

2 チャネル皮膚電気刺激による 少数単語の効率的伝達システム

金 寛*・奥野 竜平*・吉田 正樹**・赤澤 堅造*

Efficient System for Transmitting a Few Words with Two-Channel Electrotactile Stimulation

Gwan KIM,* Ryuhei OKUNO,* Masaki YOSHIDA,** Kenzo AKAZAWA*

Abstract We describe a novel artificial tactile system for transmitting a few words (verbal information) in which two-channel electrotactile stimulation capable of generating apparent movements is applied to the dorsal carpal area of the left hand via surface concentric electrodes. The utility of the system was demonstrated in psychophysical experiments using 15 healthy subjects. Verbal information was provided regarding the direction in which an object was located, with directions selected from “forward”, “left” and “right” and objects selected from “human”, “car” and “obstruction.” Consequently, nine kinds of verbal information could be sent. We therefore designed six stimulation patterns (duration, 600–900 ms) comprising several burst profiles in which each burst was composed of several pulses (interval of biphasic pulses, 2.85 μ s) modulated in amplitude. The recognition experiment showed that the mean (\pm SD) percentage of correct answers was about 92 \pm 4.2% and the mean reaction time was about 2.9 \pm 0.1 s. The recognition percentage improved with experience, prior explanation about each stimulation pattern, and by increasing the range of stimulus intensity. These basic findings suggest the possible applicability of the proposed verbal information transmission method to assist auditory impaired persons and prosthetic hand users.

Keywords: verbal information, electrotactile stimulation, apparent movement.

1. はじめに

触覚の通信容量は 10^2 あるいは 10^6 (bit/s), 視覚は 10^7 (bit/s), 聴覚は 10^4 あるいは 10^5 (bit/s), 嗅覚, 味覚はそれぞれ 10^3 (bit/s) との報告があり [1, 2], 視覚・聴覚を利用できない場合あるいはそれをアシストするため, 福祉工学の分野で触覚を利用した様々な感覚代行・感覚補助システムの開発が鋭意進められている。またバーチャルリアリティやナビゲーションなどの新規分野でも研究が開始されている。先行研究では視覚障害者のための感覚代行システ

ムが多く, 例えば, 3次元情報呈示装置 [3], 聴覚補綴のための Ticle Talker [4, 5], 多指への同時触覚刺激により 12 ビット/秒という高度の情報伝送速度を実現した報告 [6] がある。また, 聴覚代行装置であるタクタイル・ボコーダは, 音声情報を縦 16 列×横 3 行の振動子アレーを介して 1 本の指先に呈示する装置で, 改良版では振動パターンが指先上を電光掲示板のように動く [7]。

刺激部位に関して, 通常の作業を妨害することになるが, 視覚・聴覚の代行においては多くの情報を伝達する必要性から, 時空間的な分解能が高い指部を使用することが多い。指以外を使用する場合の報告もあり, Grant ら [8] は, 自然発生の発話から音声の基本周波数変化を抽出し, 前腕皮膚上に直線的に並べた 10 個の電極に伝達して電気刺激を行い, イントネーション, ストレス, 文節構造のパターンの聴覚補助になる可能性があることを示している。聴覚障害者のための警告・報知音を伝達するための振動呈示方法に関する検討 [9] も行われている。この研究では目的音の鳴動パターン (パワー時間包絡) をそのまま振動パターンで手首部などへ呈示している。

一方, 指部以外を刺激部位としなければならない場合も

生体医工学シンポジウム 2004 発表 (2004 年 9 月, 札幌)
2004 年 7 月 30 日受付, 2004 年 11 月 29 日改訂, 2005 年 2 月 21 日再改訂

Received July 30, 2004; revised November 29, 2004, February 21, 2005.

* 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

** 大阪電気通信大学医療福祉工学部

Department of Biomedical Engineering, Osaka Electro-
Communication University

ある。例えば、手を切断した義手使用者である。また、自動車の車庫入れ等の運転時の高齢者や聴覚障害者の感覚代行・補助の場合、指は一般の作業に用いるので指部を刺激部位として利用することは好ましくない。このような条件下での感覚代行装置も報告例[10, 11]があるが、研究段階に留まっている。特に義手においては強い要望があり、実用的なシステムの開発が喫緊の課題である。

このような背景から、本研究では、高齢者運転支援・聴覚障害者支援・義手操作に対しての情報伝達を行い、そして早急に実用化が可能な感覚代行システムの開発を目指す。刺激としては、振動刺激よりも多くの情報が伝達できるので皮膚電気刺激とする。なお、刺激部位として指部は使用できなく、手首とする。手首は指に比べて識別の分解能は低いので、多くの情報を伝送できないことに注意してシステム開発を進める。

電気刺激については従来多くの研究がある。皮膚電気刺激の生理心理学的な性質は Kaczmarek らの長年の研究によって明確にされ、適切な刺激パルスのパラメータの決定も比較的容易に行うことができる。情報の伝達について、北泉ら[12]は、極性変化を用いた 3 電極刺激方式を提案し、四肢麻痺患者の残存する皮膚感覚への情報呈示を行って、6 つの刺激パターンに関して、認識率の平均値は 87% と報告している。ただし刺激パターンと単語との関連付けは行っていない。筋電義手の分野でもいくつかの報告がある[11, 13]。加藤ら[11]は、義手の把持力の大きさに応じて電気パルスの周波数を変化させ、Shannon[13]は、把持力を把持力の増大に伴い、刺激パルス数を増加させている。これらの研究では刺激の強さと伝達する変量の大きさの間に関連付けを行っており、言語情報の考えはない。微細な加工技術を使用することにより、様々な形状の刺激電極が製作できるので、電気刺激法の研究も鋭意継続されている[14-16]。本研究では、電極については安定性および早急な実用化を考え、通常の同心型電極[17]を使用する。

本研究では 1 組の刺激パターンが 1 つの単語に対応することを使用者に記憶させ、その刺激を逐次与えることで、つまり刺激の系列を手首部の皮膚感覚を介して使用者に与えることによって文意（以下、バーバル情報）を伝達するという新しい方式を提案し、その有用性を明らかにすることを目的としている。具体的には、車の車庫入れ時の高齢者、義手使用者、家庭内の聴覚障害者などへの適用可能性を示すために、ある程度まで限定した条件設定（刺激とバーバル情報の関係）を行う。本研究は、多様な言語情報を多く伝達するという目的ではなく、「貧弱な伝送量」という限られた条件下での言語情報を伝達する。すなわち、たかだか 3 単語×3 単語の組み合わせで作成される 9 種類の言語情報である。ヒトが短時間で識別でき、訓練時間は非常に短いという特徴を持つものである。例えば、第一番目

