

1. 特許取得
2. 実用新案登録
3. その他

該当なし

厚生労働科学研究費補助金（医療機器開発推進研究事業）

分担研究年度終了報告書（平成22年度分）

研究課題名：

義肢における感覚機能と随意運動機能の統合と実装

課題番号：H20-ナノ一般-003

分担研究者：

下条誠 電気通信大学電気通信学部 教授

國本雅也 済生会病院横浜市東部病院脳神経センター センター長

鈴木隆文 東京大学大学院情報理工学系研究科 講師

深山理 東京大学大学院情報理工学系研究科 助教

石川正俊 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授

眞溪 歩 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 准教授

満洲邦彦 東京大学大学院情報理工学系研究科 教授

研究要旨

本研究課題の目的は、生体の神経系と人工物である外部機器の信号ラインを神経電極などのインタフェースデバイスで直接かつ永続的に接続する技術確立し、その技術を用いることにより生体の運動神経情報によって装着者が意思どおりに随意的に動かすことが可能で、また、人工肢によって物に触れた場合に、装着したセンサ類によって得られた圧などの物理的情報を神経系への刺激インパルス列に変換し、対応する感覚神経系へ直接入力してやることにより、生体があたかも自分の手足で触れたように感じる事もできるという、次世代の人工肢システムの実現を図るものである。本分担研究は、本研究において目標としている人工肢のモデルとして、本プロジェクトで研究開発を行ってきた「ロボットハンド/アーム（義手）を神経情報で操作する技術」と「その義手でものに触れた際に、その物理的刺激を（自分の手で触れたかのように）感覚として感じる事の出来る技術」を実装した義手を実際に構築・作動させ、その feasibility を示す事にあり、両機能のロボットハンド/アーム（義手）システムへの実装とその動作確認・評価実験を行なった。

満洲が研究全般の統括を行い、生体情報処理とロボットハンド操作に関しては、深山・石川・眞溪が、装着するセンサ類の設計と実装は下条・石川・満洲が、マイクロニューログラム/マイクロステミュレーション実験に関しては、國本・鈴木・下条・満洲が共同で担当した。なお、本統合実験は、ヒトを被験者とする必要があることから、侵襲的に電極を慢性的に埋め込み、運動神経情報を記録する、という方法がとれないため、ロボットハンド/アーム（義手）を操作する情報としては、運動神経活動（末梢神経における）の代わりに表面筋電信号を用いて実験を行なった。なお、この表面筋電信号によるロボットハンドの操作に関しては、協力研究者として、兵庫県立大学の石垣研究室（石垣博行教授・荒木望助教）の協力を得て行なった。

A. 研究目的

A. 研究目的と背景

本プロジェクトにおける最終的な目的は、生体の神経系（神経線維、或は神経細胞）と人工物である外部機器の信号ラインを神経電極などのインタフェース素子で直接かつ永続的に接続する技術を確立し、その技術を用いることにより、義手に随意運動機能と感覚機能を付与しようというものであり、本プロジェクトにおいて開発した技術の feasibility は最終的に、これらの技術（随意運動機能と感覚機能）を実装した義肢システムを用いて実証する必要がある。

本研究課題は、この、随意運動機能と感覚機能を実装した義肢システムの構築とその作動・評価を目的としたものであるが、我々は、7自由度を有するロボットアームと16自由度を有するロボットハンドから構成されるロボットアーム／ハンドシステム（計23自由度）を用いて、1) 被験者の動作どおりに作動する事ができ（随意運動機能）、また、2) ロボットハンドで物品を把持した際に、ロボットハンドの指に装着した圧センサによって検出された圧に対応した電気刺激パルス列を装着者の感覚神経系に入力する事により、装着者に圧感覚を生成させる事の出来る（感覚機能）義手のモデルの構築を行なったので、これについて述べる事とする。

B. 研究方法、および、C. 研究結果

ロボットハンド／アームシステム

まず、義手に対して随意運動機能と感覚機能を賦与する統合実験に用いたロボットハンド／アームシステムについて解説を加える。

本システムは、これまでに簡単な把持動作や定形運動パターンの呈示によってテストを行ったほか、図 5-1 に示すようにトランペットのバルブ操作といった複雑な操作にも適用可能であることを確認している。

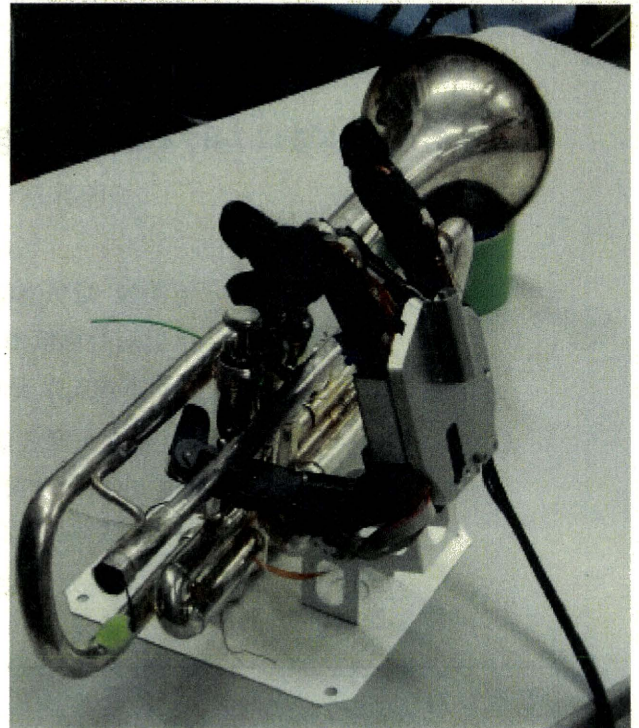


図 5-1 ロボットハンドによるトランペットのバルブの操作

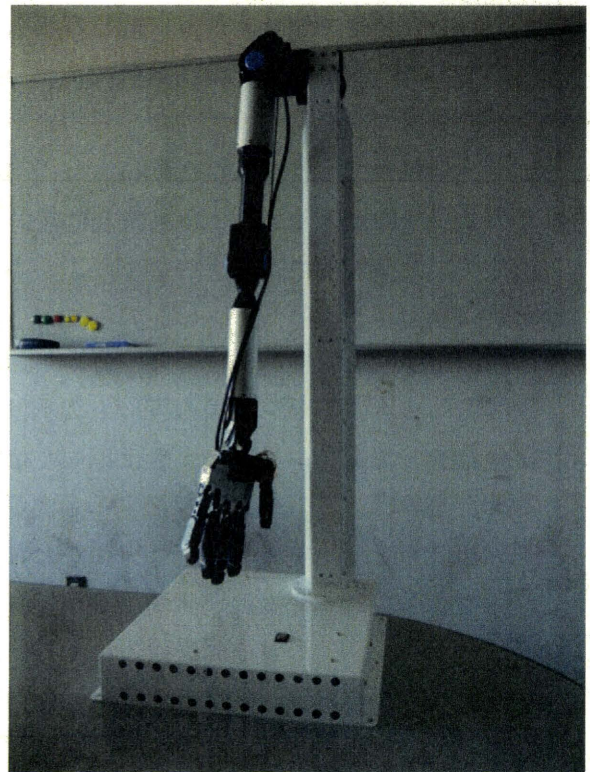


図 5-2 今回の実験で用いたロボットハンド

(川渕機械技術研究所製作：特注仕様)

