

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04002

研究課題名(和文) 視覚刺激入力に対する多チャンネル頭皮脳波からのスパース検波：低空間解像度の克服

研究課題名(英文) Sparse detection from multi-channel surface electroencephalogram response to visual stimuli

研究代表者

田中 聡久 (Tanaka, Toshihisa)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70360584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：人間に点滅光のような刺激を提示すると、光の刺激は網膜から大脳後頭部(一次視覚野)にその刺激が電気信号として伝達される。この電気信号は、頭皮に電極を設置することで、頭皮上の電圧変化(頭皮脳波)として現れる。この点滅パターンを複数個用意して、同時に提示し、どれかに一つに注目する。このときの頭皮脳波を測定すると、注目パターンを特定することができる。この技術を用いることで、機器などをコントロールできる。これを脳コンピュータインタフェース(BCI)と呼ぶ。BCIの実装には、脳波から点滅刺激の種類を正しく推定する必要がある。本研究では、スパース信号処理を用いて、点滅刺激を正しく検出する技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：When a human gazes at a visual stimulus such as on/off flashing, this optical stimulus stimulates the retina that translate the stimulus to electrical signal, which reaches the occipital area in the cerebral cortex. This electrical signal can be observed as the change of electrical potential by attaching electrodes on the head surface. This observed signal is called surface electroencephalogram (EEG). When multiple patterns of visual stimuli are presented on screen, if a human gazes at one of the stimuli, it is possible to identify the stimulus that the human is gazing at. This technique makes it possible to control a device or a machine. This is called a brain-computer interface (BCI). To implement BCI accurately, it is necessary to establish a method for detect the target only from the observed EEG. In this project, we utilized sparse signal processing to address this problem. We were successful in establishing an accurate detection of visual stimulus from the EEG.

研究分野：信号処理工学

キーワード：脳波 BCI 信号処理 視覚刺激

## 1. 研究開始当初の背景

人間に点滅光のような刺激を提示すると、光の刺激は網膜から大脳後頭部（一次視覚野）にその刺激が電気信号として伝達される。この電気信号は、頭皮に電極を設置することで、頭皮上の電圧変化（頭皮脳波）として現れる。この点滅パターンを複数個用意して、同時に提示し、どれかに一つに注目する。例えば、点滅間隔を変えたり（周波数変調）、点滅のタイミングを変えたり（位相変調）と言った具合である。

このときの頭皮脳波を測定すると、本人が注目しているパターンを特定することができる。この技術を用いることで、コンピュータや車椅子などの機器などをコントロールできる。これを視覚入力型脳コンピュータインタフェース(BCI)と呼ぶ。視覚入力型BCIの実装には、脳波から点滅刺激の種類を正しく推定する必要がある。視覚刺激に対する反応は定常的視覚誘発電位（steady-state visually evoked potential; SSVEP）と呼ばれ、これを用いたBCIに関しては、様々な研究が実施されてきた。

これまでの視覚入力型BCIでは、多くの研究が周波数変調型の視覚刺激を用いていた。これは、フーリエ解析などで容易に周波数を特定できるからである。また、脳波の他チャンネル性を利用した、アレイ信号処理型の検出手法も有力である。また、あらかじめ観測しておいた参照信号を用いることで、周波数・位相混合変調の検波が可能になる（Nakanishi et al., 2014）。これによって、視覚入力型BCIの情報伝送速度は大きく向上することになった（Chen et al., 2015）。

しかしながらこれらの検波方法には次のような問題点がある。

- A) 頭皮上に設置した複数電極を統合するため、検波に使用する電極を適切に選択する必要がある。有用な電極は神経科学的知見により、後頭部に設置することがほとんどであるが、最適な電極選択は個人差が大きいのが実情である。
- B) これまで有用性が確認されてきた検波方法は参照データをあらかじめ観測しておくキャリブレーションが必要であり、これがユーザの負担となっている。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究では、近年発展が著しいスパース信号処理を用いて、点滅刺激を正しく検出する技術を確立する。研究の具体的な目標は以下の通りである。

各ユーザが様々な種類の視覚刺激を注視している間に観測した脳波からSSVEPを検出するためのスパース検波の信号処理手法を構築する。ここで言うスパース信号処理とは、不必要なチャンネル（電極）を棄却する処理方法のことである。これによって、意味のあるチャンネルをデータから自動的に選択できるようにする。

また、データによらない検波方法についての構築も実施する。この場合は、キャリブレーションフリーの検波方法となる。

## 3. 研究の方法

### 3.1 実験参加者とデータの取得

健康な11名（男性10名、女性1名）が実験に参加した。実験は東京農工大学研究倫理委員会の承認を受け実施した。実験参加者には実験前にインフォームドコンセントを得た。

