

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：52101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23612

研究課題名(和文) 運動性ではなく皮膚感覚性の脳波活動を利用したロボット運動制御BMI

研究課題名(英文) Somatosensory EEG based brain-machine interface for robot control

研究代表者

澤畑 博人 (Sawahata, Hirohito)

茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・准教授

研究者番号：40571774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：重篤な運動機能障害を持つ患者を支援するための技術として、脳波に含まれる皮膚感覚性の事象関連電位に基づいてロボットを制御するブレインマシンインタフェースを提案している。被験者9名を対象とした実験で、手指に感覚刺激を加えた際に後頭部から得られる脳波応答の15-120 Hz信号成分を判別指標として用いると、サポートベクタマシン法を用いて指に対する意識的注意の有無を正答率83%で判別可能であることを明らかにし、仮想空間のロボット手を制御することにも成功した。また、患者の麻痺手指を能動的に動かすロボットグローブの製作も行った。以上、提案手法を用いたブレインマシンインタフェースの有効性が実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットの手指を個々に制御可能なブレインマシンインタフェースはこれまで、侵襲的な脳計測法を用いて得たスパイク信号や局所フィールド電位信号を用いた方法で実現されており、患者の負担が少ない非侵襲的に計測される脳波を用いて実現することは従来困難であったが、本研究では運動性ではなく感覚性の脳波信号を利用することで実現できることを実証した点において学術的意義がある。また、ロボットのみならずPC上のさまざまなアプリケーションを制御可能であることも実験で確かめられた。将来、全身麻痺の患者が自分の意思で多様な機器を操作し自律的な生活を送れる可能性があり、福祉分野に大きく貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：To develop the brain-machine interface (BMI) for artificial limb control, we focused the tactile sensory electroencephalogram changes due to conscious attention to body parts. Using the support vector machine (SVM), we examined whether it was possible to distinguish between the case where only one of the sensory stimuli for the thumb and index finger was consciously paid attention and the case where it was not. As the results, in based on 16 - 120 Hz signal components from occipital recording site, maximal accuracy of 83% was obtained. It was suggest that the tactile sensory response could be used to the BMI. Actually, the robot hand control BMI was simulated and succeeded in achieving the intended behavior. Therefore, the feasibility of the brain-machine interface using the proposed method was demonstrated.

研究分野：生体医工学

キーワード：ブレインマシンインタフェース 運動機能障害 体性感覚 脳波 事象関連電位

1. 研究開始当初の背景

筋ジストロフィー症や筋委縮性側索硬化症 (ALS) 等の疾患によって運動機能に障害を持つ患者は全国で約 436 万人に上ると推定され、特に日常生活に不可欠な四肢の運動機能に障害がある場合には、患者自身の生活の質 (QOL) が著しく低下するばかりか、家族や介助者の負担増加が大きな問題となっている。この解決策として期待されるのが、脳活動の信号を利用して電動義手などを患者の意思通りに制御するブレインマシンインタフェース (BMI) の技術開発である。BMI の研究開発において、脳計測の安全性と実現可能な制御性能にはトレードオフの関係がある。電動義手などのロボットを脳活動に基づいて制御することを目的とした多くの先行研究では、脳活動信号から身体末梢へ送られる運動コマンドを推定し、これをロボット制御のコマンドに変換して用いる。この際、例えば手の五指それぞれ独立の運動コマンドを推定するには、大脳皮質運動野の微細な機能マップ (数 mm スケール) に対応する高い空間分解能での信号計測が必要である。このため主な先行研究では、外科手術で脳組織に埋め込んだ電極によって直接的に信号計測を行う侵襲型脳計測法が用いられた。しかしながら安全性についての疑問が指摘されている。一方、非侵襲型である脳波計測は安全性が高いが十分な空間分解能が得られないため、BMI への応用には性能の限界があった。非侵襲的な脳計測を用いて多自由度のロボット制御を行うには根本的なアプローチの転換が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、運動関連電位ではなく、感覚関連の脳波信号に含まれる事象関連電位 (event related potential; ERP) の性質に着目し、これを用いた BMI の新しい原理を考案した。ERP とは、感覚刺激に対する脳波応答のうち、特定の刺激部位あるいは刺激条件への意識的注意 (Attention) の有無によって変調を受ける脳波成分である。図 1 の例において、人差し指 (第 2 指) に意識的注意を向けていることによって刺激されたときに ERP が検出される。即ち、ERP が検出されるか否かによって、その部位に意識的注意が向けられているか否かを判別することが可能であるため、これに基づいて外部機器を制御できれば BMI へ応用することが可能であると考えた。そこで本研究では、この原理に基づいた BMI の実現に向けて、意識的注意の有無を判別するための指標として有効な ERP の検出及びその周波数帯域を明らかにし、BMI への応用可能性について検討することを目的とした。

