

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 -

門田健志^{**}, 鈴木健也^{**}, 深井善朗^{**}, 小田高広^{**}

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-

Kenji KADOTA, Kenya SUZUKI, Zenrou FUKAI and Takahiro ODA

This study reports a drive principle and the movement characteristic about a Variable Elastic Actuator (VEA) developed in order to realize the basic robot platform model “HIPRO” using bi-articular muscles functions. VEA consists of a spring, and a straight-line motion type actuator and a sensor, and the same characteristic as a man's muscular power can be reproduced by controlling the elastic characteristic of a spring by moving an actuator by the sensor. As a result of developing a robot arm using VEA and evaluating the output characteristic at the tip of a robot arm, it can check that it is the same output characteristic as bi-articular muscles functions. Therefore, it can be said that VEA is an very important actuator in order for HIPRO to perform the same bi-articular muscles functions as a man.

Key words: bi-articular muscles functions, HIPRO, VEA, robot arm

1. 緒 言

現在少子高齢化社会を快適で安心した社会にするために、日本が世界に誇るネットワーク技術とロボット技術を活用して、生活を支援するヒューマノイドロボット（以下、HRTと略する）の研究が行われている。特に、家事や介護といった作業を支援する場面では、ヒトとロボットが直接触れ合うことが多くなるため、ロボットのコミュニケーション機能と身体機能が非常に重要となってくる。

最近発表されたロボットのコミュニケーション機能は、ヒトの脳を分析した研究成果に高性能なコンピュータとセンサを組合せることでヒトと自然に会話ができるようになっている。しかし一方の身体機能については、ヒトの身体機能とは異なり、ロボット工学独自の関節座標系制御理論を用いて、ヒトの身体運動を外見上模倣した多自由度な運動を実現している。そのため、ヒトとロボットが協調作業を行う場合には、見た目に単純なヒトの動作であっても、ロボットは高性能なコンピュータとセンサ、複雑な運動アルゴリズムを組合せたフィードバック制御方式によって、ヒトとの協調性を実現している。これではいくらコミュニケーション機能が向上しても身体機能の応答性が悪いため、ヒトとロボットが自然に協調するにはコンピュータのさらなる進化を待つしかなくなる。つまりロボットの身体機能をヒトと同じように俊敏で柔軟にするためには、ロボットの運動アルゴリズムを複雑にするのではなく、ヒトの身体機能をロボット技術に応用することが不可欠となる。

そこで、本研究ではHRTの身体機能を向上させるため、ヒトがもつ2関節筋機能を工学モデルで具現化したロボットプラットフォームHIPRO（ヒプロ）を開発する。なお、HIPROとは医学の父ヒポクラテスと最先端工学の結晶ロボットを融合させた造語であり、そこには今までのロボットとは異なり、医学と工学の融合によってロボットの身体機能を進化させ、ヒトとの親和性と協調性を向上させることを表す。

本報告では、HIPROの開発概念とともに、HIPROの駆動用アクチュエータとして独自に開発した可変弾性アクチュエータ（VEA；Variable Elastic Actuator）の基本原理と駆動特性を示す。さらにVEAを拮抗3対6筋配列に構成したHIPROを試作した結果、ヒトと同じ2関節筋機能を再現したことを紹介する。

2. HIPROの概念

2.1 ロボットコンセプト

熊本らの研究¹⁾²⁾⁷⁾によると、ヒトの四肢先端では二関節筋と一関節筋からなる筋群の協調運動によって、(a)出力・出力方向制御、(b)剛性制御、(c)軌道制御の三つを特徴とする運動が発生する。そこでは、二関節筋が重要な役割を果たしており、しかも二関節筋は古くから解剖学的には周知の筋であり(C. Galen, 131-201AD)、哺乳類から両棲類まで極めて普遍的に存在し、昆虫にさえ存在すると報告されている³⁾。

そこで、本研究では上記3つの運動特性をもつ2関節筋機能を工学モデルで具現化したロボットプラットフォームHIPROを開発する。そしてHIPROによって、現在のHRTの身体機能をヒトと同じレベルへ飛躍的に向上させるとともに、今後ロボットの形態が使用環境に応じて変化してもHIPROのプラットフォームを応用することで、変形した形態でも同じ運動特性が実現できることを目指す。

