

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360146

研究課題名(和文) 脳インタフェース実現のためのテンソル同時対角化原理による信号処理の構築と応用

研究課題名(英文) Construction and Application of Tensor Joint Diagonalization Principle for Brain Interfacing

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) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：頭皮に電極をつけて電気活動を記録することで脳内の活動を読み取ることができる。しかしながら、ここで記録した信号は強い雑音や、目的外の信号を含むことが多い。そこで、記録したデータをテンソルと呼ばれる構造で表現し、不要なデータを排除したり、必要なデータを選択するための自動的な方法を確立した。この方法を用いることで、脳と外界と結ぶ、ブレイン・マシン・インタフェースの実現に大きく近づくことができる。

研究成果の概要(英文)：Recoding electric levels with electrodes on the scalp enables us to read activities inside the brain. However, the signal recorded in this way may include high-level noise and out-of-interest components. Thus, by describing the recorded data by a so-called tensor, we established an automatic method for eliminating undesirable data and/or selecting necessary data. By using this method, we could approach to practical implementation of brain-machine interfacing that can connect the brain and the external world.

研究分野：信号処理

キーワード：脳

## 1. 研究開始当初の背景

脳マシンインターフェース (BMI; Brain Machine Interface) は、信号処理、機械学習、脳科学の応用技術の 1 つである。BMI の核となる部分は、メンタルタスクや外部コマンドによって誘発された脳活動を捉え、それを外部機器へのメッセージやコマンドに変換する技術である。これにより、筋肉を介さないコミュニケーションや制御のための通信路を実現することができる。これによって、ALS 患者など肢体不自由患者が外界とコミュニケーションを取れるようになるだけでなく、脳活動をリアルタイムに可視化したり、脳に対するフィードバックを実行することで、脳の可塑性を促進させるなど、リハビリテーション分野での応用が期待されている。

脳活動の計測には、頭皮脳波 (EEG; Electroencephalogram)、脳磁図 (MEG; Magnetoencephalogram)、機能的核磁気共鳴画像 (fMRI; functional Magnetic Response Imaging) といった、非侵襲計測装置により観測した信号が主に用いられる。この中でも、EEG は、小規模な装置で計測することが可能であるため、BMI の工学応用に適している。本研究課題においても、用いるデータは EEG に限った。

EEG を用いることで、さまざまな部位における脳活動をデコーディングできることが期待されているが、運動皮質周辺の脳活動を EEG から効率的にデコーディング技術の確立は、運動想像に関連した BMI (MI-BMI; Motor-imagery BMI) やリハビリテーションへの応用を実現するために重要である。また外部から視覚刺激 (光の点滅等) を与えることで、後頭部を中心に視覚誘発電位 (Visually Evoked Potential; VEP) と呼ばれる EEG が観測される。例えば、手足の運動や運動想像により、異なる脳領域における  $\mu$  波が変動することが知られている。EEG からそのような変化を捉えることで、異なる運動 (手・腕・足などを動かす) の想像に関連した脳波を分類することができる。

MI-BMI による脳活動を抽出するための手法の 1 つが共通空間パターン (CSP; Common Spatial Pattern) 法である。CSP は、多チャンネル脳波の各電極に対応した空間重み係数のことである。この空間重みにより抽出された信号では、クラス間の分散の比が 2 つのタスク (左手・右手の運動想像など) の間で最大になる。このような重みは、空間フィルタと呼ばれ、観測された EEG を分類するための特徴として用いられる。

このような EEG の特徴は、多次元配列構造を持つ点にある。例えば、時間、周波数、チャンネル、トライアルのように、4 つのインデックスで表現される。このようなデータはテンソルと言われ、近年テンソル分解やテンソル処理に関する研究が大きく進展し、信号