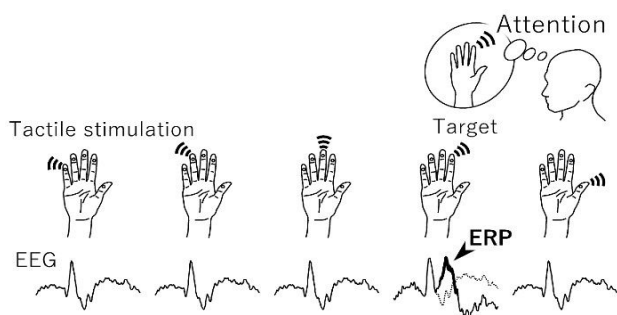


図 1 ブレインマシンインタフェースの提案原理

3. 研究の方法

(1) 感覚刺激および計測システム

皮膚感覚関連の脳波活動を誘発し計測するために、皮膚感覚刺激装置、脳波計、計測用 PC からなるシステムを構築した。皮膚感覚刺激装置は、PC から出力したパルス信号をドライバ回路で増幅し、電磁式振動子を振動させて被験者の指先の皮膚を感覚刺激する。手指の 2 か所を別々に刺激することが可能なように、2 つの刺激装置を独立して駆動できるようにした。また、刺激タイミングは脳波信号との同期のために PC に記録された。脳波計は、無線式の脳波計 (Artisebio 社、Altaire) を頭部に装着して脳波を測定した。計測部位は Fp1、Fp2、Fz、T7、T8、Pz、O1、O2 の頭部 8 か所から、サンプリング周波数 1 kHz で計測した。

(2) ヒト被験者を対象とした脳波計測実験

被験者を対象とした脳波計測実験を健康な成人男性 9 名の協力を得て行った。被験者は頭部に脳波計を装着し、シールドルームの中にある椅子に着席して、刺激装置の振動子の上に右手の親指 (第 1 指) と人差し指 (第 2 指) を置いた。皮膚感覚刺激は、刺激装置の振動子を 10 [ms] の短い持続時間 400 [Hz] で振動を発生させた。被験者の右手の親指と人差し指にそれぞれランダムな順序で刺激を与え、時間間隔も 1~2 [s] の間でランダムなタイミングとし、被験者が刺激を予測することができないようにした。親指と人差し指にそれぞれ 30 回ずつ刺激が加えられる約 90 秒間の計測 1 セットとした。

被験者に課すタスクとして、実験者によって指定された特定の指への刺激に対して意識的注意

を向けるよう指示された。意識的注意を向ける部位を親指とした場合と人差し指とした場合、それぞれ交互に3セットずつ実施した。意識的注意の仕方を明確にするために、指定された指が刺激された回数を頭の中でカウントするように促し、計測後に正しい回数から大きく外れていた場合を除いて、その計測データを解析対象とした。本研究で実施したヒトを対象とした実験は、茨城工業高等専門学校の倫理委員会により承認を受け、被験者の健康と安全、個人情報保護に留意して実施した。

(3) 機械学習による意識的注意の判別

指定部位への感覚刺激に対して意思的注意を向けている条件 (Attended) と向けていない条件 (Unattended) を脳波の応答波形から識別するためのアルゴリズムとして、少ない学習データで汎化性能が得ることが可能な機械学習の一手法である Support Vector Machine (SVM) を用いた。SVM は、クラスを識別するための境界を描く機械学習モデルの一種であり、境界に最も近いデータまでの距離 (サポートベクターの大きさ) を最大化するマージン最大化を実行することによってデータが識別される。汎化性能を向上させるために、パラメータとして Gaussian カーネルを使用し、高次元空間で分類器を学習する方法を使用した。Attended 条件および Unattended 条件のラベルを付加した刺激後 200~600 ms 間の信号データをモデルの学習に用いた。

