機能的電気刺激により反力提示する 新しいバイラテラル遠隔制御システムの開発

巖 見 武 裕^{*1} 三 浦 弘 樹^{*2} 長谷川 清 泰^{*3} 中 山 淳^{*2}
大日方 五 郎^{*2} 宮 脇 和 人^{*4} 柳 原 好 孝^{*5}

A New Bilateral Teleoperator with Force Reflection using Functional Electrical Stimulation

Takehiro Iwami^{*1}, Hiroki Miura^{*2}, Kiyoyasu Hasegawa^{*3}, Atsushi Nakayama^{*2},
Goro Obinata^{*2}, Kazuto Miyawaki^{*4} and Yoshitaka Yanagihara^{*5}

In teleoperation of manipulators, the positions and velocities of the slave actuators should resemble those of the master controls to help the operator project his presence into the slave space. Direct viewing by TV has been incorporated into teleoperator design based on this philosophy, and then becomes a most common sensor subsystem of teleoperator. Force reflection to the operator is also recognized as a useful sensory correspondence for enhancing the operator's identification with the task at hand. Several exoskeletal devices have been proposed as the master arms for the force reflection. However, the mechanisms become complicated because the arms should have the same number of active joints as the slave manipulators; moreover, those provide not only the required sensory feedbacks on the operator but also uncomfortable constraints. So as to overcome this difficulty, we propose a new man-machine interface in which functional electrical stimulation is used to present the reaction forces to the operator. Three small electrodes and two small position/orientation sensors are attached on the skin of the upper limb of the operator. Force reflection from the slave manipulator to the operator is achieved by functional electrical stimulation through the surface electrodes. There is no mechanical element in our master subsystem because the upper limb of the operator works as the master arm by itself. It is shown in this paper that the proposed structure of master subsystem allows the operator to be released from the unnecessary constraints of exoskeletal devices. The effectiveness of the proposed teleoperator is illustrated by several experiments with a seven axis slave manipulator.

Key Words: Teleoperation, Functional Electrical Stimulation, Man-Machine Interface, Force Reflection

1. 緒 言

ロボット・マニピュレータの遠隔操縦において高度な作業を行うためには、より多くの情報を効率よく伝えるヒューマン・インターフェースの実現が求められる。その中で、操縦されるロボットが対象物と接触している力情報をオペレータにフィードバックし、操作性を向上させる技術をバイラテラル制御と呼

び、マスタ・スレーブ・マニピュレータの基本インターフェースとして古くから研究されてきた [1] [2]。バイラテラル制御されたマスタ・スレーブ・マニピュレータでは、人間がマスタ・システムを操作することで、作業環境に配慮しながらスレーブ・マニピュレータにその動作指令を伝え、さらにスレーブ・マニピュレータと環境との干渉力がマスタ・システムを介して操縦者に伝えられる (Fig. 1)。この力覚情報は、作業を行う上で非常に重要であり、テレロボティクスの遠隔臨場感を達成するには欠くことができないものである。しかし、マスタ・システムに力伝達機構を組み込むことは、装置の大型化や複雑化をまねき、操縦者に圧迫感や拘束感を与えている [3]。そこで、人間の腕と同じ構成のスレーブ・マニピュレータの操作では、人間の腕自体をマスタ・システムとすることにより、システムの大幅な簡素化と操作性の向上が考えられる (Fig. 2)。

人間の腕自体をマスタ・システムとするためには、生体とロボットとの間に双方向の情報伝達が必要になる。近年、生体と

原稿受付 2001 年 12 月 26 日

^{*1}秋田大学工学資源学部

^{*2}名古屋大学大学院工学研究科

^{*3}TCM 株式会社

^{*4}秋田県工業技術センター

^{*5}東急建設株式会社

^{*1}Akita University

^{*2}Nagoya University

^{*3}TCM CORPORATION

^{*4}Akita Pref. Industrial Technology Center

^{*5}Tokyu Construction, Ltd.