図1はHIPROのコンセプトを示す。HIPROはヒトの上肢(図2²⁾⁶⁾参照)のように二関節筋と一関節筋が拮抗3対6筋構

* 原稿受付 2004年10月23日。

** 沖電気工業(株)金融ソリューションカンパニー
システム機器本部 先端技術開発部
(群馬県高崎市双葉町3-1)

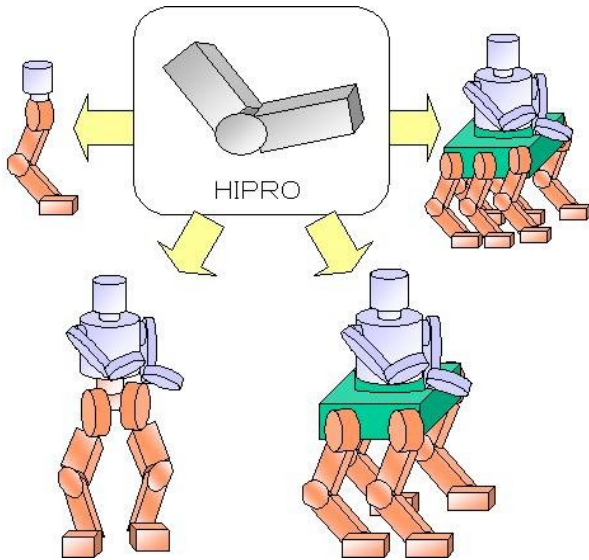


Fig.1 The concept of HIPRO

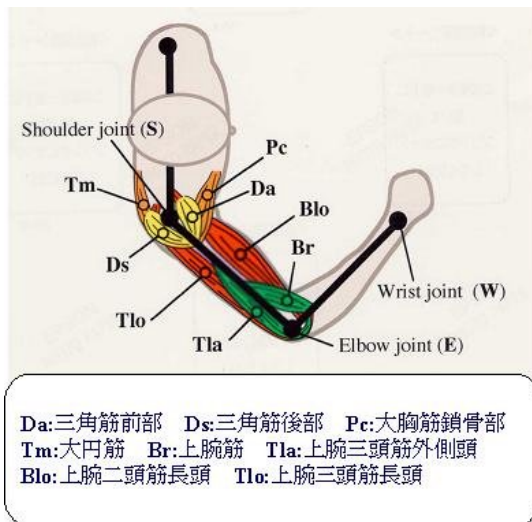


Fig.2 A man's upper limbs²⁶⁾

造になっている筋配列部分を1つのモジュールにした基本モデルである。そしてHIPROの各端部は図1に示すように、他の機能部品との連結性を容易にした構造を有している。これにより、ロボットを使用環境に対応して1足形態から多足形態へと容易に変形させることが可能となる。

2.2 運動特性と技術課題

現在発表されているHRTの殆どはHIPROのような二関節筋は全く実装されていない。通常HRTは各関節ごとに小型で高出力な電磁式回転モータを装備して、それぞれのモータが高性能なコンピュータとセンサによってフィードバック制御されて多自由度な運動を実現する。

HRTとHIPROとの違いは熊本ら⁷⁾の研究より図3で示す結果となる。HRTはヒトの一関節筋を電磁式回転モータで具現化した構造、すなわち図3(a)または図3(b)に示した構造となり、アーム先端に発生するスティフネス楕円特性は外力Fの作用方向によって容易に変化する。そのためHRTでは外力Fをセンサで検出しながら各関節の

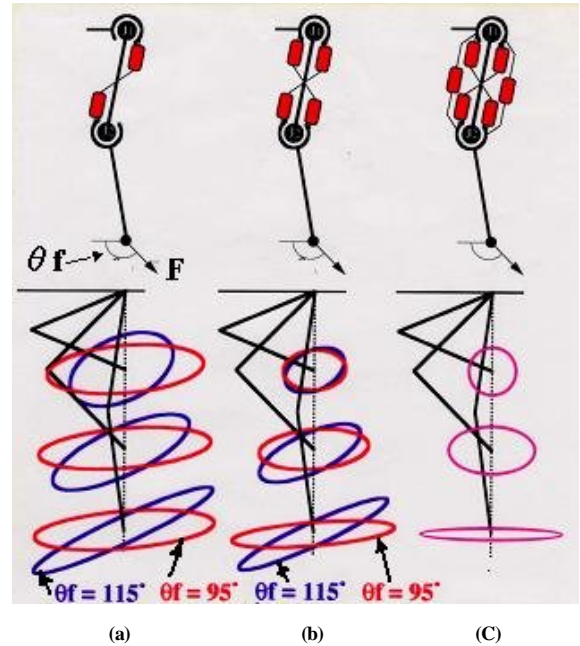


Fig.3 Effects of existence of bi-articular muscles on stiffness of the two-joint link mechanism.⁷⁾

