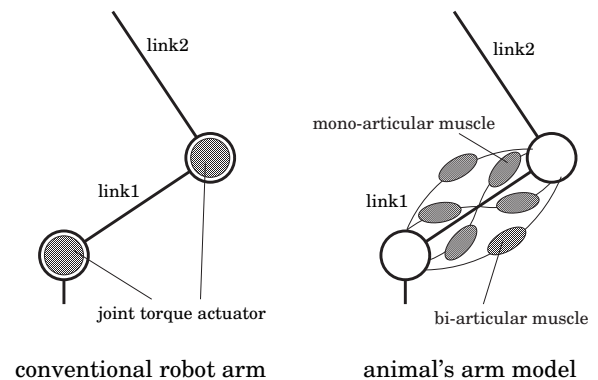


図1 従来のロボットアームのモデルと生物の
アームモデル

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

なう。4章においては、静的な条件においてアーム手先における力出力を測定してその特性を検証する。また、5章においては、3つあるモータのうちのいずれかを外しての動作を確認する。二関節同時駆動機構が両方の関節に対してトルクを発生でき、これを備えたロボットアームの冗長性を確認する。

1.2 生物の機構の応用に関する既存研究 Ingen Shenau によって二関節筋が体幹部で発生した力の伝達機構として働いていることが指摘された⁽²⁾。Hogan らによって手先インピーダンスの制御にかんして二関節筋をはじめ

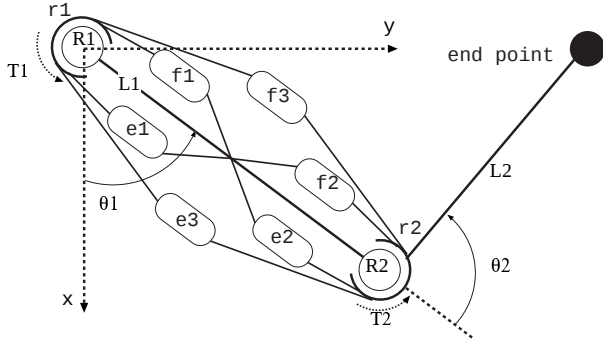


図2 3対6筋を持つアーム機構

Fig. 2. Arm model equipped with three antagonistic muscular pairs

とする冗長な筋の拮抗構造が大きな役割を果たしていることが示された⁽³⁾⁽⁴⁾。また、Mussa Ivaldi らによって姿勢による手先のスティフネス楕円体の変化が実験的に示された⁽⁵⁾。Kumamoto らは二関節筋が平面運動においてのみ働くことから、3対6筋の実行筋によるモデル化とこれによる手先出力及び手先剛性の特性を解析及び実験によって示した⁽⁶⁾。

二関節筋をはじめとした生体機構を応用したロボットの事例としては、門田らによって二関節筋を含む3対6筋を機械的に実現したロボットアームが提案された⁽⁷⁾。また小田らは二関節筋をバネによって置きかえた跳躍ロボットを開発した⁽⁸⁾。大島らは下腿の二関節筋である腓腹筋をワイヤで置き換えたモデルを提案し、これを実機において検証した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、Niiyama らによって空気圧アクチュエータとバネを組み合わせた下肢ロボット Mowgli が開発され、ロバストな着地運動が可能であることを実証した⁽¹¹⁾。

2. 二関節同時駆動機構を持つアームのモデル

生物の上肢、下肢のアーム機構は動作を平面内に限定することで図2のような2リンクの機構として単純化することができる。四肢の各筋は機能の観点から3対6筋によって表すことができる。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。

二つの関節 R1, R2 の半径をそれぞれ r_1, r_2 とし、各アクチュエータの出力を $F_x, (x = e1, e2, e3, f1, f2, f3)$ とする、各々に発生するトルク $T1, T2$ は式(1)と表わされる。

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

筋肉は引っ張り時にのみ力を発揮できるアクチュエータであるから、f1 と e1、f2 と e2、f3 と e3 はそれぞれ拮抗対として、各関節を両側に駆動することが可能となる。一般的な DC モータは単体で両回転方向にトルクを発揮できるので、本論文で提案するロボットアームは各拮抗対を DC