ロボットを繋ぐインターフェースとして、脳波 (EEG) や筋電位 (EMG) などの生体信号の利用が試みられている。例えば、筋の収縮レベルに応じて発生する EMG 信号は、どのような動作をどのくらいの力で行うか、運動インピーダンスはどの程度かなどの有益な情報を含んでいる。福田らは、EMG 信号を利用したヒューマン・インターフェースにより、マニピュレータに動作指令を与える研究を行っている [4]。しかし、これら生体信号を利用した研究では、人間からロボットへ向かう制御系が強調されているが、ロボットから人間への感覚フィードバックにおいて生体信号の利用にまで踏み込んだ研究はあまりなされていない。神経系に電気的な信号を与え、人間の感覚器官に直接情報を伝達する手法は、聴覚障害者や視覚障害者への機能回復手段として現実に行われつつある。しかし、体内の神経系へ直接情報を伝達するためには外科手術による信号線の接続が必要であり、これは障害を治療する目的以外には倫理的に許されない。そこで、本研究では麻痺肢の機能再建に用いられる機能

的電気刺激 (functional electrical stimulation; 以下 FES) の技術を用い、無侵襲な表皮電極によって運動方向に対する拮抗筋を刺激して力情報を伝達するヒューマン・インターフェースを提案する。

我々は、これまでに FES を用いて力情報を伝達する方法を建設機械の遠隔操縦に適用し、CCD カメラによる視覚情報と併用することにより直視作業に近い作業効率の向上が得られることを実験から確認している [5]。本研究では、これをマニピュレータの遠隔操縦に応用し、操縦者の腕自体をマスタ・システムとしたバイラテラル制御を実現する。

2. ダイレクト・マスタシステム

マスタ・スレーブ・マニピュレータでは、Fig. 1 のように人間がマスタ・システムを操作することで、スレーブ・マニピュレータにその動作指令を伝える。スレーブが人間の腕と同じ構成である場合は、外骨格型のマスタ・システムを腕に装着して操縦する場合もある。さらにバイラテラル制御においては、スレーブ・マニピュレータと環境との干渉力が、アクチュエータを内蔵したマスタ・システムを介して操縦者に伝えられる。本研究では、Fig. 2 のように操縦者自身の身体をマスタ・システムとして運動指令を伝え、FES によって力情報をフィードバックするダイレクト・マスタシステムを提案する。本研究で用いる実験システム全体の構成を Fig. 3 に示す。

2.1 運動指令の検出

ダイレクト・マスタシステムにおいては、操縦者自身の何らかの身体状態量をスレーブ・マニピュレータへの運動指令として用いる必要がある。このときの運動指令として EMG 信号を利用する方法も考案されているが、EMG 信号と FES 刺激は共に電気信号であるため、その分離は困難である。そこで、本研究では磁気式三次元位置センサを用いて検出した操縦者の骨格運動を運動指令とすることにした。使用する磁気式三次元位置センサ (Polhemus Co. FASTRAK) はコントローラとトランスミッタ、そして複数のレシーバから構成されている。トランスミッタは 3 方向の電磁場を生成し、その電磁場の変化を 3 方向の受信コイルを持つレシーバで検出する。これによりレシー

Fig. 1 Master slave manipulator

Fig. 2 Direct master system

Fig. 3 Master and slave systems

バの三次元空間位置とオイラー角を出力するので、理論上は一つのレシーバを装着するだけで6自由度までの関節角度が計算可能である。本システムでは、上腕と手の甲に二つのレシーバを装着し、上肢7自由度の関節角度を計算してスレーブ・マニピュレータの運動指令とする。レシーバの出力値から上肢関節角度を求める計算には、藤田らが考案した方法を用いた[6]。

