

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700422

研究課題名(和文) 単一試行脳波から脳活動状態変化を検出する新しい統計的解析手法の開発

研究課題名(英文) Statistical Method for Detecting State Transition of the Brain from Single Trial EEG data

研究代表者

成瀬 康(Naruse, Yasushi)

独立行政法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳機能計測研究室・副室長

研究者番号：00455453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、単一試行の脳波から、脳の状態変化を捉えることが出来る統計的解析手法を確立することで、高次脳機能解析やブレインマシンインターフェースの発展に寄与することであった。本研究では、まず、波の位相シフトに注目し、単一試行からこの波の位相シフトが検出出来る統計的解析手法を確立した。そして、この位相シフトが起こるかどうかで反応時間が変わるということを明らかにし、この位相シフトが脳の状態変化を表している可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to develop a novel statistical method for detecting state transitions of the brain from a single EEG trial. First, we developed the statistical method that can detect phase shift of the alpha rhythm from a single EEG trial. Then, we showed the reaction times in the trials in which phase shifts were detected before the button press were significantly longer than in those in which phase shifts were not so detected. This result indicates that the alpha phase shift relates to the state transition of the brain.

研究分野：脳機能計測

キーワード：脳波 波 位相シフト 状態遷移

1. 研究開始当初の背景

脳波を用いた神経科学的研究は S/N 比を向上させるために多くの場合において、同一の刺激に対する脳活動を複数試行計測し、それを加算平均した結果に対して議論してきた。しかし、加算平均をしてしまうと試行間で同期した活動のみしか抽出することが出来ない。例えば、何かを見てひらめく時の脳活動について考えた場合、視覚刺激が提示されてから毎回同じタイミングでひらめくということは起こりえないため、ひらめきといった高次な脳活動は加算平均をする手法で抽出することは困難である。それ故、加算平均を行わずに脳情報を抽出できる手法の確立が重要である。

このような中、我々は、既存の手法にとらわれず、脳波に適した信号処理手法を構築するために統計的手法を用いることで、波の振幅、位相を高精度で抽出出来る手法を考案した。脳波の信号は揺らいでいることから、既存の手法では脳波から精度良く位相、振幅をすることができなかった。そこで、これまでに我々が行ってきた実験的研究及び数理モデル的研究の成果から得られた知見をもとに脳波に適した確率モデルを構築し、それを元にベイズの定理を利用して波の振幅、位相を抽出するという統計的手法を考案した。そして、既存の手法よりも、高精度で波の振幅、位相を抽出出来ることを示した。これを拡張することで加算平均をしていない単一の試行から脳情報を取り出すことが出来る可能性がある。

2. 研究の目的

このように我々のこれまでの研究で、波の位相、振幅を高精度に抽出することが出来るようになった為、次に行うべきことはこの位相、振幅から脳情報を抽出することである。これまでの神経科学的な研究により、何かを見たといった外的な要因や何かがあったといった内的な要因に伴って波の振幅が変化したり、位相が急に变化したりすることが知られている。本研究では、この波の位相が急激に変化する現象(位相シフト)に注目し、これまでに我々が開発した統計的手法を拡張することで、この位相シフトを単一試行から検出する手法を確立し、この位相シフトが脳機能に関連していることを示すことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 単一試行から位相シフトを抽出する手法

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。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。このときの観測値 ($y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$) から波の位相値 ($x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$)、振幅値 ($a = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$) 及び、位相の不連続パラメータ ($l^p = \{l^p_1, l^p_2, \dots, l^p_{N-1}\}$)、振幅の不連続パラメータ ($l^a = \{l^a_1, l^a_2, \dots, l^a_{N-1}\}$) に対する確率を推定する。このときの状態空間モデルは

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

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

とする。ここで、 N はサンプリングポイント数、 $\beta, \gamma, \omega, \kappa, \lambda$ はそれぞれ位相のゆらぎ、振幅のゆらぎ、individual alpha frequency (IAF)、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。また、 Z_p, Z_a 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

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

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

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

である。得られた事後分布を利用して、第二種最尤推定を用いてハイパーパラメータを推定し、そのハイパーパラメータの推定結果を用いて、振幅 a 、位相 x の推定、及び、 l^n, l^a が 0 もしくは 1 の確率を各 n に対して計算した。そして、位相、振幅が共になめらかに変化している確率 $p(l^n=0, l^a=0) = p(l^n=0)p(l^a=0)$ 、位相はシフトしているが、振幅はなめらかに変化している確率 $p(l^n=1, l^a=0) = p(l^n=1)p(l^a=0)$ 、位相はなめらかに変化しているが、振幅はシフトしている確率 $p(l^n=0, l^a=1) = p(l^n=0)p(l^a=1)$ 、共にシフトしている確率 $p(l^n=1, l^a=1) = p(l^n=1)p(l^a=1)$ を計算した。そして、この4つの中で最も大きな確率を示したものをそのサンプリングポイントの状態と定義した(S1: 位相、振幅が共になめらかに変化している状態。S2: 位相はシフトしているが、振幅はなめらかに変化している状態。S3: 位相はなめらかに変化しているが、振幅はシフトしている状態。S4: 共にシフトしている状態)。