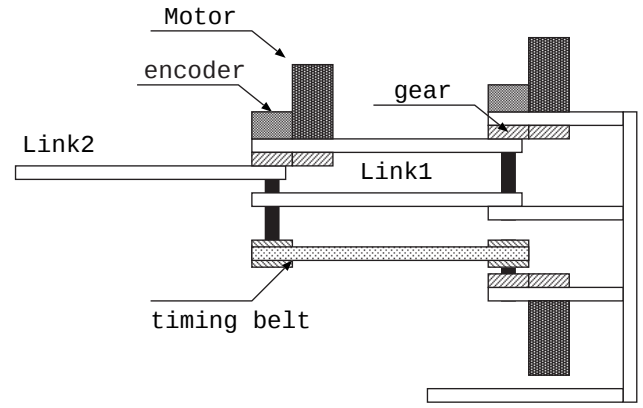


図3 二関節同時駆動機構を備えたロボットアームの全体図

Fig. 3. Outline view of robot arm design

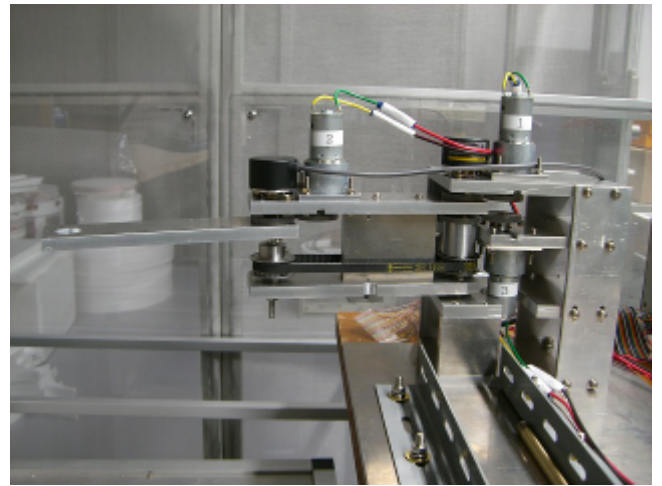


図4 制作したロボットアーム

Fig. 4. A photo of robot arm

モータで置き替える。各関節トルクは、モータの発生するトルク T_{m1}, T_{m2}, T_{m3} を用いて式(2)と表わされる。

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{m1} + T_{m3} \\ T_2 &= T_{m2} + T_{m3} \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

手先における出力はヤコビ行列 J_{aco} を用いて式3と表すことができる。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = (J_{aco}^T)^{-1} \begin{pmatrix} T_{m1} + T_{m3} \\ T_{m2} + T_{m3} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (3)$$

T_{m3} の値は両関節に同時に加わるため、各モータのトルクに最大値がある場合、手先で発揮できる力の領域は二関節筋、二関節同時駆動機構の存在の有無で異なってくる。このことは4章にて実験的に示す。

3. 二関節同時駆動機構を備えるロボットアーム

二関節同時駆動機構を備えるロボットアームの模式図を

表 1 モータとセンサ類

Table 1. Motors and Sensors

Motors	TAMIYA(380K75)
Encoders	OMRON(E6H-CWZ6C)
Force Sensor	NITTA(IFS-67M25A25-140-ANA)
Current Sensor	MAXON ADS 50/5

表 2 制御コントローラの構成

Table 2. Components of control system

Motor driver	MAXON ADS 50/5
OS	ART-Linux
CPU	Intel Pentium4 1.5MHz
AD-DA board	Interface PCI-3523A
Counter board	Interface PCI-6201E
Receiver of force sensor	Nitta IFS-PCI-2184D

表 3 ロボットアームの主な諸元

Table 3. Properties of robot arm

Total height	270mm
Total length	500mm
Total mass of link 1	0.72kg
Total Length of link 1 between joint 1 and 2	165mm
Total mass of link 2	0.27kg
Total length of link 2 between joint 2 and center of force sensor	185mm
Moment of inertia of joint 1	0.034kg·m ²
Moment of inertia of joint 2	0.0058kg·m ²
Torque coefficient	0.20Nm/A