トルクを制御しないとアーム先端のスティフネスが安定化しないことになる。一方HIPROは2関節筋を採用しているため構造は図3(c)となり、外力Fの作用方向に関係なくスティフネス楕円特性は安定している。このことから、HIPROはHRTのような高性能なコンピュータやセンサ、さらには複雑な運動アルゴリズムが不要となり、ヒトと同じような俊敏で柔軟な運動が可能といえる。

3. HIPROの開発

3.1 可変弾性アクチュエータ(VEA)の開発

HIPROを実現するには、熊本ら¹⁾²⁾が提案する筋出力モデル(図4(a)参照)

$$F_m = u - k(u)x \cdots (3.1)$$

をいかに工学モデルで具現化できるかがポイントとなる。そこで、本研究では筋出力の弾性率 $k(u)$ と収縮量 u を工学モデルであるコイルバネとリニアアクチュエータで発生させるメカニズムを開発した。

図4(b)に本研究で独自に開発した可変弾性アクチュエータVEAの基本原理を示す。VEAはコイルバネ、リニアアクチュエータ、ストロークセンサ及びコントローラから構成されている。同コントローラでは図5に示す制御ブロックによって、アクチュエータの出力が筋出力の特性式(3.1)と等しくなるように端面Aの位置を制御する。したがって、VEAは一定の範囲内で任意の弾性率を設定でき、また、弾性率を瞬時に変化させることができる。

図6(a)(b)にVEAの収縮量 x に対する周波数特性を示す。これによりVEAは周波数の帯域が0~5Hzの範囲で弾性率 $k(u)$ が制御できることが確認できた。ここで、ある周波数において実際の筋出力 F_m の、筋出力の目標値 $F_{mref} = u - kx$ に対する応答を伝達関数 $H(s) = A + sB$ で表すとす。収縮量 x に対する応答に着目すれば、

