検定技法を用いた ERP の単一試行解析と変調振動刺激の弁別評価

正員 内田 雅文* 正員 野澤 昭雄**
正員 井出 英人**

Single Trial Analysis of ERP Using Test Technique and Difference Evaluation of Modulated Vibratory Stimuli

Masafumi Uchida*, Member, Akio Nozawa**, Member, Hideto Ide**, Member

The purpose of this study is to develop the tactile display which consists of a single vibrator by using the modulated vibration. To achieve this purpose, we must evaluate the stimulus difference of the tactile in the modulated vibratory stimuli. In this study, the stimulus difference has been estimated by detecting the P300 wave in the averaged waveform of the ERP. However, it is indispensable to evaluate the stimulus difference efficiently to make the differential limen in the frequency region to express the modulated vibration clear. In this paper, the single trial analysis on the ERP that the significant difference of the EEG before and after the stimulus presentation is evaluated by the test technique is proposed.

キーワード：触覚，情報呈示，事象関連脳電位，P300，検定

Keywords: The tactile, Informational presentation, ERP, P300, Test

1. まえがき

事象関連脳電位 (Event Related Potential; ERP) は、外部刺激に対するヒトの知覚、弁別、意思決定といった心理反応に関連する脳内処理に応じて発現する大脳誘発電位である。その中でも刺激提示後 250～600ms 付近に発現する陽性電位、P300 波は刺激弁別・認知に関連している^{(1)～(3)}。

筆者らはこれまで、単一の触刺激素子 (PZT 振動子) による情報の多重化提示について研究してきた^{(4) (5)}。従来、触覚ディスプレイはその多くが触刺激素子のアレイ構造を前提としているが、単一の PZT 振動子による情報提示が可能になれば、触覚ディスプレイの携帯性・利便性・保守性・低コスト性に関する性能は飛躍的に向上する^{(6) (7)}。研究では変調振動を特徴付ける 2 つのパラメータ、搬送周波数 f_H 、変調周波数 f_L を用い、伝達情報を時間次元、図 1 のような周波数領域 f_H vs. f_L において多重化提示する方法

図 1 変調振動と周波数領域 f_H vs. f_L

Fig. 1. Modulated vibration and frequency region f_H vs. f_L .

を検討している。周波数領域 f_H vs. f_L による情報提示を可能にするためには、まずは情報の受け手となるヒト触覚における周波数領域 f_H vs. f_L 内の刺激弁別の特性、すなわち周波数弁別閾特性を明らかにしておく必要がある。本研究ではこの点に関して、ERP から P300 波を検出することによって、心理反応である刺激弁別を定量評価し、変調振動刺激に関する弁別閾特性の計測を行ってきた^{(8) (9)}。通常、ERP は背景脳波成分などが混在した状態で頭皮上から記録されるため、ERP の加算平均波形から P300 波を検出することが一般的である^{(10) (11)}。しかしながら、1 本の有効な加算平均波形を得るためには、標的刺激、非標的刺激合わせて 100 回以上もの ERP 計測が必要である。本研究の場合、約 100 回の ERP 計測におよそ 15 分を要しているが、長時間の計測は被験者の覚醒水準を低下させ、P300 波の発

* 電気通信大学電子工学科

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications

1-5-1, Chofu-ga-oka, Chofu, Tokyo 182-8585

** 青山学院大学電気電子工学科

〒229-8558 神奈川県相模原市淵野辺 5-10-1

Department of Electronics and Electrical Engineering, Aoyama Gakuin University

5-10-1, Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa 229-8558

現を抑制してしまう恐れがある。また、本研究の当面の主たる目標は、周波数領域 f_H vs. f_L 内の弁別閾の分布を解明することにあるが、加算平均波形を使ってこれを実現しようとする、この「100 回の ERP 計測」を 1 被験者あたり 1000 回以上行わなければならないことになる。可能な限り短時間で、刺激弁別を定量評価する方法が求められる。