図 3 に示す。提案するロボットアームでは、各拮抗対をそれぞれ DC モータで置き替えている。モータ 1 は R1 のみを駆動し、モータ 2 は R2 のみを駆動する。これらは単関節筋の拮抗対に相当する。モータ 3 は二関節同時駆動機構としてプーリとタイミングベルトを用いて R1,R2 の両関節にトルクを伝える。こちらは二関節筋の拮抗対に相当する。二関節同時駆動機構の R1 側の軸は、ロボットアームの R1 の軸とは完全に切り離されており、リンク 2 とベースを繋ぐ構造となっている。この機構によって、二関節同時駆動機構の特徴である、(1) 非動作時に他の関節の駆動を妨げない、(2) 同時に両関節に同じ力を発揮するという特徴を満たす。

実際に制作したロボットアームを図 4 に示す。またロボットアームに使われているモータとセンサ類を表 1 に示す。ロボットアームの各軸に対してのみエンコーダが取り付けられている。また、ロボットアームの手先は力センサと接続することができる。これらの計測情報は PC のインターフェイスボードを通じて直接取り込まれる。モータドライバとしては MAXON 製の ADS 50/5 を用いる。こちらは電流制御モードで動作させ、PC からは必要なトルクに相当する電流指令を送る。制御用の PC としては、ART-LINUX をインストールしたものを用い、リアルタイムの制御を実現している。この構成を表 2 に示す。リンク長、重量等のパラメタは表 3 に示す。本論文における実験の計算による

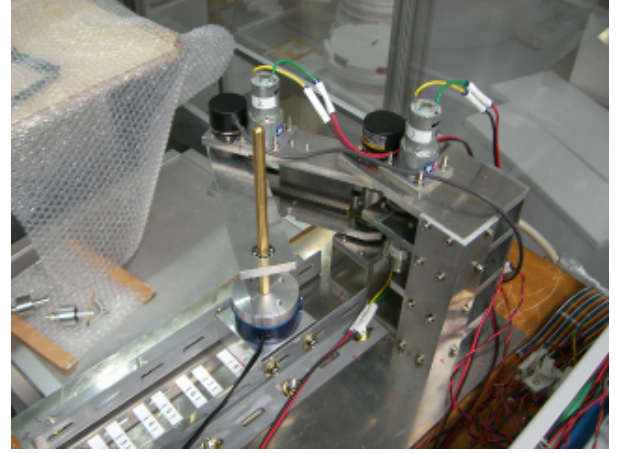


図 5 実験のためのセットアップ

Fig. 5. Experimental Setup

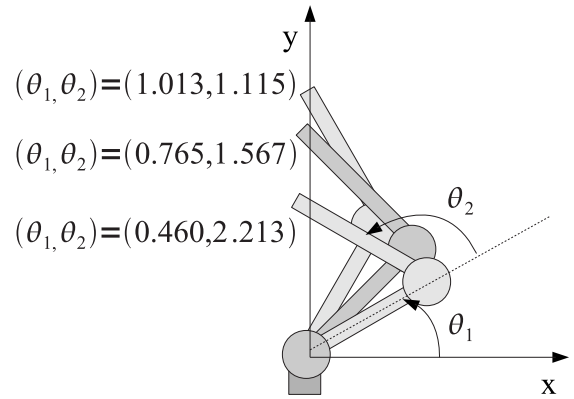


図 6 ロボットアームの姿勢と座標

Fig. 6. Coordinate and Postures of Robot Arm

理論値ではこの値を用いている。

4. ロボットアーム手先における力出力実験

二関節同時駆動機構が正しく動作していることの検証として、まずは静的な条件で手先における力の出力範囲を測定し、理論通りの出力が得られているかどうかを確かめる。実験のための装置のセットアップを図 5 のように示す。手先を力センサに固定し、力センサはベースに固定する。実験を行なった姿勢と、座標系を図 6 に示す。

