

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12日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700480

研究課題名（和文） 脳波波形変化メカニズムの解明—モデルパラメータ推定を用いたアプローチ—

研究課題名（英文） Elucidation of change mechanism of electroencephalogram - An approach with model parameter estimation-

研究代表者

成瀬 康（NARUSE YASUSHI）

独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所脳情報通信研究室・主任研究員

研究者番号：00455453

研究成果の概要（和文）：まず，周期的活動である脳波の自発活動の位相及び振幅をマルコフ確率場モデルによりモデル化し，これを事前分布として，ベイズの定理を用いることで，位相，振幅というパラメータの推定を行うことを可能とした．続いて，本手法を発展させることにより，単一試行から位相変調が検出できる手法を開発した．その結果，本研究により，初めて，刺激と同期していない位相変調を検出することに成功した．この結果，位相変調が波形変化のメカニズムの一つであることが明らかとなった．

研究成果の概要（英文）：We developed a novel method that can be used to estimate the instantaneous phases and amplitudes of the alpha rhythm with high accuracy by modeling the alpha rhythm phase and amplitude as Markov random field models. Then, advancing this method, we developed our novel statistical method that can detect phase and amplitude shifts of fluctuating alpha rhythm in a single EEG trial. We demonstrated that our advanced method could statistically detect the phase shift of the alpha rhythm caused by an external stimulus in a single EEG trial, which suggests that human EEG data include phase shifts that are not only the phase-locking type but also the non-phase-locking type in response to external stimuli.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：脳波，脳磁界，自発活動，確率モデル，パラメータ推定

1. 研究開始当初の背景

現在，脳波，脳磁界計測は神経科学的な研究や医学的な診断に世界中で盛んに利用されている．ここでは脳波，脳磁界計測結果をまとめて「脳波」と呼ぶ．医学的には，例えば，脳疾患がある時に α 波の周波数や振幅が

変化することが知られていることから，主に診断に利用されている．また，神経科学的には，脳内情報処理が行われる時間を調べる目的で主に利用されている．例えば，注意の有無により，脳波の150 ms付近の波形が変化した場合，この時間帯の脳活動が注意の処理

に関連していると考えることが出来る。これら医学的、神経科学的な脳波の利用に共通する点は、何らかの原因で「脳波の波形が変化する」ことを利用している点である。しかし、「脳波の波形が変化する」メカニズムは未だ不明である。もし、この「脳波の波形が変化する」メカニズムを明らかにすることができれば、医学的には脳波波形変化から脳のどの部分がどのように悪いかを推測したり、神経科学的には脳波波形変化の様子から脳内情報処理メカニズムに迫ることができる為、非常に有意義であることは明らかである。

2. 研究の目的

本研究では、脳波、特に自発活動の α 波のモデルを構築し、実験結果からモデルパラメータを推定する方法を確立する。そして、推定されたパラメータを解析することで、脳波波形変化メカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、周期的活動である脳波における α 波の位相及び振幅をマルコフ確率場(MRF)モデルによりモデル化し、これを事前分布として、ベイズの定理を用いることで、瞬時位相、瞬時振幅というパラメータの推定を行うことを可能とする技術を確立する。

近年、刺激により α 波の位相が変調され、これが脳波の波形が変化する原因になっているのではないかと示唆されてはいるが、これまでは単一の試行でこの現象を明らかにすることが出来なかったため、結論が出ていない。そこで、我々が開発した手法を発展させることにより、単一試行から位相変調が検出できる手法を開発し、位相変調が脳波波形変化に与える影響を調べる。

4. 研究成果

(1)まず、周期的活動である α 波の位相及び振幅をマルコフ確率場モデルによるモデル化を行い、ベイズの定理を用いることにより、以下のように瞬時位相、瞬時振幅を推定することが出来る手法を開発した。

サンプリングポイント k における計測結果を y_k とする。計測結果 y_k には α 波にサンプリングポイント間で独立なノイズが重畳していると考えられる。このノイズをガウスノイズであるとすると尤度関数は

$$p(y_k | a_k, x_k, \alpha) = \sqrt{\frac{\alpha}{2}} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}(y_k - a_k \cos(x_k))^2\right)$$