刺激は「前・左・右」の 3 種類のいずれかに、第二番目は「人・車・障害物」のいずれかに対応すると設定する。これにより、車の車庫入れ時では、例えば、「右に、障害物」の情報が与えられる。同様にして、聴覚障害者のために、第一刺激を「場所（例えば、1 階・2 階・別棟）」、第二刺激を「音の種類（例えば、ガス漏れ警報・電話・チャイム）」が考えられる。義手使用者の場合、第一刺激として義手と物体の接触部位（例えば、母指外側・二指外側・内側）、第二刺激として接触時の指開閉角度（例えば、角度大・角度中・角度小）がある。義手使用者にこのような情報を与える意義は次の通りである。現在は義手に感覚が備わっていないので、義手使用者は見えないもののハンドリングが満足にはできない。そのため、暗所でのドアの開閉や棚の上などの物体のハンドリングなどを可能にしたいとの強い要望がある。この要求を満足させるためには、義手のどの指が対象物に接触しているか、指は開いているか、閉じているかなどの情報を与えれば良い。これら情報がバーバル情報として与えられると、逐次探索しながら容易にドアの開閉や物体ハンドリングが可能となる。

本研究は被験者（健常人 15 名）に対する認識実験を行いシステムの有用性を評価する。また認識実験の経験（訓練効果）、刺激パターンの特徴に対する事前説明および刺激強度の効果などについて検討する。

2. 方 法

2.1 実験システム

本実験システムはパーソナルコンピュータ（PC）、D/A 変換器、2 チャンネルの同心表面電極および電気刺激装置からなる（図 1）[17]。PC により刺激電圧の制御、刺激電圧・電流の計測、心理物理実験における被験者の反応の記録を行った。被験者は印加された電気刺激を認知、判断し、マウスを用いて PC に反応を入力することにより実験を進めた。

刺激電極として、刺激の局在性、電流の拡散防止の点で優れている同心電極を使用した。試作した乾式金製表面同心電極（図 1 の下部）は、内側の関電極（直径 5.5 mm）、外側の不関電極（内径 10.5 mm、外径 25 mm）である。2 つの電極は、左手根部背面に手首と肘を結ぶ線とほぼ直交するように装着した。2 つの電極の中心間距離は 25 ~ 50 mm で可変である。

電気刺激装置は定電圧刺激を用い、刺激出力部は安全性のため絶縁されている。表面電極では何らかの原因で皮膚と電極の接触面積が減少する場合がある。この場合に刺激電流を一定とする定電流刺激では電流の分布が集中して、皮膚に痛みや損傷を与える恐れがある。したがって、安全性を重視し定電圧刺激を用いた。

電荷の移動を最小限に抑えることができ、皮膚組織への化学的な影響が少なく、近年主流となっている双極性電圧

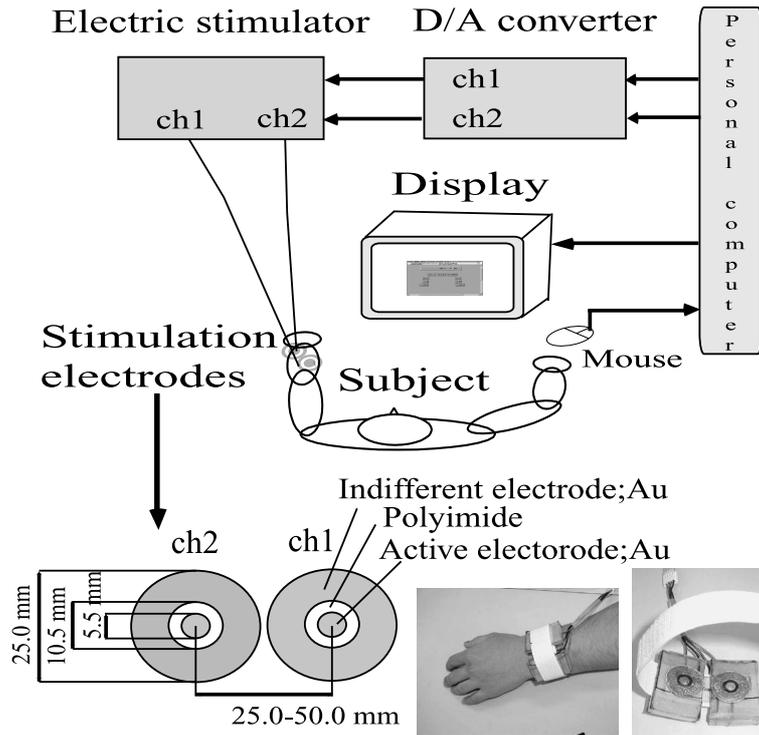


図1 実験システム
Fig. 1 Experimental setup.

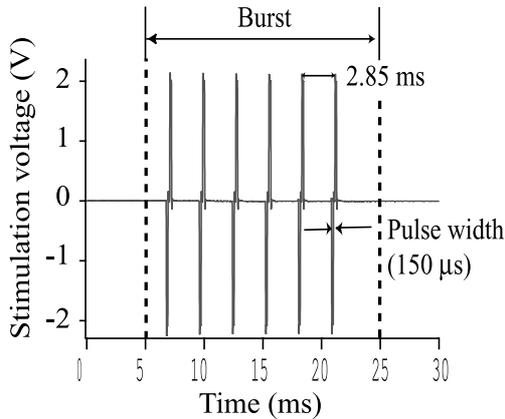


図2 単位刺激 (バースト) の波形
Fig. 2 Single stimulus (burst) waveform.

パルス [18, 19] を採用した。

2.2 刺激パターンの構成

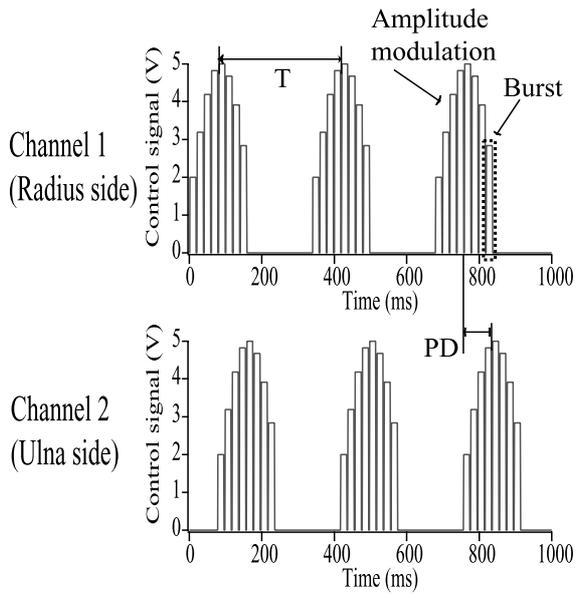
図2に基本となる刺激のパルス列を示す。刺激波形のパラメータ値はKaczmarekら[20]の結果に基づいている。Kaczmarekらは、従来のP/S比(痛み閾値/感覚閾値)の測定により求められるダイナミックレンジの最大化が必ずしも情報伝達に有効であるとは限らないという問題点を指摘している。つまり、電気的な刺激強度帯域幅が最大であったとしても、苦痛の無い主観的な感覚強度帯域幅が最大になるとは言えないということである。その上で、痛み閾値以下の刺激強度範囲において、苦痛の無い主観的な感覚強度帯域を最大化する波形として1バーストあたりのパ