短時間で刺激弁別を評価するための 1 つの方策として、加算平均波形を使わない方法、すなわち ERP の単一試行波形から P300 波を検出する方法が考えられる。そもそも P300 波は、ERP の加算平均波形中でも最大の陽性電位振幅として特定されることから、各単一試行波形中の P300 波発現時刻付近の電位振幅は、他の時刻の電位振幅に比べ、平均的に高位にあることが推測される⁽¹²⁾。この観点で P300 波発現時刻付近の電位振幅と、誘発成分を含まず、定常状態と見なされる刺激提示前の電位振幅を比較すれば、当然、前者が高位におかれているはずである。本稿では、刺激弁別を定量評価するための解析対象を ERP の単一試行波形とし、刺激提示開始前後の電位振幅平均値の有意差を検定することによって P300 波の発現度合を推定する単一試行解析の手法を提案する。ERP の単一試行解析については、FFT や wavelet 変換などを駆使し、ERP から解析的に P300 波を検出しようという試みは多数ある⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかしながら、刺激提示前の定常状態と仮定される脳波と刺激提示後の誘発された脳波である ERP とを比較し、検定技法に基づき P300 波の発現を評価する試みは本研究が最初である。変調振動刺激の弁別課題に対する ERP 計測を行い、提案手法に従って単一試行解析した結果、P300 波の発現が推測される単一試行波形に共通する特徴として、刺激提示前と P300 波発現時刻付近の電位振幅平均値との間に有意差が確認された。また、この結果を基に変調振動刺激に対する刺激弁別を単一試行波形から定量的に評価・推定し、提案手法による刺激弁別の結果と従来の加算平均波形による結果とを比較検討した。結果として、提案手法の有効性を確認するとともに、単一試行波形からの弁別閾推定の可能性を示した。

2. ERP の単一試行解析

2・1 提示刺激および ERP 計測方法 変調振動刺激提示および脳波計測の実験装置は図 2 の通りである。PZT 振動子 (村田製作所製 77B-21-19R7DM-4A0) は、伸縮性のある包帯によって非利手 (左手) 示指先端部腹側に固定、装着する。PZT 振動子への印加電圧は、 $f_L = 2 \sim 20\text{Hz}$ の矩形波を $f_H = 40 \sim 200\text{Hz}$ の矩形波で振幅変調した合成波で、パーソナルコンピュータに搭載した A/D 変換ボード (Interface 製 PCI-3310) によって生成し、オペアンプを介して振幅 16V に増幅する。パーソナルコンピュータは f_H, f_L を制御し、PZT 振動子を介して標的刺激、非標的の刺激を生成すると共に、矩形波出力の立上りと同時に誘発脳波記録装置 (日本光電製 MEB-5508) へ計測開始のトリガー信号を送出する。誘発脳波記録装置は、トリガー信号に呼

図 2 実験装置

Fig. 2. Experimental setup.

図 3 1 試行における刺激提示と脳波計測の関係

Fig. 3. Relations between presentation of stimulus and measurement of the EEG in one trial.

応して矩形波出力の立上り時刻の前 1s と後 1s、計 2s 間の脳波を記録する。全く刺激が提示されない 1s 間のブレイクタイムの後、標的刺激または非標的の刺激、何れか一方の刺激を 2 秒間提示し、その後 1s 間のブレイクタイムを設ける計 4s 間を 1 試行とする。図 3 に 1 試行中の刺激提示と脳波計測の関係を示す。便宜上、4ms を 1pt とする point 数によって時刻を表現すると、1 試行で得られる 1 本の脳波 e は $e = \{x_0, x_1, \dots, x_{249}, x_{250}, x_{251}, \dots, x_{498}, x_{499}\}$ なるデータ列で表される。ただし、 e の要素は各時刻における電位振幅を表し、 x_{250} が刺激提示開始時刻における電位振幅になる。脳波計測は、両側乳様突起 (A1, A2) を基準電極とする基準導法で行う^{(15)~(17)}。国際 10-20 基準法に基づき探查電極 (日本光電製 NE-121) の装着部位は正中頭頂部 (Pz)、接地電極は正中前頭部 (Fz) とする。サンプリング周波数は 250Hz、低域遮断周波数は 1Hz、高域遮断周波数は 20Hz とし、PZT 振動子からの漏れ電流の脳波への混入を防ぐため、PZT 振動子装着側手首に機能アースとして電極バンド (日本光電製 NM-522S) を装着する。被験者は安楽椅子に座り、姿勢は安静安楽仰臥、閉眼、PZT 振動子の振動音で刺激弁別が行われないよう市販の耳栓と遮音ヘッドホン (PELTOR 社製 H10A) を装着する。

