

# 筋電位計測システムの開発とその応用

5年A組 西田 惇  
指導教諭 末谷 健志

## 1. 要約

近年、コンピュータの普及により様々な処理が行えるようになった。しかし現在のコンピュータインターフェイスは、コンピュータに慣れない人にとっては決して扱いやすいデバイスではない。そこで私は人間の体の状態、特に腕の動作を操作対象に反映させれば直感的に電子デバイスやソフトウェアを制御できるのではないかと考えた。これを実現するために、筋肉の制御信号を取得・解析するシステムを低コストで構築し、かつ安定的に動作させることに成功した。実際に、このシステムを用いてモーターカーやゲームを筋電位つまり腕の動作だけで操作したところ、操作方法を学ぶ時間を必要とせず直感的に対象を操作することができた。

キーワード インターフェイス、筋電位 (EMG)、信号増幅、ノイズフィルタ、FFT(周波数解析)

## 2. 研究背景

現在、コンピュータやロボットなど、様々な家電製品や電気機器が発達し続け、高度化している。しかし、それに伴って、操作方法が複雑化し、便利だが使いにくい状態にある例がたくさんある。そこで私は、人間の腕の動作という側面から、直感的で分かりやすいインターフェイスの開発に取り組んだ。

## 3. 目的

非常に微弱な筋電位を増幅、不要なノイズを除去する電子回路を開発する。また、増幅された信号をコンピュータで認識し、新しいコントローラとして使えるようにする。

## 4. 研究内容

### (1) 仮説

#### <研究Ⅰ>「筋電位計測システムの開発」

人間の筋電位をスイッチングに用いることのできるレベルまで電氣的に増幅（10万倍）する電子回路を開発できる。

#### <研究Ⅱ>「単純閾値判定を利用した応用デバイスの開発」

取得した筋電位のスイッチングデータを新しいインターフェイスとして利用し、様々なソフトウェアやハードウェアのコントローラとして応用できる。

#### <研究Ⅲ>「フーリエ解析を利用した腕動作識別アルゴリズムの開発」

取得した筋電位波形を周波数解析することにより、腕の動作を詳細に認識することができる。

〈研究Ⅳ〉「腕動作自動識別ソフトウェアの開発」

研究Ⅲにおいて開発したアルゴリズムを用いて腕の状態を詳細にかつリアルタイムに識別できるソフトウェアを開発できる。

(2) 研究方法

〈研究Ⅰ〉「筋電位計測システムの開発」

差動増幅回路および、ローパス、ハイパスなどの各種フィルタなどハードウェアレベルの研究

〈研究Ⅱ〉「単純閾値判定を利用した応用デバイスの開発」

- ① 筋電位を利用したモーターカーの制御方法の検討と開発
- ② 筋電位を利用したゲームソフトの制御方法の検討と開発
- ③ 筋電位を利用した簡易筋電義手の制御方法の検討と開発

〈研究Ⅲ〉「フーリエ解析を利用した腕動作識別アルゴリズムの開発」

- ① 取得した筋電位波形の最大周波数から腕動作を識別するアルゴリズムの検討と開発
- ② 取得した筋電位波形のエネルギー分布の中央値から腕動作を識別するアルゴリズムの検討と開発
- ③ 取得した筋電位波形のエネルギー分布の中央値を二次元にグラフにプロットし腕動作を識別するアルゴリズムの検討と開発

〈研究Ⅳ〉「腕動作自動識別ソフトウェアの開発」

腕動作識別アルゴリズムを採用した腕動作自動識別ソフトウェアの開発

(3) 研究結果

〈研究Ⅰ〉「筋電位計測回路の開発」

そもそも筋電位とは、人体に流れる生体電位のことである。私たちが筋肉を動かす直前に、脳は神経を介して筋肉に電気的な信号を送る。この電気的な信号が筋電位(EMG:electromyogram)と呼ばれ、皮膚表面に $10\mu V\sim 100\mu V$ と微弱ながら漏れている。これをコンピュータで認識できるようにするには、増幅器と不要なノイズを除去するフィルタ回路が必要となる。構築したシステムは図1のようになった。

