

## 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 6 月 7 日現在

機関番号：東京農工大学 12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360179

研究課題名（和文）

脳コンピュータインタフェースのためのデータ駆動型多チャンネル信号処理

研究課題名（英文）

Data-Driven Multichannel Signal Processing for Brain Computer Interfacing

研究代表者

田中聡久（TANAKA TOSHIHISA）

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70360584

研究成果の概要（和文）：

脳コンピュータインタフェース（BCI）は、脳内の情報を外部に伝達する技術であり、様々な分野での応用が期待されている。この技術の実現のためには、測定した脳波から必要な成分を取り出したり、不要な成分を除去するための基盤技術を確立する必要がある。本研究課題では、近年注目されているデータ駆動型信号分解法である経験的モード分解（EMD）に着目し、これをBCIのための信号処理に適用する方法を確立することを目的とした。研究の結果、従来技術では実現できなかった脳波と眼電図の分離に成功した。さらに、運動想像時の脳波から効率良く必要成分を抽出することが可能になった。また、スマートフォンと簡単なロボットを用いたBCIプラットフォームの設計と開発に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Brain-computer interfacing is a technology that transmit information in the brain to the outside, has a variety of engineering and medial applications. To realize this technology, we have to establish fundamentals of signal processing for extracting necessary components from the observed electroencephalogram (EEG) and/or for removing unnecessary components. In this KAKENHI project, we paid attention into the empirical mode decomposition (EMD), which is a recently well-known data-driven signal decomposition technique, and we aimed at establishing methodologies that apply this promising technique to signal processing for BCI. As a result of this project, we have succeeded in an accurate separation of electrocardiogram (EOG) components from the observed EEG. Moreover, we have successfully developed a method for extracting necessary components from EEG signals during motor-imagery tasks. Additionally, we have developed and implemented on-line BCI platforms that utilize an Android smartphone and simple robots.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：信号処理, 脳波計測, インタフェース

## 1. 研究開始当初の背景

ブレイン・コンピュータ・インタフェース (BCI) は、非侵襲脳波でコンピュータや機械を操作する究極のインタフェースである。これを実現するためには、

1) 脳波を複数電極で観測し、2) 特徴信号を抽出し、3) パターン識別を行い、4) ユーザに対してフィードバックをかけるための各技術を確立する必要がある。特徴信号には、ミュー波やベータ波などの自発脳波、また定常的視覚誘発電位 (SSVEP) や P300 などの誘発脳波を用いることが多い。

ここで問題となるのは、日常環境下で観測する脳波に、脳活動に起因する成分だけでなく、雑音や眼球運動や脈拍等に起因する成分 (アーティファクト) など、BCI にとって有用不要の成分が同時に混入していることである。したがって BCI 実現のためには、これらの混合した成分を精度よく分離し、脳活動に関連する成分を抽出する技術が必要不可欠である。

しかしながら、脳波は多分に非線形かつ非定常な信号であり、古典的な周波数解析では意味のある成分を分離・抽出できない。さらに、統計的な手法である主成分分析 (PCA) や独立成分分析 (ICA) では、原信号に課す統計的な仮定が、抽出したい成分の特徴を表現しているという保証はない。(S. Sanei and J. Chambers 2007)。

このような扱いの難しい信号に対して、今までと全く違う信号分離のアプローチが、データ駆動型と呼ばれる経験的モード分解 (EMD) である (Huang, et al. 1998)。EMD は観測信号を、AM-FM 型 (時変の振幅と周波数を持ち、上下包絡線の和が零) である複数のモード関数と、緩慢な残差信号に分解する。周波数解析は解析対象の信号と無関係な基底関数で信号を展開する一方、EMD は信号の極値情報のみを用いて展開する。これがデータ駆動型と言われるゆえんである。さらに、モード関数は正弦波である必要がないため、非線形・非定常な信号の分解に適している。

われわれは、自発脳波や SSVEP は特定の周波数成分を強く持つ律動的な信号であり、誘発脳波である P300 などは電位の緩慢な変化として現れる事実に着目し、EMD を多チャンネル脳波の解析に拡張できないかと考えて、脳波を EMD で分解する予備実験をおこなった。その結果特筆すべきは、異なるチャンネルに存在する共通成分が、EMD で得られるモード関数に現れることがわかったことである。

