

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560240

研究課題名(和文) 生体信号及び上肢運動特性を考慮したユーザの意図推定と予測制御に関する研究

研究課題名(英文) A study on behavior estimation and predictive control of users considering on the character of arm movement and biological signals

研究代表者

鈴木 哲 (SUZUKI SATOSHI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：50306502

研究成果の概要(和文)：本研究では、手動制御系インタフェース操作時において作業者に負担をかけずに生体信号をセンシングする方法の開発や、作業者の動作の帰結である作業精度を推定する技術の開発を目的とした。その結果、センシング方法としては磁界センサを用いた非接触の生体信号計測方法を開発するとともに、予測方法としては脳波を用いた動作精度推定方法を提案した。これらの結果をもとに、迅速且つ正確にその動作を完了するための支援方法を検討した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a sensing method of biological information without placing any burden on the monitored individual at hand-operated control and also to develop a method to presume the work efficiency using biological information. As a result, non-contact sensing method using a magnetic field sensor was developed. Moreover, a method to presume the work efficiency using movement-related cortical potential (MRCP) of electroencephalogram was proposed. Additionally, the supporting method to complete the operation promptly, safety and accurately is discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：知能機械学・機械システム

科研費の分科・細目：人間機械システム

キーワード：人間工学, 生体信号処理, 意図推定, 予測制御

1. 研究開始当初の背景

近年、BCI (Brain Computer Interface) をはじめ、脳波や筋電図などの生体信号を電動車椅子や電動義手、PCなどのインタフェースとして利用しようとする試みが数多くなされている。中枢神経系が良いか末梢神経系が良いかという点については議論が残るが、現状では末梢神経系、特に筋電信号や圧セン

サにより筋の活動状態を計測し利用するのが一般的である。このような一連の研究における現実的な応用に向けた課題として、センサ取り付けによる拘束性や取り付け自体の煩雑さを避けるための“センシングの課題”と、取得した情報をどのように解析しデバイスの制御に利用するかといった“制御における課題”の2つがあると考えられる。

まず、筋萎縮性側索硬化症 (Amyotrophic Lateral Sclerosis; ALS) などの神経の変性疾患や、脊髄損傷といった障害によって筋活動機能が低下し四肢の制御が困難となった場合、PCや補助器、自働器といったデバイスを介しコミュニケーションを取ることが一般的である。この種のコミュニケーションにおいては、残存する一部の筋力や筋活動機能を利用した単純なスイッチングによりデバイスの操作を行うことが非常に有効となる。このスイッチングには、指や前頭筋、まばたき、眼球運動など身体一部の様々な動きを利用するが、僅かな筋の動きによりデバイスを制御し、意思を表現しなくてはならない。近年、筋電信号に代わって歪ゲージや圧力センサなどを使用した有用性の高いものが提案されているが、このようなスイッチの汎用性を向上させるためには、使用時の違和感を避けることが重要となる。つまり、センサが小型で手軽に設置できることや、身体への接触を極力避けること、時間的な応答性能が良いことなどがその応用への条件として挙げられる。

一方、ヒューマンエラーの観点から考えれば、動作の遂行時間を短縮し、なお且つ動作精度を損なわないことが理想であり、作業者の動作の帰結を推定・予測し、遂行時間を短くしたとしても、正確さが損なわれないよう補正するような制御が求められる。ユーザ意図の理解したインテリジェントな制御の重要性が挙げられている。ユーザの意図を理解することは、支援を行う上で極めて重要であり、特に、高齢者や障害者への義肢や自助具といった機器の制御において、ユーザの状態を取得・解析し、そのユーザの意図を推定し、ユーザを支援するといった予測制御は非常に効果的であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、身体への接触を極力避け、時間的な応答性能が良いセンシング方法の検討(検討①)と、そのユーザの意図を推定し、ユーザを支援するといった予測制御に寄与するため、生体信号をもとにしたユーザの動作精度推定を行うための検討(検討②)、さらに検討②の結果を受け、リアルタイムでユーザの動作精度推定を行うシステムの試作、の3点を目的として、それぞれの目的に対し実験と検討(検討③)を行った。