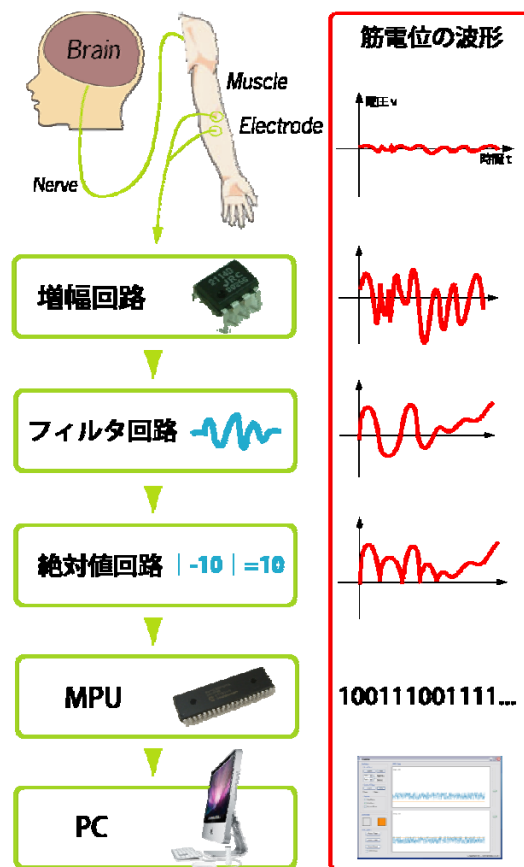


図1 開発したシステムの全体図

### ■電極の設計

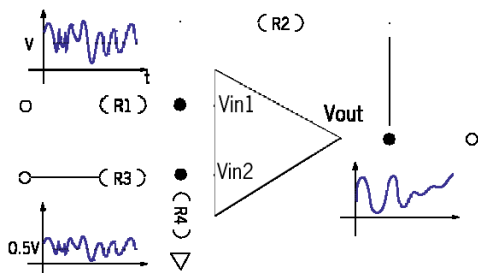
まず筋電位を取得するための電極を開発した。当初は医療用のディスコ電極を使用していたが、入手がやや困難であることから使用を諦めた。まず製作したのが導電性の高い銅板を用いた電極である。しかしすぐに酸化してしまい扱いにくいことから、スズを主成分とする半田を溶解し、電極に用いた(図2)。



図2 製作した電極

### ■増幅回路の設計

今回、私は「差動増幅回路」と呼ばれる回路を採用した(図3)。これは、2極間の電位差(Vin1-Vin2)を増幅するため、図3のように、外来ノイズが混入しても減算される。これにより、商用電源(60Hz)や蛍光灯から混入するノイズを打ち消すことができ、筋電位信号のみを抽出できる。製作した増幅器は図4のようになった。



R1=R3, R2=R4ならば、出力電圧 Vout は

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{in1} - V_{in2})$$

図3 差動増幅回路の仕組み

### ■フィルタ回路の設計

増幅回路により増幅された信号には、筋電位信号の他に、取り除けなかった商用電源からのノイズや、筋電位以外のその他のノイズが多く含まれている。そこで、不要なノイズをカットするためにフィルタを製作した。製作したフィルタは、特定の帯域のみをカットできる「ノッチフィルタ」と特定の帯域のみを通す「バンドパスフィルタ」である。

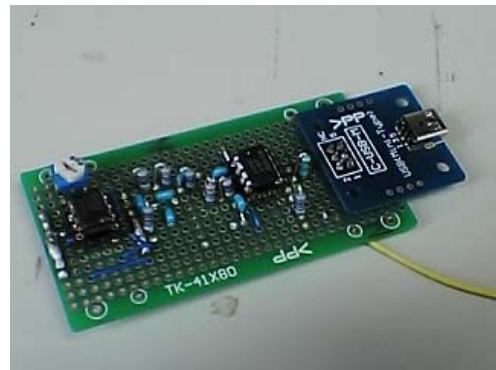


図4 製作したアンプボード

製作したノッチフィルタ(図5)とバンドパスフィルタ(図6)の周波数特性図を以下に示す。

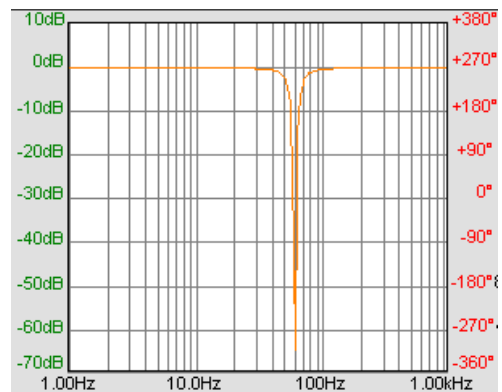


図5 ノッチフィルタ周波数特性

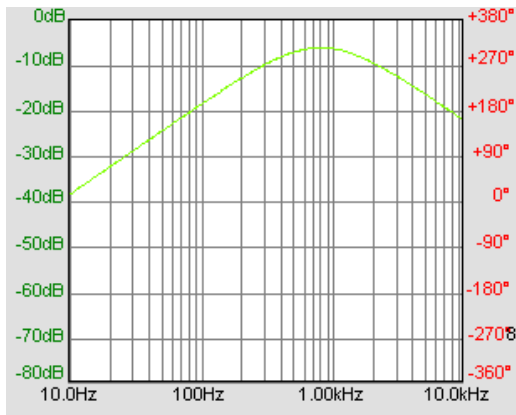


図6 バンドパスフィルタの周波数特性

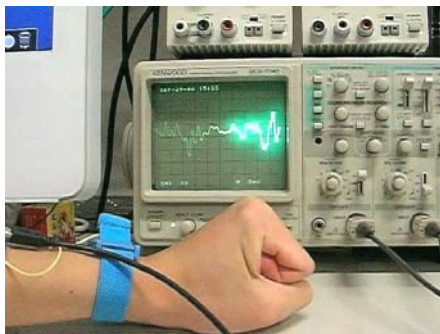


図7 設計した増幅回路で増幅した筋電位信号の様子

バンドパスフィルタは、ハイパスフィルタとローパスフィルタで構成される。製作したフィルタ回路の特性について説明する。まず、周囲の電源コードや機器など商用電源に由来する交流ノイズ 60Hz(西日本)をノッチフィルタで除去し、筋電位の周波数帯域(10Hz～1 kHz)以外の信号を除するためにバンドパスフィルタに通す。これらにより、筋電位以外の不要なノイズをほぼカットすることが可能となった(図7)。