(2) フラッシュ刺激時の脳波計測
ラッシュ刺激時の脳波データの試行数は1000回、被験者数は8名であった。脳波計測は拡張10-20法を元に30ch計測したが、本研究ではPzから得られた脳波データの

みを用いた。

(3) 単純反応課題時の脳波計測

視覚刺激に対する単純反応課題時の脳波データの試行数は500回、被験者数は5名であった。被験者はフラッシュ刺激を知覚したなるべく早くボタンを押すように教示された。反応時間の平均値、分散値は被験者ごとに異なっていたため、z-score化することで正規化した。

FC3, C3, CP3をLeft area (LA), FC4, C4, CP4をRight area (RA), P3, Pz, P4をParietal area (PA), O1, Oz, O2をoccipital area (OA)と定義した。各areaに含まれる3つの脳波チャンネルで計測された脳波データの内、一つでも位相シフトが検出された場合、そのareaにて位相シフトが起こったと定義した。そして、各試行で反応時間の150ms前から反応時間までの間に位相シフトが検出された試行をDetected trialと定義した。そして、Detected trialとUndetected trialとの間で反応時間を比較した。

4. 研究成果

(1) フラッシュ刺激時の脳波データに適応した結果

図1に単一試行の脳波データに適応した典型例を示す。0msはフラッシュ刺激提示時を表す。その結果、刺激提示前においては主に位相、振幅が共になめらかに変化している確率である $p(p_n=0, r_n=0)$ 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位相はシフトしているが、振幅はなめらかに変化している確率である $p(p_n=1, r_n=0)$ 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。

図2に各時間において位相シフトが検出された試行数の被験者間平均値を示す。early latency (50 - 150 ms)に鋭いピークが、late latency (200 - 600 ms)に緩やかなピークが見られた。鋭いピークは、試行間でタイミングが同期して位相シフトが起こっていることを示しており、緩やかなピークは試行間で

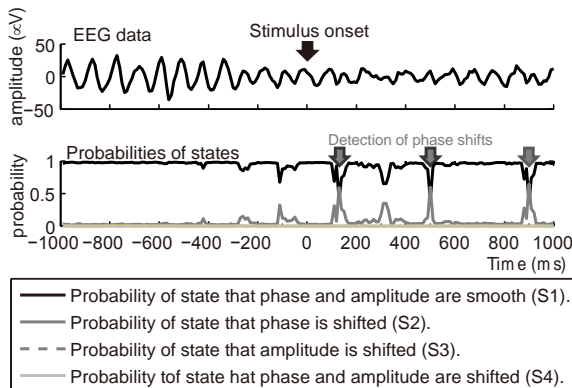


図1 本手法を単一試行に適応した典型例

タイミングが非同期で位相シフトが起こっていることを示している。これまでの研究で

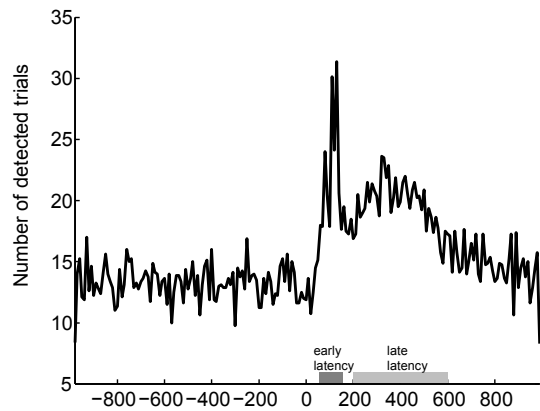


図2 各時間において位相の急激な変化が検出された試行数。

は加算平均を用いて解析をしていたため、試行間でタイミングが同期した位相シフトのみしか検出出来ていなかった。本研究により、late latencyにタイミングが同期していない位相シフトが存在していることが示された。

(2) 単純反応課題時の脳波データに適応した結果

図3に各areaにおけるDetected trialとUndetected trialのZ-score化された反応時間を示す。Z-score化された反応時間において正の値は平均反応時間より長いことを示し、負の値は平均反応時間よりも短いことを示している。LA, PA, OAにおいてDetected trialの反応時間はUndetected trialに比べて有意に長かった($p < 0.05$; Wilcoxon rank-sum test with Bonferroni correction)。この結果は、ボタンを押す直前に位相シフトが起こった場合、反応時間が長くなることを示している。