■構造

実験に使用したロボットハンド/アームには、川渕機械技術研究所の特注仕様のロボットハンドを用いた(図5-2)。仕様は下記の通りであり、右腕に相当するロボットアーム(右アーム)、右手に相当するロボットハンド(右ハンド)、左手に相当するロボットハンド(左ハンド)から構成され、ヒトの手腕を模した動作を行うことが可能である。

ハンド部に関しては、第1指は2関節、第2～第5指は3関節から成り、各関節は生体と同じ可動範囲で個別に屈曲・伸展が可能で、自由度に関しては、a)第1指は、MP関節・IP関節の屈曲・伸展の他に、橈側内転・外転、掌側内転・外転、および、対立運動が可能(5自由度)、b)第1指との把持操作を行う第2、第3指については、それぞれ、MP, DIP, PIP関節の屈曲・伸展(3自由度)が可能、c)第4、第5指については、DIP関節は独自に屈曲・伸展が可能であるが、MP関節とPIP関節の屈曲・伸展の動きは連動させるように設計されている(各2自由度)。また、d)指間の開閉(外転・内転)については、各指間を個別に開閉させる事は求めず、2～5指が連動して開閉するという設計になっている(合計16自由度で左ハンドは14自由度となっている)。

また、アーム部に関しては、手関節での屈曲・伸展、橈屈・尺屈、回内・回外、の3自由度、肘関節では屈曲・伸展の1自由度、および、肩関節では3自由度(前方挙上・後方挙上、側方挙上、外旋・内旋)の計7自由度が可能で、各関節の作動は、小型モータによる直接駆動としている。

また、ロボットハンドの指部・手掌部等は、表面に圧センサ等を装着しやすい構造となっており、ここに圧センサ類を装着して把持圧の検出を行なった。(図5-3)。

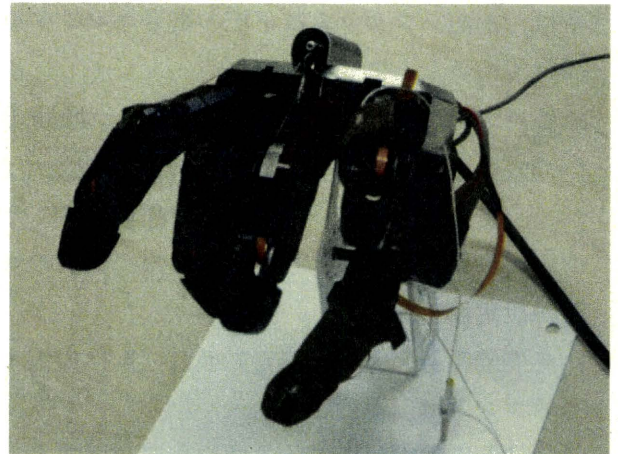


図 5-3 圧センサを装着したロボットハンド

■電源系

左右ハンドは、それぞれ2系統のDC電源(50VA程度)を必要とする。このうち一系統は内蔵する制御基板およびDIP関節(指先5点)のモータ駆動用電源であり、直流5.2 - 5.4V程度を印加する。稼働中の最大電流は2A程度である。もう一系統はDIP以外の関節モータを駆動するための電源であり、直流8 - 12V程度を印加する。負荷に応じて最大4A程度の電流供給が必要である。一方、アームについては本体土台部分に電源が内蔵されており、AC100V(100VA程度)の電源供給によって駆動される。

■制御系

【5指ハンド制御系】

パーソナルコンピュータ(Core2Duo 3GHz程度を搭載)から専用シリアル通信ボードを介して制御が行われる。3m程度までの信号線長について、正常に制御可能であることを確認済みである。

コンピュータ上においてPID制御ループを含むプログラム(Windows XP上)が稼働しており、上記通信を介して各関節角を受信し、またモータへのトルク指令を送信する。各関節の角度制御を最低100ms程度のlatencyにて行えるほか、ハンドに関してはさらに角速度およびトルク指

示による制御も実装されている。各関節への指令は、上記プログラムに下記の指令コマンドを発行することによって行われる。

各コマンドはASCII 文字列であり、" hnX0.0" の形式を1 単位とする。冒頭のh は制御対象がハンドであることを示し、n は関節番号、X はD d V v T t のいずれか（下記参照）、0.0 の部分が設定値である。

各関節番号と大まかな可動域は、X に代入するコマンドは以下の通り：
最後に0.0 の部分に、各コマンドに対応する値(rad) が代入される。以上のコマンドは空白文字(0x20) を区切りとして複数配置することが可能であり、改行(0x0d) に至るまでの1 行を基本単位として発行される毎にPID 制御ループの目標値を更新する。これにより、図12のように複数の指を一括して制御することが可能である。

【腕部制御系】

パーソナルコンピュータ(Core2Duo 3GHz程度を搭載) から専用シリアル通信ボードを介して制御が行われる。3 m程度までの信号線長について、正常に制御可能であることを確認済みである。

コンピュータ上においてPID 制御ループを含むプログラム(Windows XP 上) が稼働しており、上記通信を介して各関節角を受信し、またモータへのトルク指令を送信する。各関節の角度制御を最低100ms 程度のlatency にて行えるほか、ハンドに関してはさらに角速度およびトルク指示による制御も実装されている。各関節への指令は、上記プログラムに下記の指令コマンドを発行することによって行われる。

アーム用コマンドも同様にASCII 文字列であり、" anX0.0" の形式を1 単位とする。冒頭のa は制御対象がアームであることを示し、n は関節番号、X はD d のいずれか（下記参照）、0.0 の部分が設定値である。各関節番号と大まかな可動域は、以下の通り：

ハンドでの速度・トルク制御に相当する機能は未実装であるが、上記プロトコルにて対応可能の見込みである。以上のコマンドはハンドに対する指令と同様に複数を一括発行することができ、ハンドへの指令と混在することも可能である。

【リモート制御】

上記コマンドはTCP/IP ネットワーク接続を介して伝送することも可能となっている。また、リモート環境においてハンドの実機が存在しない場合に各関節角の生成値を確認するためのシミュレータを開発した(図 5-4)。