脳波計測の試行には、標的の刺激が提示される試行と非標的の刺激が提示される試行の 2 種類がある。本実験では、各刺激の提示頻度を (標的の刺激) : (非標的の刺激) = 2 : 8 とし、標的の刺激が提示される試行と非標的の刺激が提示される試行がランダム順で繰り返行われる。周波数領域 f_H vs. f_L 上のある位置が定める変調振動 (f_H, f_L) の弁別閾を推定するために、(f_H, f_L) を非標的の刺激とし、基準点として固定

する。基準点の周辺の任意の位置で定められる変調振動を標的刺激とし、走査点として (f_H, f_L) 周辺を走査し、その時々計測脳波における P300 波の発現度合から刺激弁別を評価し、変調振動刺激に対する周波数弁別閾を推定する。結果として脳波計測中、被験者には 2 割の確率で提示される多種類の標的刺激と 8 割の確率で提示される 1 種類の非標的刺激を弁別する課題が課されることになる。加えて被験者には、予め非標的刺激を記憶させた上で非標的刺激でない刺激、つまり標的刺激が提示されたときのみ誘発脳波記録装置付属のレスポンスボタン（以後、R.B. と記す）を押すというタスクを課す。

2.2 検定技法を用いた単一試行解析 ある試行で得られた 1 本の脳波 e について考える。刺激提示開始前 1s 間の脳波 $\{x_0, x_1, \dots, x_{249}\}$ から時刻 t_A において時間区間 τ で標本 $\{x_{t_A}, x_{t_A+1}, \dots, x_{t_A+\tau-1}\}$ を切り出し、標本集団 A 群とする。また、刺激提示開始後 1s 間の脳波 $\{x_{250}, x_{251}, \dots, x_{499}\}$ から時刻 t_B において時間区間 τ で標本 $\{x_{t_B}, x_{t_B+1}, \dots, x_{t_B+\tau-1}\}$ を切り出し、標本集団 B 群とする。便宜上、 A 群、 B 群の標本数を共に τ にするため $0 \leq t_A \leq 249 - \tau$, $250 \leq t_B \leq 499 - \tau$ とする。 A 群、 B 群それぞれの平均値を X_{t_A}, X_{t_B} 、不偏分散を $S_{t_A}^2, S_{t_B}^2$ とする。また、 A 群、 B 群はそれぞれ $N(\mu_{t_A}, \sigma_{t_A}^2)$, $N(\mu_{t_B}, \sigma_{t_B}^2)$ の正規分布に従うものと仮定する。ただし、 μ_{t_A}, μ_{t_B} は A 群、 B 群それぞれの母平均、 $\sigma_{t_A}^2, \sigma_{t_B}^2$ は母分散とする。

刺激提示前 1s 間の被験者は定常状態にあると仮定すると、定常状態の A 群と誘発成分を含む B 群では、 μ_{t_A} と μ_{t_B} に有意差が生じているはずである。この有意差を仮定し検証するため、t 検定の手順に従い、仮説「 $\mu_{t_A} = \mu_{t_B}$ 」を有意水準 α で検定する。

自由度 (τ, τ) の F 分布における上側 $\frac{\alpha}{2}$ 点の臨界値を $F_{\frac{\alpha}{2}}(\tau, \tau)$ とする。このとき

$$S_{t_A}^2 > S_{t_B}^2 \quad \text{and} \quad \frac{S_{t_A}^2}{S_{t_B}^2} > F_{\frac{\alpha}{2}}(\tau, \tau) \quad \dots\dots\dots (1)$$