処理の前処理への適用や、機械学習への応用が盛んになってきた。

## 2. 研究の目的

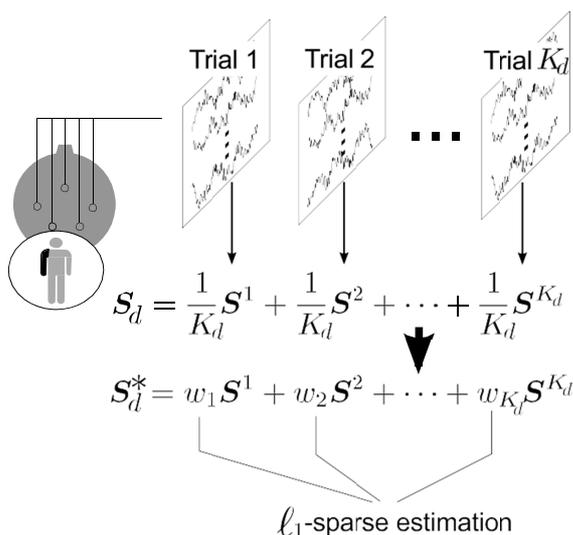
EEG から特徴を抽出するためには、信号の共分散行列を推定する必要がある。雑音の影響をできるだけ小さくし、推定精度を上げるためには、同一タスクを課したときの EEG を複数回取得し、全トライアル (エポック) の標本共分散行列を加算平均する必要がある。これは、あるタスクに対応する EEG が広義定常過程であると、暗に仮定しているからである。しかしながら、全トライアルを単純加算平均すると、共分散行列の推定精度が低下する可能性がある。たとえば、観測信号が、ユーザの集中の低下に影響を受けてしまったり、眼球運動や筋肉運動といったアーティファクトを含む場合がこれにあたる。このような「外れ値」によって、共分散行列が真の共分散行列から大きく異なるトライアルが観測データに含まれている。また、トライアルだけでなくとも、電極の接触不良や、大脳皮質の形状によって、EEG からの特徴抽出にまったく寄与しない電極 (チャンネル) も存在する。したがって、ひどく「品質」の落ちたデータ、つまり「低品質な」データやサンプルを特徴抽出に利用している可能性がある。特徴抽出器を設計する際に、低品質なデータを取り除くことで、共分散行列など統計量の推定精度が向上し、識別率の改善が期待できる。そのために、近年発展著しいテンソル信号処理やスパース最適化手法を適用することで、従来法よりロバストな特徴抽出手法を構築することが、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、信号のテンソル表現と、スパース最適化を利用した効率よい EEG のさまざまな特徴表現方法を構築したが、ここでは、研究成果 (N. Tomida, T. Tanaka, S. Ono, M. Yamagishi, and H. Higashi, "Active data selection for motor imagery EEG

classification," *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol.62, no.2, pp.458-467, Feb. 2015 ) に絞って述べる .

あるタスクのトライアルごとに得られる共分散行列 ( トライアル共分散行列と呼ぶ ) を単純加算平均する方法が従来のアプローチであった . ここでは , 単純平均ではなく , 重み付きの平均により , タスクの共分散行列を推定する方法を提案する ( 上図 ) . 重みを求めるために , トライアル共分散行列をテンソル近似同時対角化し , その誤差項によってトライアルの「品質」を定量化する . これによって , 低品質なトライアルを排除できる重みを ,  $l_1$  最適化問題によって設計する . これにより , 重み係数の分布は疎になり , 低品質なトライアルを排除できるようになるのである .



#### 4 . 研究成果

実験には , Fraunhofer FIRST ( Intelligent Data Analysis Group ) および Campus Benjamin Franklin of the Charité - University Medicine Berlin ( Department of Neurology, Neurophysics Group ) から提供されている BCI competition III のデータセット IVa および 1 を用いた . また , 本課題で措置された装置によって測定したデータも用いた ( 以下では , JK-HH 1 と呼ぶ ) .

IVa からは , 5 人の被験者 ( aa, al, av, aw, ay ) が右手・右足の運動想像をしている間の脳波 , 1 は , 右手・左手・足の運動想像を 4 名の被験者 ( a, b, f, g ) から測定した EEG , また , JK-HH 1 の場合は , 同様な実験で測定した被験者 5 名 ( sa, sb, sc, sd, sg ) の EEG を用いた .

それぞれの脳波は拡張 10-20 法または 10-10 法で複数チャンネルを用いて測定されており , バンドパスフィルタがかかっている .

提案手法により得られた識別率を表に示す .