しかしながら研究の進行にともない、

- (a) 多くの場合、抽出したい成分が、複数のモード関数に分離して現れてしまう。
- (b) ノイズレベルが高い場合において、うま

く分離できない。

- (c) 計算に時間がかかる上に、バッチアルゴリズムしか存在しない。
- と言った未解決問題も浮上したのである。

## 2. 研究の目的

- (a) 不要成分が混入した脳波から、BCI に必要な脳波成分のみを取り出す方法を構築し、実データを用いた実験により性能を検証する。
- (b) BCI の特徴抽出アルゴリズムに EMD の方法を適用することで、コマンド識別率の向上を目指す。
- (c) 実際のオンライン BCI を実行するプラットフォームを構築する。

## 3. 研究の方法

EMD はデータ駆動型と呼ばれる信号分解の方法であり、入力信号  $x(t)$  を、複数の固有モード関数 (IMF) と呼ばれる振幅・周波数変調成分に分解する:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r(t)$$

ここで、 $IMF_i(t)$  は固有モード関数であり、 $r(t)$  はトレンドを表す残差信号である。 $x(t)$  がスカラ信号であれば、これを UEMD とか、単に EMD と呼ぶ。 $x(t)$  が 2 変量または  $M$  変量のベクトル信号の場合も、幾つかの分解方法が提案されている。

### (1) 不要成分除去の方法

眼球運動成分が混入している脳波から、この成分を取り除く手法を、2 変量経験的モード分解 (BEMD) を用いることで構築した。

BEMD は、この方法では、参照信号としての眼球運動成分と、各チャンネルの脳波を同時に観測し、それらを対にして BEMD を適用する。これによって、不要成分と必要成分が明確に分離され、クリーンな脳波成分のみを抽出することができる。

さらに、Rehman らが 2010 年に発表した多変量経験的モード分解 (MEMD) を用いる方法を構築した。この方法では、参照信号としての EOG (脳波も混入している) と、各チャンネルの脳波を同時に観測し、それらを対にして MEMD を適用する。

また同様の手法を、事象関連電位である P300 の抽出にも適用した。

(2) 必要成分のみを抽出する方法

運動想像時に現れる脳波の空間パターンをうまく抽出する方法に、共通空間パターン(CSP)法がある。ここでは、CSP法にEMDを適用することで、識別率の向上を図る。基本的なアイデアは、EMDによって生成されたIMFを取捨選択して、必要成分のみの信号を再構成する：

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^N c_i IMF_i(t)$$

ここで、 $c_i$ は0か1をとるIMFの選択をする係数である。この $c_i$ の決定には、データセットをもちいて交差検定によりあらかじめ決定する方法を取る。

(3) リアルタイムBCI構築の方法

BCIを実現するために、アンドロイドのスマートフォンとLegoマインドストームを用いた。まず、図1にシステムの構成を示す。用いるBCIのパラダイムは、定常視覚誘発電位(SSVEP)に基づいたもので、画面上に異なる周波数で点滅するチェッカーボード刺激を配置し、ユーザがどれを中止しているかを検出する。

まず、脳波は生体アンプで増幅され、あるサンプリング周波数でPCにデータが入力される。このデータを、正準相関を用いた線形判別分析によってコマンドを決定する。このコマンドは、WiFiまたは3G回線経由でアンドロイドのスマートフォンに送られる。このスマートフォンは、Legoの制御部にBluetoothを介してコマンドを転送する。また、ユーザに対しては、アンドロイドのカメラを活用し、現在どのような動作をしているのか、どこに向かっているのか、ある離れていた場所からもユーザは理解できる。

4. 研究成果

(1) 提案したアルゴリズムを実信号に適用する実験を行い、スパイク状の眼電位が観測される観測脳波から、不要成分と目的成分が明確に分離され、クリーンな脳波成分のみの抽出が可能になることを確認した(図2)。さらに、従来の単変量EMD(UEMD)を用いる従来手法に比べて、BEMDやMEMDを用いると、格段にEOGの除去精度が向上した。

