

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06123

研究課題名(和文) 多次元生体信号のIVAを用いたアーチファクト除去法とその解析法に関する研究

研究課題名(英文) A study on artifact separation method for multi-dimensional biosignals using IVA and its application

研究代表者

吉田 久 (YOSHIDA, HIISASHI)

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：50278735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は微小な生体信号に混入するアーチファクト、特に畳込みによって混入するアーチファクトを除去・分離する方法の研究開発に取り組んだ。妊婦母体腹壁生体電位を主な試金石として、ここから微小な胎児心電位を精度よく抽出することを目標とし、IVA(Independent Vector Analysis)を用いた方法を提案した。その結果、提案手法は一般的なICA(Independent Component Analysis)法に比べて、胎児心電位精度よく検出することが可能であった。さらに妊婦腹壁上で観測される胎児心電位分布を推定する方法を開発し、微弱な胎児心電位計測のための効果的な電極配置を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a method for removing or separation of additive and convolutive artifacts artifact from multi-dimensional biosignals with independent vector analysis. We applied the method to extract fetal electrocardiogram from maternal abdomen as a test of our proposed method. As a results, the proposed method showed better performance rather than the conventional independent component analysis method. In addition, we developed a method for estimating a distribution of fetal cardiac potential which was observed on the maternal abdomen. The distributions are of help in order to find electrodes' coordination which has better performance on the maternal abdomen.

研究分野：統計的生体信号処理

キーワード：IVA ICA 母体腹壁生体電位 胎児心電 胎児心電位分布 筋電アーチファクト

1. 研究開始当初の背景

近年、信号処理技術は飛躍的に発展しつつあるものの、脳波データに混入する筋電位や眼電位は未だに大きな課題である。特に、筋電位は通常の独立成分分析法などでは除去できない場合が多く[①, ②]、新たな方法が求められている。研究代表者らは喫食時脳波に混入する筋電位を除去する方法として IVA(Independent Vector Analysis)[③]を用いた方法の開発に着手し始めており、通常の ICA(Independent Component Analysis)では除去できなかった筋電位も除去できる可能性を見出している[④]。このような背景から、IVA を利用した本手法を用いて、脳波に混入する筋電位のような畳込み型のアーチファクトを分離・除去する方法を進展させることが、多次元生体信号解析をより進展させるとの認識に基づき、本研究の立案ならびに実施に至った。

2. 研究の目的

脳波などの生体電気信号に混入する筋電位アーチファクトは、脳機能解析などの妨げになることは明らかである。脳波などに混入する筋電位を通常の ICA によって分離できない理由の一つは、筋電位アーチファクトが瞬時混合ではなく、畳込み混合にあると考えられる。この場合、周波数領域における ICA が一つの有効な手段と考えられるが、分離後の再構成時にパーミュテーション問題の解決が難しい。一方で、IVA はこうしたパーミュテーション問題を引き起こさないため、分離が可能となる。筆者らは原信号を時間一周波数領域へ変換方法する際の様々なパラメータによって、分離精度が変化することを観察しており[③]、本研究では「これらのパラメータが、原信号のどのような性質によって特徴付けられるのか検討すること、またその応用として、脳波などの生体電気信号に混入する筋電位アーチファクト除去による信号分離性能の向上を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では妊婦腹壁上で観測される生体電位には微弱な胎児心電位が含まれているが[⑤-⑧]、この妊婦腹壁心電位には、腹筋や子宮筋の緊張による筋電位アーチファクトが混入することがあり、このような場合、妊婦腹壁心電位から胎児心電位を ICA によって抽出することは困難になる。そこで本研究ではこの母体腹壁生体電位信号を IVA 法の試金石として、IVA 法の各種パラメータを変化させることで、筋電位アーチファクトの分離、ならびに胎児心電位抽出率の向上を試みたので、そのせいについて報告する。なお、妊婦腹壁心電位計測試験は協力機関である奈良県立医科大学において実施した。

4. 研究成果

4. 1 多次元生体信号に混入するアーチフ

ァクト除去法 1 (ICA 法)