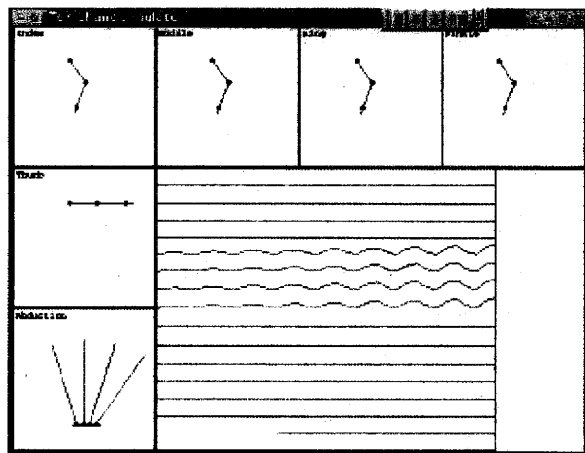


図 5-4 リモート環境においてハンド関節角状況を確認可能とするシミュレータ画面

ロボットハンドに対する随意運動機能 および感覚機能の実装

構築したシステムは生体情報信号による義手(ロボットハンド/アーム) の操作部と義手に装着したセンサからの情報による感覚提示装置の2つの部分から構成される。まず、生体情報によりロボットハンドを操作する操作部について述べる。

随意運動機能の実装

本プロジェクトでは、生体の運動神経情報を記録し、その情報に基づいて生体がとろうとしている腕・手の関節角度を推定し、義手（ロボットハンド/アーム）の姿勢や動きを（推定通りに）制御することを最終目標としているが、被験者が人間の場合は、電極を末梢神経に埋め込み、運動神経の活動を記録するという侵襲的手法はとる事ができないため、本実験では末梢神経（運動神経線維）情報の代わりに、表面筋電信号を用いてロボットハンド/アームの操作を行なった。なお、この表面筋電情報によるロボットハンドの操作に関しては、兵庫県立大学石垣研究室の荒木望助教、および、石垣博行教授の協力を得て実施した。

■筋電情報の取得

指関節角度は伸筋と屈筋の張力のバランスにより決定されると考えられるため、表面筋電信号を計測する電極は、伸筋側、屈筋側それぞれ3箇所の計6箇所を測定することとし、屈筋側が第2指、第3指の屈曲動作に動員される浅指屈筋の筋腹付近で第2指・第3指に関連している部位、伸筋側が同じく、第2指、第3指の進展動作に動員される総指伸筋の筋腹付近で第2指、第3指に関連している部位に、また第1指の対立運動を検出するため、拇指対立筋の筋上にも電極を装着した。

信号増幅には日本光電社製汎用生体アンプユニットAB-611Jを用い、同社製筐体MEG-6116に集約し、8chを一体として使用し、これらの表面筋電信号のサンプリングは2500Hzで行った。

表面筋電信号によるロボットハンドの操作は、表面筋電信号を振幅情報や周波数情報といったアナログ信号としての情報で扱うのではなく、（神経情報と同等に扱う事を目的として）パルス信号の集合とみなして扱った。このため、測定した表面筋電信号のうち負のピーク値のみを取り出した信号を用い、伸筋側の表面筋電か

ら求めたピーク値のヒストグラムと屈筋側から求めたピーク値のヒストグラムから、各指の関節角度を算出するというアルゴリズムを用いた。

この際、伸筋および屈筋側の表面筋電信号ヒストグラムに対する重み係数を決定する必要があるが、学習用に測定した指関節角度とこれに対応する表面筋電信号のヒストグラムを用いて最小時情報により得られたパラメータと、測定した表面筋電信号のヒストグラムから算出する。

この表面筋電信号ヒストグラムを用いた指関節角度推定手法について、実際に角度推定実験を行なった結果では、良好な結果が得られており、今回は本手法によって各関節角度の推定を行なった。また、この際、確率情報を利用したパターン分類法のひとつであるベイジアンフィルタを用い、動作する指が異なると、表面筋電信号の周波数特性が変化することを利用して筋電信号の変化からどの指が動作したのかを予め識別する。このようにベイジアンフィルタを用い、事前にどの指が動作したのかを識別し、ベイジアンフィルタを用いることで事前にどの指が動作したのかを識別し、この識別結果を指関節角度推定結果に反映させるという方法を用いて関節角推定を行なった。

推定用のPCを用いて6箇所の計測位置からの表面筋電信号により、提案手法を用いて各指の関節角度を同時にリアルタイムで推定し、次に、得られた推定角度をTCP/IP通信により0.1秒毎にロボットハンド制御用のPCに送信する。また、ロボットハンド制御用のPCは、送信された推定角度を目標値として位置制御を行うことによりロボットハンドを駆動させるシステムとなっている。

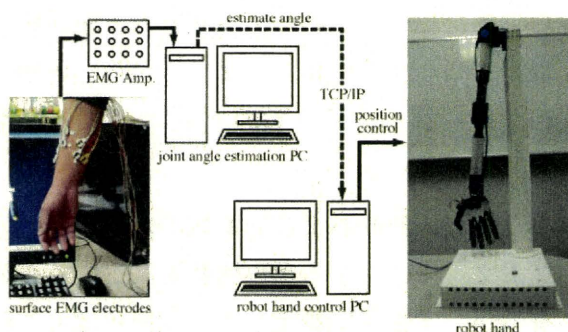


図 5-5 表面筋電情報によるロボットハンド操作のシステム構成

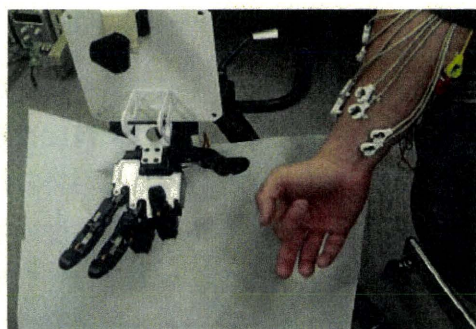


図 5-6 筋電情報によるロボットハンドの操作. ロボットハンドと被験者の手指が同じ形になっているのが判る.

今回、表面筋電情報を用いて行なったロボットハンドの駆動実験のシステム構成図を図 5-5 に示す。また、図 5-6 から、被験者とロボットハンドが同様の形状となっていることが確認でき、本手法により被験者の複数の指関節角度を同時に推定することが可能であり、リアルタイムで義手を制御できる可能性が示唆された。

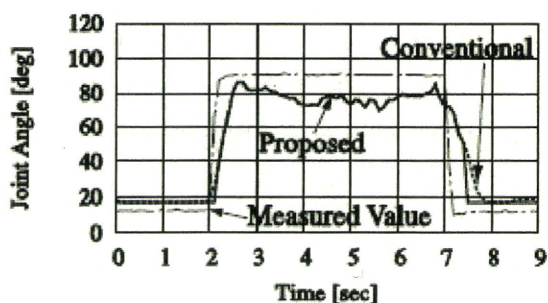


図 5-7 関節角度決定アルゴリズムに従って推定した関節角度と実際に計測した関節角度. 良く合致しているのが判る.

