

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 25日現在

機関番号：13102  
 研究種目：基盤研究(A)  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：21240013  
 研究課題名（和文） ブレイン・コンタクトによる予測協調制御に向けた適応型 BMI の展開  
 研究課題名（英文） Development of an adaptive BMI for cooperated predictive control by brain-contact  
 研究代表者  
 和田 安弘 (Wada Yasuhiro)  
 長岡技術科学大学・工学部・教授  
 研究者番号：70293248

研究成果の概要（和文）：

非侵襲の脳活動計測(近赤外分光法:fNIRS)によって、ヒトが外部装置を思い浮かべるだけで制御できるようにするための基礎研究を実施した。ヒトが前後左右4方向への等尺性収縮運動を行った際のfNIRS信号を測定し、得られた信号から腕の力方向の時間的・空間的な特徴量選択を行い、方向推定を行い、80-90%程度の推定精度が得られた。結果、運動情報の空間的、時間的局在が示された。

研究成果の概要（英文）：

Brain-machine interface (BMI) has been as a communication tool of a person who lost body function. Extracting of functional information from brain signals is important for controlling a BMI in a realistic and natural way. In this study, we measured functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) signals during isometric arm movements in four directions, and performed direction classification. As a result, the classification accuracy was highest when both of OxyHb and DeoxyHb was used as the features and both of time and channel was selected. The peak time of the signal, the task ends, and after a few seconds of task ends, was particularly well chosen.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	16,800,000	5,040,000	21,840,000
2010年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2011年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
年度			
年度			
総計	36,500,000	10,950,000	47,450,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：知能情報処理、ブレイン・マシン・インターフェース

1. 研究開始当初の背景

脳の運動ニューロンの電気信号を使って、機械・装置を動かそうとする研究、いわゆるBrain Machine Interface(BMI)の研究が注目されており、脊髄損傷などで手足にハンディキャップをもった人達だけでなく、健常者のハンドフリーの機械操作

やアシスト機能、あるいは人間とロボットの協調制御等として普及する可能性が期待できる。我々は、本申請課題においてBMI技術のヒト-ロボット協調制御への展開に向けた基礎的な研究を検討する。

BMIシステムを構築するためには、例えば、腕

を上下左右に動かすためにヒト脳が、どのように情報をコードしているかを理解し、センシングできればロボットを自分の手のように動かすことが可能となる。しかし、こういった脳の表現を完全に理解し、センシングすることは非常に困難である。BMIは自分の四肢ではなく、外部の装置を脳の信号で動かす技術である。健常者がテニスや野球、あるいは器具を使ったタスクを行う際に、最初、練習が必要なようにBMIでも練習が当然必要である。健常者の運動の場合は、『運動指令を生成する脳』のトレーニングが中心である。しかしながら、BMIでは、『運動指令を生成する脳』と、脳からの運動指令によって外部装置を制御する『運動変換制御アルゴリズム』がある。つまり、BMIでは、この2つ『運動指令を生成する脳』と、『運動変換制御アルゴリズム』の学習が可能であり、効率的なBMIの実現には、この2つの学習が必要である。

このような視点も含めて、我々はBMIの課題を以下のように整理する。第1に、BMIを利用するためにBMIの運動変換制御アルゴリズムに合う、脳の賦活を発生させるための、脳のイメージトレーニングなどの練習環境が必要である。第2に、逆に脳の賦活に合わせた運動変換制御アルゴリズムの利用者への適応も重要である。つまり、『運動指令を生成する脳』と、『運動変換制御アルゴリズム』が、互いに補完して、より自然なBMIを構築することが必要である。

また、健常者によるBMIの利用は、今後の高齢化社会におけるロボット活用の一つの可能性を示すものと考えられる。例えば、リハビリ患者の脳情報をモニタリングしながら、リハビリ介護士のように振る舞うロボットなどが考えられる。アイ・コンタクトではなく、ブレイン・コンタクトで動くロボットの適用範囲は広いと考えられる。こういった将来の展開を考え、本申請課題では、力と方向の脳情報の推定及びそれに基づくロボット協調制御を目指した研究を行う。