となる。ここで、 a_k, x_k はそれぞれサンプリングポイント k における瞬時振幅、瞬時位相であり、 α は観測ノイズ強度を表すハイパーパラメータである。また、 α 波の位相($\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$)は被験者の固有 α 波周波数の周

辺で時間とともになめらかに変化しながら進行し、振幅($\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$)も時間とともになめらかに変化しているためそれぞれの事前分布はMRFモデルを用いることにより、

$$p(\mathbf{x} | \beta, \omega) = \frac{\exp\left(\sum_{n=1}^{N-1} \beta \cos(x_{n+1} - x_n - \omega)\right)}{Z_p(\beta)}$$

$$p(\mathbf{a} | \gamma) = \frac{\exp\left(-\sum_{n=1}^{N-1} \frac{\gamma}{2}(a_{n+1} - a_n)^2\right)}{Z_a(\gamma)}$$

と表すことが出来る。ここで、 N はサンプリングポイント数、 β, γ, ω はそれぞれ位相のゆらぎ、振幅のゆらぎ、被験者の固有 α 波周波数を表すハイパーパラメータである。また、 $Z_p(\beta), Z_a(\gamma)$ はそれぞれ、規格化定数である。

これらを用いることで事後分布は

$$p(\mathbf{a}, \mathbf{x} | \mathbf{y}, \alpha, \beta, \gamma, \omega) = \frac{p(\mathbf{y} | \mathbf{a}, \mathbf{x}, \alpha) p(\mathbf{a} | \gamma) p(\mathbf{x} | \beta, \omega)}{Z(\alpha, \beta, \gamma, \omega)}$$

となる。ここで、 $Z(\alpha, \beta, \gamma, \omega)$ は規格化定数であり、

$$Z(\alpha, \beta, \gamma, \omega) = \int p(\mathbf{y} | \alpha, \beta, \gamma, \omega)$$

である。本研究では第二種最尤推定に基づき、周辺尤度 $Z(\alpha, \beta, \gamma, \omega)$ を最大化するハイパーパラメータ値をハイパーパラメータの推定結果とする。

また、 x_k, a_k に対する周辺事後分布は

$$p(a_k, x_k | \mathbf{y}, \alpha, \beta, \gamma, \omega) = \prod_{n=1}^{k-1} \prod_{m=k+1}^N \int_0^\infty da_n \int_0^{2\pi} dx_n \frac{p(\mathbf{y} | \mathbf{a}, \mathbf{x}, \alpha) p(\mathbf{a} | \gamma) p(\mathbf{x} | \beta, \omega)}{Z(\alpha, \beta, \gamma, \omega)}$$

となる。maximizer of posterior marginal 推定に基づき、瞬時位相の推定値、瞬時振幅の推定値は

$$\{\hat{x}_k, \hat{a}_k\} = \arg \max_{\{x_k, a_k\}} p(a_k, x_k | \mathbf{y}, \alpha, \beta, \gamma, \omega)$$

により求めることが出来る。

ここで、周辺事後分布や周辺尤度は多重積分が含まれていることから、一般に計算困難であるが、本研究では確率伝播法を利用することにより計算量を減らし、計算可能とした。

また、本手法において位相及び振幅のゆらぎがないと仮定した場合の推定結果と単一周波数のみを通すバンドパスフィルタを通した後のヒルベルト変換による推定結果が一致することを証明した。

本手法を検証するため、生成した人工データを利用して、ヒルベルト変換と本手法とで瞬時位相、瞬時振幅の推定精度を比較した。その結果、本手法を用いた方が、瞬時位相、瞬時振幅の推定精度が向上していることがわかった。

次に、刺激提示時の α 波位相が reaction time (RT)に影響を与えることが知られていることから、本手法及びヒルベルト変換を用いて刺激提示時の α 波位相を推定し、どちらの手法を用いた方が刺激提示時の α 波位相と RT との関係がより明確に現れるかについて調べた。解析方法は先行研究(Callaway E and Yeager C L (1960) Science 132:1765-1766)と同様である。その結果、ヒルベルト変換を用いた場合は有意に関係が表れたのが被験者6名中2名のみであったのに対して、提案手法を用いた場合は6名中4名において有意に関係が表れた。推定精度が悪い場合は関係が不明瞭になるため、実データに関しても本手法の方が、推定精度がすぐれていると考えられる。