脳波などに混入するアーチファクトを除去する方法は様々あるが、そのうちの一つに ICA (Independent Component Analysis)がある。ICA は複数の信号源が重畳された観測信号から、信号源の統計的独立性に基づいて、個々の信号源を分離する方法である。統計的に独立な信号源ベクトルを $\mathbf{s}(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}^T$ 、観測信号ベクトルを $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}^T$ 、信号の混合行列を \mathbf{A} とすると

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(t) \quad (1)$$

と書くことができる。ここで混合行列 \mathbf{A} が未知であるとき、信号源の統計的独立性 (但し、 $n \leq m$) に基づき、観測信号 $\mathbf{x}(t)$ を独立成分信号 $\mathbf{y}(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}^T$ に分離する行列 \mathbf{W} が存在して、

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

と書ける。 $\mathbf{W} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{W} = \mathbf{I}$ (\mathbf{I} は単位行列) が理想的であるが、確率変数 y_i, y_j がそれぞれ独立であるならば、 y_j, y_i も独立であり、また任意の定数倍である $\alpha_i y_i, \alpha_j y_j$ も独立である。したがって、独立成分分析ではこれらの信号の順序と振幅に関しては不定性を許して分離行列 \mathbf{W} を求めることになる。

4. 2 多次元生体信号に混入するアーチファクト除去法 2 (IVA 法)

3. 1 で示した ICA 法は瞬時混合した観測信号に対しては有効であるが、例えば脳波などに混入する筋電位は、瞬時混合ではなく畳込み混合であるような振る舞いを示す。すなわち、統計的に独立な信号源ベクトルを $\mathbf{s}(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}^T$ とし、観測信号ベクトルを $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}^T$ とすると、混合行列を $\mathbf{A}(t)$ による畳込みによつて、

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{\tau=0}^{\infty} \mathbf{A}(\tau) \mathbf{s}(t-\tau) \quad (3)$$

と表現できる。この畳込み混合されたアーチファクトを標準的な ICA によって分離、除去することはできない。IVA では次のように考えることで、標準的な ICA を拡張している。各信号源から互いに独立なベクトル $\mathbf{S}(t) = \{\mathbf{S}_1(t), \mathbf{S}_2(t), \dots, \mathbf{S}_n(t)\}^T$ とする。ここで、 $\mathbf{S}_i(t)$ はスカラーではなく、 $\mathbf{S}_i(t) = \{S_i(\omega_1, t), S_i(\omega_2, t), \dots, S_i(\omega_k, t)\}$ なるベクトル (周波数スペクトル) が発生したと考え、観測信号 $\mathbf{X}(t) = \{\mathbf{X}_1(t), \mathbf{X}_2(t), \dots, \mathbf{X}_m(t)\}^T$ (但し、 $\mathbf{X}_i(t) = \{X_i(\omega_1, t), X_i(\omega_2, t), \dots, X_i(\omega_k, t)\}$ なるベクトル (周波数スペクトル) は混合行列 \mathbf{A} によって、瞬時混合されたと考え、すなわち、

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}(t) \quad (4)$$

である。ベクトル間同士の独立性に基づいて、信号の分離行列 \mathbf{W} を求めることによって、同区立成分信号 $\mathbf{Y}(t)$ を得る。

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(t) \quad (5)$$

4. 3 母体腹壁上の胎児心電位分布の推定方法

4. 2に示した IVA を用いたアーチファクト除去提案手法により微弱な生体信号である胎児心電位の検出率が向上したが、それでもなお胎児心電位検出が困難な場合がある。そこで、その原因が筋電位のように畳込み型のアーチファクトであるのかを確認するために、妊婦腹壁上で観測される胎児心電位分布を推定する方法をここで提案する[⑨-⑪]。