$$F_m(s) = -(A + sB)kx(s) = -Akx(s) - Bksx(s)$$

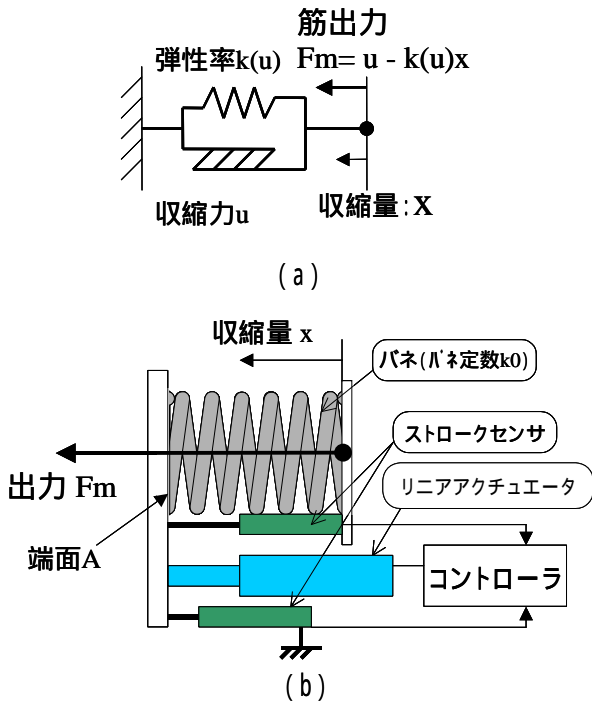


Fig.4 The basic principle of VEA

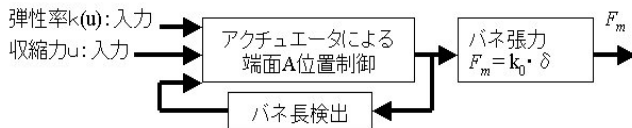


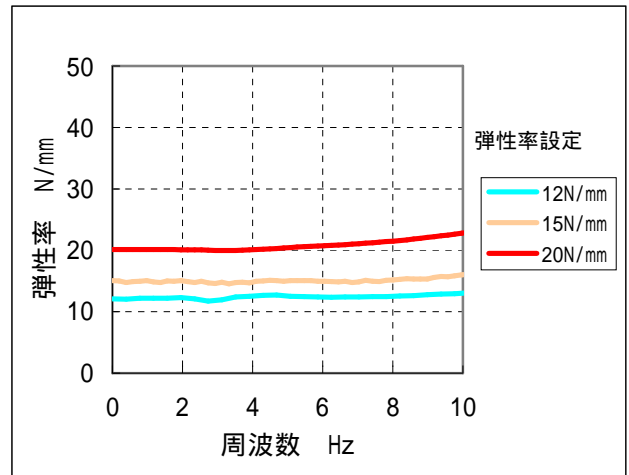
Fig.5 The control block of VEA

であるから、アクチュエータは Ak の弾性率と、 Bk の粘性抵抗係数を有する。アクチュエータが粘性抵抗を有することは動作の安定性に寄与する。よって、VEAは図4 (a)の筋出力モデルを工学的に具現化したアクチュエータであるといえる。

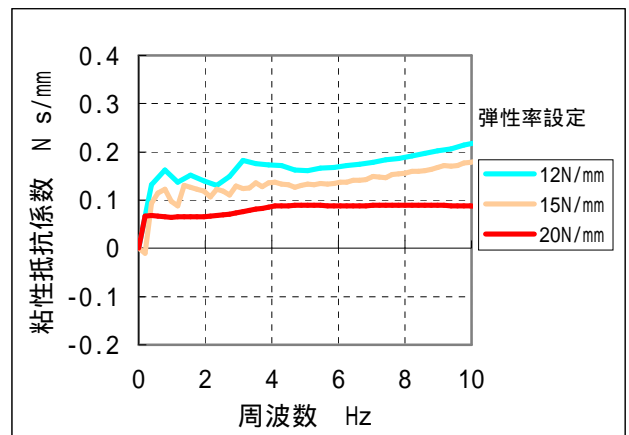
3.2 HIPROの試作機

ここでは図1に示したコンセプトに従って、VEAをヒトの上肢と同じ拮抗3対6筋配列で構成したHIPROを試作する。写真1は試作したHIPROの外観を示し、図7は試作したHIPRO内部におけるVEAの配列を示す。ここで、図7に示す各VEAは関節軸にあるプーリに金属製ワイヤーで連結されている。また試作機では、VEAのリニアアクチュエータとして、ステッピングモータの回転運動をウォームギヤで減速し平歯車とラックで直線運動に変換するメカニズムを採用している。

試作したHIPROの大きさは、幅 450mm 奥行き 1000mm、高さ 800mm であり、重さは約 20kg である。



(a)



(b)

Fig.6 The measurement result of the drive characteristic of VEA

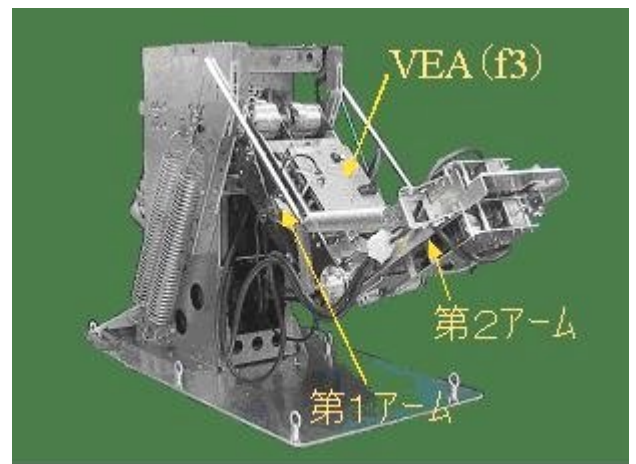
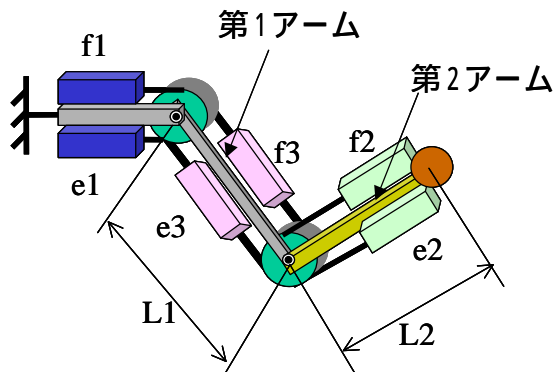