(2)続いて、本手法を発展させ、単一試行から α 波の位相変調を抽出できる、統計的手法を用いた新しい推定法を構築し、これを用いることで単一試行から α 波の位相変調が起こったタイミングを抽出する。

本手法において、位相、振幅の事前分布を

$$p(\mathbf{x}|\beta, \omega, \kappa) = \frac{\exp\left(\sum_{n=1}^{N-1} (1-I_n^p) \beta \cos(x_{n+1} - x_n - \omega) - \sum_{n=1}^{N-1} \kappa I_n^p\right)}{Z_p}$$

$$p(\mathbf{a}|\gamma, \lambda) = \frac{\exp\left(-\sum_{n=1}^{N-1} (1-I_n^a) \frac{\gamma}{2} (a_{n+1} - a_n)^2 - \sum_{n=1}^{N-1} \lambda I_n^a\right)}{Z_a}$$

とする。 κ, λ はそれぞれ位相の不連続量、振幅の不連続量を表すハイパーパラメータである。これを事前分布とし、先ほどと同様にベイズの定理を用いることで、パラメータを推定する。

そして、位相、振幅が共になめらかに変化している確率 $p(I_n^p=0, I_n^a=0) = p(I_n^p=0)p(I_n^a=0)$ 、位相は変調されているが、振幅はなめらかに変化している確率 $p(I_n^p=1, I_n^a=0) = p(I_n^p=1)p(I_n^a=0)$ 、位相はなめらかに変化しているが、振幅は変調されている確率 $p(I_n^p=0, I_n^a=1) = p(I_n^p=0)p(I_n^a=1)$ 、共に変調されている確率 $p(I_n^p=1, I_n^a=1) = p(I_n^p=1)p(I_n^a=1)$ を計算した。

本手法を実際の脳波データに適応した結果を図1に示す。0 msは刺激提示時を表す。その結果、刺激提示前においては主に $p(I_n^p=0, I_n^a=0)$ がもっとも大きな確率を示した。しかし、フラッシュ刺激提示後では $p(I_n^p=1, I_n^a=0)$ がもっとも大きな確率を示す時間があった。この結果は、単一試行のもとで、位相の急激な変化を統計的に検出出来ていることを示す。 $p(I_n^p=0, I_n^a=1)$ 及び $p(I_n^p=1, I_n^a=1)$ が最大値を示す時間はほとんどなかった。

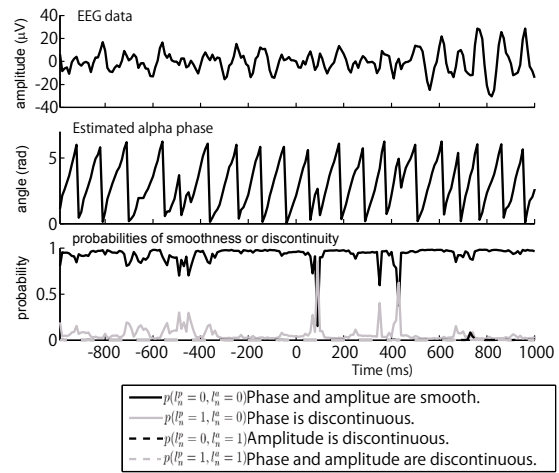


図1 本手法を単一試行に適応した典型例

次に、本手法を全試行に適応し、各時間において $p(I_n^p=1, I_n^a=0)$ がもっとも大きな確率を示した試行数をプロットした結果を図2に示す。この結果、明らかに、刺激提示後において検出されている試行数が多いことが分かった。この結果は、本研究にて構築した α 波の位相変調を抽出できる統計的手法は単一試行において刺激による α 波の位相変調を抽出出来ていることを示している。刺激直後の0 - 200 msの間においては検出されるタイミングは試行間で揃っているのに対して、200 ms以降においては試行間で揃っておらず、継続的に試行間でばらばらに検出されていた。このことから、刺激直後の試行間で揃っているものはこれまでのように加算平均を行った手法により検出が可能であったと考えられるが、200 ms以降の長潜時のものは試行間で揃っていないため、これまでの手法では検出できないものであると考えられる。このことは、これまで検出できなかった位相変調が本手法により検出できたことを示している。この結果に基づき、位相変調が波形変化のメカニズムの一つであることが明らかとなった。