ここで問題を簡単化するために母体腹壁上の各チャンネルにおける生体電位 $\mathbf{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}^T$ は、式(1)に示されるように、統計的に独立な信号源ベクトルを $\mathbf{s}(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}^T$ が混合行列を \mathbf{A} によって瞬時混合されたものであるとする。すなわち、畳込み型のアーチファクトの混合はないものとする。今、統計的に独立な分離信号 $\mathbf{y}(t)$ が式(2)によって得られたとすると、 $\mathbf{y}(t)$ のいずれかの成分信号 $y_i(t)$ が胎児心電位の推定電位である。このとき、混合行列 \mathbf{A} の成分比から、母体腹壁上に現れる胎児心電位を推定することが可能である。つまり混合行列 \mathbf{A} のうち、母体心電位にかかる係数を m 、胎児心電位の係数を f とすると、胎児心電位 F は観測信号における母体心電位 M を用いて、

$$F = f \cdot \frac{M}{m} \quad (6)$$

として推定することができる。

4. 4 データ計測：母体腹壁上生体心電位計測

妊娠中後期(21-42週)の妊婦12名に協力してもらい、図1に示すように12チャンネルの電極を用いて母体腹壁全体を覆うように配置し、10分間の計測を行った。電極には日本光電製のビトロード F-150S を使用し、測定には日本光電 MEB-2312 シリーズの誘発筋電図計を用いた。本臨床試験における誘発筋電図計の生体アンプの特性は、ローパスフィルタのカットオフ周波数を50Hz、時定数を0.3sに設定し、信号は200Hzでサンプリングした。以降の処理はオフラインでデジタル信号処理を施した。

なお計測は奈良県立医科大学産婦人科において実施された。本臨床試験は、奈良県立医科大学倫理委員会および近畿大学生物理工学部倫理委員会の承認を得て行われた。また被験者にはあらかじめ実験の内容説明し、書面による了解を得た。

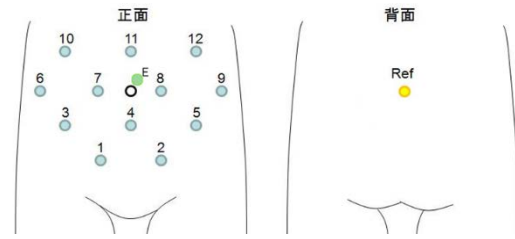


図1 母体腹壁上の電極配置

4. 5 胎児心電分離結果

表1に ICA 法による胎児心電位分離結果と IVA 法による結果を示した。表1には、各被験者の妊娠週数、ICA 法、IVA 法による胎児心電位検出率を百分率で示した。なお、検出率は以下で定義した。

$$\text{検出率} = \frac{\text{胎児心電検出区間}}{\text{全区間}} \times 100$$

表1 胎児心電検出率 (ICA vs IVA)

被験者	妊娠週数	ICA 法 (%)	IVA 法 (%)
1	25	52.7	55.4
2	28	75.9	78.5
3	38	100	100
4	40	72.9	78.8
5	38	100	100
6	36	66.1	79.7
7	38	93.2	95.8
8	33	96.6	97.5
9	40	100	100
10	38	90.7	94.9
11	38	100	100
12	38	100	100

表1から IVA 法によって、胎児心電位を分離抽出した方が、検出率が高いことがわかる。しかしながら、検出率が劇的に向上することはさほど多くはなかった。これは、母体腹壁生体電位の計測中に、常に腹筋や子宮筋の緊張による筋電位アーチファクトの混入が起きるような状況ではなかったものと推察できる。

4. 5 母体腹壁上の胎児心電位分布の推定結果

4. 3節の方法を用いて、母体腹壁上の胎児心電位分布を推定した一例を図2に示す。

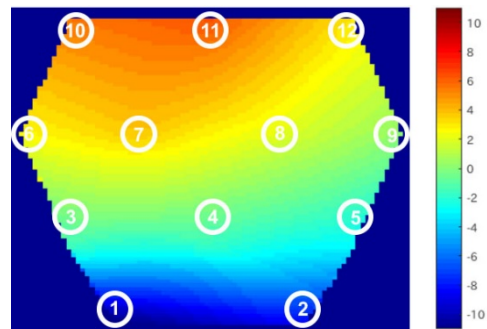


図2 母体腹壁上の胎児心電位分布

赤色が胎児心電位の R 波の電位が正方向に現れている場合で、濃紺は負方向に R 波が現れていることを示している。黄緑色付近がちょうど 0V である。なお、図中の丸印は電極が配置されている母体腹壁上の位置を示したものであり、丸印内の数字は計測チャンネルの番号である。下腹部の 1, 2 チャンネル付近に胎児心電位の R 波が負方向に大きく観測されていること、また腹部上部左側の 7, 10, 11 チャンネル付近に胎児心電位の R 波が正方向に大きな値を持つことがわかる。

