

## 任意の FES 手先リーチング再建のための目標検出に関する検討

安西 昭裕 渡辺 高志\* 村上 肇\*\* 二見 亮弘 星宮 望 半田 康延\*\*\*

東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 05

\*東北大学情報シナジーセンター 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 05

\*\*新潟工科大学 〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋 1719

\*\*\*東北大学未来科学技術共同研究センター 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 04

\*tel: 022-217-7129

\*E-mail: nabe@isc.tohoku.ac.jp

あらまし 上肢運動機能麻痺者が機能的電気刺激 (FES) により任意の手先リーチング動作を獲得するシステムを構築するためには、手を伸ばす先の物体の位置や種類、形状を認識する必要があると考えられる。本報告では、まず、頭部に装着したレーザーポインタと磁気センサを利用した目標位置検出法について、装置を試作し、その検出精度を評価した。次に、この装置を用いてリーチングの障害物や把持対象となる物体の高さ、種類を取得する方法について検討を行った。これらより、FES システムで利用するのに概ね良好な精度で目標の位置と物体の高さを検出でき、種類を識別できることが示唆された。

キーワード 機能的電気刺激, FES, 目標検出, レーザポインタ

### A Study on Detecting Target Information for Arbitrary Hand Reaching Restoration by FES

Akihiro Anzai, Takashi Watanabe\*, Hajime Murakami\*\*, Ryoko Futami,  
Nozomu Hoshimiya and Yasunobu Handa\*\*\*

Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba-yama 05, Sendai 980-8579, Japan

\*Information Synergy Center, Tohoku University, Aoba-yama 05, Sendai 980-8579, Japan

\*\*Niigata Institute of Technology, 1719 Fujihashi, Kashiwazaki, 945-1195, Japan

\*\*\*New Industry Creation Hatchery Center, Aoba-yama 04, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

\*tel: +81-22-217-7129

E-mail: nabe@isc.tohoku.ac.jp

**Abstract** In order to develop the FES system that restores arbitrary hand reaching, it is necessary to detect three-dimensional position of the target object and to identify shape of the object. In this paper, we made a detection system of target information, which consisted of a magnetometric 3-D position sensor and a laser pointer. We evaluated accuracy of detecting positions and height of target objects. We also studied a method of discriminating shapes of objects that could be obstacles or targets of grasping. Experimental results suggested that the system could detect objects' position and height, and discriminate shape of objects, so as to use the detection system with FES system.

**Key words** FES, target detection, laser pointer

## 1 はじめに

交通事故などにより脊髄損傷が起きた場合、運動機能が麻痺し、後に自然治癒をすることがない。このような場合でも、機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation、以下 FES) により麻痺した運動機能を再建することが可能であり、これまでに、臨床におけるその有効性が確認されている[1]。しかし、臨床用 FES システムでは再建動作の多様化が容易ではないという問題があるため[2]、患者の希望する多様な動作を自由に再建できるシステムの構築が望まれる。我々の研究グループでは、上記のシステムを実現するためには、患者の意志を的確に FES システムに伝達するためのユーザ・インターフェイスが必要であると考え、任意のリーチングを再建する FES システムのインターフェイスに関する検討を行ってきた[3]。上肢の動作は、リーチングと手の運動との組合せで実現されることが多く、手のリーチングは上肢の動作において基本的かつ重要である。これまでに、重度の四肢麻痺患者でも使用できる可能性が高い頭部動作を利用し [3]、手先を移動させる目標の位置を検出する方法が検討されてきた。しかし、この手法では、計測精度の安定性、装置の使用の簡便さなどに問題があった。

本報告では、リーチングの目標位置を検出する方法の確立を第1の目標とし、これまでに提案された方法を基礎として、その原理を改良することにより、使用者が移動した場合でも簡便に使用できるように改善した。そして、目標検出装置を構築し、目標位置検出や目標位置にある物体の高さ検出を通してその基本特性の評価を行った。次に、より健常者に近い動作を再建することを目指して、対象とする物体に応じてリーチング動作中に上肢の姿勢制御や手指の動作準備を行えるように、目標位置にある物体の識別を行う方法の開発を第2の目的とし、目標検出装置を用いて机上に置かれた把持動作の異なる物体の種類を識別することを検討した。

## 2 目標検出装置の原理

### 2.1 目標位置検出の原理

本法では、車イスを使用する四肢麻痺患者を想定し、レーザポインタと磁気センサを利用してリーチングを行う際の目標位置を取得する。装置は、図1に示すように目標位置を指示するためのレーザポインタ(LP-050, PLUS)と頭部や机の位置、姿勢を計測する