#### ■絶対値回路の設計

フィルタを通過した信号は、振幅±4.5Vの電位で構成されている。そのままでは正電源で動作するマイクロコンピュータで

アナログ-デジタル変換を行うことができないため、筋電位信号の絶対値を求める必要がある(図8)。

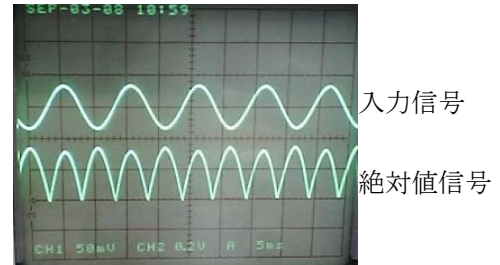


図8 Sin波に対する絶対値を出力している様子



図9 製作したMPUボード

〈研究Ⅱ〉「単純閾値判定を利用した応用デバイスの開発」

RS232でPCに送られた筋電位信号から、腕の状態をある程度認識できないかと考え、VisualStudio2005を用いて単純閾値判定ソフトを0から開発した(図10)。フォームには、マイクロコンピュータとの通信の設定を行うためのボタン、閾値判定に関する設定をおこなうボタン、筋電位信号が閾値を超えたかを表示するアイコンとグラフ、その他のソフトウェアを呼び出すためのボタンがある。

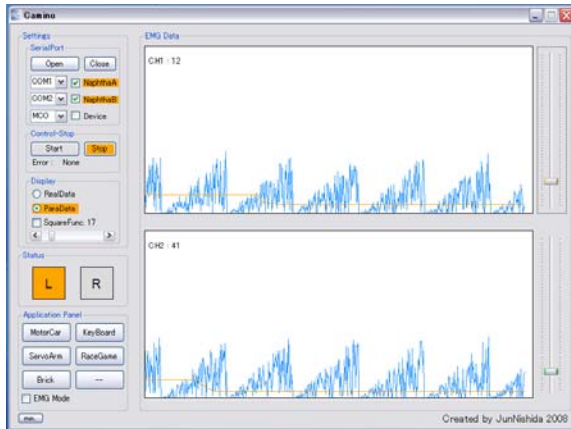


図 10 開発したソフト

### ■単純閾値判定アルゴリズムの考案

はじめに私は、「加算判定法」というものを開発した(式 1)。原理は非常に単純で、取得した筋電位信号 50 サンプルの総和がある一定の定数を超えれば、論理値 1 (=ON)として扱うものである。しかしこのアルゴリズムでは、少しでも腕に力が入ると定数を超えてしまい、ハードウェアやソフトウェアの制御には不向きだった。

$$Sum = \sum_{i=1}^n x_i (n = 50) \quad (式 1)$$

そこで次に、「自乗平均判定法」というものを開発した。これは、取得した筋電位信号 20 サンプルそれぞれを 2 乗し、その平均の平方根を求め、その値が定数より大きければ論理値 1 として扱うものである。このアルゴリズムにより、ある程度力を入れることによって、スイッチング動作を行うことができるようになった(図 11)。

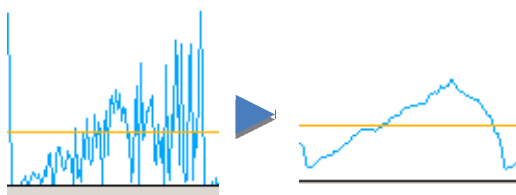


図 11 自乗平均法適用前と後の波形

これにより、正確にかつ安定的に筋電位の信号をスイッチング動作に応用することが可能となった(図 12)。

単純閾値判定ソフトによって得た筋電位のスイッチングデータを他の処理でも使えるようにするため、フォーム内に他のソフトを呼び出すボタンを配置した。これにより、筋電位のスイッチングデータをそのまま使用して他のソフト及びハードウェアを制御できる。

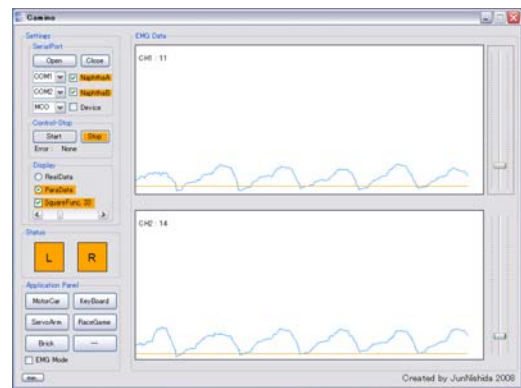


図 12 図 10 で表示されている入力信号に自乗平均法を適用した様子

### 〈研究 II〉「単純閾値判定を利用した応用デバイスの開発」

今回開発した単純閾値判定ソフトは、取得した筋電位信号を元に左右の腕のスイッチング情報を生成することができる。そこで、このスイッチング情報を用いてハードウェアの制御やソフトウェアの操作を行えないかと考えた。