実験では、各方向に最大の力を出すように筋の交代パターン⁽⁶⁾に基づき 40 点計測する。実際のパターンを図 7 及び図 8 に示す。ここで θ_{msl} は便宜的な変数であり、 0π から 2π の範囲で計測点を均等に求める。力の計測については各モータが一定のトルクを出力し始めてから 50msec 待ち、次の 200msec において計測した力を平均したものを各点の結果とする。計測のサンプリング周期は 1msec である。

二関節同時駆動機構を持たない従来型のアーム (arm1) と、二関節同時駆動機構の寄与の比を変えた 2 種のアーム (arm2, arm3) について比較実験を行なう。式 (4) のように

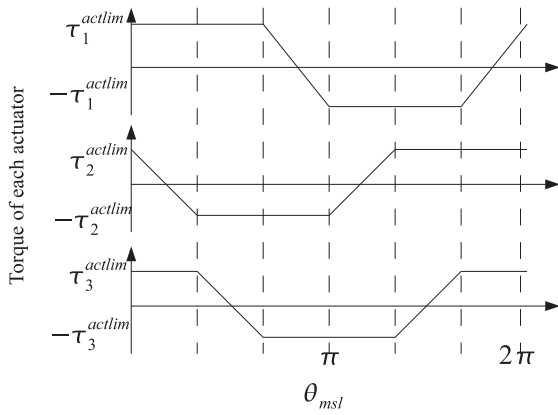


図7 筋出力パターンに基づくトルク指令 (二関節同時駆動機構あり)

Fig. 7. Torque Commands based on muscular output pattern (with bi-articular driving mechanism)

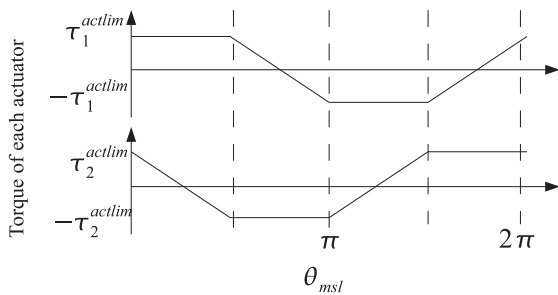


図8 筋出力パターンに基づくトルク指令 (二関節同時駆動機構無し)

Fig. 8. Torque Commands based on muscular output pattern (without bi-articular driving mechanism)

各モータの最大トルク [Nm] を制限する。ここで、最大トルクの和を揃えることで公平な実験を行なう。

$$\begin{aligned} L_{arm1} &= \text{diag}(0.3, 0.3, 0) \\ L_{arm2} &= \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2) \\ L_{arm3} &= \text{diag}(0.15, 0.15, 0.3) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ロボットアームの姿勢を $\theta_1 = 0.765, \theta_2 = 1.567$ とした時の比較を図9に示す。計測点を赤色の+でプロットし、式(3)より求めた計算上の出力を緑色の点線で、⁽¹²⁾で示された拡張した操作性指標を青色の楕円で合わせて表示する。この結果、実際の出力は計算上の値と良く合致していることが分かる。従来型のアームにおいては四角形の出力が得られるが、二関節筋、二関節同時駆動機構を供えたアームにおいては六角形の出力が得られる。また、各モータの最大トルクの比率を変えることで出力可能な領域などの特性を変化させることができる。

図10、11には、それぞれより腕を伸ばした姿勢、曲げた姿勢における出力特性の変化を arm2 に関して示してい

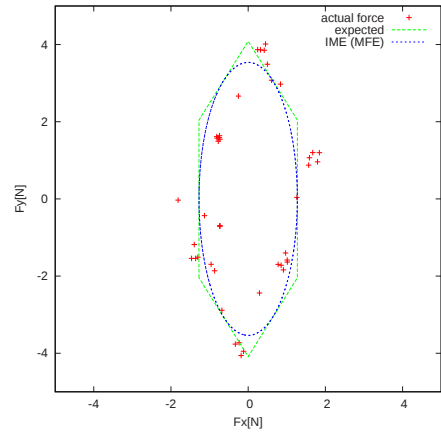


図10 力出力実験の結果 ($\theta_1 = 1.013, \theta_2 = 1.115$)

