筋電位計測システムの開発とその応用 その２

６年Ｂ組　西田　惇
指導教諭　米田　隆恒

１．要約

近年、コンピュータや電子デバイス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等電子端末のインターフェイスに代表されるマウスやキーボードは我々が実際に行ったジェスチャーが画面に直接反映されないため「直感的な操作性」に欠ける。そこで私は、生体とハードウェアをダイレクトにリンクさせ、腕の動作を操作対象に直接反映させることによって、より直感的な操作が可能になると考え、昨年度に筋電位計測システムのベースとなる基盤技術を確立させた。本年度は昨年度の理論・基盤技術をより安定的かつ実用的に実装させた。昨年度と比べ計測システムを 50%小型化するとともに、FFT を用いた新しい腕動作認識アルゴリズムを考案し、認識精度を 44%向上させることに成功した。さらに、これらをベースにして現在計 9 種類のアプリケーションを実現することに成功した。筋電位を利用した仮想ドラム演奏ソフトや、新しい家電制御システムなど多岐にわたる分野に非常に低価格で展開できたことにより、本システムの汎用性並びに実用性を示すことができた。

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

２．緒言

現在、コンピュータやロボットなど、様々な家電製品や電子デバイスが発達し続け、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例がたくさんある。そこで私は、人間の生体情報という側面から、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

昨年度に開発した、非常に微弱な筋電位を増幅し不要なノイズを除去する電子回路を大幅に改良する。また、増幅された信号をコンピュータで認識し、様々なソフトウェア・電子デバイスを操作できるシステムを新規に構築する。

４．研究内容

（１）仮説

〈研究Ⅰ〉「筋電位計測システムの新規開発」

昨年度開発した計測システムを安定化させ、コンピュータ側でフーリエ解析できるようシステムを改良できる。

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規考案」

取得した筋電位波形から、ハードウェア・ソフトウェアを操作するのに必要な情報を抽出できるアルゴリズム及びソフトウェアを開発できる。

〈研究Ⅲ〉「新しい生体インターフェイスの開発」

開発した計測システム・アルゴリズムを用いて、エンターテイメントや日常生活で使用できる様々な電子デバイスや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新規開発」

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、交流−直流変換などハードウェアレベルの研究

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規開発」

① 取得した筋電位波形を平滑化し単純閾値判定を行うアルゴリズムの研究

② 取得した筋電位波形を周波数解析し、パーやグーなど複数の腕の動作を識別できるアルゴリズムの新規開発

〈研究Ⅲ〉「新しい生体インターフェイスの開発」

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 筋電位を利用した筋電義手の制御方法の検討と開発
③ 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
④ 筋電位を利用した仮想ドラム演奏ソフトの制御方法の検討と開発
⑤ 筋電位を利用した個人差グラデーション提示ソフトの制御方法の検討と開発
⑥ 筋電位を利用した仮想テルミン演奏ソフトの制御方法の検討と開発
⑦ 筋電位を利用した筋疲労計測システムの検討と開発
⑧ 筋電位を利用した新しいコンピュータインターフェイスの制御方法の検討と開発
⑨ 筋電位を利用した家電制御システムの制御方法の検討と開発

（３）研究結果

〈研究Ⅰ〉「筋電位計測システムの新規開発」

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、脳は神経を介して筋肉に電気的な信号を送っている。この信号が筋電位(EMG；electro-myo-gram）と呼ばれ、皮膚表面に10μV～100μV と微弱ながら漏れている。これをコンピュータで周波数解析するには、増幅回路と不要なノイズを除去するフィルタ回路及び交流−直流変換回路が必要となる。

