

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420417

研究課題名(和文) 意識定量化のための脳波エネルギーと複雑度解析理論の構築並びに意識障害者のBCI応用

研究課題名(英文) The construction of EEG energy and complexity analysis theory for the consciousness quantification and the BCI application of the consciousness handicapped person

研究代表者

曹 建庭 (Cao, Jianting)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号：20306989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では脳信号処理の脳波エネルギー及び脳複雑度の解析理論とそのアルゴリズムの開発である。開発した計算アルゴリズムを、意識障害患者の評価と識別、また障害者ためのBCIシステムに適用する。本研究では脳波計測、脳活動成分の強さと複雑さ計算と評価、BCIシステム構築するための刺激器の作成、雑音除去、成分抽出と識別、携帯等の脳制御対象に対するインタフェースの開発の技術問題を解決する。本研究の複雑度とエネルギーの識別基準は先駆的な研究であり、それらが脳信号処理分野の発展に大きく寄与することができる。また応用技術である世界で初めて作成した脳で携帯電話をかけるシステムは障害者に大きく貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed EEG energy and EEG complexity theory and algorithm as fundamental researches of the brain signal processing. We applied the algorithm for the evaluation of consciousness patients, the recognition of brain activity, and for the construction of the BCI system. In order to achieve this project, we have to solve many technique problems such as how to calculate and evaluate the brain energy and complexity, how to make up the stimulator, how to remove the noise, how to extract and recognize the brain activity, and how to make up the brain-cell-phone interface. The elemental technology in this research, such as the studies of EEG energy and EEG complexity both are the pioneer works in the signal processing field. They can contribute to the development of signal processing filed in deal with brain waves. Next, we made up the brain-controlled cell-phone first time in the world, which will be expected to contribute to the handicapped people in the daily life.

研究分野：脳信号処理

キーワード：脳信号処理 脳意識 脳・コンピュータインタフェース 脳死判定

## 1. 研究開始当初の背景

意識障害レベルは、グラスゴー・コーマ・スケール(GCS: Glasgow Coma Scale)により定性的に分類されている。定量的に意識障害の「清明度」基準を創り出し、刺激により意識障害患者からの反応を読み取れることが重要な課題である。本研究では、意識障害レベル解析と意識障害患者の脳活動反応の解析を行う。そのため、要素技術である脳波エネルギー及び多変量脳波複雑度の識別基準の確立と、障害患者ための脳(BCI)システムの構築が必要不可欠である。

研究代表者らは、これまでの研究として脳死判定ための弱脳活動成分の解析と識別基準に関する研究を行った。高い雑音環境下の弱脳活動成分の抽出法、近似エントロピー(ApEn)に基づいた脳波複雑度による脳死の識別法、経験的モード分解(EMD)と拡張した多チャンネルに同時分解法(MEMD)に基づいた脳活動エネルギーによる脳死の識別法を開発し、初段階で患者状態が既知場合の35名(昏迷:19名、脳死:16名)データで検証を行った。

上記の研究課題のほか、研究代表者らは、脳・コンピュータインタフェース及び運動機能リハビリに関する研究を実施し、新しいパラダイムであるP300とP100結合した聴覚誘発電位を提案し、また、多チャンネル経験的モード分解算法と空間パターンによる特徴抽出と分類法を開発し、BCI単試行データ解析により、有効な脳活動成分であるP100とP300の誘発を同時に抽出した。以上二つの研究成果を用い、意識障害レベルの解析と意識障害患者ためのBCIの構築を試みる。

## 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、意識障害レベル解析と意識障害患者の脳活動反応解析のための臨床支援技術である脳波検査システムの導入を提案し、実現のための技術的諸問題を解決する。具体的には、(1)意識障害患者の高精度脳波エネルギー及び脳波複雑度の解析理論と算法を開発する；(2)意識障害患者ための脳コンピュータインタフェース(BCI)システムを構築する。それによって、従来困難であった雑音環境下における、計測信号から脳活動成分の抽出、脳活動成分の強さと複雑さによる意識障害レベルの客観評価、また、意識障害患者の刺激による脳活動反応の解析が可能になる。さらに、開発した算法とBCIシステムを、健常者または意識障害患者から実測したデータで検証し、基礎段階にある脳波検査システムの研究を、実現可能な段階に引き上げることを目的とする。