ルス数6(1~20)、パルス周波数350 Hz(200~1,500)、パルス幅150 μs(40~350)を求めている。パルス幅に関しては他の研究[11, 18]においてもダイナミックレンジが広い、刺激感覚が安定する、不快感が少ないなどの理由より50~150 μsの値が用いられている。バーストの区間は20 msであり、以下、このバーストを「単位刺激」と呼ぶ。

図3に刺激パターンの一例を示す。上段(チャンネル1)が橈骨側(右)、下段(チャンネル2)が尺骨側(左)の刺激である。図では、1チャンネルに3組の連続刺激の期間がある。この連続刺激の部分は数個(図3では8個)の単位刺激からなり、振幅を時間と共に正弦波状に半波長分だけ変化(振幅変調)させている。以下、この連続刺激部をバースト群と呼ぶ。バースト群の間に約200 msの刺激休止の区間を作った。

振幅変調の正弦波の周波数、バースト群の刺激周波数(間隔はT)、チャンネル間の位相差(PD)の3つのパラメータを種々変更して、6種類の刺激パターン(2チャンネル)を設計した。なお、各刺激パターンは1チャンネル当たり1~3個(図3では3個)のバースト群からなる。表1に刺激パターンのパラメータ値を、図4に波形を示す(刺激パターンに番号1~6を付けた)。

6種類の刺激パターンの知覚について簡単に説明しておく。刺激パターン3は刺激部位の移動感覚が左右交互に「右左右左右」と知覚される。左右を往復する単振動のような感覚が知覚される。刺激パターン5は刺激部位が右から左へ移動し、なぞられるような感覚が1回知覚される。刺



T:Period of amplitude modulation
 PD:Phase difference between two channels

図 3 刺激パターン波形の一例

Fig. 3 An example of a stimulation pattern waveform.

表 1 6 刺激パターンのパラメータ値

Table 1 Parameter values of six stimulation patterns.

Stimulation pattern	Amplitude modulation	Freq. (Hz)	PD (degrees)
1	Half-wave sine (3.25 Hz)	2	90
2	Half-wave sine (3.25 Hz)	3.25	-90
3	Half-wave sine (5 Hz)	5	180
4	Half-wave sine (1 Hz)		90
5	Half-wave sine (1 Hz)		-90
6	Rectangular		

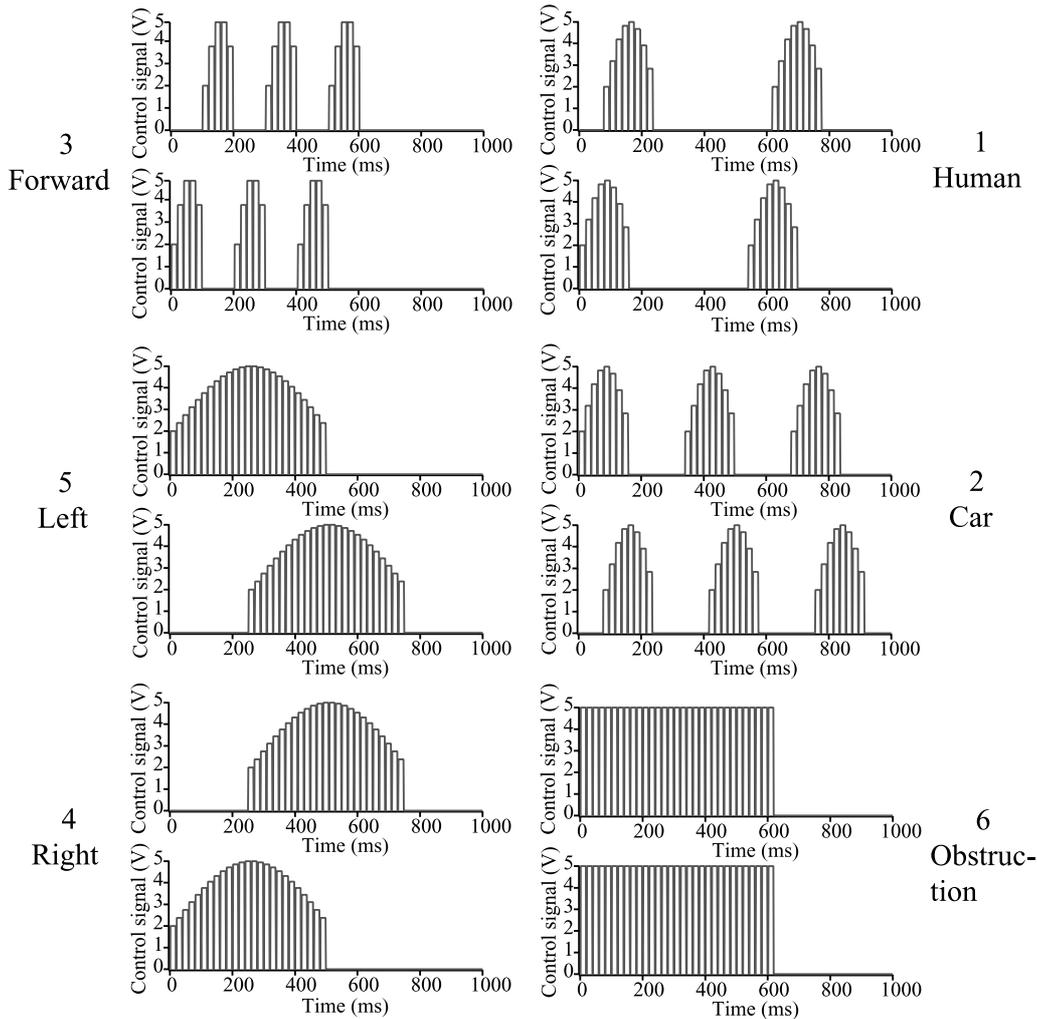


図 4 6 刺激パターンの波形

Fig. 4 Waveforms of six stimulation patterns.