Subject	Method	Common Spatial Pattern (CSP) Method with several weighting techniques		
		$(w_k = 1/K_d)$	$(w_k \sim 1/\ E^k\ _F)$	$(w_k: \ell_1 \text{ sparse weights})$
dataset IVa	aa	75.71 ± 12.66	76.43 ± 11.32	80.36 ± 12.81
	al	93.57 ± 2.99	93.93 ± 5.14	95.36 ± 4.48
	av	63.21 ± 5.14	65.36 ± 2.71	71.07 ± 7.08
	aw	97.86 ± 1.96	95.71 ± 2.04	97.86 ± 1.96
	ay	92.86 ± 3.79	93.21 ± 4.07	93.57 ± 2.99
	Ave.	84.64	84.93	87.64
dataset 1	a	66.00 ± 9.78	66.50 ± 6.75	71.50 ± 9.75
	b	71.50 ± 5.18	67.50 ± 4.33	75.00 ± 4.68
	f	88.50 ± 6.75	89.50 ± 6.94	89.50 ± 4.47
	g	89.00 ± 4.87	79.50 ± 6.47	90.00 ± 3.54
	Ave.	78.75	75.75	81.25
JK-HH 1	sa	83.50 ± 6.02	78.50 ± 7.62	83.50 ± 6.02
	sb	56.50 ± 3.79	54.00 ± 6.27	62.00 ± 5.42
	sc	47.50 ± 10.00	49.00 ± 6.75	56.50 ± 6.98
	sd	49.00 ± 9.12	48.00 ± 15.45	56.50 ± 7.42
	se	85.50 ± 10.37	85.50 ± 9.25	87.00 ± 11.00
	Ave.	64.40	63.00	69.10
				#(w_k ≠ 0) (K <sub>1</sub> + K <sub>2</sub> )
				133.2 (160)
				160.0 (160)
				62.8 (160)
				159.8 (160)
				129.0 (160)
				160.0 (160)
				148.0 (160)
				105.0 (160)
				85.6 (160)
				131.8 (160)
				126.1 (160)

表から , 列は左から , 標準的な加算平均を用いた場合 , テンソル分解のエラー項の逆数を重み付き平均に用いた場合 , そして  $l_1$  スパース重みを用いた場合である . 最後の列は , ( ) 内のトライアル数のうち , いくつか非零だったかをしめしている . ここで提案した方法は , 標準的な平均+CSP 法を用いた場合よりも高い識別性能を示していることが分かる . また , もともと識別率が悪い被験者で識別率が良くなっている様子が見られる .