提案の母体腹壁上に現れる胎児心電位推定法の妥当性を検証するために、図 3 に示すように、観測信号のあるチャンネルに胎児心電位が確認できるデータを用いて、その胎児心電位と提案手法による推定電位の比較を行った。

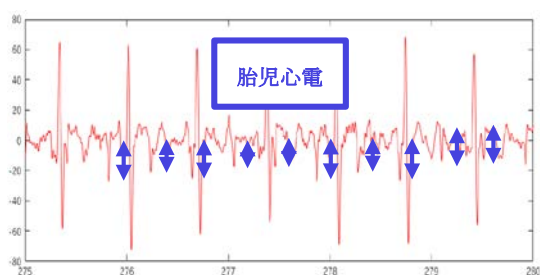


図 3 観測信号上で確認可能な胎児心電位例

この観測信号データにおける胎児心電位の平均電位は、 $-18.0 \mu\text{V}$ であった。一方で提案する胎児心電位推定法による推定値は、 $-19.4 \mu\text{V}$ であった。若干の誤差が含まれるものの、その誤差は小さく、胎児心電位の推定法として妥当であるといえる。

<引用文献>

- ① 富永滋, 吉田久, 中迫昇, 喫食時脳波解析における誘導法および喫食性雑音の分別と ICA を用いた分離法に関する検討, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 113, No. 222, (MBE-2013), 113-118, 2013.
- ② 富永滋, 吉田久, 中迫昇, 咀嚼筋電位性雑音の脳波への重畳様式の検討と FDICA (周波数領域 ICA) を用いた分離の試み, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 113, No. 373, (MBE-2013), 57-62, 2013.
- ③ Taesu Kim, Torbjorn Eltoft, and Te-Won Lee, Independent Vector Analysis: An Extension of ICA to Multivariate Components, Proceedings of the 6th Int. Conf. ICA 2006, pp.165-172, 2006.
- ④ 富永滋, 吉田久, 中迫昇, 脳波に重畳する喫食性雑音の独立ベクトル分析 (IVA) を用いた分離法, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 114, No. 51, (MBE-2014), 2014.
- ⑤ Hisashi Yoshida, Naoki Akiyama, Katsuhiko Naruse, Toshiyuki Sado and Hiroshi Kobayashi, "Non-Invasive

Measurement of Fetal Electrocardiogram," u-Healthcare 2015, 2015/11/30-2015/12/2, (Osaka, Japan)

⑥ 吉田久, "無侵襲胎児心電計測と胎児心拍変動解析," メディカルジャパン 2016/2/24-2016/2/26, (大阪市)

⑦ 吉田久, 成瀬勝彦, 佐道俊幸, 小林浩, "母体腹壁生体電位計測による胎児心電位・心拍数測定", 第 33 回センシングフォーラム計測部門大会, 2016/9/1-2016/9/2. (和歌山県紀の川市)

⑧ 黒田知宏, 足立敏, 平野喜久夫, 杉村和重, 上島一夫, 吉田久, 吉田正樹, 小林浩, "胎児心電計測用 e-Textile 開発の試み", 生体医工学シンポジウム 2016, 2016/9/17-2016/9/18. (北海道旭川市)

⑨ 小仲沙季, 吉田久, 成瀬勝彦, 佐道俊幸, 小林浩, "母体腹壁上における胎児心電位分布の推定", 日本生体医工学会, 第 55 回生体信号計測・解釈研究会, 2016/12/3, (神奈川県横浜市)

⑩ 小仲沙季, 吉田久, 成瀬勝彦, 佐道俊幸, 小林浩, "母体腹壁上の胎児心電位分布推定法", 2017 電子情報通信学会総合大会, 2017/3/22-2017/3/25 (愛知県名古屋市)

⑪ 吉田久, 小仲沙季, 足立敏, 平野喜久夫, 杉村和重, 上島一夫, 黒田知宏, 吉田正樹, 佐道俊幸, 小林浩, "母体腹壁上の胎児心電位分布推定と e-Textile 開発の試み," 第 56 回日本生体医工学会大会, 2017/5/3-2017/5/5, (宮城県仙台市)