## 3. 研究の方法

「研究目的」で示した問題を解決するため、研究方法としては、理論検討、アルゴリズムの構築、実測したデータの検証、意識障害患

者ためのBCI実験と言う手順に分かれる。まず位相同期を考慮した脳波エネルギー積算アルゴリズムを開発し、意識障害患者のデータを用いて、その性能を検証する。また、スケール因子を導入した脳波複雑度アルゴリズムを開発する。次に、開発した複雑度アルゴリズムを用い、患者の意識レベルを検証する。さらに、低「清明度」と高「清明度」の意識障害患者のBCI実験を行い、刺激により、患者の脳活動反応の観測・検討を行う。

### (1)脳波エネルギー積算の研究法

脳波は神経細胞が活動による生じたものである。意識障害患者には、意識の「清明度」により神経活動の「放電」特徴が計測された脳波信号に反映されるはずである。この特徴を利用した意識障害レベルを脳波エネルギーの積算で定量化することができる。脳波エネルギーの積算は経験的モード分解(EMD)と拡張した多チャンネルに同時モード分解法(MEMD)などの方法がある。これらの方法は、例えば何チャンネル計測した脳波信号に対し、それらを周波数の順で同時に各成分に分解し、脳活動可能な範囲にある成分だけを抽出し、それらの合成した成分をフーリエ変換し、スペクトルの積算により単位時間の脳波エネルギー量を算出することができる。このことから意識障害と脳死の間に差が大きくであることが分り、さらに意識障害患者らに対象とする場合には、脳波エネルギーの積算精度の向上と、脳波エネルギー変化の可視化を含めた高速アルゴリズムの開発などの必要がある。

### (2)脳波複雑度の研究法

近似エントロピー(ApEn)に基づいた脳波複雑度による脳死識別法を提案した。それは、時系列の規律性或いは複雑さを量る一つの尺度(複雑度)である。この尺度を利用して、昏迷患者が持つ周期的な律動成分と脳死者が持つ雑音成分を複雑度基準で識別することができる。ApEnに比べ、標本エントロピー(SampEn)があり、原理上で標本にマッチする境界条件の優位性がある。この特性を検証するため、SampEnとApEnをそれぞれ実測した昏迷と脳死データに適用し、研究結果から、SampEnのほうは昏迷-脳死間の複雑さの値が開かれていることが分かった。

本研究では、昏迷と脳死の複雑度の差を見られたが、意識障害患者らに適用する場合には、スケール因子を最適化する算法を開発し、高精度脳波複雑度法を実現する。また、スケール因子・時間・チャンネル3次元高速計算アルゴリズムを開発する。さらに、環境雑音が強い場合、既存の雑音分離手法を利用する。開発した算法との融合も試みる。

### (3)脳・コンピュータインタフェースの研究法

BCIパラダイムには定常的視覚誘発電位(SSVEP)、P300(視覚刺激)と運動想起(MI)を用

いることが多い。本研究では、右図に示すような P300 と P100 結合した聴覚誘発電位の BCI パラダイムを提案し、また、多チャンネル経験的モード分解算法と空間パターンによる特徴抽出と分類法の開発により、同一の音声刺激で、頭皮上の二箇所(側頭葉と頭頂葉)に P100 の誘発と P300 の誘発反応が同時に得られた。この提案法は、ユーザの意向を確認出来るまでにかかる時間が短くなるだけでなく、P100 補助情報によりユーザの意向確認の信頼性にも向上が可能となる。しかしながら、この提案法を意識障害患者らに対象とする場合には、刺激により脳活動反応の解析、特に「清明度」が高い患者からの意思表示の読み等の課題が残っており、これらを明らかにする必要がある。