刺激パターン4は刺激部位が左から右へ移動し、刺激パターン5と同様の感覚が知覚される。

刺激パターン1は刺激部位が左から右へ移動する感覚が一拍おいて2回知覚される。刺激パターン2は刺激部位が右から左へ移動する感覚が断続的に3回知覚される。刺激パターン6は、刺激部位が刺激中(約620 ms)押さえ付けられているような感覚が知覚される。

刺激パターン3, 5, 4はそれぞれ「前・左・右」に、刺激パターン1, 2, 6は「人・車・障害物」にそれぞれ単語(言語情報)を割り当てた。各刺激パターンのパラメータ値を設定するにあたり、各刺激に対応させる言語情報を考慮し、この言語情報が刺激パターンに関連付けられるように、周波数、仮現運動[21]の方向性、刺激回数に特徴を持たせた。刺激パターン1および2の刺激回数は2および3回で、「ヒト」および「クルマ」と子音の数に合わせている。刺激パターン6の刺激は刺激部位が圧迫されるような感覚が知覚されるため、「障害物」と「圧迫感」を対応づけている。刺激として矩形波を用いた。刺激パターン4および5に「右」および「左」を各々対応させているが、これら方向性を表現するため仮現運動を利用している。刺激パターン4は刺激部位の移動が左から始まって右で終わるため「右」と決定している。同様に、刺激パターン5は移動が右から始まって左で終わるため「左」と決定している。刺激パターン1の「前」は2チャンネルのため仮現運動を利用した方向性を表現できないため、刺激パターン2と同様、刺激回数は3回であるが、周波数の値を小さくしてパターン2と区別している。最終的に、刺激パターンは各パラメータを種々変更し、設計した各パターンに対してその識別の容易さを検討し、決定した。各刺激パターンの刺激時間は600～900 msである。

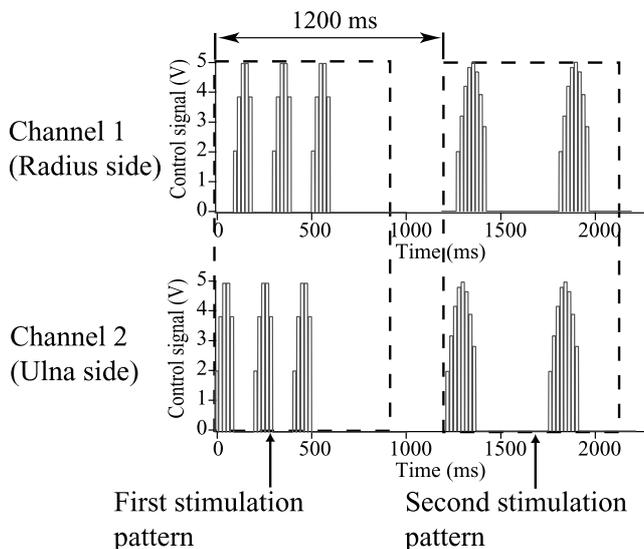


図5 刺激パターン系列の一例

Fig. 5 An example of two consecutive stimulation patterns.

2.3 バーバル情報伝達方法

「どの方向に何が存在するか」の情報を伝達するため、連続した2つの刺激を用いて表現する。「方向」と「対象物」に対応する刺激パターンをそれぞれ第一刺激、第二刺激とし、この2つの刺激によりバーバル情報を表現した(図5)。第一と第二の刺激間隔は1,200 msとした。第一刺激と第二刺激の組を刺激系列と呼ぶ。方向で3種類、対象物で3種類の、計9種類の刺激系列を構成した。

例えば、第一刺激に刺激パターン3を、第二刺激に刺激パターン1を用いた刺激系列は、「前方向に人がいる」という意味である。第一、第二の刺激パターンを「識別」し、それぞれを割り当てられた言語に「翻訳」することにより、バーバル情報を理解することができる。

2.4 実験手順

実験は、1) ダイナミックレンジの測定、2) 刺激パターン翻訳実験、3) バーバル情報伝達実験の順序で行う。

1) ダイナミックレンジの測定

ダイナミックレンジの測定に刺激強度を一定のステップで増加させながら、各ステップで被験者の判断を求める極限法[22]を用いた。この方法により絶対閾値および痛み閾値をそれぞれ5回測定し、平均を求め、それらの値を絶対閾値および痛み閾値として刺激電圧強度の範囲を決定した。2チャンネルそれぞれに対して行う。ここでは安全性を考慮して最大刺激強度を、絶対閾値とダイナミックレンジ90%の値の和とした。各被験者の実験では、各被験者で測定した閾値をもとに、刺激範囲を設定している。

2) 刺激パターン翻訳実験

まず訓練を行った。

(a) PCの画面に言語情報を表示した。刺激パターン1～6に対応する言語情報「前・左・右」、「人・車・障害物」である。被験者はその内の1つを選択して、ボタンをクリックする。言語情報に該当する刺激パターンが印加される。

(b) 被験者は刺激パターンを識別のために記憶する。

(c) 各被験者が全パターンを識別可能であると判断した時点で訓練を終了する。訓練に要した時間を計測した。

次に、評価実験を行った。

(a) 被験者が画面上の「スタート」をクリックすると、6つの刺激パターンの一つが被験者に印加される。加えられる刺激パターンの順序はランダムである。

(b) 被験者は印加された刺激が言語情報の何に対応するかを識別し、マウス操作で回答(反応)する。

(a), (b)を50試行繰り返す。反応時間、正答率を測定した。

3) バーバル情報伝達実験

ここで表示される情報は、9種類のバーバル情報である。訓練と評価の手順は2)と同様である。

バーバル情報伝達の評価実験では、全 9 種類の刺激系列がランダムに印加され、実験は約 10 分間行った。

2.5 事前情報と刺激強度の効果に関する検討

2.5.1 2 種類の被験者群 実験は、15 名の被験者 (22 ~ 24 歳の健常男子 13 名、健常女子 2 名) を 2 つのグループに分けた。各被験者に対し、各週 2 回の実験を 4 週、計 8 回の実験を行った。

グループ I は本実験を初めて行う被験者群 (22 ~ 24 歳の健常男子 6 名、健常女子 2 名) である。

グループ II は実験を経験したが刺激パターンに関する事前情報を得ていない被験者群 (22 ~ 24 歳の健常男子 7 名) である。

2.5.2 刺激パターンに関する事前情報 刺激パターンに関する事前情報を与えることの効果を明らかにするため、合計 8 回の実験を、前半と後半各 4 回ずつに分けた。前半では、刺激パターンに関する事前情報を与えない。つまり、実験前に刺激パターンの特徴や似ている刺激パターンの識別のためのポイントを説明しない。後半の実験では、それらを説明した。