構築した新システムを図１に示す。

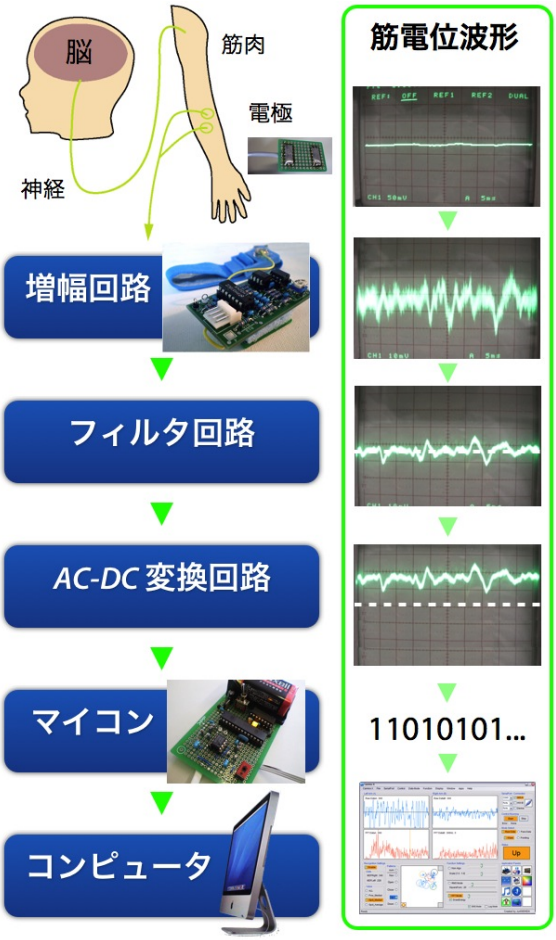


図１：開発した新システム全体図

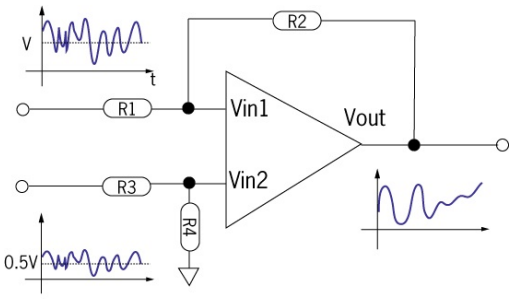
■ 電極周りの再設計

まず筋電位を取得するための電極周りを大幅に改良した。昨年度自作したシステムでは電極と増幅回路を別個の基板に実装していたため、装着するのに手間がかかる上、ゴムバンドで固定していた増幅回路が動くと電極も動き皮膚と擦れ、アーチファクト(人工ノイズ)が発生していた。そこで電極と増幅回路を一体化、さらに増幅回路と電極の間に緩衝材を設けることで装着時間の短縮及びアーチファクトの軽減を図った(図２)。

図２　製作した新しい電極と緩衝材

■増幅回路の再設計

「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、図６のように、外来ノイズが混入してもある程度相殺される。手作業での基板製作(図４)では基板ごとに個体差が生じたため、プリント基板化し、個体差の縮小、装着時の安定性向上を図った。製作した増幅回路は図５のようになった。



R1=R3，R2,=R4 ならば、出力電圧 Vout は

$$Vout=\frac{R2}{R1}(Vin1-Vin2)$$

図３　差動増幅回路の仕組み

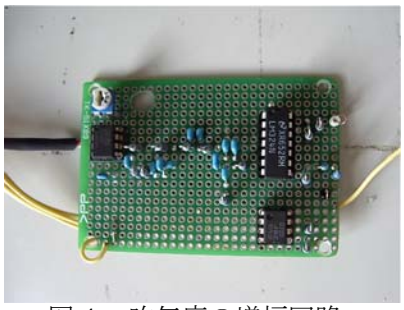


図４　昨年度の増幅回路

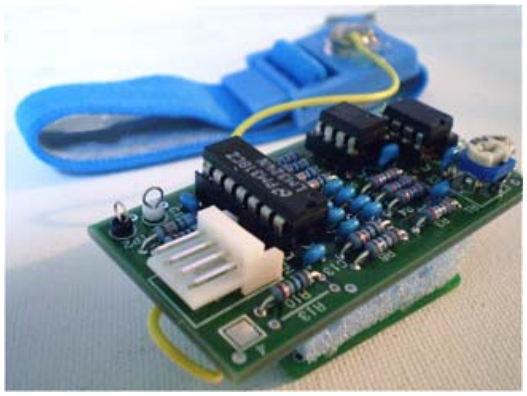


図５　製作した新しい電極・増幅回路

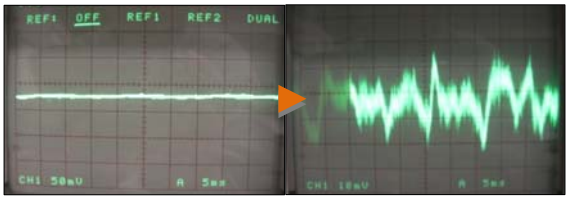


図６　筋電位波形を増幅した結果

■ 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。製作したバンドパスフィルタ(図７)とノッチフィルタ(図８)の周波数特性図を以下に示す。

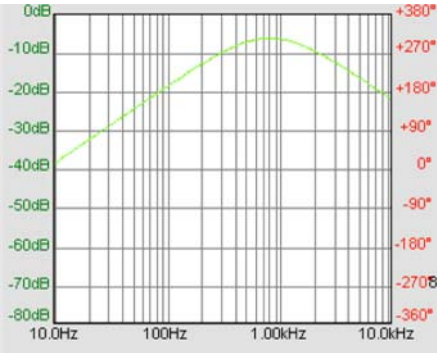


図７　バンドパスフィルタ周波数特性

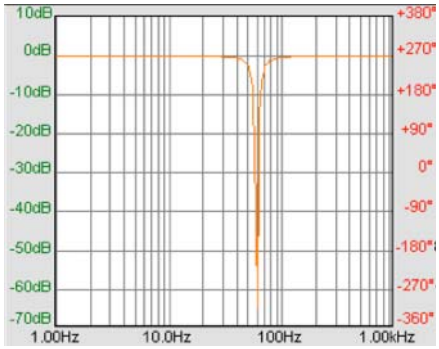


図８　ノッチフィルタの周波数特性

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～500Hz)以外の信号を除去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９)。