さらに、従来手法との比較検討を試みた。統計的な手法である、AMUSEやWASOBIアルゴリズムを、眼電図の乗った脳波に適用した。その結果、この今回用いたデータセットに対しては、従来の統計的手法ほとんど失敗する事がわかり(図3)、提案する手法が極めて有効であることが実証された。

(2) CSP法にEMDを適用したときの、手と足

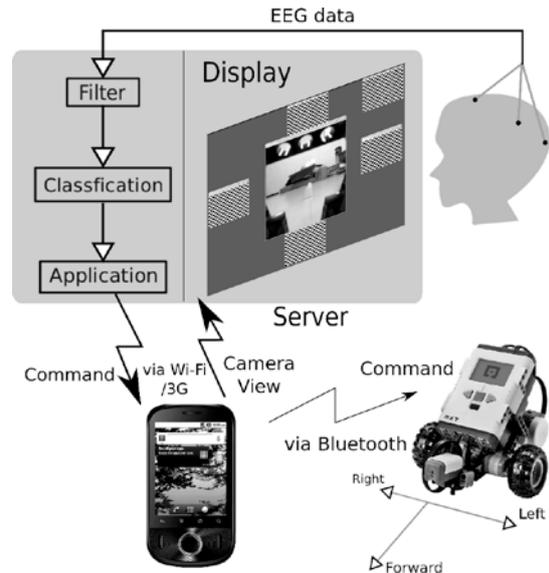


図1 構築したBCIシステムの構成図

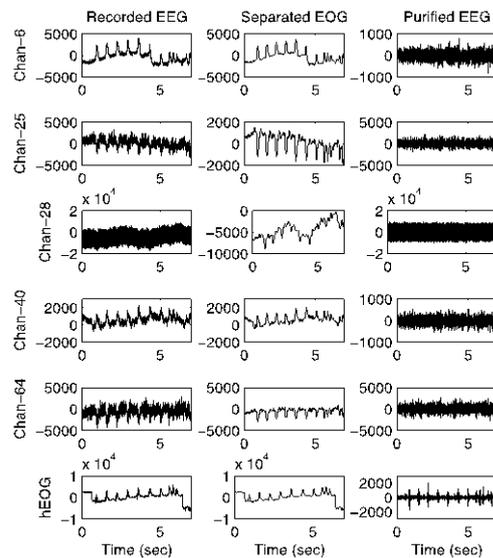
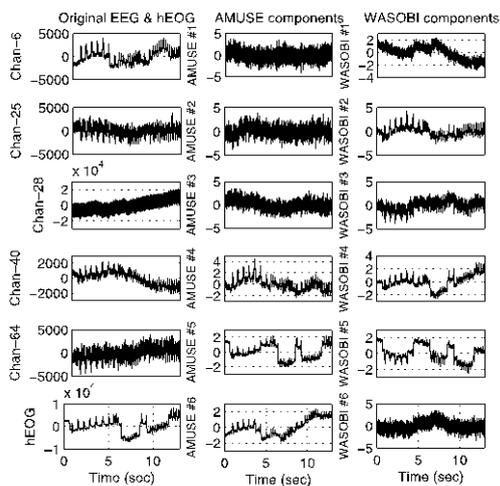


図2 左: EOGが重畳した脳波, 中: EOGを分離した結果, 右: 脳波成分を抽出した結果.

表1 EMDを手と足の運動想像の識別に用いたときの識別率. CSP1とCSP2が従来手法. 下の3段がEMDを用いた提案手法. 横軸は被験者を表している.

Method	subject				
	aa	al	av	aw	ay
CSP1	70.7	78.3	48.7	<b>88.5</b>	72.6
CSP2	63.7	87.7	64.0	79.1	86.3
EMD-CSP	62.8	89.5	<b>64.4</b>	79.6	85.9
MEMD1-CSP	63.8	<b>95.0</b>	63.8	71.2	<b>88.1</b>
MEMD2-CSP	55.3	79.7	54.7	70.0	75.6

図 3 従来の統計的手法 (AMUSE, WASOBI) が失敗する例. 左から観測信号, AMUSE, WASOBI. 縦軸は異なる電極を表している.



の運動を想像し, それぞれの脳波をクラス分けするデータの BC 識別率を表 1 に示す. この表から, 提案する方法によって識別率が改善できるとが示された.