#### ①筋電位を利用したモーターカーの制御方法の検討と開発

解析ソフトによって得られたスイッチング情報(例：左腕 OFF, 右腕 ON)を元にモーターカーを制御する信号をモーターカー

制御ソフトで生成する。モーターカーのシステムの全体図を図 15 に示す。モータ制御信号はコンピュータに接続された無線装置を介してモーターカーに搭載された無線装置に送信され、その信号に応じてマイクロコンピュータがモータードライバーを介してモータを制御する(図 13)。図 14 は動作の様子を示す。

製作したモータ制御回路の仕様を以下に示

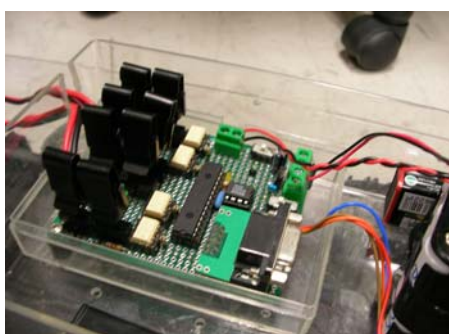


図 13 製作したモータ制御ボード

す。

マイコン	PIC16F873A
通信方式	RS232 , 38.4kbps
プログラム	自作アセンブリ言語
モータ最大駆動電力	60W
制御回路方式	FET-H ブリッジ回路
電源電圧	PIC9V , Motor6V
動作パターン	前後進, 左右旋回

モーターカーの動作表を以下に示す。

左腕	右腕	動作のパターン
OFF	OFF	停止
OFF	ON	直進
ON	OFF	旋回
ON	ON	停止

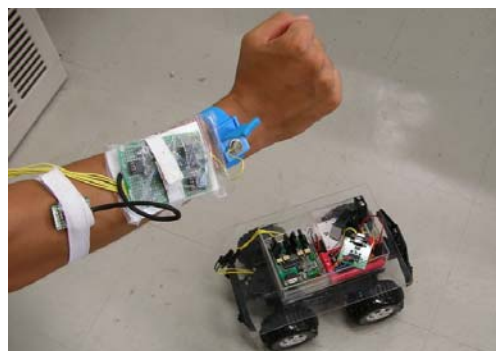


図 14 モーターカーの動作の様子

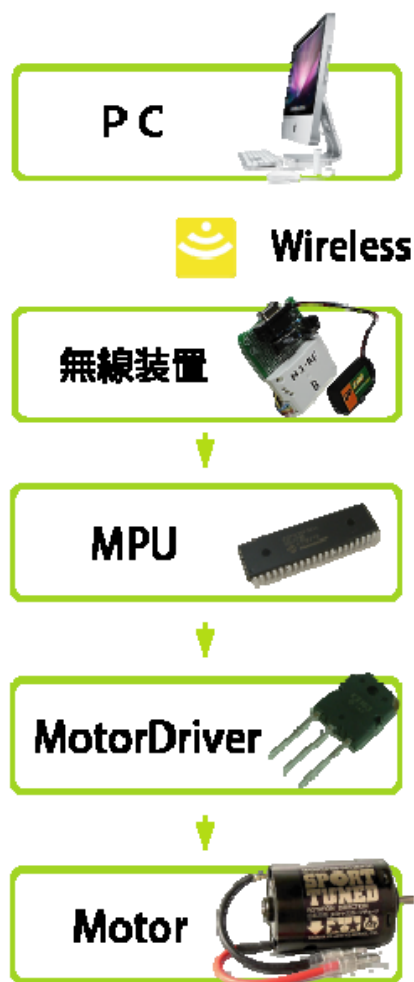


図 15 モーターカーシステムの全体図

②筋電位を利用したゲームソフトの制御方法の検討と開発

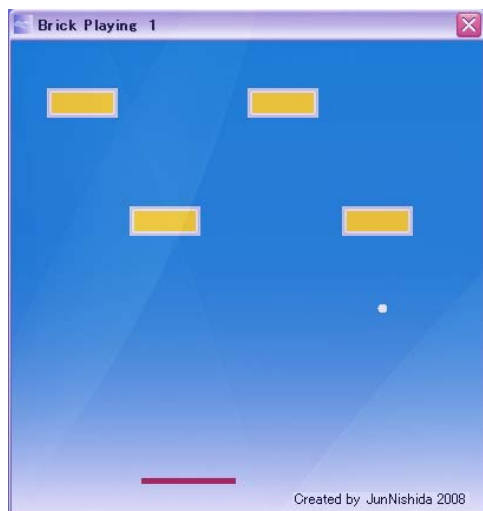


図 16 ゲームのプレイ画面

単純閾値判定ソフトによって得られたスイッチング情報(例：左腕 OFF，右腕 ON)を元にバーを左右に動かすことによってゲームをプレイすることができる(図 16，図 17)。