あるいは、

$$S_{t_A}^2 < S_{t_B}^2 \quad \text{and} \quad \frac{S_{t_B}^2}{S_{t_A}^2} > F_{\frac{\alpha}{2}}(\tau, \tau) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ならば、自由度 ν を (3) 式、

$$\nu = \frac{(S_{t_A}^2 + S_{t_B}^2)^2}{S_{t_A}^4 + S_{t_B}^4} (\tau - 1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

それ以外は (4) 式

$$\nu = 2(\tau - 1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

とする t 分布における両側 α 点の臨界値 $t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu)$ に対して (5) 式を満たすとき、仮説は破棄する。

$$\frac{|X_{t_A} - X_{t_B}|}{\sqrt{\frac{S_{t_A}^2 + S_{t_B}^2}{\tau}}} \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(\nu) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで仮説が破棄されたとき 1、以外を 0 とする関数 $h(t_B, t_A)$ を仮定する。もし、 B 群に P300 波相当の成分が含まれているならば、 μ_{t_A} と μ_{t_B} の間に有意差が生じ、 $h(t_B, t_A) = 1$ の領域が $t_B \times 4\text{ms/pt} = 250 \sim 600\text{ms}$ 付近に形成されることになる。

計測された n 本の脳波 $e_i (i = 0, 1, 2, \dots, n-2, n-1)$ それぞれについて $h(t_B, t_A)$ を求め、添字 i を付して $h_i(t_B, t_A)$ と記すことにする。また、 $h_i(t_B, t_A)$ の n に関する加算平均

$$H(t_B, t_A) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} h_i(t_B, t_A) \quad \dots\dots\dots (6)$$

なる関数を仮定する。

3. 実験結果および考察

本実験は、前述、単一試行解析上のパラメータ値を $\tau = 50\text{pt}$, $\alpha = 0.05$ とし、22 歳と 23 歳の健康な男女 2 名（被験者 I, II）について行った。非標的刺激は $(f_H, f_L) = (120, 8)\text{Hz}$ 、標的刺激は周波数領域 $f_H \text{ vs. } f_L$ 上で $(120, 8)\text{Hz}$ の周辺でグリッドを切り、 $(120, 8)\text{Hz}$ を取り巻くように複数点、設定した。周波数領域 $f_H \text{ vs. } f_L$ 上において、 $(120, 8)\text{Hz}$ の周囲に存在するはずの $(120, 8)\text{Hz}$ の弁別閾は、非標的刺激 $(120, 8)\text{Hz}$ に対して、その周辺に設定した多数の標的刺激の弁別の可・不可を精査することによって推定することができる。実験では非標的刺激 $(120, 8)\text{Hz}$ に対して、291 種類の変調振動を標的刺激として提示した。標的刺激、非標的刺激合わせて 3244 試行を行い、標的刺激の試行における脳波を 650 本計測した。

3.1 R.B. 押しタスク 図 4 は、脳波計測時、被験者に課した R.B. 押しタスクの結果である。非標的刺激 $(120, 8)\text{Hz}$ は周波数領域 $f_H \text{ vs. } f_L$ 上では、図中矢印で示した点に位置し、その周辺に位置する多数の標的刺激について R.B. が押された場合は ○ 印、押されなかった場合は × 印をプロットした。図中 $(f_H, f_L) = (150, 4)\text{Hz}$ のように、○ 印、× 印がプロットされていない点は、この実験の中で

図 4 R.B. 押しタスクの結果（被験者 I）
Fig. 4. Results of R.B. push task (subject I).

図 5 $h_i(t_B, t_A)$ の例
Fig. 5. Examples of $h_i(t_B, t_A)$.