2.5.3 刺激強度の増大の効果 6 刺激パターンの内、後述する比較的似た 3 つの刺激パターンの識別が困難であった 4 名の被験者に対して最大刺激強度をダイナミックレンジの 5% だけ増大し、同様の実験を 2 回行った。

なお、本実験での反応時間は、刺激印加から回答をマウスでクリックするまでの時間 (不正解の回答の場合を除外) とし、正答率とは印加された全刺激回数に対する正答回数の割合 (%) とした。

3. 結 果

3.1 刺激パターン翻訳実験結果

3.1.1 刺激パターンの影響 表 2 に、全被験者の刺激パターン翻訳テストの結果を示す。表は印加された刺激パターン (列) に対する反応 (行) を示す。対角要素が正

答である。各刺激パターンに対する正答率 (平均値) を右端に示している。刺激パターン 1, 2, 3 の正答率は高い。一方、刺激パターン 4, 5, 6 は、正答率が低く、識別が困難であったことを示す。刺激パターン 4, 5, 6 の 3 つのパターンは比較的似たパターンとなっている。刺激パターン 4, 5 が続けて印加されると、左右の区別がつきにくくなる。また刺激パターン 6, 4 または 6, 5 という刺激が印加される場合、刺激パターン 4 および 5 のなぞられる感覚との区別がつきにくいとの被験者のコメントがある。ただし、これら 3 つの刺激が連続して印加されない場合には、識別できるとのコメントを得ている。例えば、刺激パターンが 4, 5, 2, 3, 1, 4, 6, 2, 4, 3, 5 と与えられた時、識別が困難になる場合としては 4, 5 と 4, 6 のように類似したパターンが連続してくると短時間の内に、回答しなければならないので、誤回答が多くなる。

3.1.2 実験経験の効果 図 6 および図 7 に、グループ I および II の被験者に対する刺激パターン翻訳の結果を各々示す。図において横軸は実験回数、縦軸は正答率の平均値と標準偏差を各々表す。図から、グループ II の正答率が前半の実験において特に、グループ I のそれより高い値をとっていることが分かる。これはグループ II の被験者が刺激パターンを記憶しているためである。また、実験 3 回目より刺激パターン 5 を除いた他の 5 パターンの正答率が両グループとも 78% 以上の値であることが分かる。1 回目の実験でのグループ間の正答率の差をウィルコクソンの順位和検定 [23] を用いて検証を行った結果、刺激パターン 1 のみ、検定統計量 $W_1 = 73.5$ (有意水準 $\alpha = 0.1$) となり、グループ間の正答率に差があった。

3.1.3 刺激パターンに関する説明の効果 後半 4 回の実験では前半 4 回の実験に比べて正答率の値がやや改善された。特に、パターン 1, 2, 3 の後半 4 回の実験では正答率が両グループともほぼ 100% の値になっている。各グループでの前後半間の正答率の差 (ウィルコクソンの符号

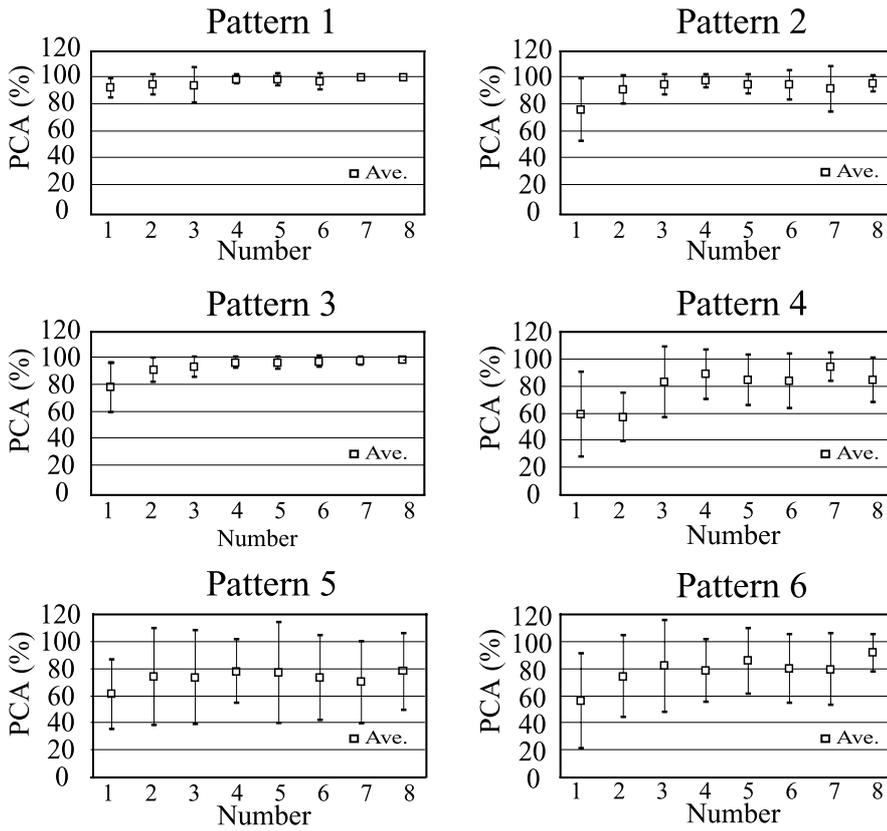
表 2 刺激パターン翻訳テスト結果 (全被験者)
Table 2 Results of the stimulation pattern translation test for all subjects.

Stimulation	Reaction						Sum	PCA*
	1	2	3	4	5	6		
1	919	5	7	8	1	4	944	97
2	12	946	50	1	8	6	1,023	92
3	9	30	1,006	3		21	1,069	94
4	7		5	852	57	117	1,038	82
5	2	4	9	64	759	146	984	77
6	2	1	7	81	100	751	942	80
Sum	951	986	1,084	1,009	925	1,045	6,000	

PCA* shows the percentage of correct answers.

