

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K21290

研究課題名（和文）ハイブリッドBMI型下肢リハビリテーションシステムの開発

研究課題名（英文）Development of Lower Extremity Rehabilitation System based on Brain Machine Interface Using Event-Related Desynchronization and Visual Evoked Potentials

研究代表者

荒木 望 (Araki, Nozomu)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10453151

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脳波からの運動企図判別を用いた下肢リハビリテーションシステムの高度化を目指し研究を行った。

我々は当初、脳波に生じる事象関連脱同期と呼ばれる現象をから運動企図の有無を判別していたが、これに加え、メニュー選択インターフェースなどで一般的に用いられる一定周期の視覚刺激による視覚誘発電位を同時に利用することを試みた。その結果、事象関連脱同期および視覚誘発電位のいずれもの特徴量を同時に利用可能であることを示唆する結果を得た。さらに本研究では、新たな視覚誘発電位利用インターフェースの検討やヘッドマウントディスプレイを利用した直接運動刺激を行わないリハビリテーションシステムについての検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では事故などで下肢運動麻痺となった患者さんに対するリハビリテーション手法として、脳波から運動意図を推定し、運動意図に応じて麻痺患部に運動刺激を与える装置と、これを実現するための関連技術の検討を行った。特に本研究では運動意図の有無によって生じる脳波と視覚刺激を行うことで生じる脳波を同時に利用できるかについての調査を行い、同時利用が可能であることを示唆する結果を得た。この結果を利用することで脳波からの状況判別をより柔軟に行える可能性があり、今後、脳波を利用したリハビリテーションシステムの制御に利用できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we considered to develop and improve lower extremity rehabilitation system based on detected movement intentions by electroencephalogram.

In an early stage of this study, we detected user's motor intention by using so-called event-related desynchronization phenomenon in electroencephalogram. In addition to this, we attempted to simultaneously use visual evoked potentials expressed by constant-period visual stimuli, which are commonly used in menu selection-type brain computer interfaces. The experimental results were shown that both event-related desynchronization and visual evoked potentials can be used simultaneously as feature values for interface. Furthermore, we also investigated a novel visual evoked potential based interface and a rehabilitation system without direct motor stimulation using a head-mounted display.

研究分野：ブレインコンピュータインターフェース

キーワード：事象関連脱同期 視覚誘発電位 リハビリテーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、事故などによる脊髄損傷によって中枢神経を損傷し運動機能を麻痺した患者さんに対して、適切な運動刺激を与えることにより神経回路の再構築を促し運動機能の回復を目指すリハビリテーション手法が注目されている。本研究では、この運動刺激を行う適切なタイミングを測る手法として運動時に頭頂部付近の脳波に発現する事象関連脱同期と呼ばれる現象を利用したブレインマシンインタフェース (Brain-Machine Interface: BMI) と、これを利用した足こぎ車椅子型下肢麻痺患者向けリハビリテーションシステムについて検討を行ってきた。

研究開始当初の時点で、我々の研究で構築した運動企図判別アルゴリズムは実際の下肢麻痺患者さんを対象とした実験においても 80%程度の正答率で運動企図の有無を判別できており、この判別結果に応じて動作する足こぎ車椅子型下肢リハビリテーションシステムの試作機の構築・動作確認を行っていた。

2. 研究の目的

研究開始当初の時点で構築したシステムにおける問題点は大きく分けて以下の2点であった。

(1) 運動企図判別アルゴリズムには事象関連脱同期と呼ばれる現象を利用しているが、この手法では2つ以上の事象(足こぎ運動企図の有無)以外の事象や運動強度を判別することが困難である。

(2) 足こぎ運動を与える装置については目標値追従型の制御則を使用しているが、運動麻痺患者が反射による突発的な動作などにより装置の動きに反発した場合、必要以上の力を使用者に与えることとなり危険を伴う。

本申請課題はこれらの問題を解決するために、新たな動作判別手法および安全な運動刺激装置(手法)を確立することが目的である。このため、具体的には

(1) 動作判別の特徴量として使用している事象関連脱同期に加え、ブレインコンピュータインタフェースでしばしば用いられる視覚刺激を利用した定常状態視覚誘発電位を併用したハイブリッド型 BMI の検討