Photo.1 Experimental model of HIPRO



e1, f1, e3, f3 : VEAによる一関節筋
e2, f2 : VEAによる二関節筋

Fig.7 Arrangement of VEA in HIPRO

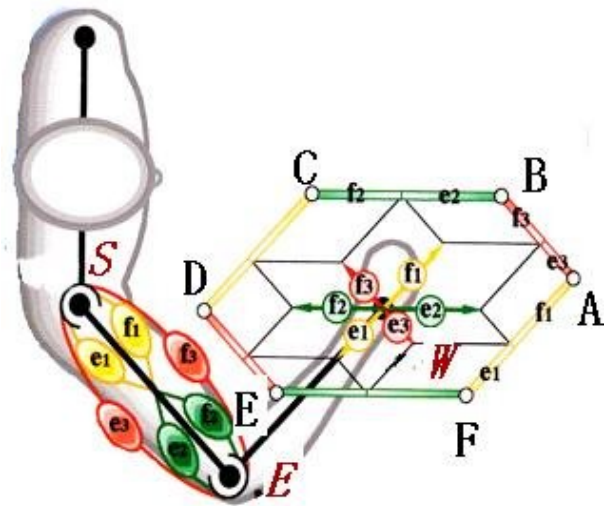


Fig.9 Unique characteristics of output force distribution⁷⁾

3.3 HIPROの先端出力特性評価

ここでは試作したHIPROに図8に示す駆動パターンを入力した場合、第2アームの先端に発生する出力特性が熊本らの研究成果と同じ特性を示すことを確認する。図9は熊本ら⁴⁾がヒトの上肢について求めた出力分布特性を示す。ここで、六角形出力の各辺の長さはそれぞれ拮抗筋の実効筋力値の和に等しくなる。つまり(A-B)=(D-E)=f3+e3, (B-C)=(E-F)=f2+e2, (C-D)=(F-A)=f1+e1となる。

まずHIPROの第2アーム先端には力覚センサ(株)製IFS-67M25A 15-I 40)を取り付け、第1, 2アームの姿勢を1=45(deg)、2=90(deg)として同センサの位置を固定する。次に各VEAに対して図8に示す駆動パターンで $u_{max}=50N$ となるように制御する。

図10に測定結果を示す。ここで理論値は実線、実測値は点である。これによりVEAを拮抗3対6筋配列で構成したHIPROは熊本らの研究成果と一致した出力特性、つまり2関節筋機能を再現できることが確認できた。

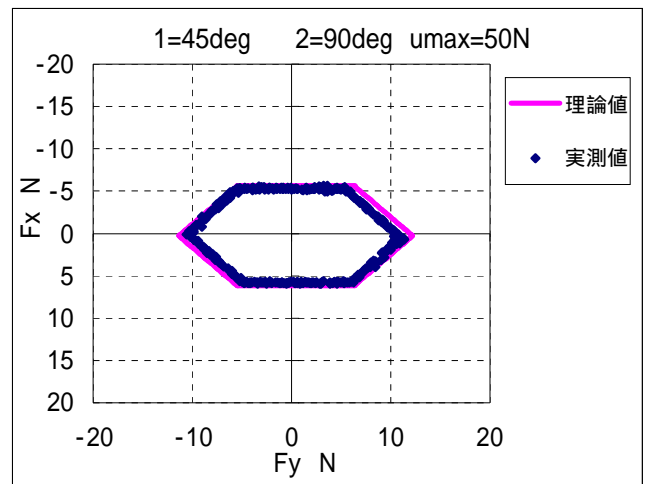


Fig.10 The experiment result of the output force distribution characteristic of HIPRO