まず、被験者に表面筋電計測用の電極を装着し、サイバークローブを装着した後に指・腕を色々な角度にとり、その際の各電極位置における筋電とサイバークローブによる各関節角を計測する。これらのデータを学習データとして、表面筋電情報から指関節角度決定を行なうための各パラメータを予め決定し、ロボットハンドが被験者の手指の動き通り動く事を確認する。

次いで、この状態でロボットハンドの各指に圧センサを装着し、ロボットハンド（圧センサ）に加えられた圧を圧感覚として被験者にフィードバック（提示）するシステムの構築を行なう。

感覚機能の実装

被験者に対する感覚提示は、マイクロステイミュレーション法を用いて行なう。手順としては、

- 6) 義手システムの指・手掌部に圧力センサを装着する
- 7) 義手を操作して物体に触れた際、或いは物体を把持した際に生じる圧を圧センサによって計測する
- 8) その圧感覚を発生する感覚神経線維への電気刺激のパルスの繰り返し周波数を算出
- 9) マイクロニューログラム法を用いて末梢神経に刺入したタングステン針電極を介して、圧感覚を発生させたい部位の圧受容器（メルケル板）を支配している感覚神経線維に3)で算出された繰り返し周波数の電気刺激パルス列を出力し、感覚神経刺激によって圧感覚を発生させる、という方法を用いた。これらの各要素について下に説明を加える。

圧センサ

義手に装着した圧力センサは、接触力を検出するフレキシブルな静電容量型圧力センサである PPS社製の Finger-TPS システムを用いた。

出力は Bluetooth 通信でパーソナルコンピュータに接続され、更新周波数は 40Hz である。指用としては指サック型やバンドエイド型のもの、また、手掌部用として平面状に貼り付ける形のものもあり、今回はサック型を中心に、把持する物体の形状に合わせて使用した。(図 5-8)



図 5-8 ロボットハンド指に装着した静電容量型圧センサ Finger-TPS system

感覚神経線維へのインタフェース (出力ポート) マイクロスティミュレーション法

マイクロスティミュレーション法を用いて末梢神経中の感覚神経線維に電気刺激 (パルス列) として加え、被験者に感覚の提示を行なった。その際、生じる圧感覚の強さを圧センサによって検出した圧と合わせるために、電気刺激の繰り返し周波数とその際に生成する圧感覚の強度との関係を予め調べておき、これに応じて、圧によって繰り返し周波数を変化させ、電気刺激を行なう。

マイクロスティミュレーション法については「神経インタフェースによる義肢における感覚機能の実現」の項に詳しく述べられているので、

そちらを参照して頂ければ有難いが、簡略に説明すると、経皮的に極細径タングステン微小針電極を末梢神経幹中に刺入し、末梢神経中の神経線維 (単数・複数) に電気刺激を行なう手法のことで、我々はこの手法を用いて人工感覚の生成を行なっている (図 5-9)。

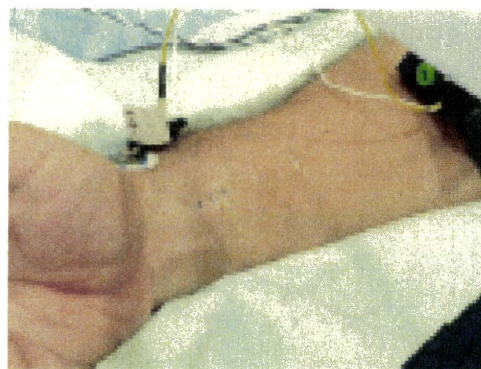


図 5-9 マイクロスティミュレーション法
マイクロ針電極を正中神経に刺入し、電気刺激を行なっている

センサにより計測された圧からの電気刺激パルス列の繰り返し周波数の決定

SA-I のシングルユニットの電気刺激に関して、センサにより計測された圧から (その圧と同じ強度の圧感覚を発生させるための電気刺激パルス列の繰り返し周波数を決定するには、厳密には、予め、電気刺激を行ない、パルス列の頻度を種々に変化し、その際に生じる圧感覚の強さを定量化して決定し、電気刺激頻度とその際生成される圧感覚強度の関係を求めておき、この曲線から発生させようとする強度の圧感覚を発生させる電気刺激の頻度を求めるという手順をとっている。しかしながら、この手順は時間を取るもので、本実験前に針電極の位置がずれかねないので、通常はもう少し簡易的な手順で電気刺激の頻度を決定している。

簡略に電気刺激の頻度を決定する場合の第一の方法は、当該 SA-I に圧を加えた際の圧とその際に発生する発火頻度の関係を用いる方法であ

るが、この関係と電気刺激の頻度とその際に発生する圧感覚の強さの関係を比較してみると両者はかなり異なり、電気刺激の頻度を変えていった場合の生成する圧感覚強度の変化は、一般に、受容器に加える圧を変えて行った際に発生する発火頻度の変化に対して小さい。

この方法は、前記の厳密な方法に比べると要する時間は短い、絶対的にはやはりかなりの時間を要する。

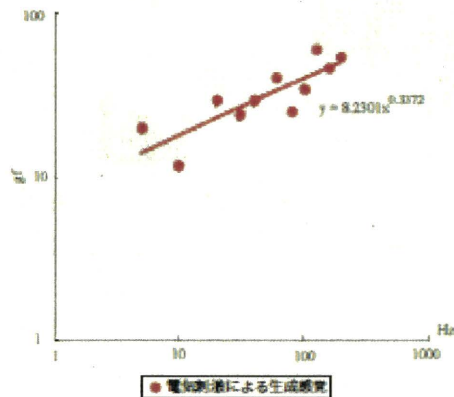


図 5-10 感覚神経への電気刺激の繰り返し周波数と生成される圧感覚強度との関係を示す。

第二の方法は、我々が使用する範囲では、電気刺激パルス列の頻度とその際に発生する圧感覚の強さの関係は、両者とも値が小さい時にはほぼ直線関係と見る事ができるとして、電気刺激パルス列の頻度を測定した圧を整数倍した値に取る方法で、この整数倍する係数を何種類か変化させて、概ね実際の感覚と合致する値を選ぶという方法であるが、簡便で刺入後時間を取らない事と、適当な係数を取ると、実際に生じる圧感覚と比較的良く合致するので、我々は通常はこの方法を用いている。

電気刺激頻度と感覚強度の関係の例を図 5-10 に示す。図 5-10 のように、感覚神経への電気刺激によって生成される圧感覚の強度は、電気刺激パルス頻度に依存している事が知られ