Fig. 10. Range of output force ($\theta_1 = 1.013, \theta_2 = 1.115$)

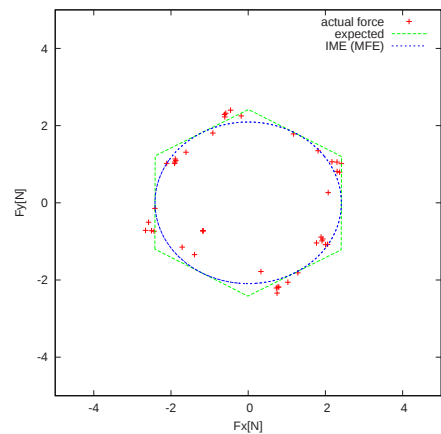


図11 力出力実験の結果 ($\theta_1 = 0.460, \theta_2 = 2.213$)

Fig. 11. Range of output force ($\theta_1 = 0.460, \theta_2 = 2.213$)

る。ここでも、計算によって求めた結果と計測結果は良く一致している。静的な条件においては、二関節同時駆動機構が理論通りうまく働いていることがこれらの実験から示された。

5. ロボットアームの駆動実験

二関節同時駆動機構が二つの関節に同時に力を加えることができることを示すために、ロボットアームの3つのモータのいずれの2つでも駆動できることを確認する。位置指令として各軸に対し振幅 0.3rad の矩形波を与え、各関節角をこれに追従させる。各軸は外乱オブザーバと PD 制御器を用いて図12のブロック図で制御される。ここで、 K_{p1}, K_{p2} は関節 R1, R2 に対する PD 制御器の比例ゲイン、 K_{d1}, K_{d2} は微分ゲインである。また、外乱オブザーバのノミナルイナーシャを J_{n1}, J_{n2} とし、トルク定数のノミナル値を kt_n とする。モータ3を外した場合は、単関節駆