4. 研究成果

(1) 平均波形解析

計測された脳波データについて、皮膚感覚刺激に対して意識的注意がある場合 (Attended 条件) と意識的注意がない場合 (Unattended 条件) による違いを調べるために加算平均法、および短時間フーリエ変換 (STFT) を用いたスペクトル解析を行い、Theta (4~8 Hz)、Alpha (8~12 Hz)、Beta (13~30 Hz)、Gamma (30~60 Hz)、High-gamma (60~120 Hz) と、周波数成分帯域に分けて解析することで詳しく調べた。解析プログラムは python で作成して用いた。また、意識的注意の有無の条件による脳波成分各値の差について、t 検定 (Student's unpaired t-test) を用いて水準 $p < 0.1$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ で有意差があるか否か検証した。

手指への皮膚感覚刺激に対する脳波応答を検出するために、刺激されたタイミングを基準とした加算平均法を用いて解析した。ハムノイズによる影響を軽減するために 50 [Hz] のノッチフィルタを施したあと、刺激の前後 0.5 [s] ずつ計 1 秒間の波形を切り抜き、Attended と Unattended の条件ごとに平均化した。左後頭部 (O2) の計測部位で得られた波形の解析結果を図 2 に示す。O2 の波形 (図 2 上) においては、刺激後 0.12 [s] 付近で Attended 条件の振幅が Unattended 条件よりも振幅が大きい傾向があった。しかしながら、t 検定の結果では両者とも統計学的な有意差は認められなかった。また、一般的に ERP (P300 応答) が現れるといわれる 0.25~0.35 [s] の間の平均値についても比較したが、統計学的な有意性は認められなかった。

(2) 時間-周波数スペクトログラム解析

次により詳細な解析を行うため、短時間フーリエ変換 (Han window function of time width of 400 ms、calculation step 1 ms) を用いて時間-周波数領域ごとの信号パワーを計算し、Attended と Unattended のそれぞれの条件でスペクトログラムを作成した。その際、各周波数において、刺激前の 0.2 [s] 分の平均パワーで全体をノーマライズし、刺激によるパワーの増強または減弱を強調して示し、Attended と Unattended の条件ごとに平均化されたスペクトログラムを図 2 の各中段と下段に示す。各スペクトログラムの横軸は刺激のタイミングを 0 [s] とした経過時間、縦軸は信号の周波数を表し、信号のパワーをカラースケールで表した。解析の結果、O2 のスペクトログラムでは Attended 条件では刺激後 0.25 [s] の周波数約 30~60 [Hz] (Gamma 帯域)、0.4 [s] の約 100 [Hz] (High Gamma 帯域) に信号パワーの増強がみられ、Unattended 条件では増強が見られなかった。

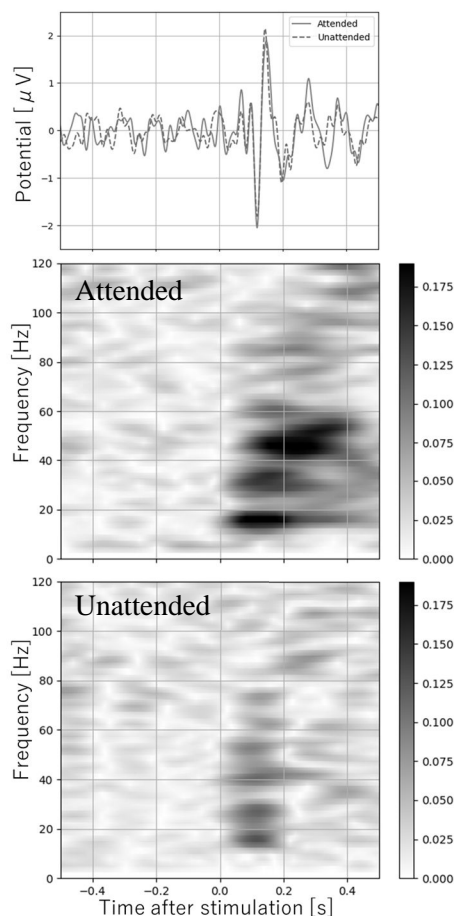


図 2 感覚応答の平均波形とスペクトログラム (計測部位 O2)

(3) SVM法を用いた判別とロボットハンド制御

上記の解析結果に基づき、脳波の各帯域の信号を教師信号として用いて SVM によるモデル学習を行い、判別性能をホールドアウト検証(学習データ 90%、テストデータ 10%)し、モデルを評価する指標として、指定した値と真の値が一致した割合である正確度 (Accuracy) を算出した。評価の結果、High gamma 帯域を用いた場合において、体部位への意識的注意の有無の正確度が最大 83% (チャンスレベル 50%) で判別できた。低周波帯域は高周波に比べて、全被験者間のばらつきが少なく、安定した結果となった。