(3) ロボットを遠隔操作するBCI実験のプラットフォームを世界で初めて作製し, オフライン実験, オンライン実験をおこなった. この時の実験結果を表2に示す. ここで, Accuracyはコマンド識別率, ITRは情報伝達速度

$$ITR = S \left\{ \log_2 N + A \log_2 A + (1-A) \log_2 \left[ \frac{1-A}{N-1} \right] \right\}$$

度あり,

であたえられる. ここで, N はコマンドの総数, A は識別率, S は 1 分経ったときのコマンド数である. この表からわかるように, EMD を用いることで識別率が改善した.

### 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 8 件)

[1]~[8]はすべて査読あり

- [1]. Md. K. I. Molla, Md. R. Islam, T. Tanaka, and T. M. Rutkowski, "Artifact suppression from EEG signals using data adaptive time domain filtering," *Neurocomputing*, in press, 2012
- [2]. C. Zhang, Y. Kimura, H. Higashi, and

表 2 構築した BCI システムの, 被験者 4 名 (Subject A~D) に対する識別率 (Accuracy) と情報伝達速度 (ITR). 4Hz の情報を使用した時と使用しないときの差も表示している.

Subject	Not using 4 Hz		Using 4 Hz	
	Accuracy	ITR [bit/min]	Accuracy	ITR [bit/min]
Subject A	0.804	56.669	0.804	56.669
Subject B	0.979	95.620	0.988	98.360
Subject C	0.571	24.120	0.583	25.505
Subject D	0.479	15.075	0.492	16.194
Average	0.708	47.871	0.717	49.182

T. Tanaka, "A simple platform of brain-controlled mobile robot and its implementation by SSVEP," to appear in *Proc. of the 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2012)*, Brisbane, Australia, June 2012. in press

- [3]. Md. K. I. Molla, T. Tanaka, and T. M. Rutkowski, "Multivariate EMD based approach to EOG artifacts separation from EEG," in *Proc. of 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2012)*, pp. 653-656, Kyoto, Japan, March 2012
- [4]. L. Zhang, C. Zhang, H. Higashi, J. Cao, and T. Tanaka, "Common spatial pattern using multivariate EMD for EEG classification," in *Proc. the Third APSIPA Annual Summit and Conference*, Wed-PM. SS4 (5 pages), Xian, China, Oct. 2011.
- [5]. T. M. Rutkowski, T. Tanaka, A. Cichocki, D. Erickson, and D. P. Mandic, "Interactive components extraction from fEEG, fNIRS, and peripheral biosignals for affective brain-machine interfacing paradigms," *Computers in Human Behavior*, Vol. 27, No. 5, pp. 1512-1518, Sept. 2011
- [6]. Q. Shi, J. Yang, J. Cao, T. Tanaka, and R. Wang, "EEG data analysis based on EMD for coma and quasi-brain-death patients," *J. Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 23, no. 1, pp. 97-110, Mar. 2011
- [7]. Md. K. I. Molla, T. Tanaka, T. M. Rutkowski, and A. Cichocki, "Separation of EOG artifacts from EEG signals using bivariate EMD," in *Proc. of 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and*

*Signal Processing (ICASSP 2010)*,  
pp. 562-565, Dallas, USA, Mar. 2010.

- [8]. J. Yang, Y. Saito, J. Cao, T. Tanaka, and T. Takeda, "Empirical mode decomposition method for MEG phantom data analysis," *J. Circuits, Systems, and Computers*, pp. 1467-1480, vol. 18, No. 8, Dec. 2009.

〔学会発表〕（計 1 件）

石 奇衛, 曹 建庭, 田中 聡久, "EMD technique for a motor imagery based BCI System," 第 24 回信号処理シンポジウム論文集, pp. 408-411, 鹿児島, Nov. 2009

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 聡久 (TANAKA TOSHIHISA)  
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：70360584

### (2) 研究分担者

曹 建庭 (CAO JIANTING)  
埼玉工業大学・工学部・教授  
研究者番号：20306989

### (3) 連携研究者

ルトコスフスキ トマシュ (RUTKOWSKI  
TOMASZ)  
筑波大学・システム情報系・講師  
研究者番号：50415238