(2) 足こぎ運動を患者の幹部に与える装置に対して、安全な制御方法あるいは直接運動刺激を与える装置の代替となる手法に関する検討

の2点に関して研究を行った。

3. 研究の方法

はじめに、(1)の動作判別の特徴量として使用している事象関連脱同期に加え、ブレインコンピュータインタフェースでしばしば用いられている視覚刺激を利用した定常状態視覚誘発電位を用いたハイブリッド型 BMI の検討については、はじめにエルゴメータによる足こぎ運動時にチェッカーボードパターンを用いた視覚刺激を同時に行う実験(図1)を実施し、その際の脳波の事象関連脱同期の発現にどのような影響が生じるかの調査を行った。また、この実験の結果、視覚刺激を行った状態で脳波の事象関連脱同期から動作判別を行えることが確認できたため、さらなる識別性能向上のために視覚誘発電位取得時の視覚刺激方法の検討を継続して行った。視覚刺激方法については研究内で調査を行ったところ、視野の左右に異なる周波数の刺激パターンを提示することで生じる脳波の強度分布を利用することでパターン分類数を増やす方法が提案されていることを確認した。このため、本研究ではこの手法を基礎とした新たな視覚刺激利用インタフェースについての検討を行った(図2)。

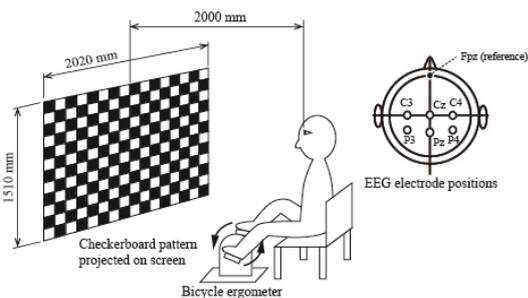


図1 運動と視覚刺激による特徴量の同時計測実験

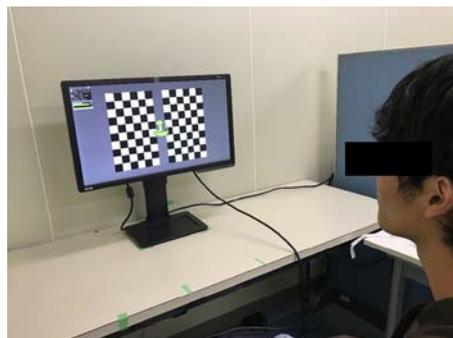


図2 左右視野独立刺激型インタフェース実験の様子

(2)の足こぎ運動を患者の患部に与える装置に対して、安全な制御方法あるいは直接運動刺激を与える装置の代替となる手法に関する検討については、大きく分けて2つの検討を行った。1つ目は制御方法の検討として、受動速度場制御と呼ばれる手法の適用について検討を行った。これは、従来の目標位置設定型の制御の場合、制御対象が目標値に向かって動作している途中で障害物などに接触し運動を妨げられたときに目標値との誤差を修正するために突発的に過大な入力を与えられる一方で、目標を速度場として設計することによりこのような突発的変化が生じないようにする手法の一つである。本研究ではこの受動速度場制御を足こぎ装置に適用し、その有効性について検証を行った。また、合わせて脳波測定を簡便化するための計測用電極についての検討も行った。さらに、直接運動刺激を伴わない装置の検討として、ヘッドマウントディスプレイによる仮想空間上での運動状態提示と、仮想空間上の身体に対する身体所有感、運動主体感および脳波の発現についても調査を行った。

4. 研究成果

まず、(1)のハイブリッド型ブレインコンピュータインタフェースに関する検討で行った運動と視覚刺激による特徴量の同時計測実験については、運動時、静止時ともに視覚刺激による定常状態視覚誘発電位は発現することが分かった。一方で、視覚刺激の周波数によっては動作判別の特徴量として利用している事象関連脱同期の発現率が特に視覚刺激周波数が 8~10 Hz で減少する傾向が見られた(図3)。このことから、脳波の定常状態視覚誘発電位と事象関連脱同期は一般に視覚刺激として用いられている 15 Hz 以上の刺激周波数であれば同時に利用可能であり、視覚刺激により脳波を用いて動作判別だけでなく機器の制御なども同時に行える可能性を示すものである(本成果の詳細は①にて報告)。