## 2. 研究の目的

Brain Machine Interface(BMI)は、将来的には、例えば健常者とロボットの協調制御への応用も考えられる。BMI 技術は、四肢を動かす前に次の動作を予測可能とする技術であり、協調制御において、予測モデルとして組み込むことで、アイ・コンタクトではない、ブレイン・コンタクトの制御の可能性が期待できる。本申請課題では、ヒトとロボットの協調制御に向けた BMI 技術の展開

を目指した基礎研究を実施する。ヒトが自然に使える BMI システムを構築するためには、脳の表現コードを忠実にコード・デコードすることによって実現するBMIが、最も有用で自然なBMIになると考えられるし、個々に適応的なアルゴリズムが重要と考えられる。我々は現状の非侵襲脳計測技術を前提に、自然な BMI のための情報表現の獲得、適応的学習アルゴリズムの基礎研究を中心に、ヒトとロボットの力・方向協調制御を目指した基礎課題に取り組む。

## 3. 研究の方法

平成21年度は、本研究に関する基礎的実験を行った。一つは、力に関する情報表現に関する実験であり、もう一つは、強化信号の推定に関する実験である。

### (1) 力に関する情報表現

最初にNIRS計測信号によって力の情報表現に関する実験を行う。実験は、手先の力、筋電およびNIRS信号を計測し、解析する。等尺性運動における4方向の力発生時のデータを解析する。これらのデータからNIRS信号から手先の方向と力の大きさを予測するモデルを構築する。

実験では力、筋電、NIRSの同時計測を行うとともに、NIRS計測の信頼性を上げるために、心電、眼球運動、呼吸等をNIRSと同時に計測し、これらの影響を解析に検討する。

### (2) 適応学習アルゴリズム:強化信号の推定

強化信号推定は EEG での推定の可能性が報告されている。ターゲット選択の被験者実験において、間違ったターゲットを選択してしまったときのみ、頭頂部において事象関連電位の発生が確認されており、強化信号としての可能性が示唆されている。21年度には脳から強化信号を推定するための実験を開始する。実験では、被験者に倒立振り子タスクを操作させ、成功時・失敗時のタスクよりデータを採取する。まず、EEG データの実験によって、成功・失敗の分類の信号処理技術を確立する。事前実験では、成功脳波と失敗脳波に明らかに異なるケースが観測されることもある。基本的には強い視覚刺激や聴覚刺激(オドールボール課題)によって事象関連電位といった脳波変化が観測されることが知られており、EEG による強化学習の実現性は高い。

平成22年度は、本研究に関する基礎的実験である力に関する情報表現に関する研究と、強

化信号の推定に関する研究を継続するとともに、『運動指令を生成する脳』と、『運動変換制御アルゴリズム』の学習に関する研究を進めた。

#### (1) 力に関する情報表現

等尺性運動における4方向の力発生時のデータの解析を継続し、NIRS信号から力方向を予測するモデルを構築する。また、追加実験を行い、データ数を増やす。実験では力、筋電、NIRSの同時計測を行う。また、NIRS計測の信頼性を上げるために、NIRSのプロープ位置を計測する3次元位置計測装置を導入し、頭表上の計測部位を正確に特定するようにし、脳表上の部位推定を可能とし、力方向表現の信頼性の高い推定を行う。

#### (2) 適応学習アルゴリズム: 強化信号の推定

BMIユーザは、どのようなイメージでどのような力が発生するかを練習し、適切な『運動指令を生成する脳』を獲得するための環境作成と実験を実施する。次に、EEG計測による強化信号によって、『運動変換制御アルゴリズム』の適応の可能性の研究を行う。力方向・大きさの効率的な学習方法についての研究を実施し、情報表現のコード・デコードの適応学習の研究を進める。

平成23年度は、本研究に関する基礎的実験である力に関する情報表現に関する研究および、強化信号の推定に関する研究を継続するとともに、協調制御について検討する。

#### (1) 力に関する情報表現

等尺性運動における4方向の力発生時のデータの解析によって、昨年度は、NIRS信号から直接作業座標系における方向予測を行い、70%~80%の予測精度を実現した。23年度は、力、筋電、NIRSの同時計測の追加実験を行い、データ数を増やす。また、NIRS計測の信頼性を上げるために、昨年度導入したNIRSのプロープ位置を計測する3次元位置計測装置を利用し、頭表上の計測部位を正確に特定するようにし、脳表上の部位推定を可能とし、SPM解析による力方向表現の信頼性の高い推定を行う。また、NIRS計測におけるArtifact(特に頭皮血流)は大きな問題となっており、その除去は重要な課題である。本年度は、NIRS計測の信頼性向上のためにArtifact除去の検討を進める。