本研究で確立した、聴覚誘発電位の BCI パラダイムと有用成分抽出・分類法を基にして、どのような音声周波数刺激で意識障害患者に適したか、周波数を軸にした刺激と反応の関係を明らかにする。また、高「清明度」の意識障害患者に、フィードバックを利用し、患者の意思表示を読み取れることを試みる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 脳波エネルギーの研究

H25 年度において、脳波エネルギー積算の精度を向上させるため、多チャンネル同時に信号分解の MEMD アルゴリズムの前処理としてバンドパスフィルターや独立成分分解 (ICA) アルゴリズムを導入し、EEG データ解析へ適用することにより、強い環境雑音の影響が低減され、脳波エネルギー積算の精度が向上された。H26 年度においては 2T-EMD アルゴリズムを利用し、従来の MEMD アルゴリズムに対し、標準化されたデータを用いて比較し、まだ実測データで検証し、その高い精度と速い計算速度を得られることが分かった。H27 年度においては前年度開発した脳波エネルギー積算アルゴリズム及び脳波複雑度アルゴリズムに時間窓が有する多チャンネル適応アルゴリズムに拡張し、その変化を可視化する。

ここで、一つ例を挙げると、既知の異なる周波数信号に対し、単一チャンネルで信号分解の EMD アルゴリズム及び多チャンネル同時に信号分解の MEMD アルゴリズム及び新しい 2T-MED アルゴリズムをそれぞれ適用し、その結果を図 1 に示す。

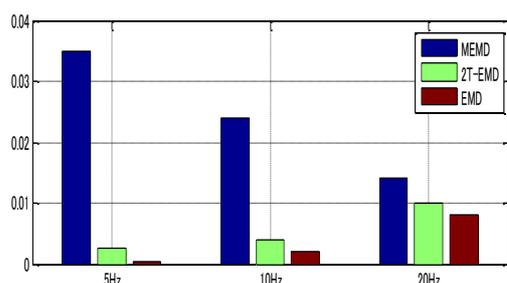


図 1. 信号分解誤差の比較

次に、患者脳波エネルギー積算と識別の研究については、チャンネルごとで信号分解の EMD アルゴリズム及び多チャンネル同時に信号分解の MEMD アルゴリズムに対し、新しい方法 2T-MED アルゴリズムを健常者、混迷患者及び脳死者の脳波データ解析にそれぞれ適用し、積算した脳波エネルギーの正確さやエネルギーの変化例を図 2 に示す。

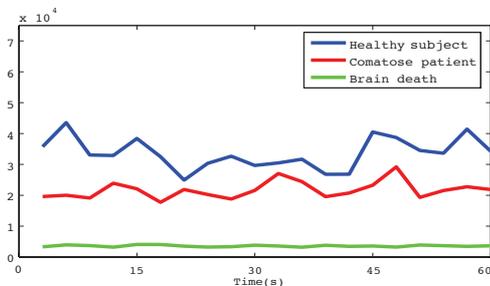


図 2. 意識清明度とエネルギーの変化

上記の結果から計算効率を向上しただけでなく、脳波エネルギーによる脳死判定が精度よく識別が可能になったことを言える。次に意識障害レベルが異なる者に対し、脳波エネルギーを行い、これにより、脳波エネルギー積算の精度の向上だけでなく、脳波エネルギーの平均移動変化の過程が可視化できるようになった。

##### (2) 脳波複雑度の研究

H25 年度において、脳波複雑度の測定として標本エントロピー法 (SampEn) の研究については、スケール因子を導入したアルゴリズムを開発し、意識障害患者の脳波データに適用したことにより、従来の近似エントロピー (ApEn) 法と比較し、識別精度が向上させたことが分かった。H26 年度において、脳波複雑度研究について、新たなスケール因子を導入した計算アルゴリズムを開発した。実測したデータで検証し、高精度の脳波複雑度を算出した。H27 年度においては、脳波複雑度アルゴリズムに時間窓を導入し、新たなダイナミック算法に拡張した。またベイズ原理に基づいた脳活動成分分類法を開発した。