ており、本研究ではこの関係を応用している。

実験の様子を図 5-11 に示す。被験者は健全な男性 2 名で、実験は座位・開眼状態で行った。義手に装着したセンサに力を加えた際に、加えた圧の感覚と等価な圧感覚量を感覚神経 (SA-I ユニット) の電気刺激で発生させることを目的とする。

まず、義手の運動制御用の表面筋電電極を測定対象とする筋上の皮膚の 2 か所接近させて貼りつけ、その差動電位として筋電信号の電位活動の計測と記録を行なった。なお、接地電極の装着は左手肘外側部に行なった。その後、微小針電極を刺入し、義手の圧力センサを加圧し、実験を行った。なお、本実験では、電気刺激によって生成された感覚強度の評価は、以下のように行なっている。感覚神経線維の電気刺激によって圧感が発生した場合、圧感が発生しているのと反対側の手指でロードセル (圧センサ) を押し込んでもらい、押し込む事によって発生する圧の感覚が電気刺激で発生している圧感の強度と同じ強さになった際の「押し込んでいる圧」を「電気刺激によって発生している圧」とする、という方法としているが、圧強度の変化傾向のみを表示する手段として、足元に設置したペダルを踏み込むという方法も同時に用いている。

義手の指先に Finger-TPS を装着し、Finger-TPS の出力をパルス列頻度に変換・出力し、マイクロスティミュレーション法によりパルス列を神経に伝達することで感覚を提示した。

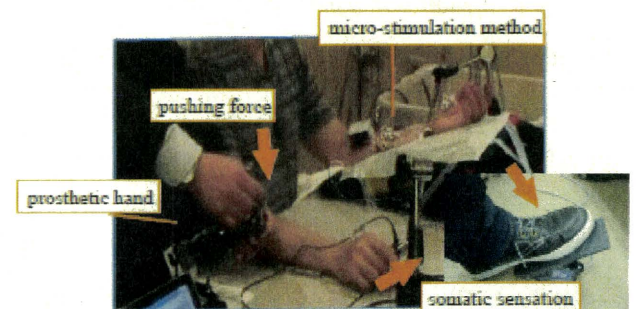


図 5-11 ロボットハンド（左側）に装着した圧センサを押した際に、その圧に応じた圧感覚を被験者の同じ手指の位置に発生させる実験の風景

本実験での圧覚から電気刺激のパルス列頻度への変換式は、Finger-TPS の出力 x を係数 α にて整数倍し、パルス頻度の周波数 f とした。即ち、 $f = \alpha x$ で、本実験では $\alpha = 10$ にとっている。この変換係数を変更することで被験者に発生する感覚強度の感度を変更する事が可能である。

実験結果を図 5-12 に示す。グラフは上から Finger-TPS と加圧力、指先による感覚量とペダルによる感覚量、刺激パルス列周波数、刺激パルス列である。実験結果をみると、Finger-TPS が検出する圧力の増加に追従するように、若干の時間差をもって被験者の感覚量が増加していることが示されている。また、指先による感覚量とペダルによる感覚量の変化に大きな違いはみられず、被験者の感覚強度を忠実に表現していることが示されている。

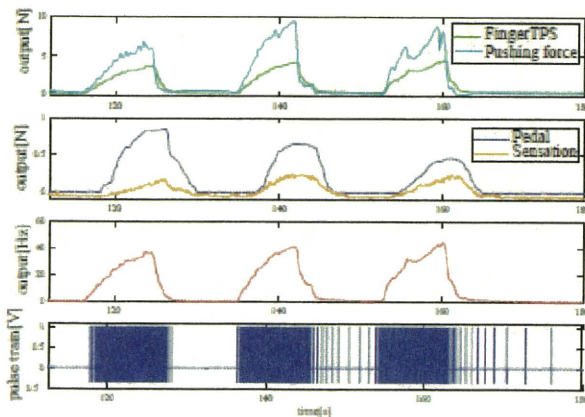


図 5-12 ロボットハンドに装着した圧センサに加えた圧刺激強度とそれによって被験者に生成された圧感覚強度の時間変化を示す。

なお、全体のシステム図、および、圧センサを

装着したロボットハンドに（筋電による操作で）スポンジを握らせ、その際の把持圧を表示させた図を、図 5-13 および 図 5-14 に示す。

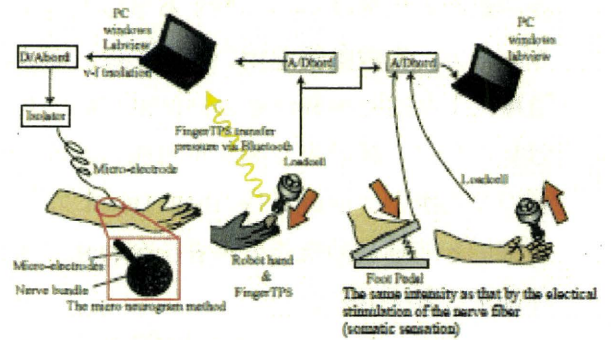


図 5-13 「随意運動機能と感覚機能を有する義手」モデルのシステム図を示す。

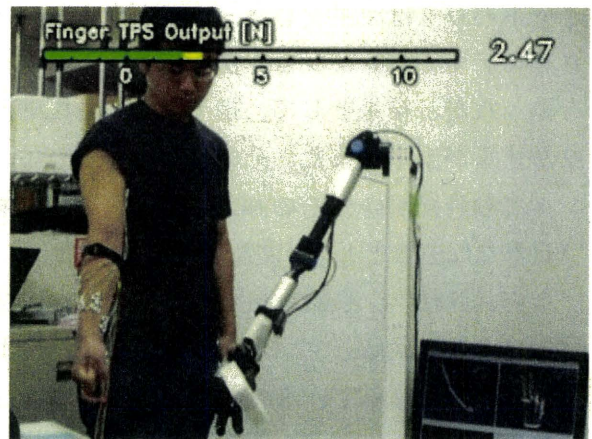


図 5-14 圧センサを手指に装着したロボットハンド/アームに表面筋電コントロールでスポンジを把持させ、その把持圧を上にしめたもの。この把持圧に応じた繰り返し周波数で SA-I ユニットの電気刺激し、同じ強度の圧感をさせるといことになる。

D. 考察

現在までの最終的な形として、指・手掌部に圧センサを装着したロボットハンド/アームを用い、神経系を介した interface によって随意

運動機能と感覚機能を具えた義手のモデル（図5-12）を試作し、その feasibility について検討を行なった。人間を被験者とする系では侵襲的に電極を埋め込む事はできないので、運動神経活動を末梢神経から計測する事は不可能であり、一方、実験動物を用いた系では、埋め込み電極により運動神経活動の計測は可能であるが、感覚の発生を評価する事が不可能に近く、どちらのモデルも、neurally interfaced の形で感覚機能と随意運動機能の両者を合わせて構築・評価する事は出来ない。