(1) 検討①: 体表面上の磁界の変化に注目し、これを観察することにより、身体表面に直接接触しなくても衣類の上から筋活動を計測でき、且つ非常に小型で時間的な応答性能の

高いスイッチング方法の一つとして利用可能か検討することを目的とした。

(2) 検討②: 生体信号を用いて動作精度を動作開始前にある程度推定することが可能か、動作精度推定技術における新たな方法を検討した。特に、随意運動の計画過程を反映し、運動開始前の1~2秒程度前に発現するとされ、動作や作業の精度と関係性があることから工学的な応用が期待されている運動関連電位 (Movement-related cortical potential; MRCP) について検討することとした。

MRCPの課題として、アーティファクトが脳波に混在しやすいことや、MRCPと背景脳波の区別が困難であること、個人差があること等の理由から通常脳波計測後の加算平均により抽出されるため、リアルタイムでの解析は困難とされていることから、現実的な応用は現状でなされていない。

MRCPの現実的な応用を目指し、上肢による到達運動時において、運動関連電位と上肢の軌道選択などの動作過程、さらに動作の帰結である動作精度との関係性を調査しすることを目的とした。

(3) 検討③: MRCPの現実的な応用の妨げとなる課題を克服するため、判別機能と学習機能を有する教師付き機械学習機であるSVM(Support vector machine)によりMRCPの波形成分抽出の学習を行い、学習結果を用いてリアルタイムで動作精度を推定するシステムを試作することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 検討①における調査方法

一般的な動作中の筋活動に伴う磁界変化を観察する実験(実験1)、及びALSのような患者に用いられるスイッチングを想定した前頭筋の筋活動による磁界変化を捉える実験(実験2)、の2つを行うこととした。実験1では、動作量の変化と動作速度に対する磁界変化に関する2つの調査を行った。また、実験2では前頭筋上に設置したセンサによって筋活動の変化が観察可能か検証する実験を行うこととした。

実験1: 上腕の筋活動に伴う磁界変化の観察
センサは、磁気インピーダンスの変化を利用した高感度で小型の磁界センサを利用した。被験者には、健康男子大学生8名(平均年齢22.88歳、SD±0.99)を選択した。前腕を上げ下ろしする屈曲・伸展動作を繰り返すタスクを行わせた。その際、上腕二頭筋上に衣類を模擬して1mm程度のコットンを介して皮膚に直接触れないように磁界センサを設置し

観察することとした。動作量に対する磁界変化を観察するため、肘を中心に前腕を3段階の異なる角度(30度, 60度, 90度)に、動作速度は一定でそれぞれ10回ずつ屈曲・伸展動作を繰り返させる実験を行った。次に動作速度に対する磁界変化を観察するため、90度の屈曲・伸展動作の速度を3段階(2sec(0.5Hz), 1.5sec(0.67Hz), 1sec(1Hz))に変えてそれぞれ10回ずつ動作させる実験を行った。なおこの時、比較のために上腕二頭筋上に筋電図電極を磁界センサと併せて設置した。磁界センサからの出力信号と筋電信号は、1kHzでサンプリングし、磁界センサからの信号はサンプリング後に低域フィルタ(カットオフ周波数 $f_c=50\text{Hz}$)により交流ノイズ及び高周波成分を除去した。筋電信号は一般的なスイッチングに利用される処理と同様に、整流処理を行った後に低域フィルタ(カットオフ周波数 $f_c=0.5\text{Hz}$)により平滑化した。