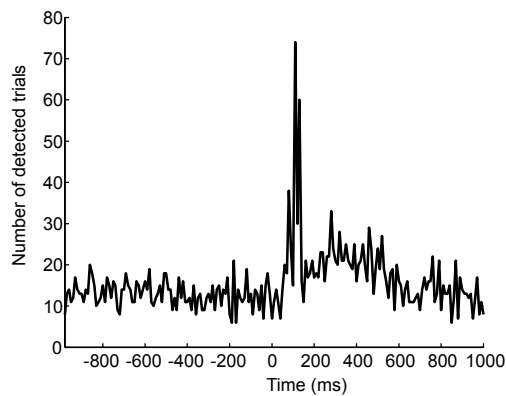


図2 各時間において位相の急激な変化が検出された試行数.

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7件)

- ① 成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 梅原広明. 周期的自発活動における急激な位相変化を単一試行から抽出する新しい手法. 電子情報通信学会技術研究報告 111, 71-74 (2011), 査読無し
- ② 成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 梅原広明. 視覚刺激によるアルファ波位相変調の検出. 第26回日本生体磁気学会大会論文集 24, 156-157 (2011), 査読無し
- ③ Naruse, Y., Takiyama, K., Okada, M. & Murata, T. Inference in alpha rhythm phase and amplitude modeled on Markov random field using belief propagation from electroencephalograms. Phys. Rev. E 92, 011912 (2010), 査読有り <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.82.011912>
- ④ 成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 村田勉. ベイズ推定を用いた新しい α 波瞬時位相, 振幅の推定法の提案. 第25回日本生体磁気学会論文集 23, 66-67 (2010), 査読無し
- ⑤ 成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 村田勉. 確率モデルを用いた新しい α 波瞬時位相, 振幅の推定法. 第25回生体生理工学シンポジウム論文集, 337-340 (2010), 査読無し
- ⑥ Naruse, Y., Matani, A., Miyawaki, Y. & Okada, M. Influence of coherence between multiple cortical columns on alpha rhythm: A computational modeling

study. Hum. Brain Mapp. 31, 703-715 (2010), 査読有り <http://dx.doi.org/10.1002/hbm.20899>

- ⑦ 成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 村田勉, マルコフ確率場モデルにおける確率伝播法をもちいた α 波位相, 振幅の同時推定. 電子情報通信学会技術研究報告 109, 167-172 (2010), 査読無し

[学会発表] (計11件)

- ① Naruse, Y., A Novel Method for Estimating Instantaneous Phase and Amplitude of Ongoing Oscillations and Detecting Phase Modulation. Neuroscience2011, 2011/11/15, アメリカワシントン DC ワシントンコンベンションセンター
- ② 成瀬康, 自発周期における位相変調を単一試行から抽出する新しい手法. 第34回日本神経科学大会, 2011/09/16, 神奈川県パシフィコ横浜.
- ③ 成瀬康, Exact inference method for Markov random field models of instantaneous phase and amplitude of oscillatory activities from electroencephalograms. 第33回日本神経科学大会, 2010/9/4, 兵庫県神戸コンベンションセンター.
- ④ Naruse, Y., Influence of visual stimulus size and top-down effect on phase resetting of alpha rhythm: An EEG/MEG model-based study. Biomag2010, 2010/3/29, クロアチアドブロブニク Rixos Libertas Hotel.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 周期的情報抽出方法

発明者: 成瀬康, 村田勉, 岡田真人, 瀧山健

権利者: 独立行政法人情報通信研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2010-195648

出願年月日: 平成 22 年 9 月 1 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

http://brain.nict.go.jp/members/y_naruse.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成瀬 康 (NARUSE YASUSHI)
独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研
究所脳情報通信研究室・主任研究員
研究者番号：00455453

(2) 研究分担者 ()
研究者番号：

(3) 連携研究者 ()
研究者番号：