Correctly classified instances: 5,233 (87.2%)

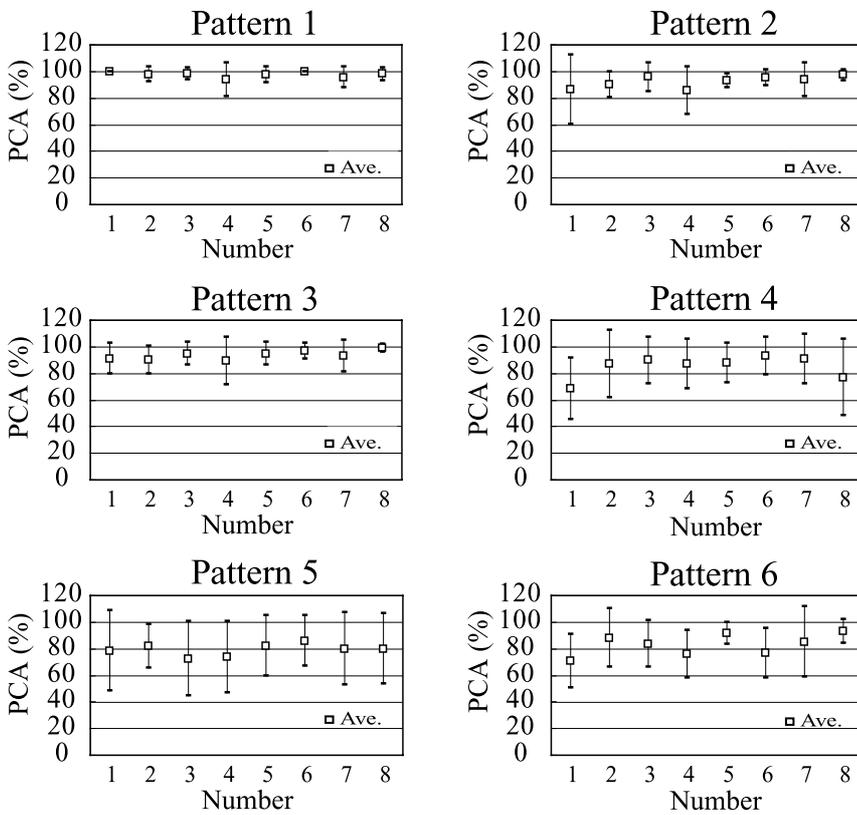
Incorrectly classified instances: 767 (12.8%)



(PCA : percentage of correct answers)
(Ave : average)

図 6 刺激パターン翻訳テスト結果 (グループ I)

Fig. 6 Results of the stimulation pattern translation test for Group I.



(PCA : percentage of correct answers)
(Ave : average)

図 7 刺激パターン翻訳テスト結果 (グループ II)

Fig. 7 Results of the stimulation pattern translation test for Group II.

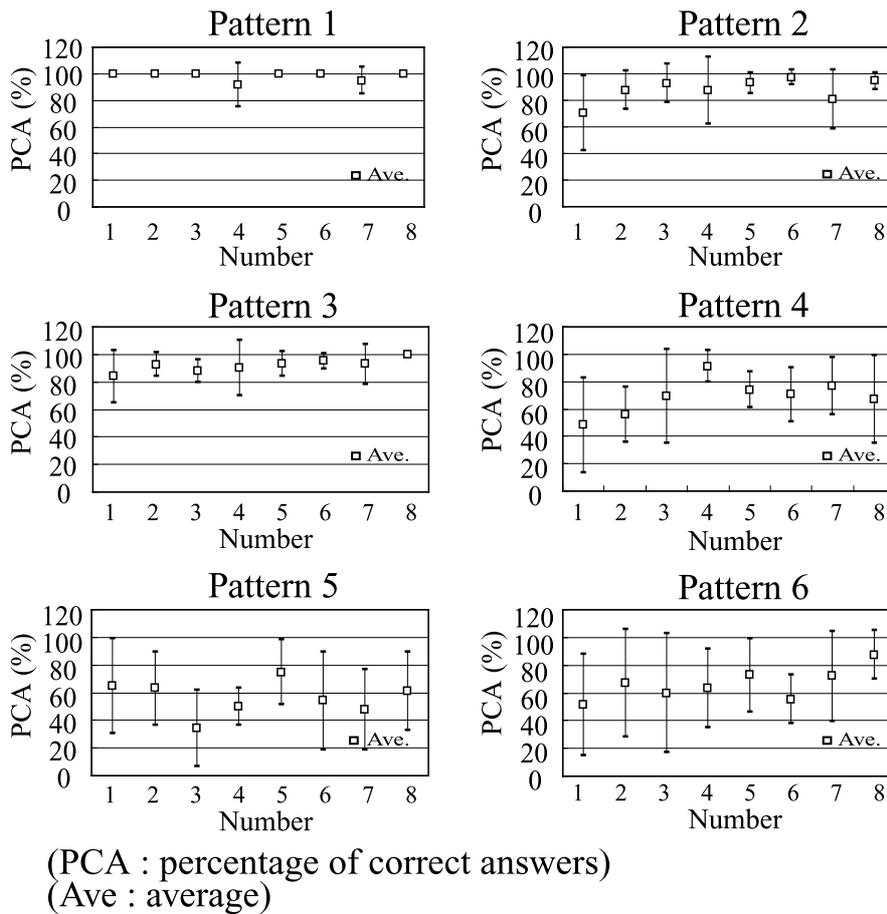


図 8 4 名の刺激パターン翻訳テスト結果
Fig. 8 Results of the stimulation pattern translation test for four subjects.

付順位検定[23])の検証結果, グループ I において, 刺激パターン 1 および 4 (検定統計量 $W_2=1$ および 5 (有意水準 $\alpha=0.1$)), 刺激パターン 3 (検定統計量 $W_2=3$ (有意水準 $\alpha=0.05$)) に, 前後半間の正答率に差があった. グループ II において, 刺激パターン 2 (検定統計量 $W_2=2$ (有意水準 $\alpha=0.1$)), 刺激パターン 3 (検定統計量 $W_2=0$ (有意水準 $\alpha=0.05$)) に, 前後半間の正答率に差があった. 被験者 15 名の内, 両グループの健常男子 2 名ずつが特に, パターン 4, 5, 6 の識別が困難であった. 図 8 にこの 4 名の被験者のみの刺激パターン翻訳結果を示す. 図 8 と 15 名全体の結果 (図 6, 7) との比較より, この特性が容易に分かる.

被験者 15 名の内, 11 名は前半 3 回の実験で概ね刺激パターンの特徴が把握でき, 後半の実験開始前に刺激パターンの特徴や似ている刺激パターン識別のためのポイントの説明を受け, 把握していたパターンの特徴をより確信して実験を行えたとのコメントを得ている. また, 実験の回数が増えるごとに刺激パターンの識別が容易になるとのコメントも得ている.

3・1・4 訓練時間, 反応時間の計測結果 表 3 に, 両グループにおける訓練時間, 反応時間の計測結果を示す.

表 3 両グループにおける訓練時間, 反応時間の計測結果
Table 3 Results of training time and average reaction time for Groups I and II.

	Group I		Group II	
	First trial	After second trial	First trial	After second trial
Training time (s)	50-180	3-57	20-112	2-50
Average reaction time (s)	1.5±0.42		1.5±0.54	

訓練時間を見ると, グループ I における 1 回目の実験では約 50 秒から約 180 秒の間, 2 回目以降の実験では約 3 秒から約 57 秒の間であった. グループ II では約 20 秒から約 112 秒の間, 約 2 秒から約 50 秒の間であった. このことは長時間の訓練を必要とせずにパターンの識別が可能であることを示唆する.