実験2: 前頭筋の筋活動による磁界変化の観察

実験1と同様の被験者に対し、一定速度で10回程度前頭筋を動かすことにより、眉を上下させる実験を行った。磁界センサは先行研究を参考に、左眉中央の直上2cm付近に設置し、皮膚との接触を避けるため、実験1と同様の方法でセンサを設置した。また、リファレンスとして磁界センサのすぐ横に筋電図を設置した。さらに、動作量の大きさを計測するために、額の動きを動作解析することとした。また、動作速度に対する磁界変化については、実験1と同様に速度を3段階(2sec(0.5Hz), 1.5sec(0.67Hz), 1sec(1Hz))に変えてそれぞれ10回ずつ動作させた(図4)。動作量に対する変化については、実験1と異なり、動作量を統制することが困難なため、動作速度のみを対象に調査を行うこととした。なお、信号のサンプリング周波数やフィルタ処理については、実験1と同様の方法で行うこととした。

(2) 検討②における調査方法

指の動きを対象とした単純な到達運動による本質的な検討(実験3)と、現実的な運転動作を模した到達運動(実験4)の2つの調査を行うこととした。

実験3: 指の動きを対象とした到達運動

右手が利き腕の健康男子大学生8名(平均年齢22.1歳, $SD\pm 1.2$)を選択し、シールドルーム内で実験を行った。タッチパネル上に右手人差し指で触れると、その位置から300pixel 垂直上方に目標となる照準が表示される。その照準を目視で確認した後、その

照準の中心部に指を移動し再度触れる、という単純な到達運動を、50試行1セットとして計2セット行うこととした。

脳波は128ch脳波計(Geodesic EEG 128ch, Electrical Geodesics, Inc)を用い、サンプリング周波数1kHzで記録した。トリガは総指伸筋の表面筋電信号を用いることとし、指の動きは高速度カメラにより125fpsで撮影した。

目標となる照準の中心から画面に触れた位置までのずれを動作精度の評価指標とした。被験者毎にこのずれの平均値を算出し、この値を境に精度の良い群(A群)とそうでない群(B群)の2群に分けた。脳波については、筋電図トリガを基準とし運動開始前1500ms~運動開始後500msの計2000msの区間の脳波をそれぞれ加算平均し、2群を代表するMRCPをそれぞれ算出した。高速度カメラのデータも同様に2群に振り分け、それぞれの群に対応した軌道を算出した。

実験4: 運転動作を模した到達運動

右手が利き腕の健康な男子大学生10名(平均年齢22.9歳, $SD\pm 1.6$)を被験者として選択した。まず、被験者はコンピュータディスプレイ(XGA)の前に着座しハンドルを右手で握る。このとき、ディスプレイの中心にはハンドルと同期して動く十字のカーソルが表示されている。次に、この位置より左225pixelの位置にターゲットとなる照準が表示され、被験者はハンドルを左方向に動かしてターゲットにカーソルを一致させる。この動作を20回1セットとして計3セット行わせた。なお、カーソルの動きは1次系で時定数0.3sec, C/D比2に設定した。

脳波は実験3と同様のシステムと設定を用いた。また、トリガは右肩僧帽筋の表面筋電信号を用いることとし、カーソルの動きを100Hzで抽出してハンドル操作の動きを観察した。また、実験3と同様、目標となる照準とカーソルまでのずれを動作精度の評価指標とし、この平均値を境に精度の良い群(A群)とそうでない群(B群)の2群に分けた。それぞれの群に対応するMRCPも加算平均により算出し、カーソルの動きもそれぞれの群に対応した軌道を実験3と同様に算出した。

(3) 検討③における検討方法

MRCPの成分を指標として用い、さらにMRCPの問題点である個人差に対応するため、SVM(Support Vector Machine)により教師付き学習を行い、リアルタイムでMRCPのNSの状態を確認し、動作開始直前にその後の動作精度を推定するシステムをLabVIEWにより試作することとした。入力信号をBP+ISとNS'の

勾配の比, 出力信号を動作精度, 教師信号を実際の動作精度とし, 出力信号と教師信号が異なった場合に SVM のパラメータを変化させ学習を行ない, 学習結果を用いて試行 1 回ごとの MRCP 波形の判別を行うこととした。