SampEn 法に基づき、スケール因子を活用した結果を図 3 に示す。

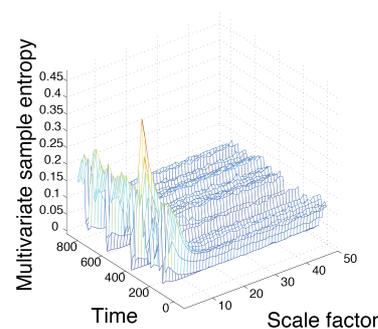


図 3. スケール因子導入した結果

図3は標本エントロピー(MSampEn)法に基づいた開発したスケール因子-時間-チャンネル3次元を含めた高速アルゴリズムであり、それによれば、脳波複雑度計量による昏迷と脳死の識別精度及び計算速度が向上されたことを確認した。また窓関数を利用したダイナミック DSampEn へ拡張し、脳死判定のブライントテストを行うことにより昏迷と脳死の進行過程が容易に識別できるようになった。

次にベイズ原理に基づいた脳活動成分分類した結果を図4に示す。ここで、赤は脳死

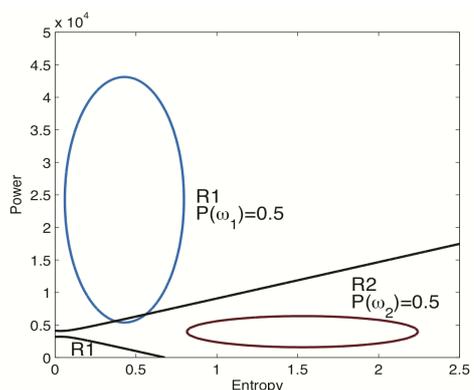


図4. ベイズ分類した結果

状態で、青は昏迷状態である。この方法を利用すれば、臨界状態の分類もできるようになった。

### (3) 脳・コンピュータインタフェースの研究

H25年度脳コンピュータインタフェース(BCI)の研究については、多択一の聴覚誘発電位のBCIパラダイムを開発し、有用な成分抽出・分類法を基にしたBCIシステムの構成を実現した。H26年度においては、BCI実験構築と装置設定調整のための新たなSSVEPのパラダイムを開発した。その有効性と実用性を検証した。H27年度では、前年度開発した実時間BCIシステムを意識障害患者に適用してみた。

研究で確立したP300とP100結合型聴覚誘発電位のBCIパラダイムと有用成分抽出・分類法を基にして、一般ユーザと意識障害患者に適用を試み、一般ユーザの反応が見られたことに対し、音声だけの刺激で意識障害患者には難しいことが分かった。次に上記のパラダイムの発展として、聴覚と視覚ハイブリッド誘発電位の新しいパラダイムを提案した(図5)。

空間パターンによる特徴抽出と分類法に基づいた単一試行データ解析により、図6に示すように、聴覚と視覚ハイブリッド型のほうが誘発電位精度よく得られたことが分かった。

BCIのもう一つの研究については、定常的視覚誘発電位(SSVEP)に基づいたBCIシステムを開発し、フリッカ周波数の調査など研究を重ね、脳で携帯電話をかけることができるようになった(図7)。