これによって筋電位波形を抽出することができた(図 10)。

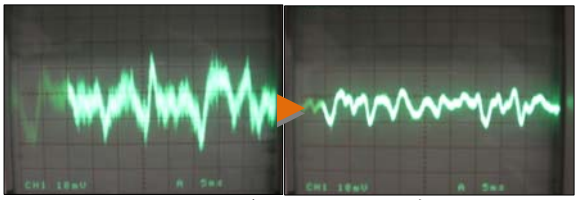


図９　フィルタ回路によるノイズのカット

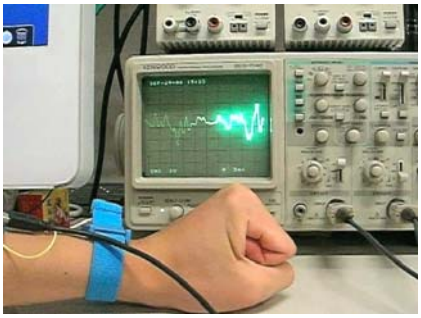


図 10　設計した増幅回路による筋電位信号の増幅

■ 交流–直流変換回路の設計

フィルタを通過した信号は、振幅±4.5V の電位変化で構成されている。昨年度ではこの時点で絶対値変換回路に通し信号の形を崩していたが、これではフーリエ解析を行うことができない。そこで筋電位信号の基線を 0V から 2.5V に引き上げる回路を挿入した。これにより、波形の形を崩さずそのままコンピュータに取り込めるようになった(図 11)。

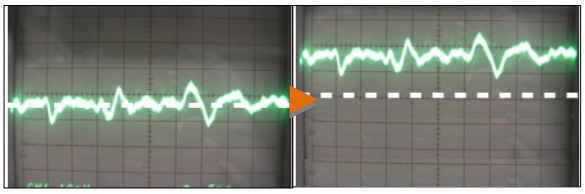


図 11：交流–直流変換回路の効果イメージ

■マイコン回路の再設計

昨年度製作したマイコン基板は 15cm×15cm と大きく、さらに波形の処理の一部をハードウェア回路で行っていたため、携帯性・可搬性に劣り、メインテナンスを頻繁

に行う必要があった。今回はこれらの問題を解消するため、波形の処理をソフトウェアに移行するなど回路設計を変更し、10cm×6cm まで小型化することに成功、部品点数を減らしメインテナンス性を向上させた(図 12)。

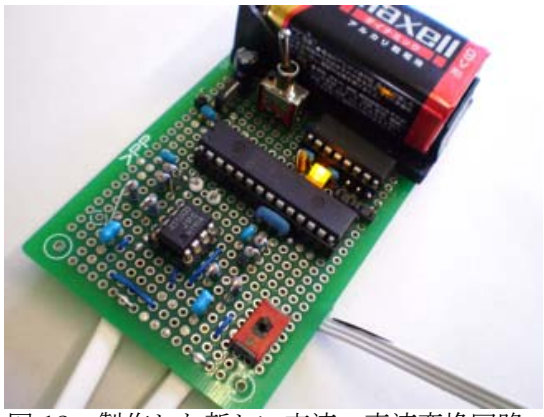


図 12　製作した新しい交流－直流変換回路及びマイコン回路

システム全体では、昨年度のものと比べ、50%小型化することに成功した。

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規考案」

RS-232C(EIA-232-D)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、VisualStudio2008 を用いて解析ソフトを 0 から開発した(図 13)。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、閾値判定及び腕状態判定に関する設定を行うボタン、筋電位信号とスペクトルを表示するグラフ、その他のアプリケーションを呼び出すためのボタンがある。

図 13　開発したソフト

①単純閾値判定アルゴリズムの考案

私は、「自乗平均判定法」というものを考案した。これは、取得した筋電位信号 20 サンプルのそれぞれを 2 乗し、その平均の平方根を求め、その値が指定した定数より大きければ論理値 1 として扱うものである(式 1)。このアルゴリズムにより、腕に力が入っているか否かを判定できるようになった(図 14)。

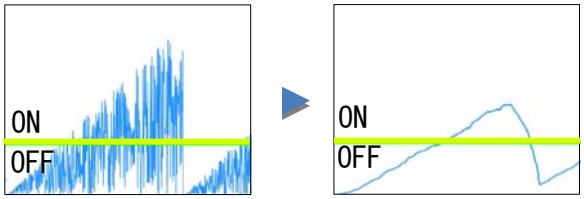


図 14　自乗平均判定法適用前と後の波形

$$\Theta = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \quad (式 1)$$

N: サンプル数　$\boldsymbol{x}_i$: 筋電位サンプル

また、自乗平均判定法を適用するサンプル数(式 1 における N)をスライドバーで設定できるようにしたため、平滑化の度合いを操作対象に応じて自由に変えることができる。