2.2 スレーブ・マニピュレータ

本研究で用いるスレーブ・マニピュレータには、三菱重工製7自由度マニピュレータ PA-10を使用した。PA-10は人間の上肢と同じ7自由度を有する冗長マニピュレータである。そのため、操縦者の関節角度をそのままマニピュレータの関節目標軌道とすることができ、シンプルな制御系の設計が可能になる。また、コントローラにパソコンを利用することができるため、システムの構築が容易である。本研究では、磁気式三次元位置センサからの出力データをRS-232Cを介してパソコンに入力し、計算した操縦者の関節角度を目標軌道として、各関節ごとのPI制御によりマニピュレータを動作させる。また、マニピュレータのエンド・エフェクタには6軸力センサ(Nitta Co. JR3 67M25)を取り付け、マニピュレータと環境との干渉力を各関節軸まわりの受動トルクに換算して、FESによる力覚フィードバック信号に変換する。

3. 機能的電気刺激による力覚フィードバック

3.1 機能的電気刺激

人間の随意的運動指令は大脳皮質から脊髄の α 運動ニューロンに到達し、 α 運動ニューロンが発火してインパルスが発生する。そのインパルスが運動神経を伝播して筋に伝わると筋線維の収縮が起こる。このとき発生する筋細胞膜の微小電位がEMGである。なお、神経系に外部から電気刺激を与えることによっても α 運動ニューロンの発火を誘発し、筋の収縮を起こすことができる。これを機能的電気刺激(functional electrical stimulation; FES)と呼び、麻痺肢の運動機能再建のための治療法として利用されている。神経と筋の接合部はモータポイントと呼ばれ、この近辺に単一のパルス電流を与えると、筋は一度ピクンと収縮してすぐに弛緩する。そしてパルス電流を繰り返し与えることにより、この単収縮が加重されて滑らかな筋収縮が得られる。一般にリハビリ医療のFESでは20 [Hz]の頻度で、幅200 [μ s]のパルス電流をモータポイントに与え、これによって筋の収縮を外部コントロールする[7][8]。

3.2 力情報の伝達

筋の内部には、筋の長さとその変化速度を検出する感覚器官があり、身体の運動情報として中枢神経にフィードバックしている。一方、力の情報は、筋両端の腱器官が筋張力を検出している。本研究では、FESにより操縦者の腕の拮抗筋を刺激して力情報の伝達を行う。ここで、例えば静止した姿勢でFESによって屈曲筋を刺激したとする。このとき、操縦者が姿勢を維持するために伸展筋の筋力を増大させると、屈曲筋と伸展筋の張力差は生じないため、腱器官の情報からは外力を受けたと判断はできないはずである。しかし、実験の結果、多くの被験者はそれを外力として感じると答えた。これは、脳が伸展方向により強い運動指令を与えなければならないため、それが外力を

受けている結果だと判断したためであると考えられる。これを利用すると、FESにより生体に直接力情報をフィードバックすることが可能になる。我々は、これまでに遠隔操縦における力情報伝達の伝達手段として、FESを用いて拮抗筋を刺激する手法が有効であることを多くの実験によって確認した[5]。

FESに用いる表皮電極と磁気式位置センサのレシーバを腕に貼り付けた状態をFig. 4に示す。実験では、Fig. 5のように手関節の背屈方向(wrist joint 1)・尺屈方向(wrist joint 2)、そして肘関節(elbow joint)の屈曲方向の筋を刺激する。これは、エンド・エフェクタが受けた力の方向を知るためには、少なくとも3方向の受動トルクが必要なことと、これらの筋のモータポイントがFig. 6で示すように表皮電極で刺激しやすい位置にあるためである[9]。また、実験では運動方向を限定することを前提として、拮抗筋の片側だけに刺激電極を貼り付けた。刺激に用いるパルス電流の周波数とパルス幅を大きくすると、より強い筋収縮が得られるが、筋疲労による筋力低下も早くなる。本研究では発生筋力と筋疲労とのトレードオフを考慮して、刺激信号は周波数100 [Hz]、幅400 [μ s]のパルス信号とし、振幅電圧

Fig. 4 Surface electrode and position sensor receiver

Fig. 5 Forearm motions controlled by FES

Fig. 6 Stimulated muscles and motor points

Fig. 7 Experimental setup for evaluating generated force

Fig. 8 Muscle forces of arm joints generated by FES

を変えることにより発生筋力をコントロールする。Fig. 7 のような装置を用いて測定した各関節軸まわりの発生トルクと、刺激信号の振幅電圧との関係を Fig. 8 に示す。表皮電極を用いた場合は、モータポイントまでの電気抵抗が大きいため比較的高い電圧を要するが、パルス信号であるため流れる電流は微小である。