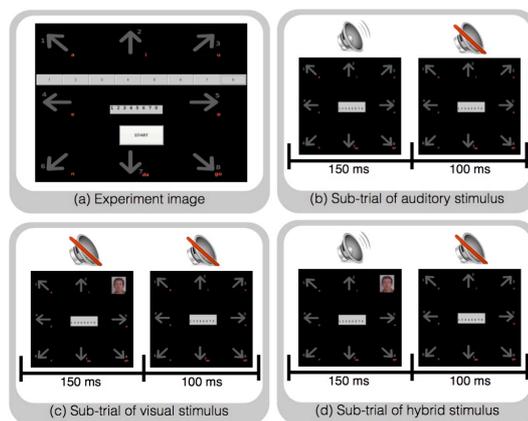


図5. 視聴覚ハイブリッドBCI

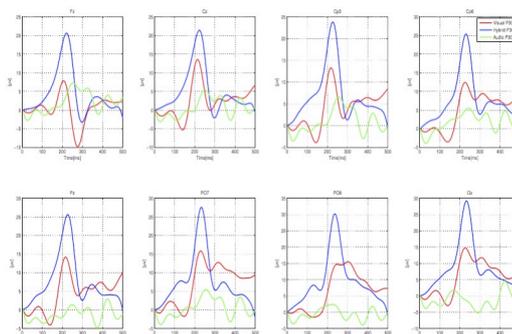


図6. 視聴覚ハイブリッドBCI識別結果

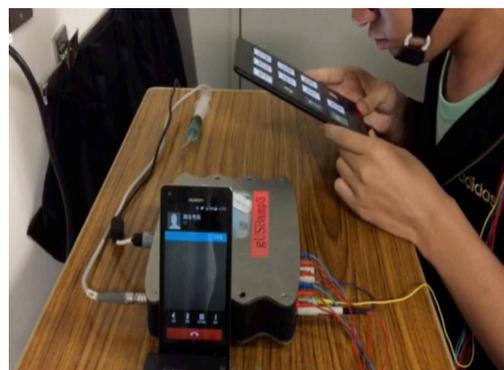


図7. SSVEPによる脳携帯システム

本研究課題において、海外研究協力者の協力を得て、上海復旦大学付属医院で多数名の意識障害患者や昏迷患者などに対して脳波を計測した。これらのデータは本研究の遂行に不可欠なものである。またこれらのデータを、必要に応じて関係者に配布し、この研究を広めて行くと考えている。

次に国内外からの招待講演を多数回行った。国際ワークショップ(The 3rd APSIPA Workshop on the Frontier in Biomedical Signal Processing and Systems)および国際学会(2015 International Conference on Cognitive Neurodynamic)にスペシャルセッションである Information and Signal Processing Techniques in Neurotechnology を計画・実施し、大学院生教育を含む本研究を広めて行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 22 件)