バーの動作表を以下に示す。

左腕	右腕	バーの動作
OFF	OFF	静止
OFF	ON	右移動
ON	OFF	左移動
ON	ON	停止



図 17 ゲームのプレイ風景

③筋電位を利用した簡易義手の制御方法の検討と開発

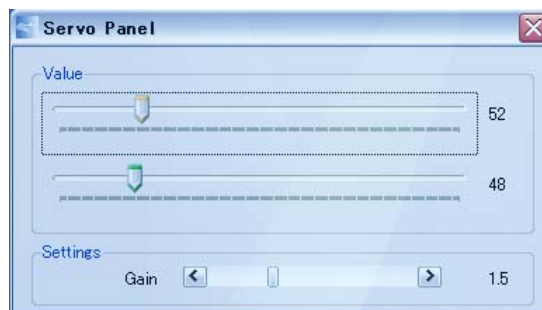


図 18 サーボモータ制御信号生成ソフト

単純閾値判定ソフトで平滑化アルゴリズムとして採用した「自乗平均法」で求めた筋電位波形の振幅の値をサーボモータの回転角に対応させることによって簡単な義手を制御することができる(図 19)。生成されたサーボモータ制御信号は、シリアルケーブルを介してサーボコントローラーに送信され、サーボモータを制御するパルス信号に変換される。

サーボモータの動作表を以下に示す。

右腕	サーボモータの動作
力をいれる	振幅に対応して開く
力をぬく	閉じる状態に戻る

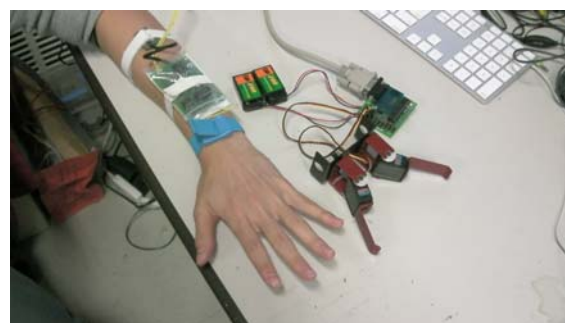


図 19 簡易義手の制御風景

### ＜研究Ⅲ＞「フーリエ解析を利用した腕動作識別アルゴリズムの開発

これまでの研究により、筋電位波形をPCで読み取り、力を入れているか否かの2値の情報を用いてデバイスをコントロールすることができた。しかしこのシステムでは、片腕から得られる情報が極端に少なく、より複雑な動きができる義手が製作できないなど、応用デバイスの範囲に限界がある。そこで、筋電位波形の単なる振幅ではなく、波形の形から腕の複数の動作を認識する必要がある。そのためには、フーリエ解析(FFT)を行う必要がある。ここでは、脱力、掌屈(手首を下に曲げた状態)、掌握(グー)、開(パー)、この4つの動作の認識を試みた。

取得した筋電位波形のフーリエ解析を行うために、フーリエ解析結果を書き出す機能のある「RH1FFT」と呼ばれるソフトウェアを用いた(図20)。

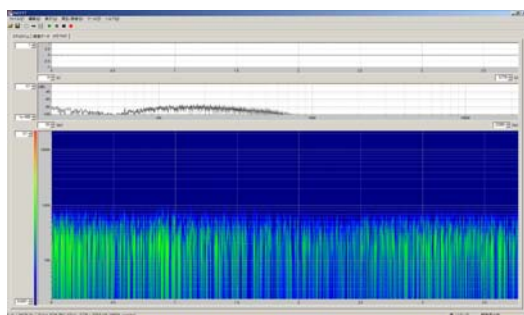


図20 フーリエ解析を行うソフトウェア

#### ①取得した筋電位波形の最大周波数から腕動作を識別するアルゴリズムの検討と開発

はじめに私は、各腕の動作では周波数分布の最大値が異なると単純に考えた。

方法：腕に電極1つを取り付け、周波数分布から周波数の最大値を算出、各腕動作を識別する。

結果：以下に開状態と掌握状態の周波数分布を示す。

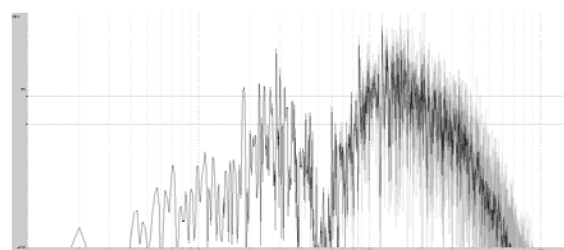


図21 開状態の周波数分布

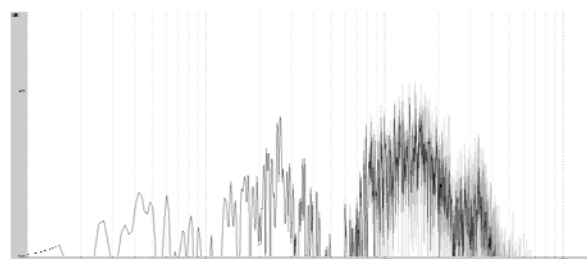


図22 掌握状態の周波数分布

横軸周波数(Hz)、縦軸振幅(dB)