ための磁気式 3 次元位置角度センサシステム (Fastrak, Polhemus)、パーソナルコンピュータ (PC) により構成した。

磁気センサのレーザ (受信コイル) とレーザポインタを一体型にしたものをバンドで頭部に装着し、トランスミッタを被験者が座るイスに固定する。この際、もう 1 つのレーザを机上に配置して、机上の座標系 (机上平面の方程式) を得る。次に、机上の既知の目標位置を指示し、光線の方向ベクトルに関するキャリブレーションデータ (3 次元座標が既知の点を指示したときの目標位置座標  ${}^A P_{cal}$ 、レーザポインタの位置座標  ${}^A P_{Lcal}$ 、レーザ B の回転行列  ${}^A_B R_{cal}$ ) を得ておく。ここでのベクトル及び回転行列の左上の記号は基準とするレーザの座標系を示す。以降、任意の目標点を指示したとき、キャリブレーションデータとレーザ B の回転行列  ${}^A_B R$  から光線の方向ベクトル  ${}^A P_{dir}$  を

$${}^A P_{dir} = {}^A_B R \cdot {}^A_B R_{cal}^{-1} ({}^A P_{cal} - {}^A P_{Lcal}) \quad (1)$$

と表すことができる[4]。

レーザポインタの位置ベクトル  ${}^A P_L$  は、レーザ B の回転行列  ${}^A_B R$ 、レーザ B の位置ベクトル  ${}^A P_B$ 、レーザ B とレーザポインタの位置関係  ${}^B P_L$  から

$${}^A P_L = {}^A_B R \cdot {}^B P_L + {}^A P_B \quad (2)$$

と表すことができる。

(1)、(2)式からレーザポインタの光線の直線の方程式を算出し、机上平面の方程式との連立解から指示した目標位置を取得する。

これまでの方法と比べ、本法では、レーザとレーザポインタを一体型にすることによりキャリブレーションデータの計測における誤差の低減を図った。また、トランスミッタをイスに配置してレーザを机上に配置する方法に変更し、Fastrak の精度を損ないにくい配置を可能にした。

### 2.2 物体の高さ検出の原理

最初に物体の下面  $S_1$  を指示し、目標位置を取得する。次に、物体の上面を指示し、目標位置  $S_2$  とレーザポインタの光線の方向ベクトル  $c$  を取得する。光線の方向ベクトル  $c$  と机上平面の法線ベクトル  $k$  から光線の方程式と机のなす角  $\alpha$  を算出し、その利用により物体の高さを

$$h = |S_1 - S_2| \tan \alpha \quad (3)$$

として検出する。

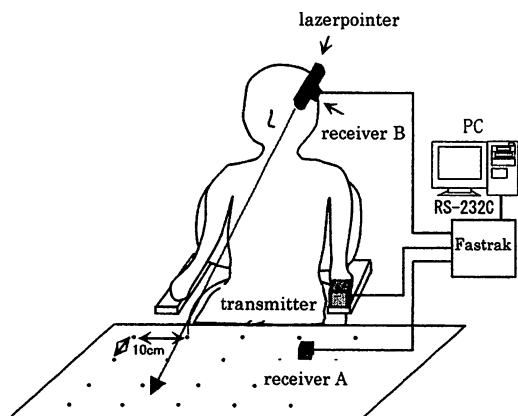


図1 レーザポインタと磁気センサから構成される目標位置入力装置

### 3 目標検出装置の評価

#### 3.1 実験方法

目標検出装置の実用性を検討するために、以下の3通りの実験を行った。

##### (1) 目標指示装置による机上の目標位置の指示

自作の木製の目標指示装置により、レーザポインタで机上目標位置を安定に指示し計測を行った。指示する目標位置は机上に100mm間隔4行5列配置で20点用意した(図2●印)。

実験ではまず、目標点 No. 20(机上平面の原点)にレシーバAを置き、次に、目標点 No. 9をレーザポインタで指示し、静止状態で5秒間(サンプリング周期50ms)計測を行い、その平均値からキャリブレーションデータを得た。なお、キャリブレーションデータの取得はイスが正面向きの状態で測定前に一度だけ行った。

