研究論文：論文

ERP を用いた変調振動刺激に対する弁別反応の効率的な評価

野澤昭雄*, 森那緒子**, 内田雅文**, 田中久弥***, 井出英人*

*青山学院大学, **電気通信大学, ***工学院大学

EFFICIENT EVALUATION METHOD OF VITAL REACTION ON DISCRIMINATION TASK OF MODULATED VIBRATION STIMULI USING ERP

Akio NOZAWA*, Naoko MORI**, Masafumi UCHIDA**, Hisaya TANAKA***, and Hideto IDE*

*Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa 229-8558, Japan

**The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

***Kogakuin University, 1-24-2 Nishishinjuku, Shinjuku, Tokyo 163-8677, Japan

Abstract: The purpose of this study is the development of the device which presents the information by modulated vibration on the tactile sense. However, there has been no study that tried to the evaluation of cognition to the modulated vibration on the tactile sense. In this paper, the effective evaluation method of the vital reaction on the discrimination task of the modulated vibration stimuli was proposed, which based on both the Event Related Potential as a physiological index and psychophysical quantity. As a result, the proposed method was effective for quantitatively evaluation on discrimination of modulated vibration, and the efficiency of the evaluation work was improved approximately 50 %.

Keywords: Sense of touch, Modulated vibration, ERP

1. まえがき

従来、触覚ディスプレイは触刺激素子をアレイ配列し伝達情報を空間次元で多重化提示する方法が一般的であった。Optacon、触覚テレビなどはその一例であるが、情報提示装置としての携帯性、保守性、コストにおいて十分な性能を備えているとは言い難い。筆者らは単一触刺激素子と変調振動により、伝達情報を時間次元において多重化提示する方法を考案してきた[1-3]。単一触刺激素子で提示する変調振動を高域と低域、2つの周波数成分 f_H 、 f_L で生成すると変調振動は直交座標系 f_H - f_L 上の1点として図1のように表現できる。図2に示すような f_H - f_L 平面上の任意の点 $a = (f_H, f_L)$ の周辺に、別の点 $a+r$ を考える。 r は、 $r = (r, \theta)$, ($r = |r| \geq 0$) にて表される任意のベクトルとする。 a と θ を一定として r を変化させ、被験者 k , ($k=1, 2, 3, \dots, K$) に任意の r における刺激 a と刺激 $a+r$ を弁別する課題を与える。 k は、 $a+r$ が a の近傍にあるとき2つの刺激を弁別できないが、 r がある値を超えると a と $a+r$ が弁別できるようになる。本稿では、被験者 k の f_H - f_L 平面上の a において θ 方向に存在する弁別閾を $r_d^{(k)}(a, \theta)$ と記す。本研究では、 f_H - f_L 平面上における弁別閾 $r_d^{(k)}(a, \theta)$ の分布である弁別閾マップの解明を目指している。この目標の達成には、まず第一に被験者の刺激弁別を定量評価する必要がある。先行研究において、ヒトの認知弁別過程を反映して発現する事象関連脳電位(Event Related Potential: 以下、ERP と略記する)を生理指標として、心理物理指標と生理指標による方法をそれぞれ検討してきた。しかしながら、前者は弁別評価の定量化に問題があり、後者は加算平均されたERP波を対象としたため、弁別評価の作業効率に問題があった

[4, 5]。一般に心理物理指標は、被験者の性格によってどの程度の認知レベルで刺激弁別の可不可を判断し回答しているのか、実験者は評価できない。一方、ERPによる生理指標は、被験者の性格や意図とは無関係に発現する生理信号を評価できる点において意義がある。しかしながら、生理的に刺激を弁別することと、情報の伝達が可能ということが全く等価とは断定できない。従って、生理指標と心理物理指標による弁別閾について、それぞれの特性を分析し相補的に扱うことが重要である。本稿では、心理物理指標と単一試行ERP波に基づく生理指標の併用より、生理指標による刺激弁別の評価作業を効率化する方法を提案する。結果として、提案方法は刺激弁別の定量評価に有効であり、弁別評価の作業効率を約50%向上させることが可能となったので報告する。

2. ERP計測および弁別閾推定方法

2.1. ERP計測実験

変調振動提示とERP計測システムを図3に示す。実験はシングルルーム内にて行う。PZT圧電振動子(村田製作所製77B-21-19R7DM4A0)は、加工された事務作業用指ゴムサックにより利き手示指先端部腹側に装着する。計測ステーション(横河電機製WE400)のファンクションジェネレータモジュール(WE7121)により生成された矩形波は、振幅16Vに増幅した後PZT圧電振動子に印加される。計測ステーションはイーサネットモジュール(横河電機製WE7051)を介してパーソナルコンピュータから制御される。ファンクションジェネレータモジュールはPZT圧電振動子への矩形波印加と同期して誘発脳波記録装置(日本光電製MEB5508 Newropack Σ)へ計測開始の