#### ■考察

上記のグラフより、振幅に差はあるものの、ある特定の周波数が大きな値を示すことはなかった。これは、腕を動作させる際、複数の筋繊維が同時にかつ複雑に使用され、様々な周波数が混入するためであると考えられる。

#### ■まとめ

周波数分布の最大値では腕の動作識別は不可能である。

②取得した筋電位波形のエネルギー分布(周波数×振幅)から腕動作を識別するアルゴリズムの検討と開発



次に、筋電位波形のエネルギー分布(Af-f グラフ)から腕の動作を識別するアルゴリズムの開発に取り組んだ。

方法：腕に電極一つを取り付け、筋電位波形のエネルギー分布から各腕動作を識別する。

結果：以下に開状態と掌握状態のエネルギー分布を示す。

横軸周波数、縦軸エネルギー

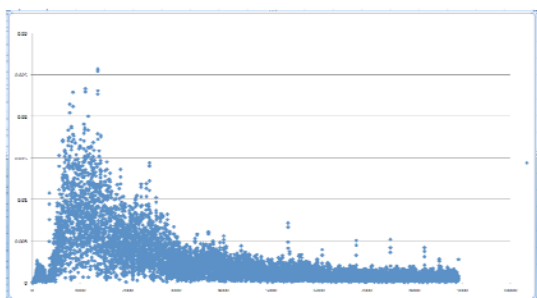


図 23 開状態の周波数分布

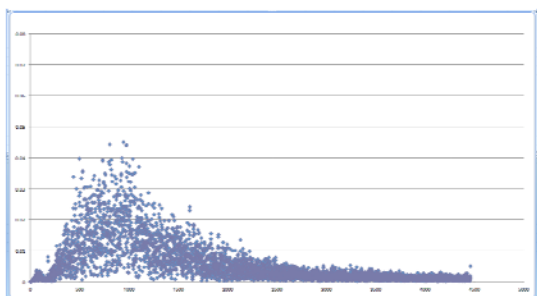


図 24 掌握状態の周波数分布

#### ■考察

グラフをみると、正規分布に近い形にな中央値を求め、横軸に各腕動作の中央値をとり、グラフにプロットしてみた。

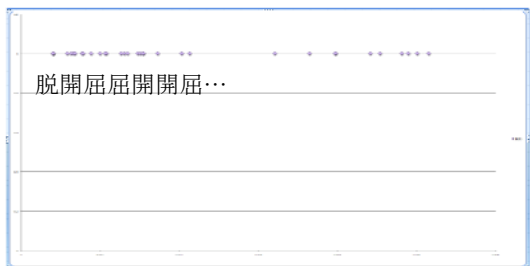


図 25 各腕動作の中央値分布

っていることがわかる。そこで、これらの

#### ■結果

複数の動作の中央値が混在し、腕の動作は識別が不可能だった。

#### ■まとめ

電極一つから得られる筋電位波形の中央値から各腕動作の識別は不可能である。

③ 取得した筋電位波形のエネルギー分布(周波数×振幅)の中央値を二次元にグラフにプロットし腕動作を識別するアルゴリズムの検討と開発

前段階で開発したアルゴリズムは、電極一つから得られる筋電位波形の中央値から各腕の動作の識別を試みたが失敗した。そこで、単純に、使用する電極を2つに増やして実験を行った。