目標位置検出は、はじめにイスの向きを正面にし目標位置20点について5秒間ずつ計測(サンプリング周期50ms)を行った。計測後、イスを適当に動かし、イスの向きを右向きにして同様の計測を行った。同様の試行をイスの向きを左向きにして計測を行った。これらの目標検出の操作を1セットとし、合計3セットの計測を行った。

##### (2) 健常被験者による机上の目標位置の指示

健常被験者(男性5名, A: 25歳 S: 24歳 O: 22歳 H: 21歳 T: 25歳)により、(1)と同様の目標位置20点について計測を行った。実験ではまず、目標点

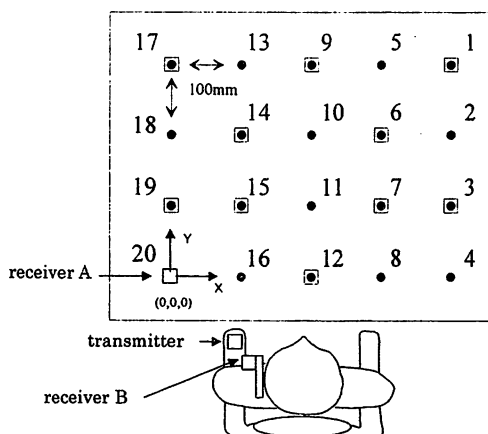


図2 机上での目標位置: ●は目標点、□は物体を置いた位置を示す

No. 20にレシーバAを置き、次に、キャリブレーションデータを取得した。この操作は(1)と同様である。

目標位置検出は、験者が被験者に3秒後に計測する旨を伝達し、計測開始時にもう一度合図を送り5秒間計測(サンプリング周期50ms)を行った。このタスクを机上の20点の目標位置について目標点 No. 1~No. 20まで順番に行ってもらい、これを1セットとして3セット行った。セット間にはイスから離れてセンサを外して休憩をしてもらい、その間にイスを適当に動かして次の計測を行った。イスの位置、向き、休憩時間などは被験者に自由に決めてもらった。

##### (3) 机上の物体の高さの計測

設定座標のうち10箇所(図2□印)に円柱状の物体2種類(高さ50mm, 104mm)を置き、その高さの計測を行った。机上にレシーバを置く位置、キャリブレーションデータ計測の指示点については(1)と同様である。

計測は目標指示装置、健常被験者2名(被験者A, S)により、それぞれ10箇所の物体の高さを計測する試行を1セットとし3セット行った。はじめに物体の下面の点を、次に上面の点を指示してもらい計測を5秒ずつ行った。この際、被験者への指示は上述の実験と同様である。この実験ではキャリブレーションは1セットごとに行った。イスの向きは、被験者ごとに目標の指示がしやすいように自由に設定してもらった。被験者が休憩する際には、イスから離れてセンサを外してもらった。

### 3.2 結果

#### (1) 目標指示装置による机上の目標位置の指示

正面向きの第1試行目で目標位置を指示したときの目標位置と計測値のx y平面での分布を図3に示す。横軸xと縦軸yおよび座標の原点は図2に対応しており、図中の■が目標位置座標、○が計測値、▲がイスに配置したトランスミッタの位置、▼がキャリブレーションデータを計測した点No.9を指示したときの頭部に装着したレーザーの位置となっている。計測値は、キャリブレーションデータを取得した点No.9(x = 20, y = 30)付近では目標位置に近い値が得られており、全体的に点No.9からの距離が大きくなるほど誤差が増加する傾向がほぼ全試行において見られた。

設定目標位置座標と計測値の間の距離の差を誤差として、各試行での誤差を机上目標点20点の平均と標準偏差で表1に示す。ここで正面向き1回目の試行がキャリブレーションデータを計測した時の位置のものであり、 $5.9 \pm 2.8\text{mm}$ と比較的小さい誤差で計測が行っている。また、正面向き1回目の試行に比べ、他の試行では計測値の誤差が若干大きくなっていることが多い。追実験で、キャリブレーションデータを取得した時からレーザーの位置、向きを大きく変えて目標位置検出を行った場合、計測値の誤差が大きくなることを確認している。これらのことから、Fastrakにより計測されるデータはイスの向きやセンサ位置に依存することが考えられる。しかし、目標位置検出全体の誤差の平均は6~8mm程度の距離であり、最大誤差も15mm程度であることから、大きな姿勢変化などがなければ、キャリブレーションデータを再取得しなくてもある程度の精度で検出できることがわかる。