今回のプロジェクトでは、実験動物を用いた系においては埋め込み電極による末梢神経からの運動情報の計測と、その信号情報を用いたロボット肢の作動を行ない、人間を対象とした系においては、ロボットハンド/アームの操作は筋電情報（表面筋電情報）で行ない、感覚のフィードバックはマイクロニューログラム・マイクロステイミュレーション法で行なうと言う形を取ったが、結果として、指や手腕を意図通り動かす事が出来、また、その際に、ロボットハンドで触れた場合、その強さに応じた圧感覚を（自然な圧感覚として）感じる事が出来た。

なお、今回は、動物を対象とした埋め込み型電極による実験は、主として運動系についてはのみの実験になっているので、「神経インタフェースによる義肢における随意運動機能の実現」の項に記載し、本項では、ヒトを対象とした筋電信号によるロボットハンドの操作と、マイクロステイミュレーション法による人工的な圧覚の生成と提示を統合した実験のみを扱った。

今回は、被験者が自分自身の指を動かした際、（その筋電情報によって）スレーブであるロボットハンドの同じ指が被験者と同じように動いて物品を把持するが、その時の圧をロボットハンドに装着した圧センサで計測し、電気刺激パルス列の繰り返し周波数に変調して、マイクロニューログラム針電極を介して生体の（同側の）

正中神経（内の感覚神経線維）に入力する。それゆえ、マイクロ針電極は動かす指と同側の腕（前腕）に刺入することになる。マイクロニューログラム（ステイミュレーション）法では、刺入された針電極は周囲の組織との間の抵抗のみで固定されているので、電極の位置がずれやすく、特に腕や指を動かすと（即ち、筋肉を収縮させると）電極の位置が最初に接触していた神経線維からずれてしまい、元通りの計測・刺激が出来なくなってしまう。このため、今回の実験では被験者に行なわせる運動として、（運動時に）できるだけ正中神経が動きにくい第1指の対立運動を選び、この対立運動によって物品の把持を行なわせ、その時の把持圧を感覚神経線維への電気刺激により圧感として装着者にフィードバックさせるという形をとったが、それでもやはり、最初、指を動かさない間は初めの投射野（受容野）に期待していた通りの（圧）感覚が生じていたが、指を動かすとあまり時間がもたず、針電極の位置がずれ、生じる感覚の性状や強さが変化してしまう結果となった。

マイクロニューログラム法はあくまで理論的な可能性・妥当性を示す実験的な手法であり、臨床的には、（感覚生成の面では）出来る限り個々の神経線維を安定して慢性的に刺激し得る電極が絶対的に不可欠である。

また、感覚神経線維の電気刺激による感覚生成のコーディング則については、今回は圧感覚（SA-I ユニット）のみについて記載したが、原則として振動覚についても電気刺激の繰り返し周波数の変化によって振動感覚を生成する事が出来る（ただし、発生する振動の周波数と電気刺激の周波数の関係については、まだ、検討が必要である）。今後は、複数の種類のユニットに対して様々な時空間的パターンで刺激を加えた際に、どのような感覚が生じるか、あるいはテクスチャなどを提示するには、どのような刺激パターンが必要かなどについて、検討を加えて行く必要があると考える。

E. 結論

最終年度と言う事で、義手に要求される随意運動機能と感覚機能をロボットハンドシステムに統合し、人間を被験者として、被験者の意思通りに動貸す事ができ、また、ロボットハンドに加えられた圧も自然な圧感覚として被験者が感じる事の出来るロボットハンドシステムの構築を行なう事が出来た。人間が被験者であるために、電極の埋め込みという侵襲的な方法はとれず、運動機能に関しては表面筋電情報を用いている点が1つの大きな問題であるが、動物(ラット)を用いた系では坐骨神経に埋め込んだ電極の情報を用いて、ロボット肢に歩行を模擬する事が出来ている。

一方、感覚機能に関しては、末梢神経へのマイクロステイミュレーション法を用いて、ロボットハンドで触れた際の圧を圧感覚として感じる事の出来るシステムを構築する事が出来たが、マイクロステイミュレーション法は針電極を安定して神経幹中に固定する事が困難で、臨床には用いる事が出来ず、結局は安定して神経線維の(出来れば1本1本の)活動を記録、或いは逆に神経線維を刺激し得る末梢神経用の電極の完成が最も望まれる事項と考える。

F. 健康危険情報

特になし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) 溝口善智, 多田隈建二郎, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠. 近接・触・すべり覚を統合したインテリジェントロボットハンドの開発; 計測自動制御学会, Vol.46, No.10, 632-640. 2010
- 2) Yuki Hoashi, Yasutaka Yamamizu, Nozomu Araki, Yasuo Konishi, Kunihiko Mabuchi and

Hiroyuki Ishigaki. Estimation of Finger Joint Angle Based on Surface EMG Signals and its Signal Source Recognition; ICIC Express Letters, Vol.4, No.6(A), 2183-2188. 2010

- 3) 荒木望, 帆足勇希, 小西康夫, 満洲邦彦, 石垣博行. ベイジアンフィルタを用いた表面筋電信号からの動作指識別手法; 電気学会論文誌 C, Vol. 131, No. 4, 736-741. 2011.04

2. 学会発表

- 1) Hasegawa, H. Mizoguchi, Y. Tadakuma, K. Aiguo Ming, Ishikawa, M. Shimojo, M. Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing; 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2010

- 2) 鈴木隆文. 次世代義手のための基盤技術～人工感覚・神経情報による制御・神経電極～; 第48回日本人工臓器学会. 2010

- 3) Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi. Correlation induction between cortical extracellular spikes pattern and locomotion states by microstimulation for a BMI control; Neuroscience2010. 2010

- 4) 荒木望, 帆足勇希, 小西康夫, 満洲邦彦, 石垣博行. 表面筋電信号ヒストグラムによる複数指関節角度推定 -ベイジアンフィルタによる動作指識別に基づいた手法-; 第25回生体・生理工学シンポジウム. 2010

- 5) Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi. RatCar: A vehicular neuro-robotic platform for a rat with a sustaining structure of the rat body under the vehicle; Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS. 4168-4171. 2010

- 6) Kunihiko Mabuchi. Linking human nervous system with mechanical control system of next-generation artificial organs; 第49回日本

生体医工学会. 48 suppl.1. 2010

7) Osamu Fukayama, Takuya Kohama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi. Study on detection and induction of plastic changes in rat brain while connected with a vehicular BMI RatCar; 第 49 回日本生体医工学会. 48 suppl.1. 2010

8) 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊. 高速多指ハンドシステムによる面状柔軟物体の動的操り; 第 16 回ロボティクスシンポジア. 2011