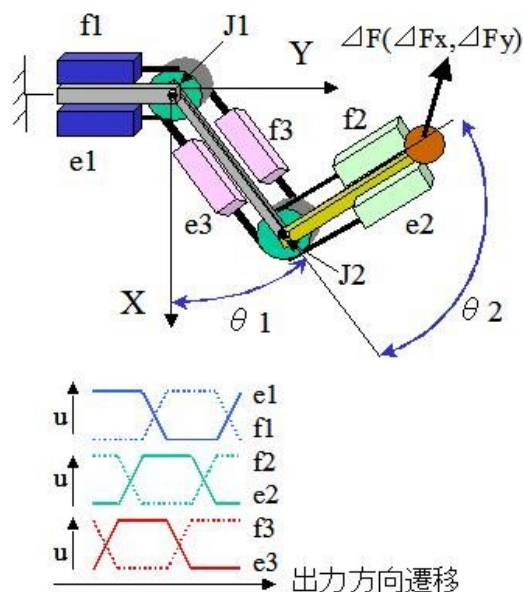


Fig.8 The drive principle of HIPRO

3.4 HIPROのスティフネス楕円特性評価

3.4.1 スティフネス楕円

HIPROの第2アーム先端のスティフネス特性(変位に対する出力応答)は熊本ら¹⁵⁾の研究より楕円を用いて表現することができる。

アーム先端の微小変位と関節角度変位の関係はヤコビ行列 J で表現される。本モデルにおいて、ヤコビ行列は図11に示すベクトルの成分を用いて式(3.2)と表現することができる。一方、VEAの出力特性式(3.1)と3対6筋の配置から関節角の変位に対する関節軸トルクの応答は、各関節のモーメントアームが等しい場合、式(3.3)で表わされる。また、ロボットアーム先端の力と関節軸トルクの関係は式(3.4)が成り立つことが一般に知られているので、ロボットアーム先端のスティフネス特性は式(3.5)と表現でき、ロボットアームの姿勢とアクチュエータの弾性率によって決定される。

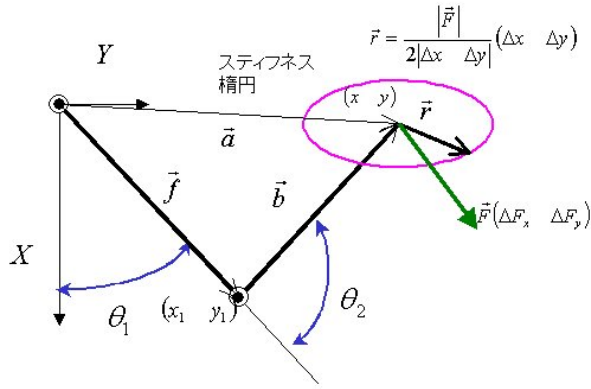


Fig.11 The stiffness ellipse characteristic generated at the tip of the 2nd arm of HIPRO

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -|\vec{f}| \sin \theta_1 - |\vec{b}| \sin(\theta_1 + \theta_2) & -|\vec{b}| \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ |\vec{f}| \cos \theta_1 + |\vec{b}| \cos(\theta_1 + \theta_2) & |\vec{b}| \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -y & -(y - y_1) \\ x & x - x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_x & -b_y \\ a_x & b_x \end{pmatrix} \quad \dots \dots (3.2)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \tau_1 \\ \Delta \tau_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} k_1 + k_3 & k_3 \\ k_3 & k_2 + k_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{pmatrix} \quad \dots \dots (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta \tau_1 \\ \Delta \tau_2 \end{pmatrix} = J^T \begin{pmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{pmatrix} \quad \dots \dots (3.4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta F_x \\ \Delta F_y \end{pmatrix} = -(J^T)^{-1} \begin{pmatrix} k_1 + k_3 & k_3 \\ k_3 & k_2 + k_3 \end{pmatrix} J^{-1} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$$

$$= -\frac{1}{|\vec{b} \times \vec{a}|^2} \left(k_1 \begin{pmatrix} b_x^2 & b_x b_y \\ b_x b_y & b_y^2 \end{pmatrix} + k_2 \begin{pmatrix} a_x^2 & a_x a_y \\ a_x a_y & a_y^2 \end{pmatrix} + k_3 \begin{pmatrix} f_x^2 & f_x f_y \\ f_x f_y & f_y^2 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}$$

$$= -\frac{1}{|\vec{b} \times \vec{a}|^2} (k_1 (\vec{b} \cdot (\Delta x \ \Delta y)) \vec{b} + k_2 (\vec{a} \cdot (\Delta x \ \Delta y)) \vec{a} + k_3 (\vec{f} \cdot (\Delta x \ \Delta y)) \vec{f})$$