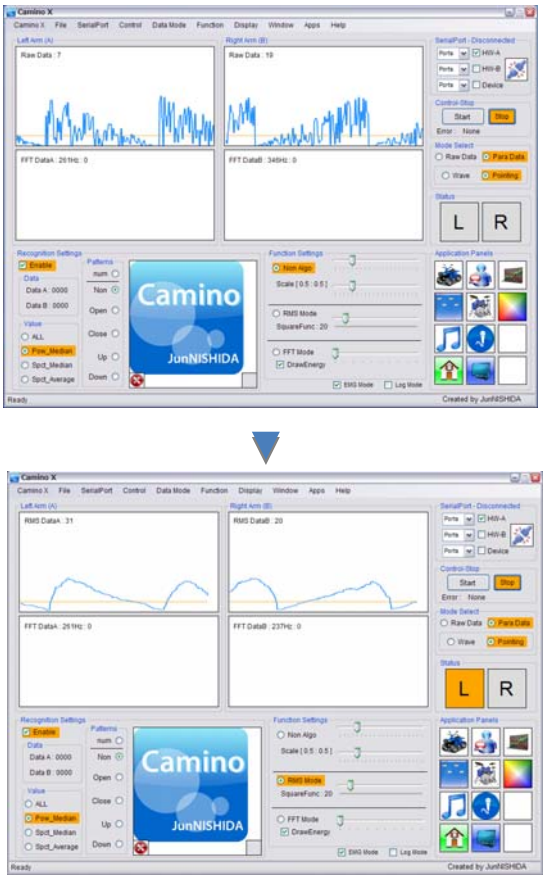


図 15　上図で表示されている入力信号に自乗平均法を適用した様子(下図)

単純閾値判定アルゴリズム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ウェアを呼び出すアイコンを配置した。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ウェア及びハードウェアを制御できる。

②FFT を用いた腕動作識別アルゴリズムの新規考案

これまでの研究により、筋電位波形をコンピュータで読み取り、力を入れているか否かの２値の情報を抽出することに成功した。しかし単純閾値判定アルゴリズムでは片腕から得られる情報が ON 又は OFF と極端に少なく、より複雑な動きを必要とする義手などが製作できないなどデバイスの応用範囲に制限ができてしまう。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った。そのために周波数解析(FFT)を行うことにした。ここでは、脱力、掌握(グー)、開(パー)、手首を上に曲げた状態、手首を下に曲げた状態、この５つの動作の認識を試みた(図 16)。

図 16　マイコンから取得した筋電位波形をフーリエ解析した結果を表示し、腕動作を識別している様子

昨年度考案した「中央値判定法」では、取得した２つの筋電位波形のエネルギー分布(周波数×振幅)の中央値をグラフにプロットし腕動作を識別してきた。

方法：片腕に電極２つを取り付け(図 17)、筋電位波形のエネルギー分布から中央値を算出(図 18)、それぞれの中央値を XY 平面にプロットし各腕動作を識別する。

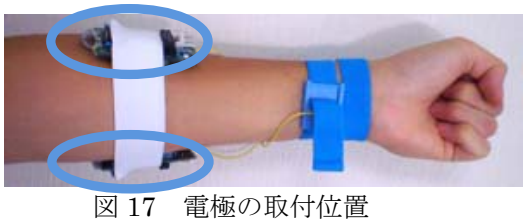


図 17　電極の取付位置

昨年度の識別アルゴリズムの結果を次に示す。

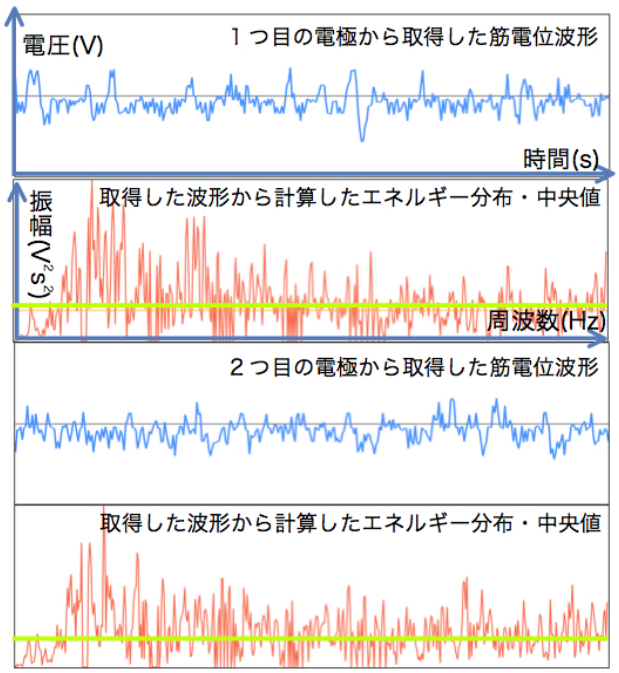


図 18　マイコンから取得した筋電位波形(青色)をフーリエ解析した結果(赤色)と中央値(緑色の横線)

しかしこのアルゴリズムでは、周波数×振幅の中央値を特徴量として採用していたため、同じ腕の動作を行った場合でも、力の入れ具合によって振幅が変動し、値にばらつきが生じることがあった(図 19)。

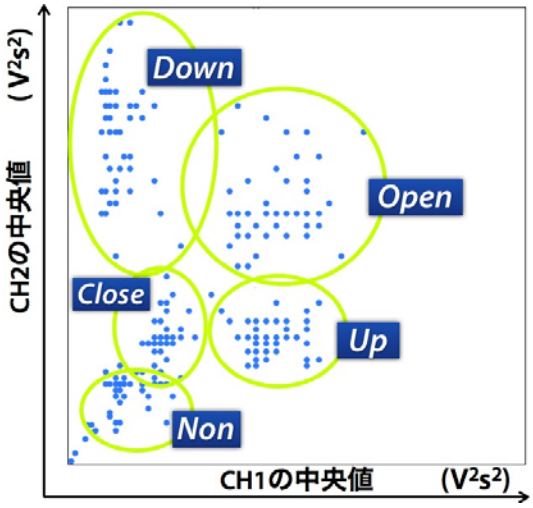


図 19　X 軸に１つ目の電極の中央値、Y 軸に２つ目の電極の中央値をプロットする

そのため、腕動作ごとのカテゴリが一部重なり、誤認識を引き起こす要因になっていた。

ゆえに、波形の振幅の変化に影響を受けない上、腕動作の特徴を捉える新しい特徴量を見つける必要があった。昨年度の「中央値判定法」ではエネルギー分布の縦軸にあたる「周波数×振幅」を特徴量として捉えていたが、横軸にあたる「周波数」を特徴量として捉えられないかと考え、中央周波数(MDF)を特徴量とした新しいアルゴリズムを考案した。