グループ I および II における平均反応時間は両グループとも約 1.50 秒, 標準偏差は 0.42 秒および 0.54 秒であった.

表4 両グループにおけるバーバル情報伝達実験結果

Table 4 Results of the experiment for transmitting verbal information for Groups I and II.

	Group I		Group II	
	Session 1	Session 2	Session 1	Session 2
PCA (%)	92	97	88	90
Average reaction time (s)	2.8±0.98		3.0±1.02	

3.2 バーバル情報伝達実験結果

バーバル情報伝達では、比較的似たパターンである刺激パターン4, 5および6に関して、識別を容易とするため、4, 5は第一刺激に、6は第二刺激に割り当てた。この結果、グループIにおける正答率は87%~99% (平均正答率約95%) の高い正答率を得た。グループIIでは77%~96% (約89%) であった。ウィルコクソンの順位和検定を用いた検証結果、各グループ間の正答率の違い (検定統計量 $W_1 = 43$) に有意差が無かった。

表4に、両グループにおけるバーバル情報伝達実験の結果を示す。前半および後半の実験での正答率の値はグループIではそれぞれ約92%と約97%であり、グループIIでは約88%と約90%であった。後半の実験での正答率の値が両グループとも前半のそれより高い結果が得られている。各グループでの前後半間の正答率の差 (ウィルコクソンの符号付順位検定) の検証結果、グループIのみ、検定統計量 $W_2 = 5$ (有意水準 $\alpha = 0.1$) となり、前後半間の正答率に差があった。

グループI, IIの平均反応時間は約2.8秒と約3.0秒、標準偏差は0.98秒と1.02秒という結果が得られた。グループ間の差違はほとんど無い。実用上、例えば、障害者への生活支援情報や筋電義手での情報は、瞬時の動作を要求するものではなく、十分な時間的余裕を持って与えるものである。また、約3秒の反応時間は支障が無いものといえる。また、車庫入れ等の運転時の高齢者に対しては警告情報を知らせることが重要であり、多少の時間がかかっても問題が無いと考える。

実験結果から、次のように結論づけられる。被験者は設計した6種類の刺激パターンを比較的容易に識別でき、実験開始前に刺激パターンの特徴をあらかじめ説明することにより2~3回の実験で9種類のバーバル情報の伝達が可能となることが示された。

3.3 刺激強度変更の効果

2.5.3項で前述した最大刺激強度をダイナミックレンジの5%だけ増大し、同様の実験を行った。これにより1つのパターンでの振幅が増大したので識別が容易になることが、4名中3名の被験者に対する刺激パターン翻訳実験の結果、示された[24]。すなわち、6種類の刺激パターンの

平均正答率が刺激強度変更前の98, 89, 91, 69, 64, 77%から刺激強度増大の場合の100 (増加が+2%), 100 (+11), 97 (+6), 90 (+21), 89 (+25), 86 (+9) %に改善された。特に、刺激パターン4, 5, 6の改善が大きい。

被験者から「刺激強度の増大により刺激パターンがより分かりやすくなった」、とのコメントを得ている。しかし、1名においては、刺激パターン4, 5, 6の識別がまだ困難であった。

バーバル情報伝達実験結果、3名の平均正答率は94, 94, 82%から99 (+5), 92 (-2), 99 (+17) %に改善された。特に、2名に改善が見られた。

3.4 考察

提案した2チャンネル皮膚電気刺激を利用したバーバル情報伝達は、手首部であるので、伝達できる情報は9種類と少ないが、実験を通じて実用上十分な精度で利用可能であることを示した。提案したバーバル情報伝達システムは視覚、聴覚以外の方法でヒトへのバーバル情報を伝達するシステムであり、実用上価値あるものと考えられる。実用化には、装置の小型化が必要であるが、簡単な情報を伝達するシステムとしては、家庭、施設などで必要な伝達情報が得られておれば、技術的には比較的容易に使用可能であると考える。

さらに、本システムを用いて提供する情報を増加するためには、刺激パターン、チャンネルの増大などが必要であり、電極サイズなど多くの検討すべき技術的な問題を解決していく必要がある。また義手使用者への適用が考えられるが、切断の個所によって利用される部位が限定されるため、刺激部位の決定および刺激パターンの設計が課題であり、鋭意検討を行っている。

4. おわりに

本研究は、感覚障害者へのバーバル情報伝達を目的とし、試作した2チャンネル皮膚電気刺激システムの概要、設計指針、認識実験結果などについて述べ、提案した方式の有用性を示した。以下に、結論を要約する。

- 1) 電気刺激装置、乾式金製表面同心電極を試作し、またバーバル情報伝達のための刺激パターンの設計を行った。
- 2) 方向「前・左・右」と対象物「人・車・障害物」に関する2つ1組からなる9種類のバーバル情報を対象とした。基本の刺激パターンは振幅形状の異なるバースト状刺激 (双極性電圧パルス列) が1~3個連続したもので、識別しやすいようにこれらを2チャンネルに配置し、バーバル情報に対応する9種類の刺激パターン系列を作成した。
- 3) 健常者15名の被験者を対象として実験を行った。バーバル情報伝達実験の結果、平均正答率は約92%、平均反応時間は約2.9秒となった。

- 4) 識別実験の経験, 刺激パターン分類のための事前情報, 刺激強度範囲の増大により, バーバル情報の識別率は向上した。

実用化に向けた今後の課題は, 聴覚障害者を対象にした評価実験, 皮膚との接触の安定性に優れた電極の開発, 電気刺激装置の小型化, などである。さらに, 義手への適用を考慮したシステム設計を鋭意遂行しているところである。

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金による。分部靖君(神戸大学工学部), 佐々木陽子君(大阪電気通信大学)には大学院特別研究の一部として, 実験システム開発, 心理物理実験の協力を得た。