Fig. 3 に示した実験システムでは、力覚フィードバックのための刺激電圧を以下の手順で計算する。マニピュレータ先端に取り付けた 6 軸力センサで計測された $f_x \sim m_z$ の力とトルクは、仮想仕事の原理に基づくヤコビ行列を用いた変換によりマニピュレータの七つの関節軸まわりの受動トルクに変換する。そのうち、Fig. 5 に対応する手首 2 軸と肘 1 軸の受動トルク $\tau_1 \sim \tau_3$ を FES の刺激信号として操縦者の腕の筋に伝える。このときマニピュレータの関節が受けるトルクの数分の 1 程度の力が伝わるようにゲインを調整している。操縦者に伝える関節トルクから FES の振幅電圧への変換は、Fig. 8 のグラフを線形近似して求める。すなわち、Fig. 8 に示した実線の傾きを各筋ごとの刺激ゲインとして関節トルクに対する FES の振幅電圧を求めている。

4. 実験

4.1 力覚検知の確認実験

提案したダイレクト・マスタシステムの有効性を確認するため、Fig. 3 に示した実験システムを用いて、4 種類の実験を行った。初めの二つの実験は、FES を用いた力覚フィードバックによって、力の大きさと方向を検知できるかを確かめるものであ

Fig. 9 Experimental setup

Fig. 10 Experimental result

る。まず、操縦者が反力を提示した腕の感覚だけで環境との作用力を調整できるかを、Fig. 9 に示すように、マニピュレータ先端に掛けたばね秤を指定した力で引き上げる実験によって確かめた。被験者には、事前にばね秤の目盛りを確認しながらマニピュレータを操作させて、FES によって反力が提示される腕の感覚を 2~7 [kg] まで 1 [kg] ごとに学習させた。十分に学習した後、被験者は後ろを向いて腕の感覚を頼りに 2~7 [kg] までの力で順番にばね秤を引き上げた。秤量 20 [kg] のばね秤を使用したため、荷重の違いによる変位差は小さく、また、測定ごとに一度手を下げてから引き上げるという方法をとったため、腕の移動量からの荷重の推定は困難であるといえる。この実験による測定結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の横軸は被験者へ指示した力の大きさである。また、縦軸は力センサで計測したばね秤との作用力で、被験者が 5 回の実験を行った平均値と標準偏差を示す。Fig. 10 では、被験者が自分の手で直接ばね秤を引き上げて実験した結果よりも正確な値が得られている。これについて、「反力を提示した筋が 3ヶ所であったため、かえってそこに意識を集中しやすかった」という被験者の感想が得られた。この実験結果により、FES による力覚フィードバックで力の大きさを検知できることが示された。

FES による力覚フィードバックを用いて環境との作用力を調整するためには、力の大きさだけでなく方向も検知できることが必要である。そこで、Fig. 11 に示すようにマニピュレータ先端の力センサを紐で引っ張り、操縦者は手先が引っ張られた

と感ずる方向に腕を動かすという実験を行った。実験では、操縦者が掌を内側に向けて腕を前に伸ばした姿勢を初期姿勢とした。この姿勢では、操縦者から前方に向かって12時方向の力はFig. 6の(c)に示す筋への刺激によって、また3時と6時方向の力は、それぞれFig. 6の(a)と(b)の筋への刺激によって検知する。しかし、本システムでは9時方向の力を発生する筋