このように , テンソル表現と  $l_1$  最適化を用いることで , いままで大量の観測データを手動で処理していたなか , すべてのデータ選択

を自動的に行えるようになることを示した。  
この他にも、BMI のための信号処理・特徴表現に関して、多くの研究結果を得ることができた。

なお、本研究で実施した EEG 測定実験は、すべて東京農工大学倫理委員会の承認を得ている。

#### 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 15 件)

1. N. Tomida, T. Tanaka, S. Ono, M. Yamagishi, and H. Higashi, "Active data selection for motor imagery EEG classification," *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol.62, no.2, pp.458-467, Feb. 2015 [doi:10.1109/TBME.2014.2358536] 査読有
2. H. Higashi, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Smoothing of spatial filter by graph Fourier transform for EEG signals," Siem Reap, Cambodia, Dec. 2014 in *2014 APSIPA Annual Summit and Conference*, pp.1-5, Siem Reap, Cambodia, 9-12 Dec. 2014 [doi:10.1109/APSIPA.2014.7041710] 査読有
3. K. Shimpo and T. Tanaka, "Phase detection of multi-channel SSVEPs via complex sparse spatial weighting," in *2014 APSIPA Annual Summit and Conference*, pp.1-5, Siem Reap, Cambodia, 9-12 Dec. 2014 [doi:10.1109/APSIPA.2014.7041666] 査読有
4. H. Higashi and T. Tanaka, "Band selection by distance of spatial patterns for brain machine interfacing," in *Proceedings of International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications 2014*, Bandung, Indonesia, Aug. 2014. [doi:10.1109/ICAICTA.2014.7005916] 査読有
5. G. Cui, Y. Yin, T. Tanaka, and J. Cao, "EEG energy analysis for evaluating consciousness level using dynamic MEMD", in *Proc. of 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2014)*, pp.3247-3250, Beijing, China, July 2014 [doi: 10.1109/IJCNN.2014.6889716] 査読有
6. H. Higashi and T. Tanaka, "Common spatio-time-frequency patterns for motor-imagery-based brain machine interfaces," *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol.2013, Article ID 537218, 12 pages, 2013 [doi:10.1155/2013/537218] 査読有
7. Y. Yin, D. Zheng, J. Cao, and T. Tanaka, "Dynamic approximate entropy with band filtering for patient's EEG consciousness analysis," in *Proc. of the IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM 2013)*, pp.23-26, Shanghai, China, Dec, 2013 [doi:10.1109/BIBM.2013.6732617] 査読有
8. H. Higashi and T. Tanaka, "Band selection by criterion of common spatial patterns for motor imagery based brain machine interfaces," in *Proc. of 2013 APSIPA Annual Summit and Conference*, Kaohsiung, Taiwan, October 29 to November 1, 2013 [doi:10.1109/APSIPA.2013.6694273] 査読有
9. K. Tanaka, Y. Mizuno, T. Tanaka, and K. Kitajo, "Detection of phase synchronization in EEG with bivariate empirical mode decomposition," in *Proc. of the 35th Annual International IEEE EMBS Conference (EMBC 2013)*, pp.973-976, Osaka, Japan, Jul. 3-7, 2013 [doi:10.1109/EMBC.2013.6609665] 査読有
10. K. Shimpo and T. Tanaka, "Asynchronous brain-computer interfacing based on intended movement direction," in *Proc. of the 35th Annual International IEEE EMBS Conference (EMBC 2013)*, pp.4251-4254, Osaka, Japan, Jul. 3-7, 2013 [doi:10.1109/EMBC.2013.6609665] 査読有

11. H. Higashi and T. Tanaka, "Regularization using similarities of signals observed in nearby sensors for feature extraction of brain signals," in *Proc. of the 35th Annual International IEEE EMBS Conference (EMBC 2013)*, pp.7420-7423, Osaka, Japan, Jul. 3-7, 2013  
[doi:10.1109/EMBC.2013.6611273]  
査読有
  12. N. Tomida, H. Higashi, and T. Tanaka, "A joint tensor diagonalization approach to active data selection for EEG classification," in *Proc. of 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2013)*, pp.983-987, Vancouver, Canada, May 2013  
[doi:10.1109/ICASSP.2013.6637796]  
査読有
  13. H. Higashi and T. Tanaka, "Simultaneous design of FIR filter banks and spatial patterns for EEG signal classification," *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol.60, no.4, pp.1100-1110, Apr. 2013  
[doi:10.1109/TBME.2012.2215960]  
査読有
  14. 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*, Vol.97, pp.297-308, Nov. 2012.  
[doi:10.1016/j.neucom.2012.05.009]  
査読有
  15. H. Higashi and T. Tanaka "Time sparsification of EEG signals in motor-imagery based brain computer interfaces," in *Proc. of the 34th Annual International IEEE EMBS Conference (EMBC 2012)*, pp.4271-4274, San Diego, USA, Aug. 28-Sept. 1, 2012  
[doi:10.1109/EMBC.2012.6346910]  
査読有
- 〔学会発表〕(計 20 件)
1. 末房佳小里, 田中聡久, "位相空間における正準相関分析を利用した非同期脳コンピュータインタフェース," 電子情報通信学会 信号処理研究会, ホテルミヤヒラ(石垣島) 2015年3月3日.
  2. 長辰彦, 田中聡久, "選択的注意を用いた聴性脳コンピュータインタフェースにおける特徴抽出," 電子情報通信学会 信号処理研究会, ホテルミヤヒラ(石垣島) 2015年3月3日
  3. 富田尚規, 山岸昌夫, 山田功, 田中聡久, "Multi-class classification for motor-imagery EEG signals with a reduced rank estimation technique," 電子情報通信学会第29回信号処理シンポジウム, ピナリオ嵯峨嵐山(京都市), 2014年11月14日
  4. 森川直樹, 田中聡久, "QPSK 視覚刺激を用いた脳コンピュータインタフェース," 電子情報通信学会第29回信号処理シンポジウム, ピナリオ嵯峨嵐山(京都市), 2014年11月12日
  5. 新保圭太, 田中聡久, "多チャンネルSSVEP の位相識別のためのスパースな空間フィルタ設計," 電子情報通信学会第29回信号処理シンポジウム, ピナリオ嵯峨嵐山(京都市), 2014年11月12日
  6. 末房佳小里, 新保圭太, 田中聡久, "非同期脳コンピュータインタフェースにおけるユーザ依存のパラメータ選択法," 電子情報通信学会 信号処理研究会, 北海道大学, 2014年7月11日.
  7. 森川直樹, 田中聡久, "位相偏移変調を用いた視覚刺激 BCI の復調方法における一検討," 電子情報通信学会 信号処理研究会, 北海道大学, 2014年7月11日.
  8. 前田修一, 平林 晃, 田中聡久, "単語音声刺激に対する P300 検出の雑音耐性に関する研究," 電子情報通信学会 信号処理研究会, 名古屋工業大学, 2014年5月22日
  9. 森川直樹, 田中聡久, "PSK 変調を用いた視覚刺激による脳コンピュータインタフェース," 2014年電子情報通信学会総合大会, 新潟大学, 2014年3月20日
  10. 萩原貴弘, 森川直樹, 田中聡久, "2T-EMD による多チャンネル脳波からの事象関連電位の抽出," 2014年電子情報通信学会総合大会新潟大学, 2014年3月20日
  11. 長辰彦, 田中聡久, "選択的注意を用いた聴性脳コンピュータインタフェース," 電子情報通信学会 信号処理研究