#### ■方法：

腕に電極2つを取り付け、筋電位波形のエネルギー分布から中央値を算出、各腕動作を識別する。

#### ■結果：

次に各腕の動作のエネルギー分布を示す。

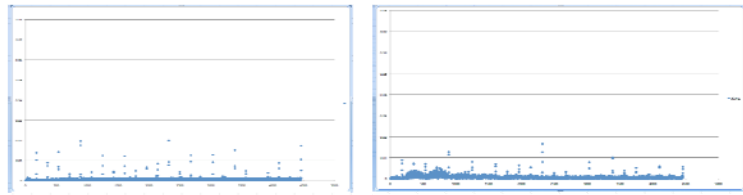


図 26 脱力状態のエネルギー分布

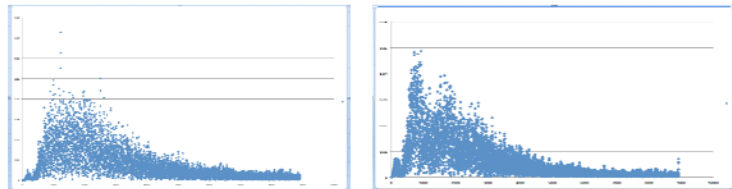


図 27 開状態のエネルギー分布

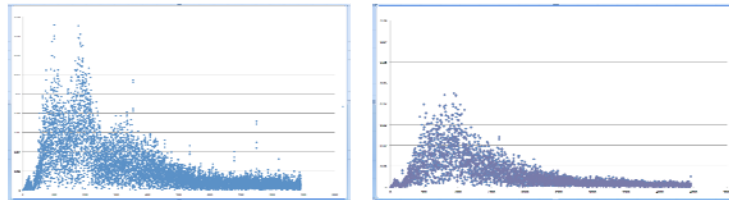


図 28 掌握状態のエネルギー分布

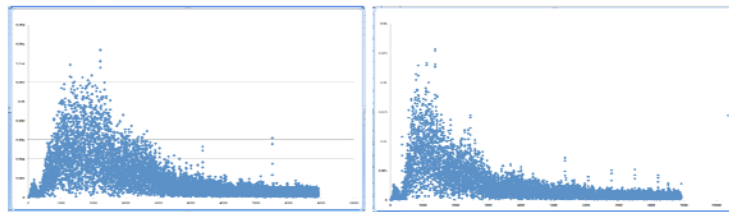


図 29 掌屈状態のエネルギー分布

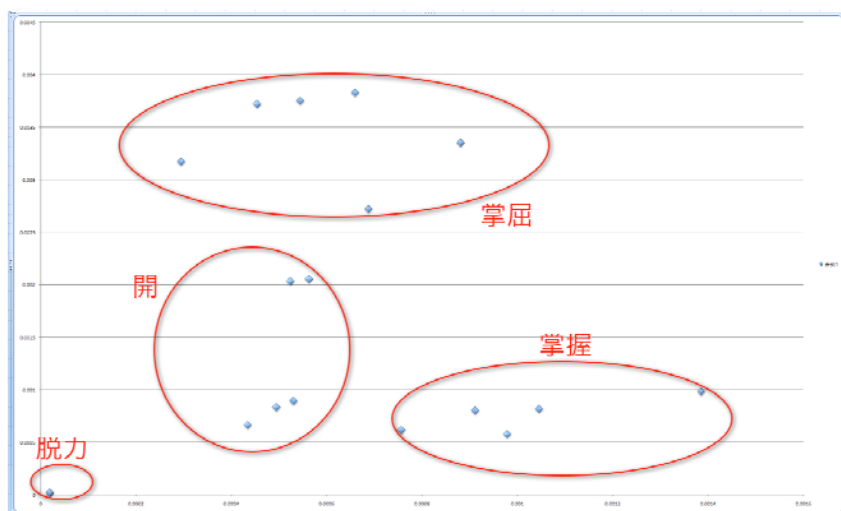


図 30 各腕動作の中央値分布

横軸 一つ目の電極の中央値 縦軸 二つ目の電極の中央値

## ■結果

驚いたことに、各腕の動作ごとにカテゴリ化できることが分かった。

この結果を踏まえて、違う人で同じ実験を行えばどのようなグラフが現れるのか、個人差の研究を行った。以下に実験結果を示す。

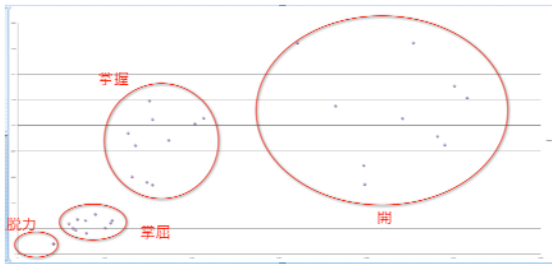


図 31 別の被験者での各腕動作の中央値

各腕動作の位置関係は異なるものの、それぞれの腕動作についてカテゴリ化できている。つまり、事前に被験者が腕ごとのデータを登録しておけば、後に照合し、認識することが可能である。

### <研究IV>「腕動作自動識別ソフトウェアの開発」

研究Ⅲにおいて、少ない電極数から複数の腕動作を識別可能なアルゴリズムを発見した。そこで、これまでフーリエ解析を市販品に頼っていた部分を全て自作し、リアルタイムで腕の複数の動作を識別できるソフトウェアの開発を行う。現在、開発途中であるが、FFTをリアルタイムで行うレベルまでできた(図32)。

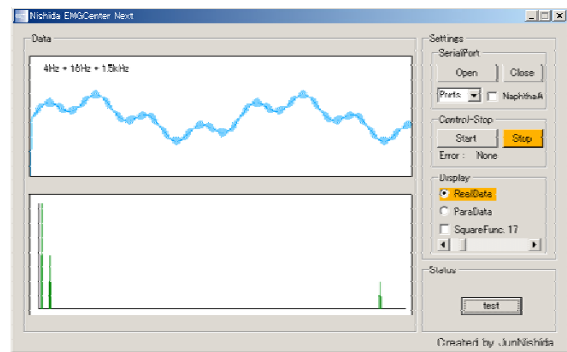


図 32 開発中の腕動作自動認識ソフトウェア

図32について：4Hz+16Hz+1.5kHzの入力信号に対して、画面下のグラフで周波数スペクトルを求めている様子。それぞれの周波数を検出できていることが分かる。また、取得したスペクトル分布からエネルギー分布、中央値を算出するプログラムも動作に成功した。