は提示されることのなかった標的刺激である。本実験では、標的刺激と非標的刺激的提示はランダム順であると共に、複数の標的刺激のうち、どの標的刺激が提示されるかもランダムに設定しているため、実験中に提示されない標的刺激が生じたり、ある標的刺激が複数回提示されることもありうる。ひとつの標的刺激が複数回提示された場合、R.B. 押しタスクの結果が前後で異なることも生じる。例えば、図中 (190,12)Hz の R.B. 押しタスク結果は×印である。一方、(190,12)Hz の周辺に位置する標的刺激の結果は印であり、(190,12)Hz を×印とする結果は疑わしい。実験では標的刺激 (190,12)Hz は 2 回以上提示され、印とする結果も記録された。しかしながら図では、1 度でも R.B. が押されない状況が生じたならば×印でプロットしている。

3.2 P300 波の特徴抽出 標的刺激の試行における各脳波に対して提案手法に従い解析を施し、得られた $h_i(t_B, t_A)$ の一例を図 5 に示す。図は、横軸 t_B 、縦軸 t_A とする t_B vs. t_A 平面上に $h_i(t_B, t_A) = 1$ の座標 (t_B, t_A) を白点、 $h_i(t_B, t_A) = 0$ の座標 (t_B, t_A) を黒点でプロットしたものである。図中左は R.B. が押されなかったとき、右は押されたときの脳波から算出された $h_i(t_B, t_A)$ である。提案手法が時刻 t_B の B 群と時刻 t_A の A 群の間に有意差ありと判定すると、図では (t_B, t_A) 点に白点がプロットされている。

標的刺激の試行における脳波について、R.B. が押されなかったときと押されたときの 2 グループに分け、各グループの $H(t_B, t_A)$ を算出、 t_B vs. t_A 平面上にグレースケール 10 階調でプロットしたところ、前者は図 6、後者は図 7 のようになった。前者は刺激弁別が行われなかった状況にあり、P300 波の発現度合は非標的刺激と同程度であろうことが推測される。一方、後者は刺激弁別が行われた状況にあり、ERP には P300 波が含まれているはずである。各図中左が被験者 I、右が被験者 II より得られた結果である。図 7 を見ると、被験者 I では $t_B \times 4\text{ms/pt} = 400 \sim 600\text{ms}$ 付近に、被験者 II では $t_B \times 4\text{ms/pt} = 250 \sim 400\text{ms}$ 付近に $H(t_B, t_A)$ の高位な領域が縦の帯状（以後、縦帯領域と記す）に分布している。被験者 II の縦帯領域は被験者 I に比べると鮮明ではないが、R.B. が押されなかった図 6 右図と比較すると、縦帯領域の形成が確認できる。被験者 I の 400 ~

図 6 R.B. が押されなかったときの脳波の $H(t_A, t_B)$

Fig. 6. $H(t_A, t_B)$ in the EEG when R.B. wasn't pushed.

図 7 R.B. が押されたときの脳波の $H(t_B, t_A)$

Fig. 7. $H(t_B, t_A)$ in the EEG when R.B. was pushed.

600ms や被験者 II の 250 ~ 400ms は P300 波の潜時に相当し、加えて、縦帯領域が図 6 からはほとんど確認できないことから、縦帯領域は P300 波を含む脳波の $h_i(t_B, t_A)$ に共通する特徴である可能性がある。そこで、この縦帯領域の帯幅に相当するパラメータ ω ($\omega > 0$) を仮定し、各 $h_i(t_B, t_A)$ の縦帯領域の出現度合を (7) 式によって算出する。

$$\eta_i(t_B) = \frac{1}{(\omega - 1)(249 - \tau)} \sum_{x=0}^{\omega-1} \sum_{t_A=0}^{249-\tau} h_i(t_B + x, t_A) \quad \dots\dots\dots (7)$$

本稿では $\eta_i(t_B)$ を、単一試行波形の時刻 t_B における P300 波の出現度合を表すパラメータとする。

3.3 刺激弁別の推定 $\omega = 5\text{pt}(= 20\text{ms})$ とし、横軸 t_B 、縦軸を R.B. が押されたときの脳波の $\eta_i(t_B)$ の i に関する平均値としてプロットしたところ、図 8 が得られた。R.B. が押されているので、P300 波は発現しているはずである。結果として R.B. が押されたときの単一試行波形は平均的に、被験者 I では $t_B = 105\text{pt}(= 420\text{ms})$ 、被験者 II では $t_B = 114\text{pt}(= 456\text{ms})$ で $\eta_i(t_B)$ を最大にしていた。この結果に基づき、被験者 I における標的刺激時の各単一試行波形について、それぞれ $\eta_i(105)$ を算出し、周波数領域 f_H vs. f_L 上に $\eta_i(105)$ をプロットし、平滑化処理後、グレースケール 10 階調の等高線表示したところ、図 9 の上右図が得られた。図中、白色系の領域は $\eta_i(105)$ が高位