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)

1. 小濱 剛, 中井裕真, 大谷尚平, 山本雅也, 上田慎一, 吉田久, "マイクロサッカー頻度解析に基づいた音声応答および身体応答に要する認知負荷の定量的比較," ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 19, No. 2, 2017. (査読有)
2. Hisashi Yoshida, Yasuto Yoshioka, Masaharu Miyauchi, Naoki Nakano, Amami Kato, "A Method of Connectivity Analysis of Epileptiform Discharges During Epileptic Seizure," International Journal of Bioelectromagnetism, Vol. 19, No.1, 2017. (査読有)
3. 久保賢典, 小濱 剛, 吉田久, "網膜-外側膝状体間における視覚情報のリマッピング", 近畿大学生物理工学部紀要, 38, pp.11-20, 2016. (査読無)
4. Shohei Ohtani, Takeshi Kohama, Sho Kikkawa, Hisashi Yoshida, "A microsaccade detection method by using an order-statistic time-window

- analysis”, *International Journal of Bioelectromagnetism*, 18, 1, pp. 19-25, 2016. (査読有)
5. 吉岡康人, 吉田久, 宮内正晴, 中野直樹, 加藤天美, “難治性側頭葉てんかん患者におけるコネクティビティ解析,” *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. 115 : 513 (MBE2015 102-131), pp. 67 - 72. 2016. (査読無)
 6. Mitsuhiro Kodama, Takeshi Kohama, and Hisashi Yoshida, “A saliency based motion detection model of visual system considering visual adaptation properties,” *Proceedings of the 37th Ann. Int. Conf. of the IEEE EMBS*. pp. 6658-6661, 2015. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319920 (査読有).
- [学会発表] (計 39 件)
1. 吉田久, “側頭葉てんかん患者における皮質脳波のコネクティビティ解析,” 統計数理研究所共同利用集会「生体信号・イメージングデータ解析に基づくダイナミカルバイオインフォマティクスの展開」, 2017/10/26-2016/10/27, (東京都立川市).
 2. Hisashi Yoshida, “Application of Time-Frequency Analysis in Biomedical Signals and the Challenges,” 2017RIMS Joint Research Advanced Innovation Powered by Mathematics Platform: Signal Analysis and Time-Frequency Analysis, 2017/10/23-2017/10/24, (Kyoto, Japan).
 3. 小林葵, 小濱剛, 吉田久, “fNIRS による注意の統制に関わる高次脳機能の計測,” 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム, 2017/9/4-2017/9/6, (岐阜市).
 4. Aoi Kobayashi, Takeshi Kohama, Hisashi Yoshida, “Can cognitive brain function be quantitatively evaluated by event-related fNIRS measurement?,” 40th European Conference on Visual Perception (ECVP 2017), , 2017/8/27-2017/8/31, (ベルリン, ドイツ)
 5. 小林 葵, 岡本亮太, 小濱 剛, 吉田久, “事象関連 fNIRS 計測に基づく認知機能の定量的評価,” 第 56 回日本生体医工学会大会, 2017/5/3-2017/5/5, (宮城県仙台市)
 6. 和宇慶真, 小濱剛, 吉田久, “血流動態に基づく fNIRS 観測信号の機能成分と全身成分への分離パラメータ特性,” 第 56 回日本生体医工学会大会, 2017/5/3-2017/5/5, (宮城県仙台市)
 7. 吉田久, 小仲沙季, 足立敏, 平野喜久夫, 杉村和重, 上島一夫, 黒田知宏, 吉田正樹, 佐道俊幸, 小林浩, “母体腹壁上の胎児心電位分布推定と e-Textile 開発の試み,” 第 56 回日本生体医工学会大会, 2017/5/3-2017/5/5, (宮城県仙台市)
 8. 小仲沙季, 吉田久, 成瀬勝彦, 佐道俊幸, 小林浩, “母体腹壁上の胎児心電位分布推定法”, 2017 電子情報通信学会総合大会, 2017/3/22-2017/3/25 (愛知県名古屋)
 9. 岡本亮太, 小林葵, 小濱剛, 吉田久, “事象関連 fNIRS 信号に対する一般線形モデル解析に基づいた視覚野応答の計測”, 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, 2017/3/8 (東京都小金井市)
 10. 小仲沙季, 吉田久, 成瀬勝彦, 佐道俊幸, 小林浩, “母体腹壁上における胎児心電位分布の推定”, 日本生体医工学会, 第 55 回生体信号計測・解釈研究会, 2016/12/3, (神奈川県横浜市)
 11. Hisashi Yoshida, Yasuto Yoshioka, Masaharu Miyauchi, Noki Nakano, Amari Kato, “Connectivity of Epileptiform Discharges during Epileptic Seizure in Temporal Lobe,” 8th International Workshop on Biosignal Interpretation, 2016/11/1-2016/11/3 (Osaka, JAPAN)
 12. 黒田知宏, 足立敏, 平野喜久夫, 杉村和重, 上島一夫, 吉田久, 吉田正樹, 小林浩, “胎児心電計測用 e-Textile 開発の試み”, 生体医工学シンポジウム 2016, 2016/9/17-2016/9/18. (北海道旭川市)
 13. 岡本亮太, 小濱 剛, 吉田久: “独立成分分析を用いた fNIRS 計測信号解析手法の検討”, 第 33 回センシングフォーラム計測部門大会, 2016/9/1-2016/9/2. (和歌山県紀の川市)
 14. 吉田久, 成瀬勝彦, 佐道俊幸, 小林浩, “母体腹壁生体電位計測による胎児心電位・心拍数測定”, 第 33 回センシングフォーラム計測部門大会, 2016/9/1-2016/9/2. (和歌山県紀の川市)
 15. 岡本亮太, 並河弘樹, 柴田はるな, 小濱 剛, 吉田久: “fNIRS 計測信号に対する独立成分分析適用手法の検討”, 第 55 回日本生体医工学会大会, 2016/4/26-2016/4/28. (富山市)
 16. 吉田久, 吉岡康人, 神保亮輔, 宮内正晴, 中野直樹, 加藤天美, “難治性側頭葉てんかん患者の皮質脳波解析”, 第 55 回日本生体医工学会大会, 2016/4/26-2016/4/28. (富山市)
 17. 吉田久, “無侵襲胎児心電計測と胎児心拍変動解析,” *メディカルジャパン* 2016/2/24-2016/2/26, (大阪市)
 18. Hisashi Yoshida, Naoki Akiyama, Katsuhiko Naruse, Toshiyuki Sado and Hiroshi Kobayashi, “Non-Invasive Measurement of Fetal