以上の結果から、本法は目標位置を安定に指示することができれば、イスの向きや被験者の位置によらず概ね良好な精度で目標検出が実現可能であることがわかる。

#### (2) 健常被験者による机上の目標位置の指示

各試行での計測値の誤差を机上目標点20点の平均と標準偏差で表2に示す。健常被験者5名による目標位置検出全体の誤差の平均は11.3mm程度であり、最大誤差は41.0mmであることから、目標指示装置と比べて若干大きな誤差で計測される程度であることが確認された。

被験者Sについては1回目の試行では計測値の誤

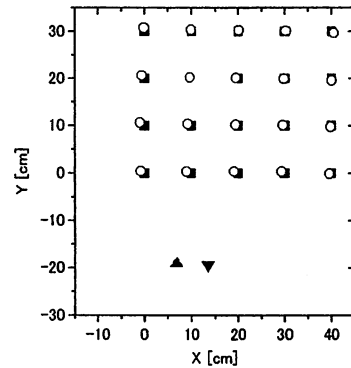


図3 目標指示装置により机上の目標位置を指示したときの目標検出値：■は目標位置、○は計測値、▲はトランスミッタ、▼が頭部装着レーザーの位置を示す。

表1 木製指示装置による指示した机上目標点20点の誤差の平均と標準偏差 (mm)

	正面	右向き	左向き
1回目	$5.9 \pm 2.8$	$6.2 \pm 2.4$	$8.8 \pm 3.5$
2回目	$6.0 \pm 3.1$	$6.1 \pm 2.4$	$7.8 \pm 3.9$
3回目	$7.4 \pm 3.5$	$5.8 \pm 3.4$	$8.2 \pm 3.4$
全試行	$6.4 \pm 3.1$	$6.0 \pm 2.7$	$8.2 \pm 3.6$
最大誤差	14.1	11.8	15.2

表2 健常被験者による机上目標点20点の誤差の平均と標準偏差 (mm)

	A	S	O	H	T
第1試行	$6.2 \pm 3.2$	$4.5 \pm 2.5$	$5.7 \pm 1.9$	$5.3 \pm 3.5$	$19.2 \pm 7.4$
第2試行	$7.8 \pm 4.2$	$6.2 \pm 3.4$	$20.7 \pm 7.2$	$7.0 \pm 4.8$	$14.2 \pm 6.4$
第3試行	$8.3 \pm 3.4$	$15.5 \pm 7.2$	$19.2 \pm 7.5$	$9.3 \pm 6.1$	$21.1 \pm 9.3$
全試行	$7.4 \pm 3.6$	$8.7 \pm 4.3$	$15.2 \pm 5.5$	$7.2 \pm 4.8$	$18.1 \pm 7.7$
最大誤差	19.3	34.1	37.9	23.9	41.0

差が4.5mm、2回目の試行で6.2mmであるのに対し3回目は15.5mmと増加している。被験者Oについても2回目、3回目の試行では計測値の誤差は20mm程度と増加している。これらの計測値の誤差が大きくなった被験者は他の被験者に比べ、キャリブレーションデータを取得した時から目標位置検出時のレーザーとトランスミッタの位置関係が大きく変わっていた。また、第2試行、第3試行で点No.9を指示した時のFastrakの出力値からキャリブレーションデータを作成し、机上の目標点20点について計測値を再計算すると計測値の誤差の平均は第1試行目の値に近くなった。よって、計測値の誤差の増加の一因として、キャリブレーションデータを取得した時からトラン

スマッタとレシーバの位置関係が大きく変化すると計測結果が異なることが挙げられる。そのため、測定条件が大きく変わった時にはキャリブレーションデータを再取得する方が良いと考えられる。

被験者 A が目標位置を 5 秒間指示し取得した計測値の標準偏差は 1.3~5.9mm (平均 2.9mm) であった。被験者 S では 1.2~6.8mm (平均 3.5mm)、被験者 O では 0.8~6.0mm (平均 2.7mm)、被験者 H では 1.5~7.5mm (平均 4.1mm)、被験者 T は 1.2mm~7.0mm (平均 3.5mm) であった。目標指示装置の標準偏差は、0.9~5.3mm (平均 2.4mm) であり、被験者の目標の指示は目標検出装置に比べ、ややばらつきが大きくなっている。しかし、一番標準偏差が大きい被験者でも標準偏差の増加は平均で 1.7mm 程度であり、それほど大きくはならないことから、目標指示に頭部動作を利用することは有効であると考えられる。