- (1) L. Ni, J. Cao and R. Wang: "Time-dependent multivariate and multiscale entropy based analysis on brain consciousness diagnosis," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 7888, Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-38785-2, pp.75-82, May 2013.(査読有)
- (2) Y. Liu, M. Li, H. Zhang, J. Li, J. Jia, Y. Wu, J. Cao and L. Zhang: "Single-trial discrimination of EEG signals for stroke patients: a general multi-way analysis," *2013 IEEE Engineering in Medicine and Biology 35th Annual Conference*, Osaka, Japan, pp.2204-2207, July 2013. (査読有)
- (3) H. Zhang, Y. Liu, J. Liang, J. Cao and L. Zhang: "Gaussian mixture modeling in stroke patients' rehabilitation EEG data analysis," *2013 IEEE Engineering in Medicine and Biology 35th Annual Conference*, pp.2208-2211, July 2013. (査読有)
- (4) J. Cao, D. Watabe, L. Zhang: "An EEG diagnosis system for quasi brain death based on complexity and energy analyses," *2013 IEEE Engineering in Medicine and Biology 35th Annual Conference*, pp.7132-7135, July 2013. (査読有)
- (5) D. Watabe, T. Minamidani, W. Zhao, H. Sai and J. Cao: "Effect of barrel distortion and super-resolution for single-view-based ear biometrics rotated in depth," *2013 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering*, DOI:10.1109/ICBAKE, pp.183-188, July 2013. (査読有)
- (6) L. Ni, J. Cao and R. Wang: "Analyzing EEG of quasi-brain-death based on dynamic sample entropy measures," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, Volume 2013, Article ID: 618743, 6 pages. (査読有)
- (7) G. Cui, Y. Yin, Q. Zhao, A. Cichocki and J. Cao: "Patients' consciousness analysis using dynamic approximate entropy and MEMD method," *2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, ISBN: 978-986-90006-0-4, October 2013. (査読有)
- (8) L. Ni, J. Cao and R. Wang: "Time-dependent approximate and sample entropy measures for brain death diagnosis," *the 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics*, DOI: 10.1007/978-94-017-9548-7\_46, pp. 323-328, June 2013. (査読有)
- (9) L. Ni, J. Cao and R. Wang: "Brain death diagnosis based on adaptive multi-scale entropy analysis," *Journal of Dynamics and Control*, Vol. 2014-1, pp.74-78, DOI: 10.6052/1672-6553-2013-086, March 2014. (査読有)
- (10) G. Cui, Y. Yin, T. Tanaka and J. Cao: "EEG energy analysis for evaluating consciousness level using dynamic MEMD," *IEEE world congress on computational intelligence*, ISBN: 978-1-1484-5, pp. 3247-3250, July 2014. (査読有)
- (11) D. Watabe T. Minamidani, H. Sai, and J. Cao: "Comparison of ear recognition robustness of single-view-based images rotated in depth," *2014 Fifth International Conference on Emerging Security Technologies (EST) Alcala de Henares*, Spain, ISBN: 978-1-4799-7007-0, pp. 19-23, Sept. 10-12, 2014. (査読有)
- (12) D. Watabe, T. Minamidani, W. Zhao, H. Sai and J. Cao: "Examining barrel distortion, super-resolution on single-view-based ear biometrics rotated in depth", *International Journal of Affective Engineering*, Vol.14 No.2, pp.1-8 2015. (査読有)
- (13) G. Cui, Q. Zhao, J. Cao and A. Cichocki: "Hybrid-BCI: Classification of auditory and visual related potentials," *Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, DOI: 10.1109/SCIS-ISIS. 2014.7044768, pp. 297-300, December 2014. (査読有)
- (14) 倪力, 曹建庭, 王如彬. 自适应多尺度熵在脑死亡诊断中的应用[J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(1): 74~78. (査読有)
- (15) L. Ni, J. Cao and R. Wang: "Dynamic multivariate multiscale entropy based analysis on brain death diagnosis," *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(3): 425-433. DOI:10.1007/s11431-014-5757-0. (査読有)
- (16) D. Wang, T. Kobayashi, G. Cui, D. Watabe and J. Cao: "BCI based mobile phone using SSVEP techniques", *Advances in Cognitive Neurodynamic(v), the 5th International Conference on Cognitive Neurodynamics*, Springer, pp.379-382, DOI: 10.1007/978-981-10-0207-6\_52, June 3-7, 2015. (査読有)
- (17) D. Zheng, G. Cui, T. Tanaka and J. Cao: "Analysis of brain-death EEG data using 2T-EMD algorithm," *2015 IEEE*