実験参加者の頭頂部から後頭部にかけて頭皮上に25個のアクティブ電極を配置した（具体的な電極位置はCPz, CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, Pz, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, POz, PO3, PO4, PO7, PO8, Oz, O1, O2, Iz）。電極はアナログアンプに接続し、増幅した信号をA/D変換器でデータ化した。

### 3.2 視覚刺激

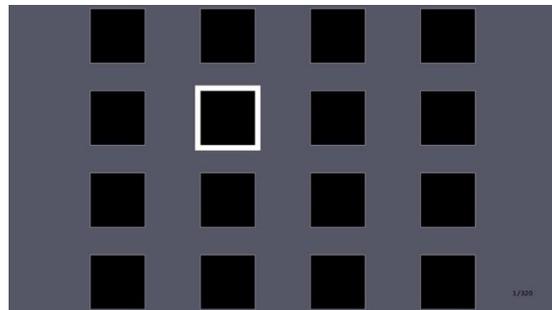


図1 ディスプレイ上に配置した視覚刺激。

図1に示すように、液晶ディスプレイ上に16個の視覚刺激を配置した。それぞれは、白と黒が一定の間隔で反転することで点滅する。上から反転周期が  $f = 12, 13, 14, 15$  Hz であり、左から点滅の位相ずれが、  $\phi = 0, 0.5, 1, 1.5$  となるようにした。

### 3.3 タスク

実験参加者は頭部を固定したまま、それぞれの視覚刺激を4秒ずつ注視した。注視している間の脳波を記録した。全部の刺激を一通り見終わるまでのタスクを20周分実施した。

### 3.4 スパース検波アルゴリズム

訓練データの刺激周波数  $f$  のそれぞれに対して、空間フィルタ  $\mathbf{w}(f)$  を設計する。テストデータの脳波にたいしフーリエ変換を計算し、周波数  $f$  のフーリエ変換ベクトル  $\mathbf{X}(f)$  (チャンネル数の次元を持つ) と、各  $f$  のフィルタ  $\mathbf{w}(f)$  との内積を取り、さらに各位相  $\phi$  で内積を回転させる。このときの実数成分が最大となる  $(f, \phi)$  の組を、注視ターゲットとして検出する。

空間フィルタ  $\mathbf{w}$  を設計する手順は以下の通りである。いま  $(f, \phi)$  のターゲットを注視しているとする。このときの訓練データ脳波のフーリエ変換  $\mathbf{X}(f)$  と  $\mathbf{w}$  との内積と、複素数平面上の点  $e^{j\phi}$  との2乗誤差を評価関数とする。

さらに、スパース性を課すために  $w$  の  $l_1$  ノルムを正則化項に加え、フィルタ設計の損失関数とした。また一方で、周波数  $f$  の倍音成分  $kf$  [Hz] も考慮する損失関数も設計した。この場合は、正則化項は、 $l_1$  ではなく、 $l_{2,1}$  (ブロック  $l_1$ ) ノルムになる。この損失関数を FOBOS と呼ばれるアルゴリズム (Duchi et al., 2009) によって最適解を求めた。

#### 4. 研究成果

周波数・位相混合変調の検波に比較的広く用いられている CCA+CA 法 (Nakanishi et al., 2014) との比較の結果、認識率で 2~3%、情報伝達率で 8 ビット/min の向上を観測できた。識別にもちいるデータ長に対する認識率

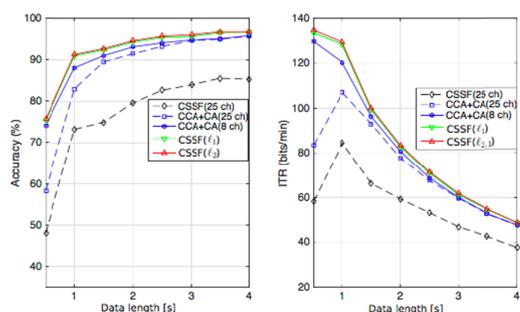


図 2 解析データ長に対する認識率(左)と情報伝達率(右)。提案手法が赤の、比較対象が青のと\*

と情報伝達率を図 2 に示す。CCA+CA 法では 24 ch 利用した場合より、8 ch 利用したほうの性能が高く、また本課題の提案手法に近い結果を出しているが、本課題で提案した方法はデータのみから自動的にチャンネルを削減できることが特筆すべき点である。

次に、CCA+CA 法と提案手法での識別における計算時間の比較を実施した。320 トライアルの積算値で、CCA+CA 法では 2.27 秒、提案手法で 0.0717 秒であり、計算コストの観点からは圧倒的な優位性を示している。これは、CCA+CA 法が固有値分解を必要とするのに対して、提案手法は内積計算で済むためであると言える。