#### (2) 適応学習アルゴリズム: 強化信号の推定

22年度には脳から強化信号を推定するための実験を開始しており、EEGデータによって、成功・失敗の分類の信号処理技術の可能性を確

認し、P300 speller を例に、その有効性を示した。23年度は、EEG/NIRSの同時計測を行いEEGとNIRSの相関等よりNIRS単独での成功/失敗推定(強化信号推定)の可能性の検討を継続する。NIRSは脳表のみの計測であって、強化信号の推定は極めて困難であると考えられているが、NIRSとEEGの同時計測による21年度の実験によって、脳波ERPが発生しているときと発生していないときで、NIRS信号に相違がある可能性を確認している。今年度は、これらを定量化する研究を進める。また、EEG、NIRSの同時計測による脳情報多元化の研究を進める。

#### (3) 『運動指令を生成する脳』の学習に関する研究-NIRSによるニューロフィードバックの可能性の検討

BMIユーザは、どのようなイメージでどのような力が発生するかを練習する必要がある。適切な『運動指令を生成する脳』を獲得するための環境提供と実験を継続する。22年度は、NIRS計測チャンネル単位での学習制御の可能性を検討したが、23年度は、力方向のイメージによる脳賦活領域の制御の可能性を検討する。特にEEGとの同時計測による検討を実施する。

#### (4) 協調制御に関する検討

NIRS信号からの力方向推定結果を利用したロボット等の外部デバイスとヒトとの協調制御の可能性の検討を行う。まず、NIRS信号によるロボットの制御に関して検討し、次に、ヒトとロボットの協調作業の可能性を検討する。

### 4. 研究成果

平成21年度の研究成果は以下の通りである。

#### (1) 力に関する情報表現

力の大きさ15Nの右腕等尺性収縮運動について4つの方向のタスクを行った際に観測されるNIRS信号に対して、SVM(Support Vector Machine)を用いてNIRS信号から腕が生成した力方向を推定できるか検討し、特徴量選択、パラメータ探索を行うことで、2方向(NS-EW)分類で90%程度、4方向分類では60%程度の識別率を得た。さらに、NIRS信号のチャンネル選択や、カーネル関数を検討することで、識別率の向上が期待できる。

#### (2) 適応学習アルゴリズム: 強化信号の推定

タスクの成功、失敗の識別を測定した脳波ERPの識別結果を報酬とした強化学習について可能性を検討した。倒立振り子タスクの学習獲得を例に、リアルタイムでの単試行EEGからのERP判

定の可能性についてサポートベクターマシン (SVM) を応用して検討した。遅い学習過程になるが、脳波ERPを使った強化学習の可能性を示した。

また、強化信号推定はEEGでの推定の可能性が報告されている。本年度は、これに加えEEG / NIRSの同時計測を行いEEGとNIRSの相関等よりNIRS単独での成功/失敗推定(強化信号推定)の可能性の検討を行った。NIRSとEEGの同時計測によって、脳波ERPが発生しているときと発生していないときで、NIRS信号に相違があることを確認した。

平成22年度の研究成果は以下の通りである。

#### (1) 力に関する情報表現

等尺性運動における4方向の力発生時のデータの実験・解析を継続した。実験では、被験者が右腕による等尺性筋伸縮運動を、4方向(前、右、後、左方向)について行い、左半球一次運動野周辺のfNIRS信号を測定した。fNIRS信号に対する、空間的、時間的な特徴選択手法を提案し、運動方向に寄与する特徴量の抽出を試みた。結果として、SVMの適用で約70-90%の推定精度が得られた。また、NIRS-SPM解析を得られたfNIRS信号に対して行うことで統計的に有意な特徴を示し、推定に寄与した特徴量とNIRS-SPM解析の結果に関連があることを示した。また、本研究でfNIRS信号に対する一般的な処理であるフィルタ処理、加算平均処理、主成分分析(PCA)、独立成分分析(ICA)により得られた信号が神経情報を反映しているかを検討した。検討した結果は、PCAをfNIRS信号に対し適用し、得られた主成分を選択的に特徴量へと採用することで、4力方向を90[%]以上の精度で分類できることを示し、fNIRS信号から抽出された特徴量は神経情報を反映しており、適切な処理により高い精度でのデコーディングが実現できる可能性を示した。