図 8 t_B と $\eta_i(t_B)$ の i に関する平均値との関係
Fig. 8. Relations between t_B and an average of $\eta_i(t_B)$ in EEG e_i when R.B. was pushed.

図 9 周波数領域 f_H vs. f_L と $\eta_i(105)$ の関係、および $f_H = 120\text{Hz}$, $f_L = 8\text{Hz}$ における加算平均波形による刺激弁別の評価結果と R.B. 押しタスクの正答率 (被験者 I)

Fig. 9. Relations between frequency region f_H vs. f_L and $\eta_i(105)$, and relations between evaluation results of stimulus difference by using average waveform and the percentage of correct answers of R.B. push task in $f_H = 120\text{Hz}$ and $f_L = 8\text{Hz}$ (subject I).

であることを示し、黒色系が濃くなるに従い、 $\eta_i(105)$ がより低位にあることを示している。図中 $\times$ 印は、図 4 をそのまま重ね描きしたものである。印の点は R.B. が押された標的刺激を表しているが、これらの点は概ね白色系の領域に位置しており、刺激弁別が行なわれたときの単一試行波形は、 $\eta_i(105)$ が高位であることを示している。一方、 $\times$ 印の点は R.B. が押されなかった標的刺激を表しているが、これらの点は概ね黒色系の領域に位置し、刺激弁別が行なわれなかったときの単一試行波形は、 $\eta_i(105)$ が低位であることを示している。結果として $\eta_i(t_B)$ の i に関する平均値が最大となった時刻 $t_B = 105$ における $\eta_i(t_B)$

と R.B. 押しタスク結果との対応関係が確認でき、加えて、 $\eta_i(t_B)$ の i に関する平均値が低位な時刻で、その対応がみられないことも本研究では確認している。以上より、本研究では刺激弁別の可・不可が $\eta_i(105)$ から推定できたものとする。非標的刺激 (120, 8)Hz の近傍では、 f_H 軸方向を長径、 f_L 軸方向を短径とする楕円形状に $\eta_i(105)$ の低位な領域が形成されており、非標的刺激 (120, 8)Hz の弁別閾は、(120, 8)Hz を楕円形状に包囲するような分布であることが推測される。 $\eta_i(105)$ の低位と高位を分ける閾値を設定し、 $\eta_i(105)$ の低位領域と高位領域の境界線を求めることによって、弁別閾は特定できる。図 9 の上左図および下図は、非標的刺激 (120, 8)Hz に対して従来の方法に基づき ERP 計測と心理物理計測を行い、ERP の加算平均波形と R.B. 押しタスクの正答率から刺激弁別を評価した結果である⁽⁸⁾。上左図、下図はそれぞれ、 $f_H = 120\text{Hz}$ における f_L 軸方向、および $f_L = 8\text{Hz}$ における f_H 軸方向の結果であり、図中実線は加算平均波形による刺激弁別の評価結果、点線は R.B. 押しタスクの正答率である。この結果に基づいて $\eta_i(105)$ の閾値を特定すれば、単一試行波形によって加算平均波形や正答率と同等な弁別閾の推定は十分に可能である。しかしながら刺激弁別は心理反応であり、多角的な計測を通して吟味することが肝要であることから、この点に関する詳細は次稿で論ずる。