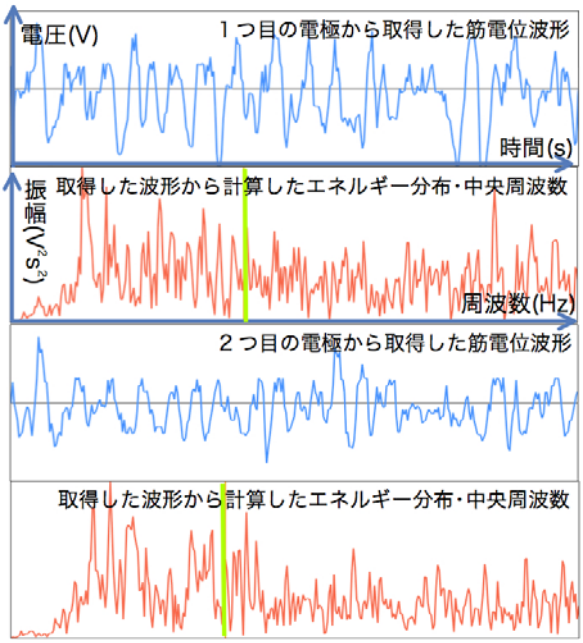


図 20　マイコンから取得した筋電位波形(青色)をフーリエ解析した結果(赤色)と中央周波数(緑の縦線)

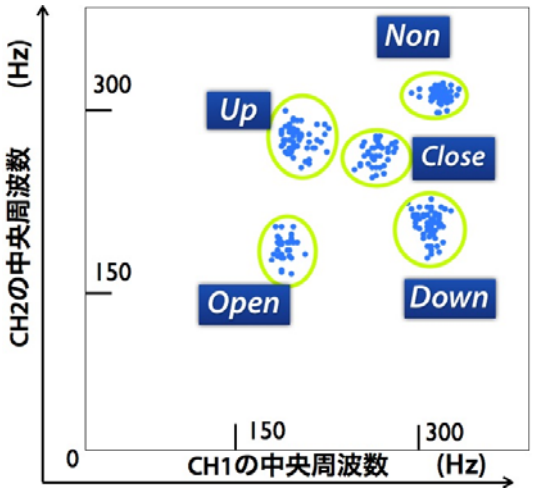


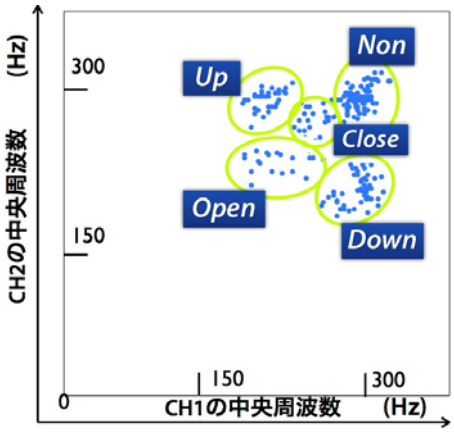
図 21　X 軸に１つ目の電極の中央周波数(MDF)，Y 軸に２つ目の電極の中央周波数をプロットしたグラフ

方法：片腕に電極２つを取り付け(図 17)、筋電位波形のスペクトル分布×周波数 $(P(f)\times f)$ から中央周波数(MDF)を(式 2)から算出し(図 20)、それぞれの中央周波数を XY 平面にプロットし各腕動作を識別する。

$$\int_{0}^{MDF} P(f)\cdot f\,df = \int_{MDF}^{512} P(f)\cdot f\,df \qquad (式２)$$

図 21 は、横軸に一つ目の電極から得られた中央周波数、縦軸に二つ目の電極から得られた中央周波数を表し、各腕動作の中央周波数(特徴量)をマッピングしたものである。驚いたことに、明らかに昨年度考案した「中央値判定法」とは異なり、各腕動作の値の分散はほとんどなく、カテゴライズ(グループ分け)できることがわかった。私はこの新しいアルゴリズムを「中央周波数判定法」と名付けた。

この結果を踏まえて個人差測定実験を行った。結果、各腕動作の位置関係は同じで、それぞれの腕動作についてカテゴライズできている。カテゴリ同士が隣接しているが、数回訓練することによって、より標準偏差が小さくなると考えられる。



新旧アルゴリズムについて各腕動作の特徴量の標準偏差(式３)の平均を算出した。その結果、新しい「中央周波数判定法」は昨年度の「中央値判定法」と比べ 44%標準偏差が小さいことが判明した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \qquad (式３)$$