4. 研究成果

(1) 検討①における結果

実験 1: 図 1 は, ある被験者が肘を 90° , 10 回屈曲・伸展したときの 上腕二頭筋上の筋電図 (図 1a) と, 上腕二頭筋上の磁界変化 (図 1b) を示したものである。濃い網掛けの部分 が前腕を持ち上げる屈曲動作時の磁界変化を示し, 薄い網掛け部分が前腕を降ろす伸展動作を示している。肘を中心に前腕の屈曲・伸展動作をすると筋電図は明確に反応し, この動作に対して磁界も明確に変化していることが確認できる。前腕を屈曲させると同時に筋電図の振幅も増加し, これに併せて磁界の値も増加する。また, 伸展させると同時に筋電図も活動が収まり, 磁界変化も減少している。

また, 筋電図をスイッチング等を利用するための平滑化処理を行った後の波形が図 1c) である。これを見ると, 磁界センサの出力 (図 1b) と極めて似た変化を示していることが見てとれる。また, 筋電図は低域フィルタの処理を行った際の時定数分の遅れが見てとれるが, 磁界センサの変化を見ると前腕の屈曲・伸展動作のタイミングに遅れはほとんど見られなかった。したがって, 時間応答性も高いことが確認できた。このような変化は, すべての被験者に見られたことから, 磁界変化を捉えることの有意性があると考えられる。そこで, 実験 1 における動作量と動作速度を検討するために以下のように考え, 自動解析システムを作成し調査を行った。その結果, 動作量については図 2 のような結果を示した。すべての被験者において, 動作量に対して非常に明確な線形関係を示すと共に, 極めて強い相関を示した。さらに, 動作速度についても動作量と同様に, 振幅の傾きは極めて強い線形の相関関係を示した。このことから, その線形関係性と明確な変化, さらに強い相関性を示したことから, 磁界変化は実際の利用に適していると考えられる。

実験 2: 次に前頭筋の微小な動きよる筋活動を計測し, スwitching として利用可能か検討した実験を行った。その結果, 動きが微小であるため磁界変化も実験 1 の場合と比較して値が小さく, また分散も比較的大きくなることが分かったが, その変化はやはり極めて強い線形の相関性を示していることが確認

できた。

以上, 身体表面に直接触れずに筋の活動状態を捉える計測方法を, 機器制御を目的としたスイッチング方法の一つとして検討した。その結果, 磁界の変化は, 動作量にも変化の速度に対しても極めて高い線形性を示したことから, 身体表面に直接触れずに筋の活動状態を捉えるスイッチング方法の一つとなりうることを示した。直接皮膚に触ることなく, 衣類を介して筋活動を推定できることや, 時間的な応答性に優れている点, また極めて微小な変化に対しても線形性は崩れずに反応していることなど, 筋の活動状態を把握する上で実用上好ましい計測手法であると考えられる。