### (3) 机上の物体の高さの計測

物体の高さと計測された物体の高さの差を誤差として、10 箇所計測された物体の高さの誤差の平均値及び標準偏差を表 3 に示す。目標指示装置及び健常被験者 2 名では異なる物体 2 種類とも非常に高い精度で高さを検出することができた。この理由として、 $x$   $y$  平面上では誤差がある程度含まれていても  $z$  方向に対して同様に誤差が含まれて、互いの誤差を相殺している可能性が考えられる。実際に、物体の下辺の計測値と 50mm の高さの物体の上辺の計測値、104mm の高さの物体の上辺の計測値の  $x$   $y$  平面での標準偏差は 0.3~12.0mm (平均 3.0mm) であり、計測値は  $z$  方向に対して同様の誤差分布をしていた。

### 3.3 考察

FES では筋に非線形性や時変性があり、精度の高い位置制御の実現は現状では困難であると考えられる。多チャンネルフィードバック FES による手関節制御実験では、健常被験者により目標軌道を円軌道で制御をした場合、その平均誤差が 5~24mm ほどであった [5]。これより複雑な制御を行う場合、さらに誤差が大きくなることが想定される。よって、今回用いた目標位置検出装置の検出精度は実用上十分であると思われる。また、物体の高さを高精度で検出できることから、障害物や目標物の情報の取得をするために有効なユーザ・インターフェイスとして活用できると考えられる。

本法を実用化するためには目標物を指示したときに被験者がシステムに制御命令を伝達する方法が必

表 3 物体の高さ検出の誤差

(a) 物体 1 (高さ 104mm、直径 55mm) での誤差 [mm]

	目標指示装置	A	S
1 回目	0.3±4.9	3.0±2.6	3.0±1.8
2 回目	1.1±3.4	2.2±2.2	3.8±3.0
3 回目	0.7±2.4	2.1±2.0	4.2±3.4
全試行	0.7±3.5	2.4±2.2	3.6±2.7

(b) 物体 2 (高さ 50mm、直径 85mm) での誤差 [mm]

	目標指示装置	A	S
1 回目	2.0±3.8	0.0±1.6	2.9±3.4
2 回目	1.2±3.7	1.1±1.8	2.6±2.3
3 回目	1.1±4.9	1.8±2.0	3.1±3.2
全試行	1.4±4.1	0.9±1.8	2.8±2.9

要である。ニューラルネットで学習したうなずき動作を利用することによりディスプレイ上の文字を高認識率で取得できることが確認されているので、この方法を応用することが考えられる [6]。このような制御命令の取得方法と組み合わせた仕様を検討することも必要である。

## 4 目標とする物体を識別する方法の検討

### 4.1 物体を識別する方法の原理

最初に、物体の下辺をレーザポインタで指示し、物体の位置座標を測定する。次に、物体の上辺をレーザポインタで指示し、物体の高さを測定する。次に、物体の上面と下面それぞれの形状をレーザポインタ光でなぞり、取得した座標系列に含まれる特異雑音の除去を行う。そして、物体の上 (下) 面を一回りしたときの最大径の差と高さの比の逆正接角  $\alpha$ 、上辺の  $x$  軸方向の大きさ  $r_1$  と  $y$  軸方向の大きさ  $r_3$  に関する評価関数 (図 4) により物体の識別を行う。各評価関数で  $f_c$  は円柱状、 $f_l$  は長細形、 $f_{ul}$  は上面が大きい形状の関数であり 0~1 の大きさを出力する。そして、 $\alpha$  と  $r_3$  に関する評価関数の出力の平均が最も大きい形状をその物体の種類として識別する。

### 4.2 実験方法

物体の識別法を評価するために以下の実験を行った。被験者は机に対して正面に座り物体は (20, 20, 0) を中心に配置した。物体は、皿 (直径 18cm、高さ 1.2cm)、茶碗 (直径 17.6cm、高さ 8.0cm)、缶 (直径 6.6cm、高さ 10.5cm)、ペン (長さ 20.3cm、幅 0.7cm、高さ 0.6cm)、スプーン (長さ 17.5cm、幅 4.0cm、高さ 2.1cm)、コップ (直径 5.7cm、高さ 10.4cm) の 6 種類を用意した。

物体の高さの測定は前述と同様に行い、物体の形状を取得する際にはサンプリング周期 50ms で 10 秒間に時計回りで物体の上面および下面を一回りするようにレーザポインタの光線で被験者になぞってもらった。被験者は健康男性 1 名(被験者 A 25 歳)で、各物体につき 5 回の試行を行った。