各アルゴリズムの標準偏差の平均を以下に示す。

アルゴリズム	各腕動作の特徴量の標準偏差の平均
中央周波数(新)	10.4
中央値　(旧)	18.5

〈研究Ⅲ〉「新しい生体インターフェイスの開発」

今回開発した筋電位解析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、さらに５種類の腕の状態を識別す

ることができる。そこで、これらの情報を用いてハードウェア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 23 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す。

マイクロコンピュータ	PIC16F873A
通信方式	RS232C、 38.4kbps
プログラム	自作 PGM (アセンブリ)
最大モータ駆動電力	60W
制御回路方式	FET-H ブリッジ回路
電源電圧	PIC9V、 Motor6V

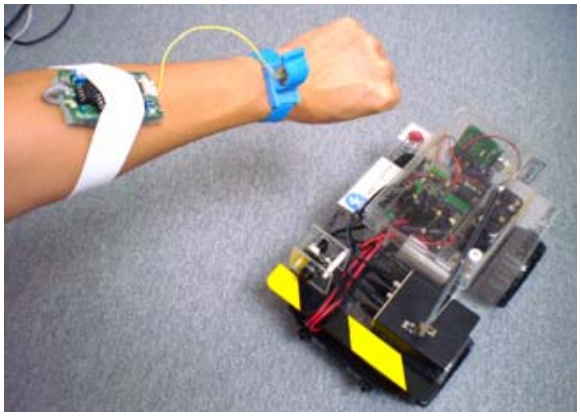


図 23　モーターカーの動作の様子

②筋電位を利用した筋電義手の制御方法の検討と開発

解析ソフトに実装した、FFT を用いた腕状態識別アルゴリズムを利用して、取得した筋電位波形から腕動作を識別、サーボモータの回転角を対応させることによって義手を制御することができる(図 24)。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、パルス信号に変換される(図 25)。

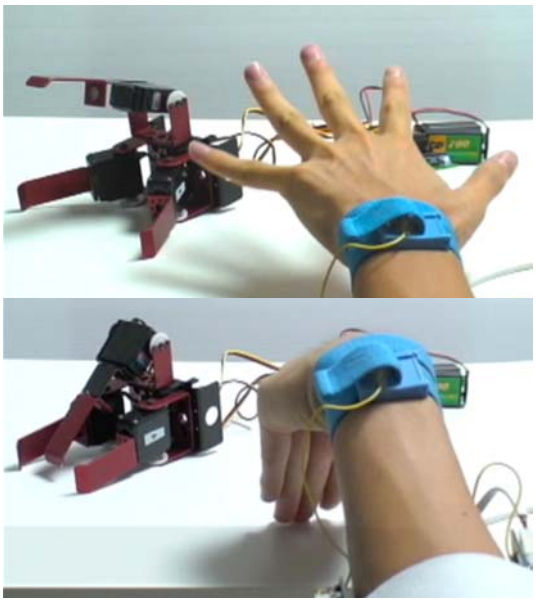


図 24　筋電義手の制御風景

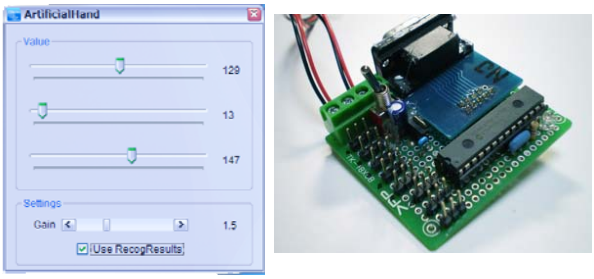


図 25　製作した制御ソフトとコントローラ基板

③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

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

ームをより直感的にプレーすることができる(図 26、図 27)。

図 26　ゲームのプレー画面

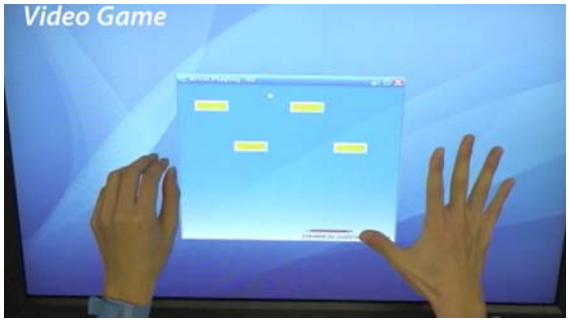


図 27　ゲームのプレー風景

④筋電位を利用した仮想ドラム演奏ソフトの制御方法の検討と開発

ドラムを叩く時に発生する筋電位を認識し、物理的なドラムセットなしに、ドラムを叩く動作をするだけでドラムの音を出力することができる。物理的なドラムと異なり、ドラムセットを設置する空間を必要としないため、省スペースで練習することができる。

図 28　筋電位を利用したドラム演奏ソフト

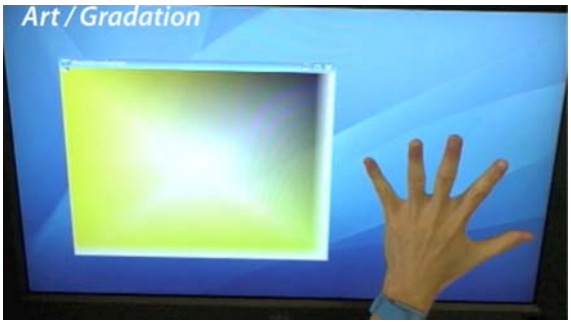


図 29　筋電位を利用したグラデーション提示ソフト

筋電位波形の個人差をアートに適用した一例である。取得する個人の筋電によって、表示されるグラデーションのパターンが異なってくる。これを応用すると、個人個人の生体情報を元に生成したスクリーンセーバやデザインを作成することができるようになる。