- International Conference on Signal Image Technology & Internet Based Systems*, ISBN: 978-1-4673-9721-6. pp: 528-531, DOI: 10.1109/SITIS.2015.84, Nov. 2015. (査読有)
- (18) D. Watabe, T. Minamidani, H. Sai, T. Maeda, T. Yamazaki and J. Cao: "Estimating a shooting angle in ear recognition," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9339, Springer, pp. 559-570, DOI 10.1007/978-3-319-24369-6, 2015. (査読有)
- (19) D. Watabe, T. Minamidani, W. Zhao, H. Sai and J. Cao: "Examining barrel distortion, super resolution on single view based war biometrics rotated in depth," *International Journal of Affective Engineering*, Vol.14 No.2, pp.1-8, 2015. (査読有)
- (20) L. Gui, Q. Zhao, and J. Cao: "Tens or denoising using Bayesian CP factorization," *Sixth International Conference on Information Science and Technology*, pp. 49-54, May 6-8, 2016. (査読有)
- (21) G. Cui, L. Gui, Q. Zhao, A. Cichocki and J. Cao: "Bayesian CP factorization of incomplete tensor for EEG signal application," *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, July 24-29, 2016. (査読有)
- (22) L. Ni, J. Cao and R. Wang: "A Bayes classifier based on multiscale features in brain death diagnosis," *Advances in Cognitive Neurodynamics (V)*, Springer, 2015, 439-455, DOI: 10.1007/978-981-10-0207-6\_60. (査読有)
- [学会発表] (計 12 件)
- (1) J. Cao: "Complexity and energy analysis methods for the real world recorded EEG signals," *The first APSIPA Workshop on Frontier in Biomedical Signal Processing and Systems*, Mahidol University, Thailand, March 2013.
- (2) J. Cao: "Dynamic entropy and EEG energy analyses for consciousness patients," *2013 Japan-China Joint Workshop on Frontier of Multidiscipline Research: Brain Science, Biology and Big-Data Mining*, Beijing, China, June 21-22, 2013.
- (3) Y. Yin, D. Zheng, J. Cao and T. Tanaka: "Dynamic approximate entropy with band filtering for patient's EEG consciousness analysis," *IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*, ISBN: 978-4799-1309-1, Shanghai, China, Dec. 2013.
- (4) 諏訪 祥平, 曹 建庭: "三択一の聴覚刺激による P300 実験の試み," 埼玉工業大学, 第 11 回若手研究フォーラム論文集, pp.96-97, July 2013.
- (5) G. Cui, Q. Zhao and J. Cao: "P300 classification based on linear discriminant analysis for BCI system," 埼玉工業大学, 第 11 回若手研究フォーラム論文集, pp.104-105, July 2013.
- (6) J. Cao: "Dynamic approximate entropy and empirical mode decomposition methods for the comatose patients' EEG analyses," *the 13th China-Japan-Korea Joint Workshop on Neurobiology and Neuroinformatics*, Beijing Normal University, Beijing, China, November 18-19, 2013.
- (7) 曹 建庭: "脳・コンピュータインターフェイス(BCI)基礎とその応用," 電気学会研究発表会論文集, pp.3-4, March 2014.
- (8) G. Cui, D. Wang, Q. Zhao, J. Cao and A. Cichocki: "Classification of event-related potentials P300 based on Hybrid-BCI system," 埼玉工業大学, 若手研究フォーラム 2014, pp. 130-131.
- (9) J. Cao: "High frequency SSVEP based BSI systems and its application," in Shanghai Jiaotong University, March 10, 2015.
- (10) J. Cao: "Dynamic multivariate multiscale entropy based analysis on brain death diagnosis," *The 3rd APSIPA Workshop on the Frontier in Biomedical Signal Processing and Systems*, Shanghai, China, June 1-3, 2015.
- (11) D. Zheng, T. Tanaka and J. Cao: "Comparing 2T-EMD and MEMD in the calculating speed of test for Quasi-brain-death EEG," 埼玉工業大学, 第 13 回若手研究フォーラム, pp. 64-65, July 2015.
- (12) D. Wang, T. Kobayashi, G. Cui, D. Watabe and J. Cao: "SSVE に基づいた携帯電話オフラインシステム," 埼玉工業大学若手研究フォーラム 2015, pp.62-63. ISSN 1880-392X.
- [その他]  
ホームページ : [www.sit.ac.jp/user/cao](http://www.sit.ac.jp/user/cao)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
曹 建庭 (CAO Jianting)  
埼玉工業大学・工学部・教授  
研究者番号 : 20306989
- (2) 連携研究者  
田中 聡久 (TANAKA Toshihisa)  
東京農工大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 70360584