## 5. 考察

現段階において、増幅した筋電位をスイッチとして、ハードウェア、ソフトウェアの動作信号を生成するシステムを構築することができた。また、少ない電極数から複数の腕動作を識別できるアルゴリズムを発見した。本研究において明らかになったことは、以下の3点である。

- ① 同じ筋肉でも、長時間使っていると電位が小さくなる。
- ② 腕の動作によって、筋電位波形のエネルギー分布の中央値が異なる。
- ③ 同じ箇所でも筋電位波形のエネルギー分布を測定しても、個人によって腕動作の分布グラフの位置関係が異なる。

特に③については、皮膚表面の保水率の違いや、同じ人でも使用する筋繊維が若干異なることからくるものと考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

### (1) まとめ

〈研究Ⅰ〉「筋電位計測システムの開発」

- ① 電極の開発
- ② 筋電位信号を増幅する回路の開発
- ③ 不要なノイズを除去するフィルタ回路開発
- ④ 筋電位データの閾値判定アルゴリズムの開発

これらにより、筋電位を安定的に取得し、解析するシステムを構築することができた。

〈研究Ⅱ〉「筋電位計測システムの応用」

- ① 筋電位を用いたモーターカーの制御
- ② 筋電位を用いたゲームの操作

これらに成功したことにより、筋電位信号のスイッチング情報をもとにハードウェア、ソフトウェア両面においてコントローラとして使用できることが分かった。

〈研究Ⅲ〉「フーリエ解析を利用した腕動作識別アルゴリズムの開発」

2つの電極から得られる筋電位波形のエネルギー分布の中央値を求めることにより、4つの腕動作を識別することができるアルゴリズムを発見した。

〈研究Ⅳ〉「腕動作自動識別ソフトウェアの開発」

現段階で、任意の周波数を含んだ波形をリアルタイムにフーリエ解析することができ、ソフトウェアを開発することができた。

これらの研究により、筋電位を計測し、電子デバイスのインターフェイスとして使用できるシステムを低コストでかつ安定的に使用できる道筋を示せた。

### (2) 今後の課題

脳から送られてくる信号をダイレクトにハードウェアやソフトウェアに伝えるシステムは、直感的な操作であったり、人間の物理的限界を超えるといった意味において非常に将来性を感じさせる。本研究により、このシステムを「安価」かつ「シンプル」に実現する道筋を示すことができたと思う。

#### ①ハードウェアでの今後の応用

現在、片腕の筋電位信号から4つの腕の状態を認識できるアルゴリズムの開発に成功している。そこで、このアルゴリズムを採用した非常に安価な筋電義手を開発する(図33)。これは、腕を無くした方の代替手首として、またはお年寄りの手首のパワーアシストとして機能する。動作例として、「握る」・「つまむ」・「まわす」・「開く」といった日常生活で必要不可欠な動作を行うことができる。

#### ②ソフトウェアでの今後の応用

現在、得られた筋電位信号をコンピュータの動作に反映させることに成功している。そこで、手の握った状態を把握することで

ドラッグ&ドロップなどの操作をより直感的に行える，第三のコンピュータインターフェイスの開発を行っていききたい(図34)．これは既存のコンピュータインターフェイスに付け加えて使用する．動作例として，指をチョキにすると切り取り，パーで貼り付け，親指と小指を広げると拡大，手首で払う動作をするとデスクトップ上のウィンドウを払いのけるなど，実際の指の行為となるべく近い操作が可能となる．これをさらに応用させると，仮想空間内における3Dオブジェクトを直感的に操作することもできるようになる．

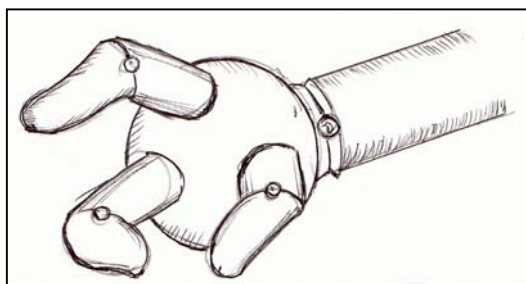


図 33 : 設計中の筋電義手



図 34 : 開発中の新しい PC インターフェイス

### ③腕動作識別アルゴリズムの改良

筋電位波形は，電極-皮膚間の接触状況や時間によって変動することが分かった．今後は電極の改良及び判定アルゴリズムの改良を行っていききたい．具体的には，研究Ⅲにおいて発見した腕動作識別アルゴリズムが，筋電位波形の時間変動に対して自動的に校正するアルゴリズムの開発を行う．

## 7. 参考文献

- [1]トランジスタ技術 CQ 出版
- [2]OP アンプ実用回路設計 CQ 出版
- [3]表面筋電図 東京電機大学出版

## 8. 謝辞

この研究を進めるに当たり，ハードウェア技術に関して，MIT 研究員の松下光次郎氏，顧問の末谷健志先生には数々のご指導をいただきました．また，予算面などで，前川校長先生，吉田信也副校長先生に多大なご協力をいただきました．

お世話になった先生方，大変ありがとうございました．