⑥筋電位を利用した仮想テルミン演奏ソフトの制御方法の検討と開発

図 30：筋電位を利用したテルミン演奏ソフト

筋電位波形の個人差を音楽に適用した一例である。波形の形から音階を設定し、出力する。腕の動作、個人によって出力される音階が異なる。

⑦筋電位を利用した筋疲労計測システムの検討と開発

筋電位波形の周波数成分は、筋疲労に伴い低周波側へシフトする。これを利用して筋肉の疲労度を測定できるシステムを構築

した。これによって医学的パラメータを出力することも可能になった。

⑧筋電位を利用した新しいコンピュータインターフェイスの制御方法の検討と開発

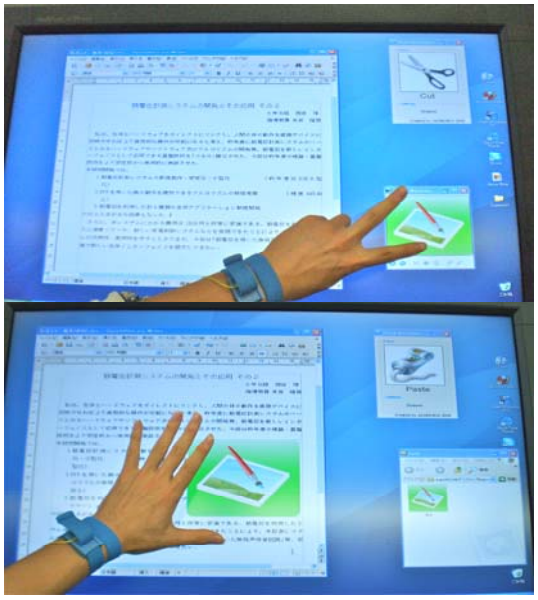


図 31　筋電位を利用した新しいコンピュータ・インターフェイス

腕の動作を直接コンピュータに反映できる例として、筋電位を利用した新しいコンピュータインターフェイスを開発した。これは、マウス・キーボードに付け加えて使用する”*Third-Interface*”(第３のインターフェイス)として機能する。動作例として、手を「チョキ」にすると「コピー」、「パー」にすると「貼付け」を行うことができる。また腕を上下することによりウェブブラウザやファイルエクスプローラの上下スクロールを行うことができる。

手の動作とコンピュータ上での動作が一致しているため、より直感的で実感のある操作が可能となる。

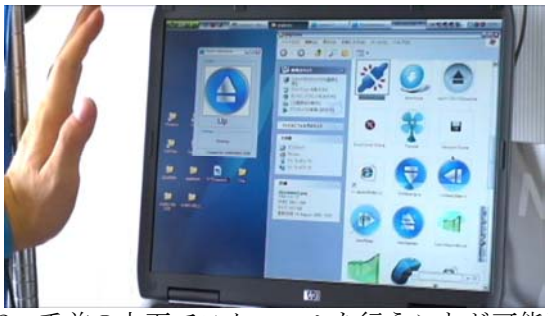


図 32　手首の上下でスクロールを行うことが可能になりより直感的な操作が可能となる

⑨筋電位を利用した家電制御システムの制御方法の検討と開発

開発した筋電位計測システムを日常生活で実用的に使用できる一例として、家電制御システムが挙げられる。これは腕に力を入れたときに発生する筋電位波形を認識し、制御する家電製品のアイコン、行いたい操作を表したアイコンを選択、赤外線ユニットを介して家電製品を制御するものである。本システムの大きな特徴は、腕を動かそうとするだけで筋電位が発生するため、腕を動かさなくても、赤外線リモコン制御式の家電製品全てを操作することが可能であることである。これは寝たきりのお年寄りや障害のある方にとって非常にメリットが大きいと推測される。本システム全体図を図 34 に示す。

図 33　開発した家電制御システム

図 34　家電制御システムの全体図

５．考察

現段階において、取得した筋電位から多くのハードウェア、ソフトウェアをより詳細に制御できるようになった。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り、周波数成分が低周波側へシフトする。