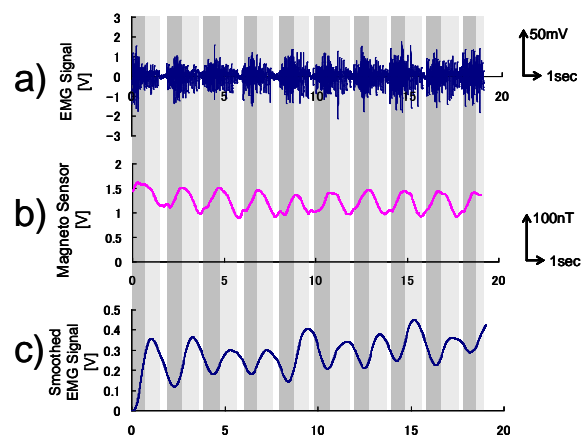


図 1 実験 1 における前腕の動きに対する筋電図及び磁界の変化

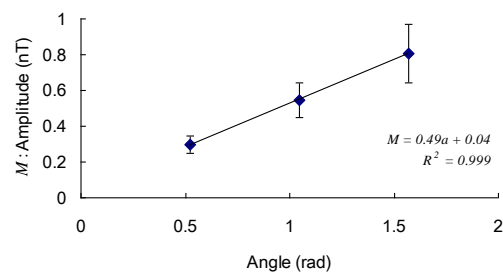


図 2 動作量と磁界変化の関係

(2) 検討②における結果

実験 3: 図 3 は, ある被験者の A, B 群それぞれに対応する Fz における MRCP を算出したものである。この図では, BP (動作開始前 1500msec~900msec 付近), IS (動作開始前 900~500msec 付近) においては差異が確認できないが, 動作開始 500msec 前から発生する NS については, その勾配が A 群の方が急峻であることが確認された。すべての被験者において同様の傾向が認められ, 図 4 に示すように Fz だけでなく Cz でも有意差が認められた。

実験 4：実験 4 についても実験 3 と同様、動作精度を基準として 2 群に分けたが、今回のタスクのカーソルの動きが直線的で、またカーソル動作の設定も単純であったため、実際は動作精度に明確な違いが見出せず 2 群に分類することが困難であった。そこで、今回は主に動作過程との関係を考えることとし、その基準として躍度最小化規範を用いることとした。結果として実験 1 と同様、NS の勾配に明確な違いが、特に Fz において明確に現れた。この変化は 10 人中 8 名で確認され、Fz においては有意差が確認できた。

以上、MRCP、動作過程とさらに動作精度との間に一定の関係性が認められ、また MRCP と動作過程に一定の関係性が得られた。いずれも NS の傾きが大きい場合、動作過程や動作精度が良くなる傾向が確認できた。MRCP は運動計画を反映していると解釈されていることを考慮すれば、NS の勾配が大きい場合、より良い運動計画がなされていると考えられる。この意味合いとしては、理想的な運動を行った結果が動作精度に影響を与え、動作過程と動作精度を関係付けたと考えられる。

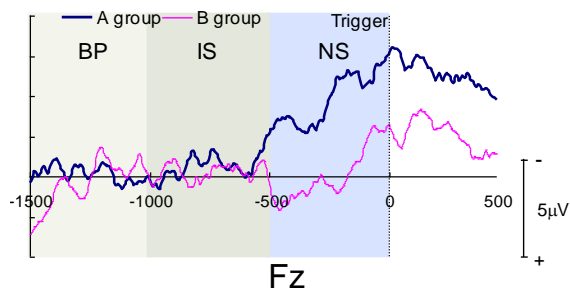


図 3 動作量と磁界変化の関係

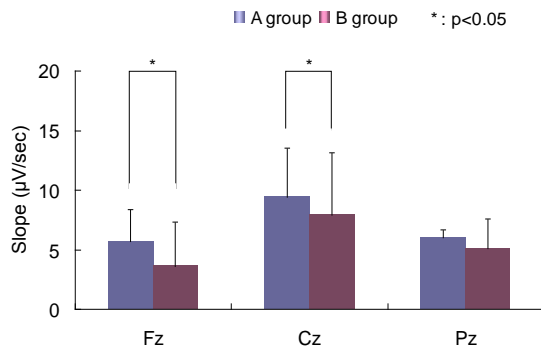


図 4 動作量と磁界変化の関係

(3) 検討③における結果

図 5 は LabVIEW 上で試作したシステムである。脳波の計測部位や訓練セット数による判別精度の比較、さらに SVM 以外の判別分析手法との比較検討を行い、最適な設定を行った。結果、動作精度の推定精度は平均で 70%程

度となったが(表 1)、一般に障害者の自立支援を目的とした BMI などの研究では、実用可能は水準は 60~70%程度とされており、また、大脳皮質に直接ワイヤーを取り付けた侵襲的な方法を検討した研究でも、信号抽出の成功率は 70%となっていることを考慮しても、今回の 70%程度の結果はほぼ妥当な結果と考えられる。