9) 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦. 外骨格構造を有する神経-車体制御インタフェース「ラットカー」によるラット歩行補助に関する検討; 第 50 回日本生体医工学会, 49 suppl.1. 2011 [2011.04.29-05.01]

10) 大塚博, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦. ラット末梢神経系の運動指令信号を用いた歩行状態模倣ロボットの開発; 電気学会医用・生体工学研究会. 2011 [2011.05.12]

11) 満洲邦彦: 末梢神経感覚線維の電気刺激による人工感覚の生成とその応用. 第 4 回日本ニ

ューロモデュレーション学会抄録集: 13, 2011 [2011.05.21]

12) 荒木望, 帆足勇希, 小西康夫, 満洲邦彦, 石垣博行. 義手の運動制御のための生体信号からの手指関節角度推定 -表面筋電信号と針筋電信号を中心とした 信号源の違いによる処理方法の検討-; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011. 2011 [2011.05.28]

13) 新納弘崇, 荒木望, 國本雅也, 帆足勇希, 鈴木隆文, 深山理, 満洲邦彦, 下条誠. 感覚神経線維刺激を用いた義手への感覚提示機能の実装に関する研究; 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011. 2011 [2011.05.28]

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
2. 実用新案登録
3. その他
該当なし

研究成果の刊行に関する一覧表レイアウト

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
下条誠		下条誠	触覚認識メカニズムと応用技術	サイエンス&テクノロジー株式会社		2010	

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
A. Matani, Y. Naruse, Y. Terazono, T. Iwasaki, N. Fujimaki, and T. Murata	Phase-compensated Averaging for Analyzing Electroencephalography and Magnetoencephalography Epochs	IEEE Transactions on Biomedical Engineering	vol. 57, no. 5	1117-1123	2010
Shimojo M., Araki T., Ming A., Ishikawa M.	A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces	IEEE Sensors Journal	10,4	822-830	2010
溝口善智, 多田隈建二郎, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	近接・触・すべり覚を統合したインテリジェントロボットハンドの開発	計測自動制御学会論文集	Vol.46, No. 10	632-640	2010
Yuki Hoashi, Yasutaka Yamazaki, Nozomu Araki, Yasuo Konishi, Kunihiko Mabuchi and Hiroyuki Ishigaki	Estimation of Finger Joint Angle Based on Surface EMG Signals and its Signal Source Recognition	ICIC Express Letters	Vol.4, No.6 (A)	2183-2188	2010
勅使河原誠一, 堤隆弘, 清水智, 鈴木陽介, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	高速・高感度型すべり覚センサの研究開発ー多指ロボットハンドへの応用ー	第28回ロボット学会学術講演会/予稿集		201-205	2010

清水智, 勅使河原誠一, 明愛国, 石川正俊, 下条誠	高感度初期滑り検出センサの研究開発ー感圧ゴムの種類と被覆材の検討	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2010 (ROBOMECH 2010) /講演会論文集	1A1- D02	2010
大野紘明, 渡辺義浩, 小室孝, 石川正俊, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	姿勢と筋活動を提示するシンクロナイズドビデオ	第15回日本バーチャルリアリティ学会大会抄録集	444-447	2010
Hasegawa, H.; Mizoguchi, Y.; Tadakuma, K.; Aiguo Ming; Ishikawa, M.; Shimajo, M	Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing	2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)/Proceedings	777-784	2010
Teshigawara, S.; Shimizu, S.; Tsutsumi, T.; Suzuki, Y.; Ming, A.; Shimajo, M.; Ishikawa, M.	High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber for Dexterous Grasp and Manipulation	2010 Ninth IEEE Sensor Conference (SENSORS 2010) /Proceedings	570-574	2010
吉田 充宏, 浮田芳昭, 満洲 邦彦, 内海 裕一	多層配線構造を有する神経再生型電極の開発	第22回化学とマイクロ・ナノシステム研究会 (CHEMINAS) 抄録集	52	2010
吉田 充宏, 浮田芳昭, 満洲 邦彦, 内海 裕一	多層配線構造を有する神経再生型電極の作製	ナノ学会第8回大会 8th Annual Meeting of Society of Nano Science and Technology /講演予稿集	231	2010
矢口博彬, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	腱振動刺激によって錯覚される運動の速度に関する研究	第2回多感覚研究会抄録集	12	2010
鈴木隆文	次世代義手のための基盤技術ー人工感覚・神経情報による制御・神経電極ー	第48回日本人工臓器学会大会抄録集	S-28	2010
S. Kuroki, J. Watanabe, K. Mabeuchi, S. Tachi, S. Nishida	Neural representation of motion signal after direction remapping in touch: Evidence from motion aftereffect	Neuroscience 2010/Proceedings		2010

Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Correlation induction between cortical extracellular spikes pattern and locomotion states by microstimulation for a BMI control	Neuroscience 2010/Proceedings			2010
Takafumi Suzuki, Naoki Kotake, Osamu Fukayama, Shoji Takeuchi, Hidenori Watanabe, Tadahito Sawahata, Haruo Toda, Isao Hasegawa, Kunihiko Mabuchi	Improvement of a flexible Parylene ECoG electrode for long-term stable recording	Neuroscience 2010/Proceedings			2010
新納弘崇, 下条誠, 國本雅也, 鈴木隆文, 石川正俊, 矢口博彬, 満洲邦彦	末梢神経障害による感覚障害に対するマイクロステイミュレーション法を用いた感覚補填・感覚強化システムモデルの構築	第23回日本マイクロニューログラフィ学会抄録集		3	2010
満洲邦彦, 新納弘崇, 國本雅也, 鈴木隆文, 矢口博彬, 下条誠	SA-I mechano-receptive units の圧-発火特性に関する検討 - preliminary study -	第23回日本マイクロニューログラフィ学会抄録集		3	2010
鈴木隆文, 矢口博彬, 伊藤孝佑, 満洲邦彦, 國本雅也	速順応型機械受容ユニットへの微小刺激により生成される振動感覚の周波数特性に関する基礎的研究	第23回日本マイクロニューログラフィ学会抄録集		2	2010
高山祐三, 森口裕之, 小谷潔, 鈴木隆文, 満洲邦彦, 神保泰彦	分化誘導神経回路と初代培養神経回路の共培養系における機能的結合の形成	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010
藤原正浩, 芳賀達也, 鈴木隆文, 満洲邦彦	培養神経細胞を用いた刺激パターンの学習に関する研究-高頻度電気刺激によるスパイク発火頻度の時間的分布変化を用いた学習-	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010
芳賀達也, 深山里, 鈴木隆文, 満洲邦彦	Multi-Electrode-Array Dish上の培養神経細胞ネットワークのリアルタイム結合推定・可視化システムの構築	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010