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周波数が異なる。

③ 同じ箇所で筋電位波形のエネルギー分布を測定しても、特徴量(MDF)の分布はほぼ同じ。

③については、個々人の皮膚表面の保水率の違いや、使用する筋繊維が若干異なることで特徴量が変動すると考えられる。

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・改良」

① 電極周りの大幅な改良

② 増幅回路の再設計・安定化・小型化

③ マイコン回路の再設計・小型化

④ 解析ソフトウェアの新規設計

これらにより昨年度と比較し、筋電位をより安定的に取得・解析するシステムを50%コンパクトに構築することができた(図35)。

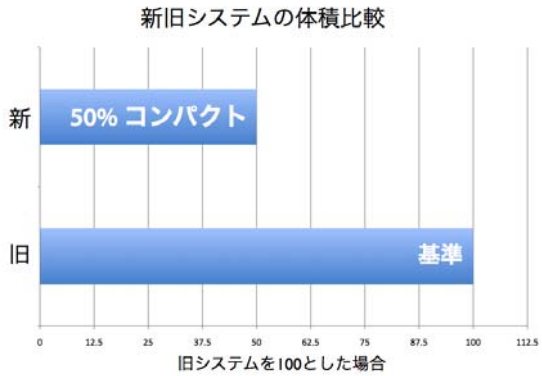


図 35　新旧システムの体積比較

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規開発」

① 筋電位データの閾値判定アルゴリズムの開発

② FFT を用いた腕動作識別アルゴリズムの新規考案、認識精度 44%向上

これにより、さらに精密に操作対象をコントロールすることができるようになった。

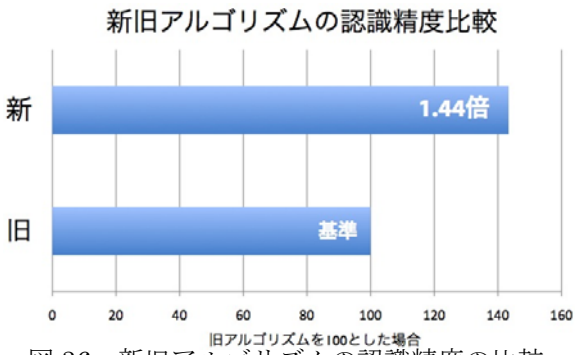


図 36　新旧アルゴリズムの認識精度の比較

〈研究Ⅲ〉「新しい生体インターフェイスの開発」

エンターテイメント分野の直感的ゲームソフトから、介護補助となる家電制御システムまで計９種類、幅広い分野に計測システムを応用することができた(図 37)。

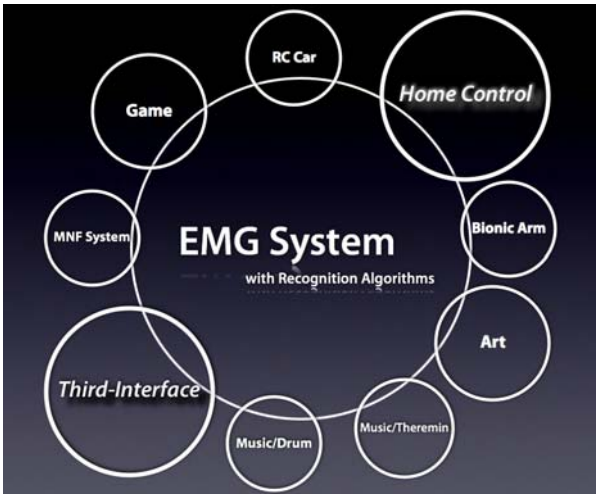


図 37　システムの応用概念図

これらの研究により、筋電位を計測し、電子デバイス及びソフトウェアのインターフェイスとして応用できるシステムを低コストで、かつより安定的に使用できる道筋を提示することができた。

（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たり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「低価格で」かつ「シンプル」に実現する道筋を示すことができた。今後はこれらの特性を生かして、次の３つの応用を実現していきたい。

①ハードウェアでの今後の応用

家電制御システムの開発をさらに進めていきたいと考えている。研究を進めていく上で、筋電位を用いたインターフェイスは健常者のみならず、障害のある方や高齢の方にとって非常にメリットが大きいことが判明した。そこで今後は、臨床での試験も進めていきたい。また、計測システムを腕時計サイズまで小型化し内部に通信機能を持たせることにより、ウェアラブルに、手のモーションだけで家電製品を操作することができるようになる。例えば、手首を回すと TV のボリュームアップ､指さしだけで照明を点けることができる。

図 38　新しい家電制御システムのコンセプト

②ソフトウェアでの今後の応用

口の周囲に分布する筋肉の電位を取得し、発声せずに口を動かすだけで母音を認識できる「無発声母音認識」を行う。これは、極度の雑音下での会話が可能となることや、プライバシーが確保されるといった大きなメリットがある。これを利用して、工場や建設現場における作業員同士の簡単なメッセージのやり取り、あるいは電車での無発声通話や会場内での秘匿性の高い会話が可能となる。

③腕動作識別アルゴリズムの改良

今回新規に考案したアルゴリズムでは、取得した筋電位波形の中央周波数を求め、５種類の腕動作を認識することに成功した。しかし、電極の貼り付け位置や皮膚の保水率によって結果が左右されてしまい、最適な結果を得られるまで調整に時間がかかる。そこで今後は、最適な調整方法をマニュアル化していきたいと考えている。

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

[4] VisualBasic2005 シニア編，ソフトバンククリエイティブ

[5] MSDN ライブラリ，マイクロソフト

[6] MPLAB C30 C Compiler User's Guide, Microchip

[7] 「画像処理とパターン認識入門」， 森北出版

８．謝辞

この研究を進めるに当たり、顧問の米田隆恒先生、MIT(マサチューセッツ工科大学)研究員の松下光次郎氏には数々のご指導をいただきました。また予算面などは吉田信也副校長先生に、数学的検証については川口慎二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、ありがとうございました。