また、MRCP の特徴として、動作の計画段階の活動の反映とされていることから、動作開始以降の修正運動に関しては今後検討が必要と考えられる。エラーを反映するとされるエラー関連陰性電位 (Error Related Negativity) といった動作開始後の波形を用いることにより、今後精度を向上させることが可能であると考えられる。

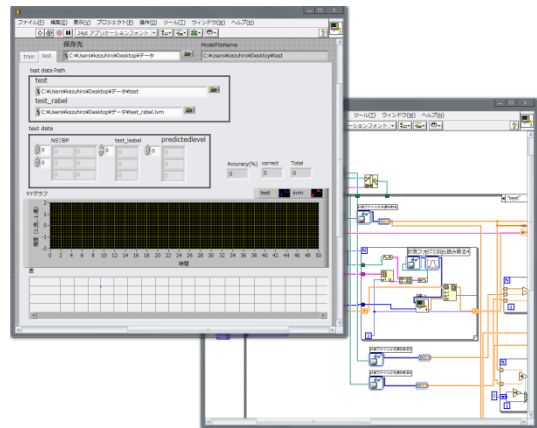


図 5 試作したシステム

表 1 試作システムによる動作精度の推定精度

Subject	Results(%)
S ₁	72.5
S ₂	75
S ₃	70
S ₄	40
S ₅	77.5
S ₆	82.5
S ₇	65
S ₈	62.5
Average	68.13
SD	13.08

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Satoshi Suzuki, Takemi Matsui, Yusuke Sakaguchi, et al. The possibility of determination of accuracy of

performance just before the onset of a reaching task using movement-related cortical potentials. Medical & Biological Engineering & Computing, 48(9):845-52, 2010.

[学会発表] (計7件)

- ①鈴木哲, 坂口有亮, 松井岳巳, 三ヶ尻健太郎, 運動関連電位と動作過程及び動作精度の関係についての調査研究, 日本人間工学会誌第44巻特別号, pp. 324-325, 2008.
- ②Satoshi Suzuki, Takemi Matsui, et al., On the Possibility About Performance Estimation Just Before Beginning a Voluntary Motion Using Movement-Related Cortical Potential, J.A. Jacko (Ed.): Human-Computer Interaction, Part I, HCII 2009, pp. 184-191, 2009.
- ③Satoshi Suzuki, Takemi Matsui, et al., An approach for the task performance estimation using biological signals just before and after the onset of voluntary motion, ICCAS-SICE 184-191, 2009.
- ④Satoshi Suzuki, Takemi Matsui, Yususke Sakaguchi, Kazuhiro Ando, On extraction and usage of the negative slope in movement-related cortical potential intended for the performance estimation, Clinical Neurophysiology, Vol.121, Supplement 1, p. 320, 2010.
- ⑤坂口有亮, 鈴木哲, 安藤一裕, 菅原慶太郎, 松井岳巳, 手動制御系インタフェースにおける動作精度と運動準備電位との関係性について-予測制御への応用に向けて-, 日本人間工学会誌, 第46巻特別号, pp. 128-129, 2010.
- ⑥溝口翔一, 松井岳巳, 鈴木哲, 到達運動時における動作と運動関連電位およびエラー関連陰性電位との関係性について, 人間工学会関東支部会, pp. 31-32, 2010.
- ⑦安藤一裕, 鈴木哲, 菅原慶太郎, 溝口翔一, 松井岳巳, リアルタイムによる運動関連電位の判別とその応用に関する研究, 人間工学会関東支部会, pp. 58-59, 2010.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 筋活動測定装置, 筋活動測定システム, 意思検出システム, 筋疲労測定システム, 運動機能測定システム, 心拍測定システムおよび自立行動支援システム

発明者: 鈴木哲, 松井岳巳, 三ヶ尻健太郎

権利者: 首都大学東京理事長

種類: 特許

番号: 特開 2008-221492

出願年月日: 2008年8月29日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 哲 (SUZUKI SATOSHI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号: 50306502

(2) 研究分担者

松井 岳巳 (MATSUI TAKEMI)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号: 50404934