会, 大阪市立大学, 2014年3月7日

12. 東広志, 田中聡久, ``運動想像脳波識別のための空間パターンの類似性による帯域選択,`` 電子情報通信学会 第28回信号処理シンポジウム, 海峡メッセ下関, 2013年11月22日
13. N. Tomida, M. Yamagishi, I. Yamada, and T. Tanaka, ``A reduced rank estimation of covariance matrices for EEG classification,`` 電子情報通信学会 第28回信号処理シンポジウム, 海峡メッセ下関, 2013年11月22日
14. 未房佳小里, 田中聡久, ``コマンド入力インタフェースにおける視線位置と脳波利用の性能評価,`` 電子情報通信学会 第28回信号処理シンポジウム, 海峡メッセ下関, 2013年11月20日.
15. 田中聡久, 富田尚規, 東広志, ``脳波クラス分類のための疎性による能動的データ選択法`` 電子情報通信学会 信号処理研究会, 東京農工大学, 2013年8月30日.
16. 森川直樹, 木村陽介, 田中聡久, ``位相偏移変調視覚刺激を用いた脳コンピュータインタフェース,`` 2012年 電子情報通信学会総合大会 A-4-31, 新潟大学, 2013年3月21日.
17. 富田尚規, 東広志, 田中聡久, ``テンソル同時対角化によるサンプルの重み付けを用いた脳波識別,`` 電子情報通信学会 信号処理研究会, vol. 112, no. 423, SIP2012-107, pp.153-158, ビューポートくれ(呉市), 2013年2月1日.
18. 東広志, 田中聡久, ``脳波識別のためのフィルタバンク・空間重み・時間窓の最適設計,`` 電子情報通信学会 第27回信号処理シンポジウム, ANA インターコンチネンタル石垣リゾート(石垣市), 2012年11月28日
19. 新保圭太, 田中聡久, ``非線形回帰を用いた定常的視覚誘発電位のアイドル状態識別,`` 電子情報通信学会 第27回信号処理シンポジウム, ANA インターコンチネンタル石垣リゾート(石垣市), 2012年11月28日
20. 東広志, 田中聡久, ``運動想起中の脳波識別における時間窓のスパース化,`` 電子情報通信学会 信号処理研究会, 京都市立総合体育センター(京都市), 2012年7月2日.

## 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