今回、解析対象とした10Hz付近の波帯域の自発活動の内、 α 波は後頭の視覚野付近から観測され、 μ 波は頭頂の感覚運動野付近から観測される。それ故、LAにおいて有意に反応時間に差があったということは、 μ 波の位相シフトが反応時間に関係していることを示し、OAにおいて有意に反応時間に差があったということは、 α 波の位相シフトも反応時間に関係していることを示している。この結果は、 α 波及び μ 波が視覚刺激に対する単純反応課題に関連する脳内処理に関連していることを示している。

これまでの先行研究において、 α 波の位相シフトは脳の状態変化を表しているという仮説が提案されている。本研究結果はこの仮説を支持するものである。つまり、単純反応課題を処理出来る脳の状態の時に刺激が入力された場合、状態変化を起こす必要が無いため、処理が素早くなされ反応時間が短くなる。

それに対して、単純反応課題を処理するために脳の状態変化を起こす必要がある場合は、この状態変化を起こす時間だけ処理が遅れるため、反応時間が長くなると解釈することが出来るからである。しかし、この脳の状態というのは具体的にどういう状態を表しているのかは不明であるため、これを明らかにしていくことが今後の課題である。

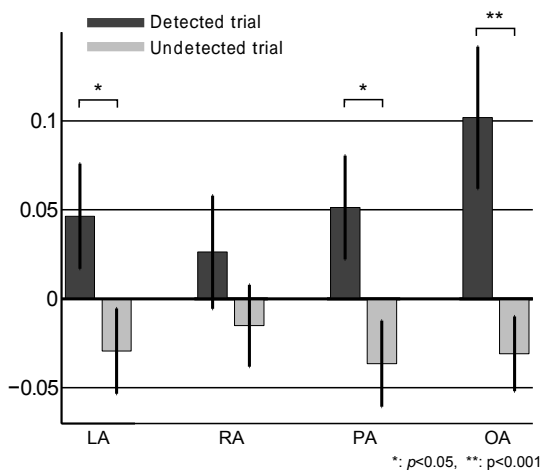


図 3 各 area における，Detected trials と Undetected trial の Z-score 化された反応時間の平均値。

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 2 件)

Yasushi Naruse, Ken Takiyama, Masato Okada, Hiroaki Umehara, Yutaka Sakaguchi, Phase shifts in alpha-frequency rhythm detected in electroencephalograms influence reaction time, *Neural Networks*, 査読有り, Vol. 62, 2015, pp 47-51, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2014.07.012>

Yasushi Naruse, Ken Takiyama, Masato Okada, Hiroaki Umehara, Statistical method for detecting phase shifts in alpha rhythm from human electroencephalogram data, *Physical Review E*, 査読有り, Vol. 87, 2013, 042708, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.87.042708>

〔学会発表〕(計 10 件)

成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 梅原広明, 阪口豊, Phase shifts in alpha-frequency rhythms in electroencephalograms affect reaction times, *neuroscience* 2014, 2014/11/16,

ワシントン DC (アメリカ)

成瀬康, 脳波, 脳磁界における自発活動のダイナミクス解析に向けた新しい信号処理手法, 第 53 回日本生体医工学会, 2014/6/24, 仙台国際センター(宮城県・仙台市)

成瀬康, 岡田真人, 瀧山健, 梅原広明, Evaluation of the amount of phase shift in the alpha rhythm, *Neuroscience* 2013, 2013/11/9, サンディエゴ(アメリカ)

成瀬康, 単一試行脳波から 波位相シフトを検出出来る新しい統計的手法, *Neural Oscillation Conference* 2013, 2013/7/19, 岡崎コンファレンスセンター (愛知県・岡崎市)

成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 梅原広明, 単一試行から 波の位相シフトを抽出できる新手法を用いた, 視覚刺激に同期しない位相シフトの発見, 第 28 回日本生体磁気学会, 2013/6/6, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 梅原広明, A novel method for detection of phase shift of alpha rhythm in single trial, 18th International Conference on Biomagnetism, 2012/8/28, パリ(フランス)

成瀬康, 瀧山健, 岡田真人, 梅原広明, 単一試行から 波の位相変化を抽出できる新しい手法の定量評価, 第 27 回日本生体磁気学会, 2012/6/1, 東京電機大学(東京都)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔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・脳情報通信融合研究センター脳機能計測研究室・副室長

研究者番号：00455453