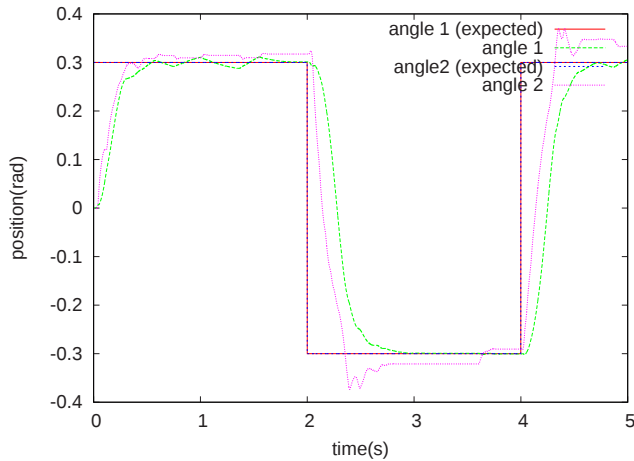


図 13 モータ 3 を外した駆動実験

Fig. 13. Experiment without motor 3

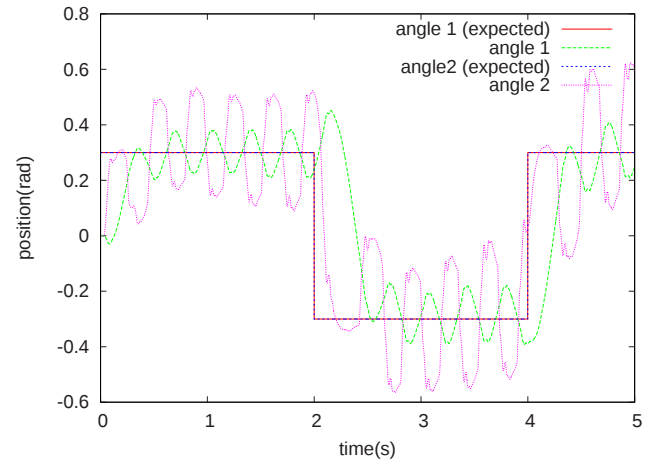


図 15 モータ 1 を外した駆動実験

Fig. 15. Experiment without motor 1

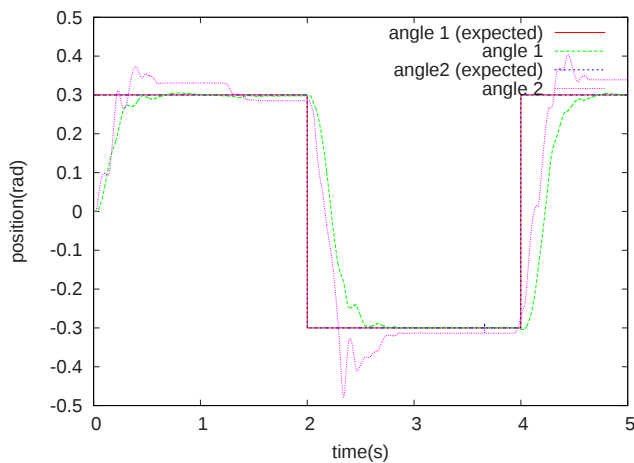


図 14 モータ 2 を外した駆動実験

Fig. 14. Experiment without motor 2

ロボットアームの駆動方法について、本論文の 5 章のような既存の制御工学による手法、生物の制御手法を模倣した方法??双方に関してより改善し、実験による検証を進める。

文 献

- (1) Kengo Yoshida, Naoki Hata, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori, "A Novel Design and Realization of Robot Arm Based on the Principle of Bi-articular Muscles", Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2006. 12
- (2) G. J. van Ingen Shenau, M. F. Bobbert and R. H. Rozendal, "The unique action of bi-articular muscles in complex movements", Journal of Anatomy, 155, pp. 1-5, 1987
- (3) Neville Hogan, "Adaptive Control of Mechanical Impedance by Coactivation of Antagonist Muscles", IEEE Transactions on Automatic Control, vol.AC-29, No.8, pp. 681-690, 1984
- (4) Neville Hogan, "On the stability of Manipulators Performing Contact Tasks", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 6, pp. 677-686, 1988
- (5) F. A. Mussa Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi, "Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subserving Arm Posture in Humans", The Journal of Neuroscience, Vol. 5, No. 10, pp. 2732-2743, 1985
- (6) 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
- (7) Kenji Kadota, Kenya Suzuki, Zenrou Fukai and Takahiro Oda, "Study on the basic robot platform model HIPRO using bi-articular muscles functions - Evaluation of bi-articular muscles functions by the robot arm using VEA -", The Japan Society for Precision Engineering, Committee of Biological Control System and Its Applied Technology, 2004.10
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
- (8) Takahiro Oda, Mamoru Tokita, Kenji Kadota, Kenya Suzuki, Zenrou Fukai and Koukichi Simada, "Coordination control model - Robot Leg using bi-articular muscle functions -", The Japan Society for Precision Engineering, Committee of Biological Control System and Its Applied Technology, 2005.8
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
- (9) Toru Oshima, Noboru Momose and Kiyoshi Toriumi, "Jump mechanism using coordination in knee and ankle joint and application to leg orthosis", The 2005 International Power Electronics Conference, 2005
- (10) Seiji Toriumi, Toru Oshima, Tomohiko Fujikawa, Mizuyori Kumamoto and Noboru Momose, "Effect of the Bi-articular Gastrocnemius Muscle of Human on the Jump Movement of the Model", Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol. 69, No. 688, pp. 3263-3268, 2003
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
- (11) Ryuma Niyama, Akihiko Nagakubo, Yasuo Kuniyoshi, "A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007
- (12) Kengo Yoshida, Naoki Hata, Sehoon Oh, Yoichi Hori, "Evaluation of Robot Arm Equipped with Bi-articular Muscles by Extended Manipulability Measures", 2008 Annual Conference of I.E.E. of Japan. Industry Applications Society, 2008
吉田 憲吾, 畠 直輝, 吳 世訓, 堀 洋一, "拡張した可操作性指標による二関節筋を持つロボットアームの評価", 電気学会平成 20 年度産業応用部門大会, 2008