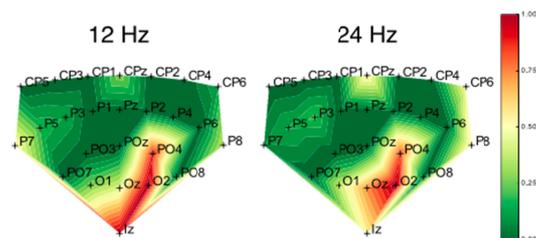


図 3 12 Hz 視覚刺激に対するフィルタ係数の絶対値の空間分布。

つぎに、提案した手法で設計したスパースなフィルタの係数分布を図 3 に示す。ここに示すように、棄却する電極はフィルタの係数が 0 になっている。この図から、複数の電極

が棄却されている様子がわかる。また、ブロック  $l_1$  正則化の効果により、係数のスパース性が、12 Hz の場合と倍音成分である 24 Hz の場合で同じになっている。

#### 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 6 件)すべて査読有り

1. K. Suefusa and T. Tanaka, "Asynchronous brain-computer interfacing based on mixed-coded visual stimuli," IEEE Trans. Biomedical Engineering, 2018. doi:10.1109/TBME.2017.2785412
2. N. Morikawa, T. Tanaka, and Md R. Islam "Complex sparse spatial filter for decoding mixed frequency and phase coded steady-state visually evoked potentials," Journal of Neuroscience Methods, 2018. doi:10.1016/j.jneumeth.2018.04.001
3. Higashi H, Minami T and Nakauchi S (2017) Variation in Event-Related Potentials by State Transitions. Front. Hum. Neurosci. 11:75 doi: 10.3389/fnhum.2017.00075
4. Md R. Islam, Md K. I. Molla, M. Nakanishi, and T. Tanaka, "Unsupervised frequency-recognition method of SSVEPs using a filter bank implementation of binary subband CCA," Journal of Neural Engineering, vol.14, no.2, 2017
5. K. Suefusa and T. Tanaka, "A comparison study of visually stimulated brain-computer and eye tracking interfaces," Journal of Neural Engineering, vol.14, no.3, 2017 doi:10.1088/1741-2552/aa6086
6. H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Multilinear discriminant analysis with subspace constraints for single-trial classification of event-related potentials," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol.10, no.7, pp.1295-1305, Oct. 2016 doi:10.1109/JSTSP.2016.2599297

〔学会発表〕(計 8 件)

1. K. Suefusa and T. Tanaka, "Decoding of responses to mixed frequency and phase coded visual stimuli using multiset canonical correlation analysis," in Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2016 38th Annual International Conference of the IEEE, pp. 1492–1495, Orland, USA, 2016.
2. Dongsheng Wang, Toshiki Kobayashi, Gaochao Cui, Daishi Watabe, Jianting Cao, "Real-time mobile phone dialing system based on SSVEP", Proc. SPIE 10341, Ninth International Conference on Machine Vision (ICMV 2016), 103410R (17 March 2017)
3. S. Ryu, H. Higashi, T. Tanaka, S. Nakauchi, and T. Minami, "Spatial smoothing of canonical correlation analysis for steady state evoked potential based brain computer interfaces," in Proceedings of 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2016), pp.1516–1519, Florida, USA, Aug. 2016.
4. H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Smoothing of xDAWN spatial filters for robust extraction of event-related potentials," in 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), Jeju, Korea, 2016, pp. 1-5.
5. Md. R. Islam, T. Tanaka, M. Nakanishi, and Md. K. I. Molla, "Frequency recognition of steady-state visually evoked potentials using binary subband CCA with reduced dimension of reference signals," in 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2016), pp. 769-773, Shanghai, China, Apr. 19-24, 2016
6. Md. R. Islam, T. Tanaka, Md. K. I. Molla, and Most. S. Akter, "Frequency recognition for SSVEP-BCI using reference signals with dominant stimulus frequency," in 2015 APSIPA Annual Summit and Conference, pp.971-974, Hong Kong, 16-19 Dec. 2015
7. Md. R. Islam, T. Tanaka, N. Morikawa, and Md. K. I. Molla, "Frequency recognition for SSVEP-based BCI with data adaptive reference signals," in 2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP), pp.799-803, Singapore, 21-24 July 2015.
8. H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Subspace-constrained multilinear discriminant analysis for ERP-based brain computer interface classification," in 2015 APSIPA Annual Summit and Conference, pp.934-940, Hong Kong, 16-19 Dec. 2015

## 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

東 広志 (HIGASHI, Hiroshi)  
豊橋技術科学大学・情報・知能工学系・  
助教  
研究者番号：70734474