#### (2) 適応学習アルゴリズム:強化信号の推定

BMI を実用化するためには利用者個々に適応した制御が必要である。本研究ではシステムの出力結果とユーザの意図が異なった際に発生する事象関連電位を強化学習の報酬信号とした BMI システムについて検討した。P300 speller を BMI の一例として、発生した事象関連電位を識別するための分類アルゴリズムを提案し、9人の被験者で事象関連電位を強化学習の報酬に利用可能であり、事象関連電位を報酬信号とした適応的 BMI 実現の可能性を示した。

平成23年度の研究成果は以下の通りである。

#### (1) 力に関する情報表現

等尺性運動における4方向力発生時の運動情報がNIRS信号において空間的、時間的に局在しているかの検討を実施した。空間的、時間的な特徴量選択を行うことで運動情報の特定を試みた。実験で被験者が右腕で前後左右4方向への等尺性収縮運動を行った際のNIRS信号を測定し、得られた信号から腕の力方向を時間的・空間的な特徴量選択を行い方向推定を実施し、80-90%程度の推定精度が得られた。結果、運動情報の空間的、時間的局在が示された。また、NIRS計測における頭皮血流の除去は重要な課題である。本年度は、NIRS計測の信頼性向上のためにノイズ除去の検討を進めた。PCA、ICAによるシミュレーション及びプローブ間の距離の短いショートチャンネルを利用した方法を検討した。

#### (2) 適応学習アルゴリズム:強化信号の推定

脳波から強化信号を推定するための実験を開始しており、P300 speller を例に、その有効性を示した。今年度は、EEG/NIRSの同時計測を行いEEGとNIRSの相関等よりNIRS単独での強化信号推定の可能性の検討を実施したが、様々な神経活動に由来する血流変化が混在し、それぞれを分離して計測することが難しかった。そこで、基礎的な確認を含めて、事象関連デザインを素早い把持動作に適用し、NIRSによる計測が可能であるか、およびそのために必要となる条件について検討した。

#### (3) 『運動指令を生成する脳』の学習に関する研究-NIRSによるニューロフィードバックの可能性の検討

力方向想起時の脳活動から想起方向の分類可能性について検討した。4方向力想起時の脳活動をNIRSにより測定する実験を行い、実運動の信号との比較、および想起時の方向別信号の比較を行い、想起方向の分類を行った。また、実験日ごとの分類精度の増減を調べることで、運動想起に対する学習効果を調べた。

#### 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7件)

1. Natsue Yoshimura, Charles S DaSalla, Takashi Hanakawa, Masa-aki Sato, Yasuharu Koike, Reconstruction of flexor and extensor muscle