$$\dots \dots (3.5)$$

3.4.2 スティフネス楕円特性の測定方法

写真2はHIPROの第2アーム先端に発生するスティフネス楕円特性を測定する方法を示す。ここでは前項の先端出力特性評価と異なり、各VEAは駆動させない。HIPROの第1, 2アームは所定の姿勢に設定され、第2アームの先端はリニアスライダ(THK(株)製VLA-ST-45-12-0400)と力覚センサ(ニッタ(株)製IFS-67M25A 15-I 40)を介して連結されている。リニアスライダを駆動させることで第2アームの先端にスライダの移動方向に強制変位を与えると、アーム先端に反力Fが発生する。このとき、第2アームの先端に発生する反力は同位置に設置した力覚センサで測定する。

3.4.3 特性評価結果

ここではHIPROの第1, 2アームの姿勢を変化させた場合、第2アームの先端に発生するスティフネス楕円特性を測定し、図3(c)と同じ特性になることを確認する。このとき、各VEAの弾性率は全て同じ値になるように制御する。

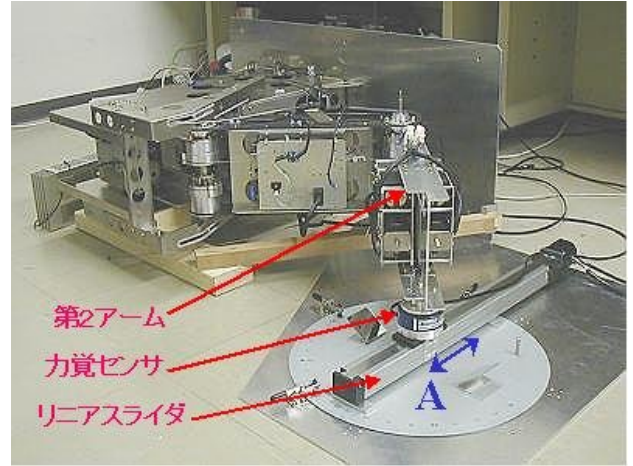


Photo.2 The experiment of the stiffness ellipse characteristic generated at the tip of the 2nd arm of HIPRO

図12にHIPROの姿勢を三通りに変化させたときのスティフネス楕円特性の評価結果を示す。ここでは各VEAの弾性率を全て25N/mmに制御している。これによりHIPROは各姿勢において理論どおりのスティフネス楕円特性を再現できることが確認できた。さらに、各VEAの弾性率を同時に25N/mmから20N/mm, 15N/mmと減少させると、各姿勢で発生するスティフネス楕円が理論どおり、長短軸の比が同じのまま小さくなることも確認できた。

4. 結 言

本研究では、HIPROという新たなロボットを提案するとともに、ヒトの筋力特性をVEAで工学的に具現化し、さらにヒトの上半肢と同じ拮抗3対6筋配列にVEAを構成したHIPROを試作することで以下に示す成果を得ることができた。

- (1) ヒトの筋力特性を可変弾性特性で再現するために、バネ、ストロークセンサ、リニアアクチュエータからなるVEAを開発しバネ長をリニアアクチュエータで制御することで所定の周波数の範囲にて理論どおり弾性率が可変制御できることを確認した。
- (2) VEAを拮抗3対6筋配列に構成したHIPROを試作してアーム先端出力特性を評価した結果、理論どおり六角形の出力特性を示すことを確認した。
- (3) 試作したHIPROのアーム先端のスティフネス楕円特性を評価した結果、アーム姿勢に応じて理論どおりの楕円特性を示すことを確認した。

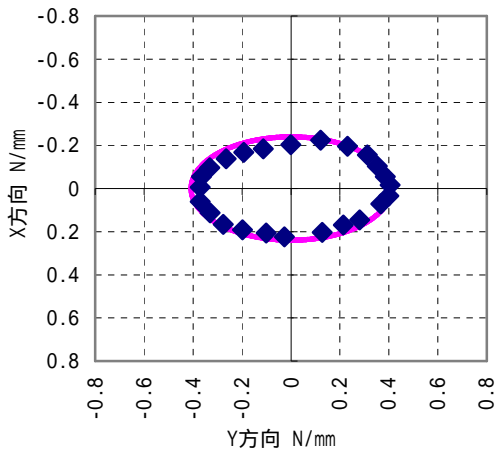
以上より、本研究で提案するVEAとHIPROは2関節筋の実利用化において十分な成果を達成できたといえる。今後の研究としてはVEAのさらなる小型軽量化と高速高出力を目指すとともに、HIPROを用いた具体的なロボットの開発を行っていく所存である。