Direction of the Passive Force
Direction of the Motion of end-effector

Fig. 11 The Experiment to detects the direction of the force

は刺激しないため、左方向の力は検知できない。Fig. 11の中央に示した図は実験結果の一例で、力センサを中心として、紐で引っ張った力ベクトルの方向を実線で、また操縦者が腕を動かすことによってマニピュレータ先端が動いた速度ベクトルの方向を点線で示している。図より力ベクトルと速度ベクトルの方向が概ね一致していることから、被験者はFESを用いた力覚フィードバックによって力の方向も検知していることが分かる。しかし、力ベクトルと速度ベクトルの方向には一定のずれが観られ、ずれる方向は実験を繰り返しても同じであった。これは、マスタ・システムである操縦者の腕と、スレーブ・マニピュレータの機構パラメータの違いによるものと考えられる。すなわち、FESによって発生する関節トルクの方向は、人間の関節構造と筋の付着位置によって個々に異なり、正確にはマニピュレータの関節のように直交していない。また、各筋ごとのフィードバックゲインに差があった場合にも力の検知方向にずれが生じた。

本実験のように、三つの筋への刺激だけでは力を検知できる方向が限定され、その方向も腕の姿勢により変化する。したがって、理想的には片腕7自由度の拮抗筋として14本の筋を刺激することが望ましい。しかし、本研究ではFESを用いた力覚フィードバックを実現する第一段階として、刺激する筋を限定した簡単なシステムを用いて基礎的な実験を行った。

4.2 壁面接触実験

つぎに、反力の大きさと方向を総合的に検知しながらマニピュレータを操縦する実験として、Fig. 12に示す壁面接触実験を行った。この実験において操縦者に与える情報は、FESを用いたマニピュレータからの力覚フィードバックだけである。操縦者は目隠しをしており、自身の腕の動きも見ることができない。そして、腕の感覚のみでマニピュレータを操作し、壁面をなぞっていく。マニピュレータ先端には6軸力センサのみを取り付け、壁面との接触によってマニピュレータが受ける受動トルクの10分の1程度の筋力を発生するようにゲインを設定し、受動トルクの大きい肘関節へのゲインはさらに低めに設定している。壁面は厚さ15[mm]の合板であり、完全な剛体ではなく若干のステイフネスを有する。実験における操縦者の腕とマニピュレータの動きの一例を三次元表示してFig. 13に示す。Fig. 13(a)より、FESによって操縦者の腕が拘束されて、○で示した手先

Fig. 12 Experimental setup

Fig. 13 Experimental result of wall touching

Fig. 16 Experimental setup

Fig. 14 The angles of manipulator joints

Fig. 15 The passive torques of Manipulator joints and stimulation amplitudes

の位置が壁面の位置に沿って正確に移動している。また、このとき反力提示を行ったマニピュレータの関節の角度変化を Fig. 14 に、その受動トルクと FES の振幅電圧を Fig. 15 に示す。点線で挟んだ区間が壁に接触している時間である。グラフより、操縦者が腕を前方に伸ばして壁に接触したあと、壁との接触力を一定に保つ方向に腕を動かしている様子が見える。なお、接触時に受動トルクが振動的になっている理由は、操縦者の動きに対するマニピュレータの応答に 0.2 [s] 程度の遅れがあるためであり、時間遅れのあるバイラテラル制御では一般的に見られる現象である [10]。

4.3 作業精度の比較実験

最後に、FES を用いた力覚フィードバックによっても遠隔操縦における作業精度が向上することを簡単な比較実験で確かめた。これは、Fig. 16 に示すように目標位置にブロックを置き、操縦者が腕を動かしてスレーブ・マニピュレータ側の手先をブロックに接触するまで移動させるという作業である。操縦者には CCD カメラの映像による視覚情報を与えているため、FES を用いた場合は視覚と力覚フィードバックの併用となる。ブロックは 5 [kg] の重さで、机との動摩擦力は 19.6 [N] である。作業精度は接触後のブロックの移動量で評価するが、ブロックがまっ

Fig. 17 Experimental result of comparison of the work accuracy

たく移動していない場合は失敗としてデータに含めない。以上の実験を視覚情報のみの場合と FES による力覚フィードバックを併用した場合について行った。被験者は健康青年 5 名 (22 歳～24 歳) である。事前の作業訓練は行わず、視覚情報のみの実験と FES による力覚フィードバックを併用した実験を交互に 5 回ずつ行った。また、作業を実行する際の制限時間は 5 秒とした。