3.4 弁別評価の効率化 本実験では被験者 I の場合、脳波計測を 3244 試行行い、標的刺激 291 種類の試行における脳波を 650 本計測、その中から 291 本の脳波を使って (120, 8)Hz の弁別閾を図 9 のように推定した。今回の実験では、同一の標的刺激が複数回提示されているので、結果的に試行回数が 3000 回を越えてしまったが、標的刺激対非標的刺激の提示頻度 2 : 8 を考慮し、刺激提示順のランダム性を損なうことなく刺激提示のスケジューリングを行えば、本提案手法は約 $291 \times 5 = 1455$ 試行で十分である。一方、加算平均波形による従来の方法によって本稿の結果と同等のものを得るには、少なくとも $291 \times 100 = 29100$ 試行は必要であり、したがって本提案手法は、従来の方法より計測・評価効率を 20 倍 (試行回数は $\frac{1}{20}$) 向上させたことになる。

4. むすび

筆者らは先行研究において、ERP の加算平均波形から P300 波を検出することによって、変調振動に対する刺激弁別の評価が可能であることを示した。また、ERP の計測と刺激弁別の評価効率の問題に関して、加算平均波形に依らない方法を提案し、効率化に関する検討も行ってきた。しかしながら、周波数領域 f_H vs. f_L におけるヒト触覚の弁別閾解明には、更なる計測・評価効率の向上が必要であり、ERP の単一試行解析は必須な技術として求められていた。ERP の単一試行解析に関しては筆者らも、周波数解析や wavelet 解析を駆使し、ERP の単一試行波形から直接、P300 波を検出しようと試みてきたが、刺激弁別の評価

に有効な結果はこれまで得られていなかった。

本稿での提案は、刺激提示前後の脳波を計測し、刺激提示開始前の定常状態と仮定される脳波と刺激提示開始後の誘発脳波である ERP を比較すること、そして、この前者と後者の有意差を検定技法に従って解析することによって、単一試行波形における P300 波の発現度合を間接的に評価するところにある。実験では、変調振動刺激に対する刺激弁別を提案手法に従い単一試行波形ごとに評価し、周波数領域 $f_{Hvs.f_L}$ 上 (120, 8)Hz における弁別閾の推定を試みた。結果として、(120, 8)Hz の周囲で楕円形状に広がる領域を捉えることができた。この領域は R.B. 押しタスクによる結果に対応しており、また、従来の加算平均波形による刺激弁別の評価結果や R.B. 押しタスクの正答率の結果とも概ね一致したことから、結果的に本稿で提案した単一試行波形による刺激弁別評価方法の有効性が確認できた。今後は、提案手法を利用して周波数領域 $f_{Hvs.f_L}$ 上の弁別閾分布を詳細に調査し、得られた知見を基に周波数領域 $f_{Hvs.f_L}$ を利用した情報提示方法の検討へと繋げていく予定である。(平成 16 年 1 月 21 日受付, 平成 16 年 6 月 4 日再受付)