荒木望, 帆足勇希, 小西康夫, 満洲邦彦, 石垣博行	表面筋電信号ヒストグラムによる複数指関節角度推定 -ベイジアンフィルタによる動作指識別に基づいた手法-	第25回生体・生理工学シンポジウム抄録集			2010
黒木忍, 渡邊淳司, 満洲邦彦, 館暲	触運動知覚の刺激周波数による違い	日本パーチャルリアリティ学会第15回大会論文抄録集			2010
Kunihiko Mabuchi, Hirotaka Niino, Masanari Kunimoto, Takafumi Suzuki, Masatoshi Ishikawa, Makoto Shimojo	Development of a Wearable Sensory Prosthetic Device for Patients with Peripheral Neural Disturbances	Proc. of IFE SS2010 (15th Annual Conference of the International FES Society) /Proceedings		309-311	2010
Hiroaki Yaguchi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Effects of simultaneous vibrations to two tendons on the velocity of induced illusory movement	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS/Proceedings		5851-5853	2010
Yutaro Kobayashi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Estimation of finger postures to control a manifold device for playing a trumpet using electromyographic signals with external triggers	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS/Proceedings		5847-5850	2010
Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	RatCar: A vehicular neuro-robotic platform for a rat with a sustaining structure of the rat body under the vehicle	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS/Proceedings		4168-4171	2010
Riho Gojo, Harukazu Saito, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi	Optimizing the diameter of holes for flexible regeneration microelectrode	Proc. of 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS/Proceedings		1531-1534	2010
Kunihiko Mabuchi	Linking human nervous system with mechanical control system of next-generation artificial organs	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010

Tatsuya Haga, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihi ko Mabuchi	Stochastic estimation of synaptic changes evoked by electrical stimuli in neural network in vitro	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
Yutaro Kobayashi, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihi ko Mabuchi	Estimation of finger movements by electromyographic signals with external triggers for playing trumpet	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
柴本浩児, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	慢性神経信号計測に向けた針型電極の自動位置制御の基礎的検討	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
Hiroaki Yaguchi, Kazuki Togawa, Osamu Fukayama, Takafumi Suzuki, Kunihi ko Mabuchi	A basic study of kinesthetic feedback by tendon vibration for prosthetic arms	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
Osamu Fukayama, Takuya Kohama, Takafumi Suzuki, Kunihi ko Mabuchi	Study on detection and induction of plastic changes in rat brain while connected with a vehicular BMI RatCar	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
Naoki Kotake, Takafumi Suzuki, Osamu Fukayama, Shoji Takeuchi, Kunihi ko Mabuchi	Development and characterization of flexible L-glutamate biosensor	第49回日本生体医工学会大会論文集		48 suppl.1	2010
新納弘崇, 國本雅也, 鈴木隆文, 満洲邦彦, 下条誠	感覚神経系障害患者のためのウェアラブル感覚補填・感覚強化システムの開発	ROBOMECS2010抄録集		2A1-D13(1)-(2)	2010
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	運動皮質における可塑的な機能変化の観測・誘発技術を用いたBMIポート形成の試み	第4回Motor Control研究会抄録集		38-39	2010
斎藤治和, 満洲邦彦, 鈴木隆文, 五條理保, 池上博康	運動機能と感覚機能を備えた義手開発のための末梢神経再生型電極に関する研究 - 免疫組織学的検討	第53回日本手の外科学会学術集会抄録集			2010
斎藤治和, 満洲邦彦, 鈴木隆文, 五條理保, 池上博泰	運動および感覚機能を備えた義手開発のための末梢神経再生型電極に関する研究 - 至適電極孔径の検討 -	日本整形外科学会雑誌 第25回日本整形外科学会基礎学術集会抄録集	Vol. 84, No. 8	S1321	2010

A. Matani, Y. Naruse, Y. Terazono, N. Fujimaki, and T. Murata	Phase-interpolated Averaging for Analyzing Electroencephalography and Magnetoencephalography Epochs	IEEE Trans. on Biomedical Engineering	vol. 58, no. 1	71-80	2011
眞溪歩	脳波の共振現象とエポックフィルタ	電気学会論文誌C	vol. 131, no. 1	9-14	2011
荒木 望, 帆足 勇希, 小西 康夫, 満洲 邦彦, 石垣 博行	ベイジアンフィルタを用いた表面筋電信号からの動作指識別手法	電気学会論文誌C	Vol. 131, No. 4	736-741	2011.04
山川雄司, 並木明夫, 石川正俊	高速多指ハンドシステムによる面状柔軟物体の動的操り	第16回ロボティクスシンポジウム/講演論文集		506-511	2011
吉田充宏, 廣瀬義人, 浮田芳昭, 満洲邦彦, 内海裕一	多層配線可能な神経再生型電極の作製	エレクトロニクス実装学会春季講演大会論文集		345-346	2011
Mitsuhiro Yoshida, Yoshito Hirose, Yoshiaki Uekita, Kunihiko Mabuchi, Yuichi Utsumi	Proposal of stacked electrodes for multiplex neural interface	ICEP2011 International Conference on Electronics Packaging / アブストラクトCD		968-971	2011
柴本浩児, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	神経信号の信号強度最大化に向けた赤外線送信による電極位置の自動制御	電気学会医用・生体工学研究会抄録集		19-23	2011
深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	外骨格構造を有する神経-車体制御インタフェース「ラットカー」によるラット歩行補助に関する検討	第50回日本生体医工学会大会論文集	49 suppl.1		2011.04.29-05.01
芳賀達也, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	事前知識を必要としないスパイクソーティング手法の開発	第50回日本生体医工学会大会論文集	49 suppl.1		2011.04.29-05.01
大塚博, 深山理, 鈴木隆文, 満洲邦彦	ラット末梢神経系の運動指令信号を用いた歩行状態模倣ロボットの開発	電気学会医用・生体工学研究会抄録集		7-11	2011/05/12
満洲邦彦	末梢神経感覚線維の電気刺激による人工感覚の生成とその応用	第4回日本ニューロモデュレーション学会抄録集		13	2011.05.21

<p>荒木 望、帆足勇 希、小西 康夫、 満洲 邦彦、石垣 博行</p>	<p>義手の運動制御のため の生体信号からの手指 関節角度推定 —表 面筋電信号と針筋電信 号を中心とした 信号 源の違いによる処理方 法の検討—</p>	<p>日本機械学会 ロボティク ス・メカトロ ニクス講演会 2011 抄録集</p>		<p>2P1-H13</p>	<p>2011.05</p>
<p>新納弘崇, 荒木 望, 國本雅也, 帆 足勇希, 鈴木隆 文, 深山理, 満洲 邦彦, 下条誠</p>	<p>感覚神経線維刺激を用 いた義手への感覚提示 機能の実装に関する研 究</p>	<p>日本機械学会 ロボティク ス・メカトロ ニクス講演会 2011 抄録集</p>		<p>2P1-O16</p>	<p>2011.05.28</p>