文 献

1. 下条 誠: 皮膚感覚の情報処理. 計測と制御. **41**(10): 723-727, 2002.
2. 清水 豊: 視・聴覚障害者用触覚情報伝達機器の設計支援. 基盤研究(B-2)課題番号 06452407, インターネットによる情報公開「触覚伝達機器の設計支援情報」: <http://www.tsukuba-tech.ac.jp/info/kenkyu/kaken/trans.html> [accessed October 7, 2004].
3. Shinohara M, Shimizu Y, Mochizuki A: Three-dimensional tactile display for the blind. *IEEE Trans Rehabil Eng.* **6**(3): 249-256, 1998.
4. Galvin KL, Blamey PJ, Oerlemans M, Cowan RSC, Clark GM: Acquisition of a tactile-alone vocabulary by normally hearing users of the Tickle Talker. *J Acoust Soc Am.* **106**(2): 1084-1089, 1999.
5. Galvin KL, Blamey PJ, Cowan RSC, Oerlemans M, Clark GM: Generalization of tactile perceptual skills to new context following tactile-alone word recognition training with the Tickle Talker. *J Acoust Soc Am.* **108**(6): 2969-2979, 2000.
6. Tan HZ, Durlach NI, Reed CM, Rabinowitz WM: Information transmission with a multifinger tactual display. *Perception & Psychophysics.* **61**(6): 993-1008, 1999.
7. 和田親宗, 井野秀一, 伊福部達: 高度難聴者用タクトイルボコーダにおける音声スペクトルのスイープ呈示方式の提案と評価. 電子情報通信学会論文誌 A. **J78-A**(3): 305-313, 1995.
8. Grant KW, Andell LAH, Kuhl PK, Sparks DW: Hearing aids and neural rehabilitation, the transmission of prosodic information via an electrotactile speechreading aid. *Ear Hear.* **7**(5): 328-335, 1986.
9. 織田修平, 水島昌英, 羽田陽一, 片岡章俊: 聴覚障害者への振動呈示方法に関する基礎検討. 電子情報通信学会総合大会予稿集. 2004, pp. 384.
10. 奥野竜平, 吉田正樹, 内山孝憲, 赤澤堅造: 皮膚振動刺激による筋電義手感覚フィードバック装置の検討. 電学論 C. **116**(11): 1246-1251, 1996.
11. 加藤一郎, 大原雄一, 岡崎公一, 市川 洌: 圧力感覚を持つ上腕電子義手; ワセダハンド-5. *バイオメカニズム.* **1**: 199-206, 1973.
12. 北泉 武, 村上 肇, 星宮 望, 半田康延: 3電極皮膚電気刺激による感覚情報の呈示法. 電子情報通信学会論文誌. **J76-D-II**, 2638-2640, 1993.
13. Shannon GF: A myoelectrically-controlled prosthesis with sensory feedback. *Med Biol Eng Comput.* **17**: 73-80, 1979.
14. Kajimoto H, Kawakami N, Maeda T, Tachi S: Tactile feeling display using functional electrical stimulation. *Proc of 9th Int. Conf. Artificial Reality and Telexistence ICAT '99.* 1999, pp. 107-114.
15. Tang H, Beebe DJ: A microfabricated electrostatic haptic display for persons with visual impairments. *IEEE Trans Rehabil Eng.* **6**(3): 241-248, 1998.
16. Kaczmarek KA, Haase SJ: Pattern identification as a function of stimulation current on a fingertip-scanned electro-tactile display. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* **11**(3): 269-275, 2003.
17. 分部 靖, 奥野竜平, 金 寛, 赤澤堅造: 自動車運転者へのバーバル情報伝達のための時空間皮膚電気刺激パターン. 信学技報. **MBE2001-191**: 53-58, 2002.
18. 市川 洌, 山本澄子, 三舘 誠, 阿部紀子: 皮膚電気刺激による情報伝達の基礎的特性. *バイオメカニズム.* **4**: 17-24, 1978.
19. Kaczmarek KA, Webster JG, Bach-y-Rita P, Tompkins WJ: Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE Trans Biomed Eng.* **38**(1): 1-16, 1991.
20. Kaczmarek KA, Webster JG, Radwin RG: Maximal dynamic range electrotactile stimulation waveforms. *IEEE Trans Biomed Eng.* **39**(7): 701-715, 1992.
21. 津田良一, 上野照剛: 皮膚感覚における仮現運動知覚の誘発脳波トポグラフィによる検討. *医用電子と生体工学.* **29**(4): 243-248, 1991.
22. 日科技連官能検査委員会: 新版官能検査ハンドブック, 日科技連出版社, 東京, 1990, pp. 398.
23. 縄田和満: C による統計データ解析入門. 東洋経済新報社, 東京, 2001, pp. 215-242.
24. 金 寛, 奥野竜平, 吉田正樹, 赤澤堅造: 皮膚電気刺激バーバル情報正答率向上のためのダイナミックレンジ変更. *生体医工学.* **42**(Suppl): 292, 2004.

金 寛 (キム グワン)

1974 年朝鮮大学校理学部物理数学科卒業, 大阪大学工学部電気工学科研究生, 同大学工学部電気工学科教務技官を経て, 1991 年同大学工学部情報システム工学科助手, 2002 年同大学情報科学研究科助手, 現在に至る。社会システムのモデリングやアナリシス, 皮膚電気刺激による情報伝達方法に関する研究に従事。博士(工学)。日本エム・イー学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会の各会員。



奥野 竜平 (オクノ リュウヘイ)

1992 年神戸大学工学部計測工学科卒業, 1997 年同大学大学院自然科学研究科システム工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年同大学工学部情報知能工学科助手, 2000 年大阪大学大学院工学研究科助手, 2002 年同大学工学部情報科学研究科助手, 現在に至る。筋電義手の開発, 筋運動制御機構の計測と解析に関する研究に従事。



日本エム・イー学会, 電子情報通信学会, 電気学会, バイオメカニズム学会の各会員。

吉田 正樹 (ヨシダ マサキ)

1953年7月9日生まれ。1984年大阪大学大学院工学研究科後期課程電気工学専攻単位修得退学。1984年神戸大学医療技術短期大学部理学療法学科講師，1994年同大学工学部情報知能工学科助教授，1998年大阪電気通信大学工学部知能機械工学科教授を経て，2001年同大学医療福祉工学科教授，現在に至る。現在，生体電気信号（特に筋電図）の処理に関する研究，筋電制御義手の開発，歩行分析などの研究に従事。博士（工学）。1983年日本エム・イー学会学会賞（論文賞）受賞。

日本エム・イー学会，電気学会，電子情報通信学会，計測自動制御学会，日本体力医学会，日本理学診療医学会，IEEEなどの会員。



赤澤 堅造 (アカザワ ケンゾウ)

1965年大阪大学工学部電気工学科卒業，1971年同大学大学院博士課程単位取得退学。同年同大学工学部電気工学科助手，講師，助教授を経て，1990年神戸大学工学部教授，2000年大阪大学大学院工学研究科教授，2002年同大学情報科学研究科教授，現在に至る。1970～1971年アルバータ大学生理学教室研究員。神経・筋系の解析と応用，筋電制御義手開発，生体信号処理，新しいサイバー楽器の開発等の研究に従事。工学博士。

日本エム・イー学会，電子情報通信学会，バイオメカニズム学会，IEEE，ISEKなどに所属。