- Electrocardiogram,” u-Healthcare
2015, 2015/11/30-2015/12/2, (Osaka,
Japan)
19. 大谷尚平, 中井裕真, 加納悠史, 小濱剛, 吉田久, 吉川昭, “順序統計量に基づくマイクロサッカードの検出手法,” 生体医工学シンポジウム 2015, 09/24/2015-09/24/2015, (岡山市)
 20. Yasuto Yoshioka, Hisashi Yoshida, Masaharu Miyachi, Naoki Nakano, Amami Kato, “Propagation pattern of epileptiform discharges during epileptic seizure in temporal lobe,” 生体医工学シンポジウム 2015, 09/24/2015-09/24/2015, (岡山市)
 21. Yasuto Yoshioka, Hisashi Yoshida, Masaharu Miyachi, Naoki Nakano, Amami Kato, “Estimation of propagation structure during epileptic seizure in temporal lobe,” 37th Ann. Int. Conf. of the IEEE EMBS, 08/25/2015-08/29/2015, (Milano, Italy).
 22. 岡本亮太, 並河弘樹, 小濱剛, 吉田久, “NIRS による安静時機能的結合推定のための計測条件の検討,” 第 54 回日本生体医工学会大会, 2015/5/7-2015/5/9, (愛知県名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 久 (YOSHIDA Hisashi)
近畿大学・生物理工学部・教授
研究者番号：50278735

(2) 研究分担者

小濱 剛 (KOHAMA Takeshi)
近畿大学・生物理工学部・准教授
研究者番号：90295577

(3) 連携研究者

なし