計測した脳波のオフラインデータを実時間で読み込み、上述の条件による SVM 判別器を用いてロボット義手を制御する BMI のシミュレーションを行った。まず、親指と人差し指への感覚刺激を各 60 試行与える実験で、意識的注意を親指とした条件と人差し指とした条件の脳波データを SVM の学習に用いて判別モデルを作成した。この際、脳波の Gamma 帯域 (30-60 Hz) 信号の包絡線波形を用いた。次に、学習データ取得の約 2 分後に計測した計 250 試行のデータをテストデータとして用いた。義手ロボット制御プログラムの仕組みとして、感覚刺激への脳波応答波形に対して SVM 判別器が "Attended" (刺激に対して意識的注意が向けられている) と判別した

場合には、感覚部位が親指であればロボットの親指を屈曲し、刺激部位が人差し指であればロボットの人差し指を屈曲させた。また、"Unattended" (刺激に対して意識的注意が向けられていない) が判別された場合にはロボットの手指を伸展させた。シミュレーションの結果、被験者が感覚刺激に対して意識的注意を向けていた手指に対応して、ロボットの手指は屈曲と伸展の動作を繰り返し起こした。一部、十分な屈強動作が起こらなかったり、逆の動作を起こしたりする誤動作も見られたが、概ね意図した挙動をしめした。

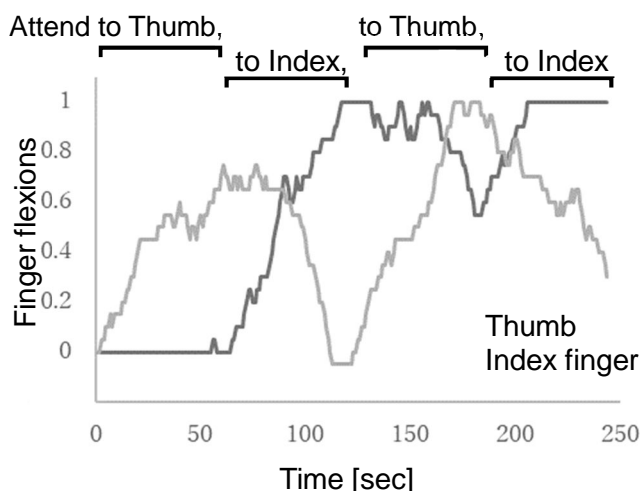
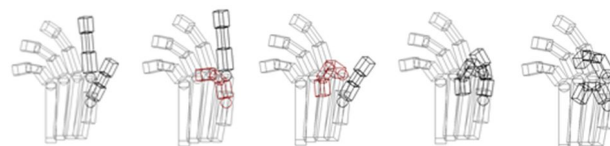


図3 提案手法を用いた仮想空間のロボットハンドの制御

(4) 結論

本研究の実験と解析によって、皮膚感覚刺激に対する意識的注意の有無を脳波応答から判別するための指標となる

信号成分の特定に成功した。また、この信号に基づき、SVM 機械学習を用いた体部位への意識的注意の判別が最大正答率 83% の性能で実現できることを実証した。また、これを利用した BMI のデモンストレーションとして、義手ロボットの制御シミュレーションにも成功した。空間解像度が低い非侵襲的な脳波計測を用いて、手指を個別に制御することが可能であり、運動障害を持つ患者の運動機能を代替する支援機器として発展されれば、福祉分野へ大きく貢献できることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坂本駿太, 今野大輔, 高村陸, 澤畑博人
2. 発表標題 脳波を用いたブレインマシンインタフェースによるコンピュータアプリケーション制御
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会, 18a-A401-8
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 舟生蓮, 澤畑 博人
2. 発表標題 時空間2次元フィルタを用いた生体電気信号の伝搬成分検出技術
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会, 24p-E203-7
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高村陸, 今野大輔, 澤畑博人
2. 発表標題 義手ロボット制御ブレインマシンインターフェイス応用に向けた 皮膚感覚性脳波活動のスペクトル解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会, 19a-Z32-4
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今野大輔, 高村陸, 澤畑博人
2. 発表標題 機械学習を用いた皮膚感覚性脳波応答からの意思解読とロボット制御ブレインマシンインタフェースへの応用検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会, 19a-Z32-5
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤畑 博人
2. 発表標題 Visualization of the propagation vector of neural activity using the triangle-arranged microneedle electrode cluster.
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関