謝 辞

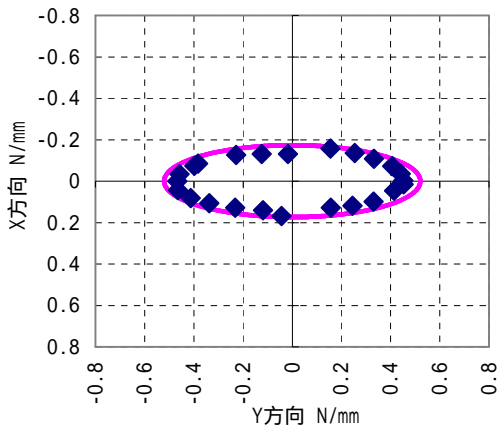
本研究の実施にあたり、ご指導いただいた熊本水頼先生（京都大学名誉教授）に感謝する。

参 考 文 献

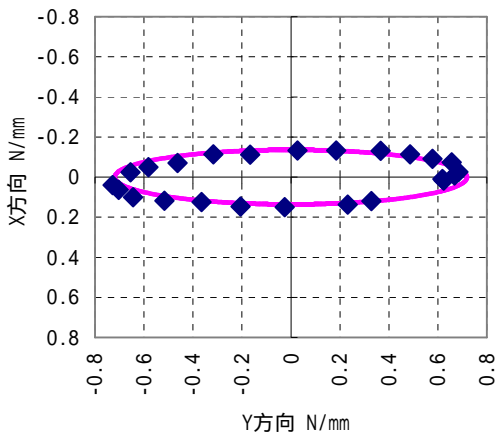
- 1) 藤川智彦・大島 徹・熊本水頼・山本倫久, 上肢における拮抗する一関節筋および二関節筋群の協調活動とその機械モデルによる制御機能解析, バイオメカニズム学会バイオメカニズム第 13 巻, (1996), pp.181-193 .
- 2) 藤川智彦・大島 徹・熊本水頼・横井信安, 拮抗筋群による協調制御機能, 日本機械学会論文集C 編, 第 63 巻, 607 号, (1997), pp.769-776 .
- 3) 大島 徹・藤川智彦・熊本水頼, 動物の筋配列による四肢先端の運動学的解析, 日本機械学会論文集C 編, 第 65 巻, 635 号, (1999), pp.2837-2844 .
- 4) Toru OSHIMA・Tomohiko FUJIKAWA・Minayori KUMAMOTO, Proposal of A Humanlike Two-joint Link Mechanism Provided with the Bi-articular and the Mono-articular Actuators, Part 1:Force Control:Hexagonal Output Force Distribution, Proc. Of 5th Franco-Japan Congress & 3rd European-Asian Congress of Mechatronics, (2001), pp.148-153 .
- 5) Tomohiko FUJIKAWA・Toru OSHIMA・Minayori KUMAMOTO, Proposal of A Humanlike Two-joint Link Mechanism Provided with the Bi-articular and the Mono-articular Actuators, Part 2:Trajectory Control:Contact Task was Dissolved,Proc. Of 5th Franco-Japan Congress & 3rd European-Asian Congress of Mechatronics, (2001), pp.154-159 .
- 6) Minayori KUMAMOTO・Toru OSHIMA・Tomohiko FUJIKAWA , Bi-articular Muscle as a Principle Keyword for Biomimetic Motor link System, Proc. Of 2nd Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine & Biology, (2002), pp.346-351 .
- 7) 熊本水頼:「アクチュエータの使い方に見る動物運動制御の妙」, システム・制御研究会(SC-04-7~22), 2004年3月3日, 電気学会, p47-52(SC-04-15) .



(a) $\theta_1 = 37^\circ$ $\theta_2 = 106^\circ$



(a) $\theta_1 = 45^\circ$ $\theta_2 = 90^\circ$



(a) $\theta_1 = 53^\circ$ $\theta_2 = 74^\circ$

Fig.11 The experiment result of the stiffness ellipse characteristic of HIPRO