Fig. 17 に実験結果を示す。図の横軸は 1 回目から 5 回目までの実験の回数、縦軸が移動量で、5 名の移動量の平均値を中心にして上下は標準偏差を示している。結果として、FES による力覚フィードバックを併用した方がいずれの場合も移動量は小さくなり作業精度は向上している。また、視覚情報のみの場合は 1 回目の移動量が最も大きく、回数を重ねるにつれて作業に習熟し精度が向上する様子が伺える。それに対し FES による力覚フィードバックを併用した場合は 1 回目から移動量が小さく、その後の作業に対しても習熟の影響が低い。このことは FES による力覚フィードバックを併用することで熟練をあまり考慮する必要がないシステムを構築できる可能性があることを示唆している。

次に視覚情報のみの場合と FES による力覚フィードバックを併用した場合の作業精度に関して、被験者ごとに統計的な有意差を確認するために 25 回すべての実験に対して t 分布検定を行った。その結果、危険率 1% 以下で FES による力覚フィードバックを併用した場合に作業精度が高いことが示された。

5. 結 言

本論文では、操縦者の腕自体をマスタ・システムとする新しい遠隔操縦マニピュレータを提案した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 腕に取り付けた二つの小型位置姿勢センサ（位置三次元，姿勢三次元）によって，マスタ・アーム片腕の7自由度の角度を，腕の動きに対応して実時間で生成することができる。それらは，スレーブ・マニピュレータへの角度指令信号として使われる。
 - (2) 腕の皮膚表面に貼り付けた3対の表面電極によって，三つの筋力に的確に力を発生させることができる。これらの力を操縦者の動作を生み出す筋力と拮抗させることによって，操縦者にスレーブ・マニピュレータの反力を提示することができる。
 - (3) 提示した力の大きさと方向を操縦者が正しく認識できるかを確認した実験では，操縦者はマニピュレータを操作して，指定した力でばね秤を引き上げることができた。また，力センサに加えた力の方向へマニピュレータを動かすことができた。
 - (4) 視覚情報を与えない壁面接触実験を行った結果，操縦者は腕に提示された触覚だけを頼りにスレーブ・マニピュレータを操作して壁面に沿って動かすことができた。
 - (5) 開発したシステムにおける作業性の有効性を確認するため，視覚情報のみの作業とFESによる力覚フィードバックを併用した作業を行った結果，FESによる力覚フィードバックを併用した場合に作業精度が高いことが統計的に示された。
- 以上のように新しく開発した遠隔操縦システムの有効性を確認したが，次に述べるような研究がさらに望まれる。

- (1) 壁面接触実験において発生し，操縦者に提示された力（トルク）は1 [Hz] ほどの振動成分が含まれている。これは，スレーブ・マニピュレータのサーボ性能を変更するとその振幅が大きくなる可能性がある。遠隔操縦システムの発振現象（不安定現象）は調べられているが[10]，本システムの

場合，生体の神経・筋力系が直接関与しており，今までにない解析が必要である。心理的な面までを含めた検討が求められるかもしれない。

- (2) スレーブ・マニピュレータの空間中の自由な動作から，壁面などへの接触を伴う動作への移行はマニピュレータの動特性の変更や内力の発生などスムーズな遷移が困難な場合がある。スレーブ・マニピュレータの制御方式のスイッチングなどを含めて，本システム特有のコントローラ設計によって，拘束動作中の性能向上をはかる必要がある。なお，本研究における各実験は，実験の内容・目的について被験者に詳しく説明し，十分なインフォームドコンセントが得られた後に行われた。