- activity from electroencephalography cortical currents, *NeuroImage* 査読有, Vol.59, pp.1324-1337, (2012)
2. H. Ono, T. Wada and N. Kawatsuki, "Polarization imaging screen using vector gratings fabricated by photocrosslinkable polymer liquid crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.* 査読有, 51 (2012)
  3. C. Mitsantisuk, K. Ohishi, S. Katsura: "Control of Interaction Force of Twin Direct-Drive Motor System Using Variable Wire Rope Tension With Multisensor Integration", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 査読有, Volume: 59, Issue: 1, Page(s): 498 – 510, 2012
  4. 佐野 俊文, 松崎 周一, 和田 安弘, "fNIRS 信号からの神経情報デコーディングの可能性の検討-ヒト腕等尺性力方向の推定," *電子情報通信学会論文誌*, 査読有, vol. 94, no. 10, pp. 1676–1684, 2011.
  5. T. Ishii, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Estimation of arm force direction during isometric muscle contraction with fNIRS," *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems*, 査読有, vol. 12, no. 2, pp. 1–6, 2010.
  6. 新出航, 坪根 正, 和田 安弘, "近赤外分光法を用いた脳活動計測による動作肢の判別," *電子情報通信学会論文誌 D*, 査読有, vol. 92, no. 9, pp. 1632–1642, Sep. 2009.
  7. 山岸 佑也, 坪根 正, 和田 安弘, "BCIにおける事象関連電位を応用した強化学習の可能性の検討," *電気学会論文誌 C*, 査読有, vol. 129, no. 8, pp. 1601–1608, Aug. 2009.
- [学会発表] (計 51 件)
1. S. Matsuzaki, Y. Shiina, Y. Wada, "Adaptive classification for brain-machine interface with reinforcement learning," presented at the Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)-Proceedings of the 18th international conference on Neural Information Processing, 2011, vol. 7062, no. 1, pp. 360–369.
  2. Y. Muto, T. Ishii, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Temporal representation of arm force direction using fNIRS signals," presented at the Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, Boston, Massachusetts USA,, 2011, pp. 7425–7428.
  3. T. Sato, Y. Wada, "Consideration Of Motor Representation In Complex Human Arm Movement," presented at the Progress in Motor Control VIII, Cincinnati, OH. USA, 2011, p. 241.
  4. M. Ebisawa, M. Kogure, S.-H. Yano, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Estimation of direction of attention using EEG and out-of-head sound localization," presented at the Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, Boston, Massachusetts USA,, 2011, pp. 7417–7420.
  5. T. Sato, H. Hokari, Y. Wada, "Independent component analysis technique to remove skio blood flow artifacts in 144 functional near-infrared spectroscopy signal," presented at the 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2011, pp. 144–145.
  6. Y. Muto, T. Ishii, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Localization of information about arm force direction in fNIRS signals during isometric exercise," presented at the Proceeding of The 26th Symposium on Biological and Physiological Engineering (BPES 2011), 2011, pp. 650–655.
  7. Natsue Yoshimura, Aruha Satsuma, Charles Sayo Dasalla, Takashi Hanakawa, Masaaki Sato, Yasuharu Koike, Usability of EEG Cortical Currents in Classification of Vowel Speech Imagery, International Conference on Virtual Rehabilitation 2011, Zurich, Switzerland, (2011)
  8. M. Ebisawa, S. Yano, S. Matsuzaki, H. Hokari, Y. Wada, "Brain-Machine Interface for direction discrimination of auditory target," presented at the 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2011, pp. 168–169.
  9. Y. Muto, Y. Wada, "Temporal representation of arm force direction using fNIRS signals," presented at the 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2011, pp. 170–171.
  10. M. Kogure, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Identification of sound-source direction using auditory evoked event-related potentials," *NEURO2010*, 2010.
  11. T. Sano, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Source separation of multi-channel near-infrared spectroscopic signals by time delayed decorrelation," *NEURO2010*, 2010.
  12. T. Ishii, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Estimation of arm force direction during isometric muscle contraction with fNIRS," presented at the 17th International Conference Neural Information Processing, Sydney, Australia, 2010.
  13. M. Kogure, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Investigation of Brain-Computer Interfaces that Apply Sound-evoked Event-related Potentials," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)-ICANN2010*, vol. 6352, no. 1, pp. 511–520, 2010.
  14. T. Sano, S. Matsuzaki, Y. Wada, "Independent Component Analysis of Multi-Channel Near-Infrared Spectroscopic Signals by Time-delayed Decorrelation," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)-ICANN2010*, 2010.

15. T. Sato, T. Tsubone, Y. Wada, "Estimation of the direction of arm force by using NIRS signals," presented at the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine, EMBC 2009, 2009, pp. 590-593.
16. M. Morihiro, T. Tsubone, Y. Wada, "Relation between NIRS signal and motor capability," presented at the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine, EMBC 2009, 2009, pp. 3991-3994.
17. K. Nomoto, T. Tsubone, Y. Wada, "Possibility of reinforcement learning using event-related potential toward an adaptive BCI," presented at the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC 2009, 2009, pp. 1720-1725.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田 安弘 (WADA YASUHIRO)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号：70293248

### (2) 研究分担者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号：40185187

小池 康晴 (KOIKE YASUHARU)  
東京工業大学・ソリューション研究機構・教授

研究者番号：10302978

小野 浩司 (ONO HIROSHI)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号：10283029

坪根 正 (TSUBONE TADASHI)  
長岡技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号：50334694

松崎 周一 (MATSUZAKI SHUICHI)  
長岡技術科学大学・工学部・助教  
研究者番号：60455706

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：