### 4.3 結果

物体の形状の識別では、コップとペンで各 1 回誤認識をしたが、それ以外は 100% の確率で物体の形状を識別することができた。コップの識別に失敗した試行は皿とコップの評価関数の値は同値の 0.5 でありどちらでもありうると識別された。コップの下面に被験者からみて死角が存在するため、下面を実際より小さくなくってしまったためだと考えられる。また、ペンの識別に失敗した試行では、茶碗のような形状と識別された。これは物体の高さが低いために評価関数を通じて誤認識されたためと考えられる。

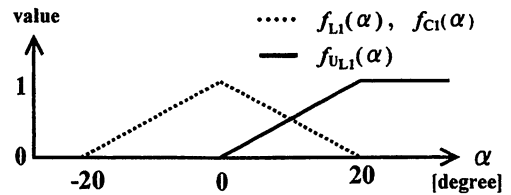
全体的には 6 種類の物体において高認識率で 3 種類の把持動作の異なる物体に識別することができた。このことにより、本報告で提案した目標位置検出装置を用いれば患者の残存機能を使って目標とする物体の種類を識別できることが示唆された。

### 4.4 考察

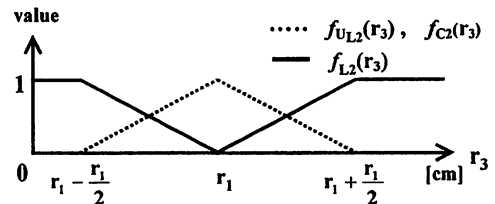
手の制御を考える際にペンやスプーンの先がどちらを向いているかは重要な情報だと考えられる。メニュー方式のユーザ・インターフェイスでは物体が何であるかを認識させるためのプロセスが容易であるが、物体の向きまで判断することはできない。ところが、目標検出装置を使用する場合は検出される座標は時系列になっているため、はじめに指示する座標が必ずペンの先と判断するような処理など比較的簡単な方法で物体がどういう向きで置かれているかを判断することが可能だと考えられる。このような方法を用いて、物体の向きの検出することに関しても今後の検討が必要であると考えられる。また、頭部動作を間違えた時のキャンセル機能についても検討する必要があると考えられる。

## 5 まとめ

本報告では、上肢の再建動作の中で重要なリーチングに着目し、任意のリーチング動作を再建するユーザ・インターフェイスについての検討を行った。まず、FES システムのユーザ・インターフェイスとして目標検出装置を構築し、その評価を行った。そして、



(a) 物体の角度  $\alpha$  に対する評価関数



(b) 物体の大きさ  $r_3$  に対する評価関数

図 4 物体識別のための評価関数

目標指示装置と健康被験者による実験から物体の位置及び高さを比較的安定に良好な精度で検出できることを確認した。次に、目標検出装置を利用し、目標とする物体の種類を識別する簡易な方法を考案し、その評価を行った。その結果、把持動作の異なる 3 種類の物体を高確率で識別することに成功し、患者の残存機能を使って目標とする物体の種類を識別できることが示唆された。これらの結果から、本装置が FES システムで有用になると考えられる。

### 謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金および高柳記念電子科学技術振興財団の援助を受けた。記して感謝する。

### 参考文献

- [1] 星宮 望:機能的電気刺激の基礎, 日本ME学会雑誌 BME, Vol. 6, No. 8, pp. 1-7, 1992
- [2] 半田康延:機能的電気刺激による上肢運動機能の制御, 日本ME学会雑誌 BME, Vol. 6, No. 8, pp. 8-15, 1992
- [3] 有野恵子, 渡辺高志, 大庭茂男, 二見亮弘, 星宮 望, 半田康延:任意のリーチングを再建する FES システムの構築に関する基礎的検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 98, No. 671, MBE98-137, pp. 83-90, 1999
- [4] 安西昭裕:任意の FES リーチング再建のためのユーザインターフェイスに関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士学位論文, 2002
- [5] 渡辺高志, 飯淵 寛, 黒沢健至, 星宮 望:機能的電気刺激による手関節 2 自由度運動の多チャネル PID 制御法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-II, No. 2, pp. 319-328, 2002
- [6] 古瀬則夫, 渡辺高志, 二見亮弘, 星宮 望, 半田康延:運動機能麻痺者の残存運動機能を用いた制御命令入力システム, 医用電子と生体工学, Vol. 37, No. 2, pp. 152-160, 1999