謝 辞 本研究を行うに際し，貴重な助言をいただいた秋田大学医学部附属病院リハビリテーション部の島田洋一先生，同大学医学部整形外科の安藤滋先生に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- [1] 横小路：“マスタ・スレーブ制御の理論”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.6，pp.794-802，1993。
- [2] 館：“テレロボティクスの世界”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.6，pp.770-772，1993。
- [3] 鷹巣，柳原：“遠隔臨場マニピュレータ”，ロボティクス・メカトロニクス講演会'92 講演論文集，pp.181-186，1992。
- [4] 福田，辻，金子：“EMG 信号を利用した手動制御人間支援マニピュレータ”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.3，pp.387-394，2000。
- [5] 村上，長谷川，大橋，柳原，大日方，中山，島田：“機能的電気刺激を用いた遠隔操縦システム”，計測自動制御学会論文集，vol.36，no.12，pp.1132-1137，2000。
- [6] 藤田，及川：“磁気式三次元位置計測装置を用いた上肢7関節角度の算出法”，第16回バイオメカニクスシンポジウム講演論文集，pp.131-139，1999。
- [7] 島田，市江：“機能的電気刺激法の臨床応用”，計測と制御，vol.33，no.4，pp.321-326，1994。
- [8] 半田，星宮：“機能的電気刺激（FES）による麻痺上下肢の制御”，医用電子と生体工学，vol.24，no.1，pp.27-33，1986。
- [9] 矢谷，小川：図解 筋の機能解剖。医学書院，1968。
- [10] Robert J. Anderson and Mark W. Spong: “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol.34, no.5, pp.494-501, 1989。

巖見武裕 (Takehiro Iwami)

1966年12月16日生。1990年静岡大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)KTIセミコンダクタ入社。1992年鶴岡工業高等専門学校助手，2000年秋田大学大学院鉱山学研究科博士課程修了。2002年より秋田大学工学資源学部講師。現在に至る。医用生体工学，バイオメカニクス，ロボティクスなどの研究に従事。工学博士。2002年日本機械学会賞論文賞，計測自動制御学会，日本機械学会，バイオメカニクス学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

長谷川清泰 (Kiyoyasu Hasegawa)

1975年7月31日生。2000年秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程修了。同年TCM株式会社入社。現在に至る。在学中はFES応用に関する研究に従事。日本機械学会の会員。

三浦弘樹 (Hiroki Miura)

1978年1月12日生。2002年秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程修了。同年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程入学。現在に至る。ロボットの力制御，FES応用などに関する研究に従事。日本機械学会の会員。

中山 淳 (Atsushi Nakayama)

1969年6月5日生。1994年秋田大学大学院鉱山学研究科修士課程修了。同年福島工業高等専門学校助手。1997年秋田大学鉱山学部機械工学科助手。2001年より名古屋大学大学院工学研究科助手。現在に至る。2足歩行のシミュレーションに関する研究に従事。計測自動制御学会，日本機械学会，日本

AEM学会，IEEEなどの会員。

大日方五郎 (Goro Obinata)

1949年11月30日生。1977年東北大学大学院博士課程修了。同年東北大学高速力学研究所助手。1980年秋田大学鉱山学部生産機械工学科講師。同大学工学資源学部機械工学科教授を経て、2001年より名古屋大学大学院工学研究科教授。現在に至る。制御理論、生体運動解析、身体運動支援機器の設計の研究に従事。工学博士。2002年日本機械学会賞論文賞。計測自動制御学会、日本機械学会、日本油空圧学会、システム制御情報学会、IEEEなどの会員。
(日本ロボット学会正会員)

宮脇和人 (Kazuto Miyawaki)

1961年12月26日生。1986年秋田大学鉱山学部機械工学科卒業。同年ヤマザキマザック(株)入社。1994年より秋田県工業技術センター研究員。現在に至る。2000年秋田大学大学院鉱山学研究科博士課程修了。福祉ロボティクス、バイオメカニクスなどの研究に従事。2002年日本機械学会賞論文賞。工学博士。日本機械学会、ライフサポート学会などの会員。

柳原好孝 (Yoshitaka Yanagihara)

1963年11月10日生。1988年熊本大学工学部生産機械工学科卒業。同年東急建設株式会社入社。現在に至る。建設機械の遠隔操縦、ヒューマノイドロボットの研究開発に従事。技術士(機械分門)。
(日本ロボット学会正会員)