文 献

- (1) 投石保広・下河内稔: “内因性 ERP の成分同定と主成分分析”, 臨床脳波, **26**, pp.623–628 (1984)
- (2) 佐藤謙助・井平富雄・山岡 淳: 誘発電位の基礎と臨床, 創造出版 (1990)
- (3) W. Sommer, J. Matt, and H. Leuthold: “Consciousness of attention and expectancy as reflected in event-related potentials and reaction times”, Journal of Experimental Psychology Learning, Memory and Cognition, Vol.16, pp.902–915 (1990)
- (4) M. Fukuda, M. Uchida: “A Basic Characteristic for Presentation of 3-D Position Information using PZT Vibrator”, *IEEJ Trans.*, Vol.119-C, No.7, pp.915–916 (1999-7) (in Japanese) 福田真樹・内田雅文: 「PZT 振動子を用いた 3 次元位置情報呈示のための基礎特性」, 電学論 C, **119**, 7, pp.915–916 (1999-7)
- (5) M. Uchida, H. Tanaka, H. Ide, and S. Yokoyama: “A Tactile Display by 16 kinds of modulated wave vibration Used Only One PZT Vibrator”, *IEEJ Trans. EIS*, Vol.120, No.6, pp.825–830 (2000-6) (in Japanese) 内田雅文・田中久弥・井出英人・横山修一: 「単一の PZT 振動子を用いた 16 種類の変調波振動による触覚ディスプレイ」, 電学論 C, **120**, 6, pp.825–830 (2000-6)
- (6) B.L. Gray and R.S. Fearing: “A surface-micromachined micro-tactile sensor array”, IEEE Int. Conf. Rob. and Auto., Vol.1, pp.1–6 (1996)
- (7) D. Pawluk, C. Buskirk, J. Killebrew, S. Hsiao, and K. Johnson: “Control and pattern specification for a high density tactile array”, IMECE Proc. of the ASME Dyn. Sys. and Control Div., Vol.64, pp.97–102 (1998)
- (8) T. Shiozaki, M. Uchida, H. Tanaka, A. Nozawa, and H. Ide: “The Evaluation of Cognition to the Modulated Vibration Stimulus by ERP”, *IEEJ Trans. EIS*, Vol.122, No.9, pp.1567–1572 (2002-9) (in Japanese) 塩崎哲也・内田雅文・田中久弥・野澤昭雄・井出英人: 「事象関連脳電位による変調振動刺激に対する認知評価」, 電学論 C, **122**, 9, pp.1567–1572 (2002-9)
- (9) M. Uchida, A. Nozawa, and H. Ide: “Difference Evolution to Modulated Vibration Stimuli by Using Single Trial Waveform of ERP”, *IEEJ Trans. EIS*, Vol.124, No.1, pp.73–78 (2004-1) (in Japanese) 内田雅文・野澤昭雄・井出英人: 「ERP の単一試行波形を用いた変調振動刺激に対する弁別評価」, 電学論 C, **124**, 1, pp.73–78 (2004-1)
- (10) G.D. Dawson: “A summation technique for the detection of

small evoked potentials”, *Electroencephal in Neuro physiol.*, Vol.6, pp.65–84 (1954)

- (11) S. Sutton, et al: “Evoked potential correlates of stimulus uncertainty”, *Science*, **150**, pp.1187–1188 (1965)
- (12) M. Nakamura, S. Nisida, and H. Sibasaki: “Deterioration of average evoked potential waveform due to asynchronous averaging and its compensation”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol.38, No.3, pp.309–312 (1991)
- (13) M. Nakamura, Y. Hayashi, and S. Nishida: “Method for Extracting Single Trial P3 from Child ERP by Using the Mathematical Model”, *Medical Electronics and Biological Engineering*, Vol.33, No.2, pp.135–138 (1995-2) (in Japanese) 中村政俊・林真由美・西田茂人: 「小児事象関連電位の数式モデルを用いた単一試行 P3 抽出法」, 医用電子と生体工学, **33**, 2, pp.135–138 (1995-2)
- (14) H.S. Liu, T. Zhang, and F.S. Yang: “A Multistage, Multi-method Approach for Automatic Detection and Classification of Epileptiform EEG”, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol.49, No.12, pp.1557–1566 (2002)
- (15) 北村元仕他: 脳波検査マニュアル, 文光堂, p.1181 (1988)
- (16) 脳波筋電図学会誘発電位検査法委員会: 「誘発電位測定指針」, 脳波と筋電図, **13**, 1 (1985)
- (17) 日本臨床神経生理学学会: “臨床脳波検査基準改定委員会報告”, (2002)

内 田 雅 文 (正員) 1990 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻)。青山学院大学理工学部電気電子工学科助手, 和歌山大学教育学部助教授を経て現在, 電気通信大学電気通信学部電子工学科助教授。主に自律移動ロボット, 生体計測, 感覚代行に関する研究に従事。工博。IEEE, 日本ロボット学会各会員。

野 澤 昭 雄 (正員) 1997 年青山学院大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。2002 年青山学院大学理工学部電気電子工学科助手。主にアントアルゴリズム, 生体計測, 感情工学の研究に従事。電子情報通信学会会員。

井 出 英 人 (正員) 1970 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻)。1985 年 UCLA 応用科学科客員研究員。1986 年 UCLA 脳研究所客員教授。感覚の計測, 感覚代行の研究に従事。青山学院大学理工学部講師, 助教授を経て現在, 同教授。工博。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会各会員。