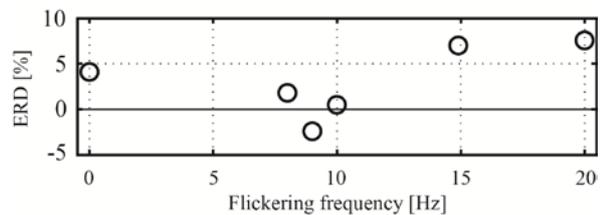


図3 視覚刺激周波数(横軸)と事象関連脱同期発現強度(縦軸)との関係

また、上記の結果から事象関連脱同期と視覚誘発電位が同時に利用可能であることが明らかとなったため、本研究では新たな視覚刺激型インタフェースの検討として、左右視野を独立に刺激するインタフェースの検討を行った。これは視野の右側・左側を独立に刺激すると、脳の視野角の左側・右側で視覚誘発電位が増加するという反応部位の違いを利用するものである。図2のような実験を行って視野の左右差を確認したところ、明確な差異が現れることを確認した。また、この特徴を利用したインタフェースを構築し、1つの刺激周波数で左側のみ刺激、右側のみ刺激、両側刺激の3つの状態をパターン分類に利用できることを確認した(本成果の詳細は②, ③, ④にて報告)。さらに、このインタフェースについてはさらなる発展が見込まれることから、科学研究費助成事業(基盤研究(C), 課題番号 19K04298)で継続して調査を行う。

次に、(2)の運動刺激装置に関する検討としては、制御に関する検討として足こぎ装置に受動速度場制御を適用し、足こぎ時に想定以上の負荷が生じた際には足こぎペダルの動作を停止し、負荷が除去された後は設定した回転速度まで緩やかに戻るような制御系を設計した。本手法については足こぎ装置のペダルに意図的に負荷を与える実験を行い、良好に動作することを確認した(本成果は本学の修士論文としてまとめているが、外部への発表は行っていない)。また、これと合わせて脳波測定を簡便化するための計測用電極についての検討を行った。通常、脳波の測定に誘発電位測定用皿電極を使用しているが、この電極は使用時に固定と皮膚インピーダンスを下げるための導電性ペーストを用いる必要があり、使用者に対する負担が大きい。そこで本研究では頭皮に直接電極を設置するだけで測定可能なアクティブ・ドライ電極システム(Polymate Mini AP108)の使用を検討した。この電極は剣山型の接触子を頭皮に押し当てて測定を行うが、測定時に痛みを伴うため、痛みを低減するための新たな接触子と電極固定用ヘッドマウントの試作および検証を行った(図4)。試作した接触子については痛みが少なく、閉眼時に発現する α 波を対象とした測定実験により良好に脳波が取得できていることを確認した(本成果の詳細は⑤, ⑥にて発表)。



図4 試作したアクティブ電極固定用ヘッドマウント(左)と接触子(右)

さらに、直接運動刺激を伴わない装置の検討として、ヘッドマウントディスプレイによる仮想空間上での運動状態提示と、仮想空間上の身体に対する身体所有感、運動主体感および脳波の発現についても調査を行った。この調査ではヘッドマウントディスプレイおよびモーションセンサを用いて、仮想的な身体を提示するシステム(図5)を構築した。この仮想的な身体は実際の

動きと 100ms 程度の遅延で同期させることができ、また、任意の動作を提示することも可能である。このことから、運動麻痺患者さんなどに対して実際の身体を動作させる代わりに、本システムで仮想的な身体の動作を提示することが可能である。本システムを用いて、実際の運動を伴わずに仮想空間上の足が動作している映像を提示する実験を行ったところ、実動作を伴う場合よりも発現強度は小さいものの、事象関連脱同期が生じていることを確認した。これはヘッドマウントディスプレイのようなシステムを利用することで、実動作を伴わないリハビリテーションシステムを構築できる可能性を示唆するものである。さらに、実動作と提示動作の遅延時間を大きくすることで意図的に運動主体感を減少させるような実験を行い、事象関連脱同期の発現率との関係を調査した。これは事象関連脱同期の発現によりヘッドマウントディスプレイを使用したときの遅延による違和感を定量化することを試みたものである。アンケートの結果からは遅延による違和感が生じている明らかになったものの、今回の結果から違和感と事象関連脱同期の発現率には明確な関連が見られなかった（本成果の詳細は⑦にて報告）。このシステムについては今後継続して評価を行っていく予定である。

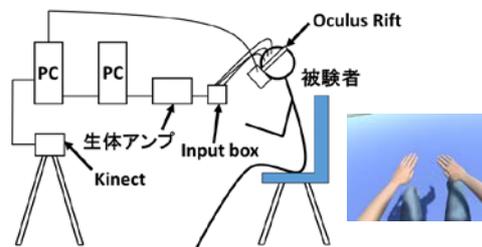


図 5 ヘッドマウントディスプレイとモーションセンサを用いた仮想身体動作提示システム

<引用文献>

- ① S. Sakata, R. Ijiri, N. Araki, S. Nakatani, Y. Konishi and K. Mabuchi, Evaluation of Steady State Visual Evoked Potential by using Corresponding Frequency Band of Movement-Related Desynchronization, 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016 (第 31 回生体・生理工学シンポジウム), 2016, pp.158-159
- ② 阪田真也, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦, 定常視覚誘発電位と視点に対する空間情報を利用したインタフェースの検討, 平成 29 年度日本人間工学会関西支部大会, 2017, pp.95-96
- ③ 菅野将輝, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦, 視点に対する空間情報を用いた視覚誘発電位利用選択インタフェースの検討, 平成 30 年度日本人間工学会関西支部大会, 2018, pp.66-67
- ④ 菅野将輝, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦, 視点に対する視覚刺激位置と視覚誘発電位の発生部位に関する検討, 2019 年度日本人間工学会関西支部大会, 2019, pp.75-76
- ⑤ 井尻蓮, 中谷真太郎, 荒木望, 小西康夫, 成瀬康, 満洲邦彦, アクティブ電極型脳波計によるドライ計測のための低刺激な頭皮上脳波測定用接触子の検討, 平成 28 年度日本人間工学会関西支部大会, 2016, pp.88-91
- ⑥ 岸和輝, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 簡易脳波計を用いた BCI 型下肢リハビリテーションシステムの開発, 2019 年度日本人間工学会関西支部大会, 2019, pp.57-58
- ⑦ 志水啓悟, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 仮想空間上での運動状態の提示と事象関連脱同期の発現に関する検討, 2019 年度日本人間工学会関西支部大会, 2019, pp.43-44

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 菅野将輝, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦
2. 発表標題 視点に対する視覚刺激位置と視覚誘発電位の発生部位に関する検討
3. 学会等名 2019年度日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸和輝, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫
2. 発表標題 簡易脳波計を用いたBCI型下肢リハビリテーションシステムの開発
3. 学会等名 2019年度日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志水啓悟, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫
2. 発表標題 仮想空間上での運動状態の提示と事象関連脱同期の発現に関する検討
3. 学会等名 2019年度日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Araki, H. Takatani, T. Sato and Y. Konishi
2. 発表標題 Proportional-Derivative Controller Based Gradient Descent Method for Parameter Optimization of Machine Learning
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅野将輝, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦
2. 発表標題 視点に対する空間情報を用いた視覚誘発電位利用選択インタフェースの検討
3. 学会等名 平成30年度 日本人間工学会 関西支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shintaro Nakatani, Motoki Murakami, Nozomu Araki, Kazunori Sakurama, Shinichiro Nishida and Kunihiro Mabuchi
2. 発表標題 Frequency-Band and Electrode-Channel Selection for Motion Discrimination from Electroencephalography using l1-Constrained Least Squares
3. 学会等名 2017 IEEE International Conference on Systems Man, and Cybernetics (SMC2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阪田真也, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦
2. 発表標題 定常視覚誘発電位と視点に対する空間情報を利用したインタフェースの検討
3. 学会等名 平成29年度 日本人間工学会 関西支部大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中谷真太郎, 井尻蓮, 荒木望, 小西康夫, 満洲邦彦
2. 発表標題 下肢麻痺患者の運動企図を反映したリハビリテーションシステムに対する機能的電気刺激装置の適用検討
3. 学会等名 第7回日本ニューロリハビリテーション学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 王正宇, 中谷真太郎, 荒木望, 小西康夫, 満洲邦彦
2. 発表標題 上肢リハビリテーションのためのワイヤ駆動型肘関節屈伸装置の開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2016 (Robomech2016)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Shinya Sakata, Ren Ijiri, Nozomu Araki, Shintaro Nakatani, Yasuo Konishi and Kunihiko Mabuchi
2. 発表標題 Evaluation of Steady-State Visual Evoked Potential by using Corresponding Frequency Band of Movement-Related Desynchronization
3. 学会等名 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 井尻 蓮, 荒木望, 中谷真太郎, 小西康夫, 満洲邦彦
2. 発表標題 アクティブ電極型脳波計によるドライ計測のための低刺激な頭皮上脳波測定用接触子の検討
3. 学会等名 平成28年度日本人間工学会関西支部大会
4. 発表年 2016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
研究協力者	中谷 真太郎 (Nakatani Shintaro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	満洲 邦彦 (Mabuchi Kunihiko)		
研究協力者	井尻 蓮 (Ijiri Ren)		
研究協力者	阪田 真也 (Sakata Shinya)		
研究協力者	王 正宇 (Wang Chengyu)		
研究協力者	中島 圭補 (Nakashima Keisuke)		
研究協力者	菅野 将輝 (Sugano Masaki)		
研究協力者	志水 啓悟 (Shimizu Keigo)		
研究協力者	岸 和輝 (Kishi Kazuki)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	瀧口 義宏 (Takiguchi Yoshihiro)		