図 1: f_H - f_L 領域における変調振動刺激

図 2: 周波数領域と提示刺激

トリガ信号を送出する。誘発脳波記録装置は PZT 圧電振動子による被験者への振動提示と同時に刺激提示時刻より 2 秒間の脳波計測を行う。従来の弁別閾推定処理方法においては標的刺激における ERP 波を 30~50 波必要としていたが本稿では解析の効率化が目的であるため、標的刺激が 15 回提示されるまで脳波計測を行う。脳波計測は両側乳用突起を reference とし、国際式 10-20 基準法に基づき、Fz (前頭葉)、Cz (頭頂部)、Pz (後頭部) に装着した探索電極 (日本光電製 NE-121B) より測定する。サンプリング周波数 500Hz、低域遮断周波数 1Hz、高域遮断周波数 50Hz とした。PZT 圧電振動子からの漏れ電流を防ぐため、右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安静安楽仰臥の姿勢をとり、瞬き等からのアーチファクトを防ぐため計測中は閉眼とする。また、PZT 圧電振動子の振動音による弁別を抑制するため遮音ヘッドホン (PELTOR 社製 H10A) を装着する。被験者には実験の主旨・計測方法を説明し、あらかじめ刺激に対する訓練を十分に行っておく。実験は被験者のサーカディアンリズムを聴取し基礎覚醒水準が高い時間帯に行い、実験前の薬剤服用、食事摂取などの制限を与え、常に一定のコンディションで実験が行えるように注意を払う。刺激は a と $a+r$ が 8:2 の出現頻度になるようランダムな順序で提示する。ERP 計測中、被験者には 2 つの刺激 a , $a+r$ のうち $a+r$ が提示されたとき脳波計付属のレスポンスボタンを押下げる課題 (以後、ボタン押し課題と記す) と、 $a+r$ の提示回数を数える課題 (以後、計数課題と記す) を課す。

2.2. 弁別閾推定方法

先行研究において生理指標を用いた弁別評価には、標的刺

図 3: 変調振動提示および ERP 計測システム

激・非標的刺激における単一の ERP 波をそれぞれ 30~50 波加算平均処理し獲得した加算平均波を使用していた。非標的の刺激との弁別可能な標的の刺激の ERP 波には刺激提示後約 300ms に陽性電位 (P300) の発現が認められる。これは弁別・認知に関連して発現する電位であり、標的の刺激・非標的の刺激それぞれの加算平均波における P300 の面積比を計測することで刺激に対する弁別反応を定量的に評価してきた [4, 5]。本稿では、標的の刺激提示時における最大 15 試行分の単一 ERP 波 (以降単一試行波と記す) の P300 成分の電位面積の平均値を生理指標とし、従来の加算平均処理による手法と比較して弁別閾推定の効率化を図る。ERP の計測実験では被験者にボタン押し課題と計数課題を課している。被験者に課した 2 課題によって、被験者 k へ実際に提示した $a+r$ の提示回数 $N(r, a, \theta)$ なる物理量と、 k が数え上げた $a+r$ の提示回数 $N^{(k)}(r, a, \theta)$ なる心理量が得られる。この 2 量から (1) 式により、刺激弁別に関する心理物理計測が可能になる。

$$\rho^{(k)} = \frac{N^{(k)}(r, a, \theta)}{N(r, a, \theta)} \times 100\% \quad (1)$$

(1) 式を標的の刺激正答率 $\rho^{(k)} = \rho^{(k)}(r, \theta, a)$ と定義し、 $\rho^{(k)}$ を心理物理指標による刺激弁別閾の評価値とする。被験者は計測中レスポンスボタンの押し損ないや、提示された刺激の認知弁別が遅れ次の提示刺激時にボタンを押してしまうなどのミスをする可能性が考えられる。ここで、 $\rho^{(k)} \geq 80\%$ であれば、 k は 2 つの刺激を完全に弁別しているものと仮定し、 $r | \rho^{(k)} = 80\%$ の k に関する最小値を図 6 のように r_{80} とおく。このとき K 名の全被験者は、 $r \geq r_{80}$ を満たす a と $a+r$ を完全に弁別することになる。図 6 は、 $\rho^{(k)}$ と後述する生理指標による $\tilde{S}^{(k)}$ は一致しないことを示している。被験者 k における ERP 計測実験において非標的の刺激 a 、標的の刺激 $a+r$ のとき、標的の刺激時の単一試行 ERP 波が M_0 ($M_0 < 15$) 本計測された場合を考える。本研究では ERP をサンプリング周波数 500Hz で 2 秒間計測しているため、1 本の単一試行波のデータ長は 1000 サンプル点になる。 M_0 本の単一試行波それぞれに振幅値を 0

図 4: P300 波成分の抽出

図 5: 単一試行 ERP 波の例 (非標的刺激 = (120, 8), 弁別可能な標的刺激 = (200, 8), 弁別不可能な標的刺激 = (130, 8))

から 1 に正規化し, 17 サンプル点区間の移動平均処理を施すと $e_m^{(k)}(nr, a, \theta)$ ($n=0, \dots, 999$; $m=1, 2, \dots, M_0$) で表される単一試行波データを得る。ただし, n はデータ点数, m は単一試行波 M_0 本中の任意の 1 本を表し, $e_m^{(k)}(nr, a, \theta)$ は $0 \leq e_m^{(k)}(nr, a, \theta) \leq 1$ である。一般に変調振動刺激に対する P300 波の頂点潜時は刺激提示後 250~600ms であるため, $e_m^{(k)}(nr, a, \theta)$ のこれに相当するサンプル点区間 [125, 300] における頂点潜時 n_p の前後 25 サンプル点の区間から (2) 式により電位面積値 $s_m^{(k)} = s_m^{(k)}(nr, a, \theta)$ を算出することにより P300 波成分を抽出する。ただし, $1(-)$ はステップ関数である。図 4, 5 に $s_m^{(k)}$ 及び単一試行 ERP 波の例を図示する。

$$s_m^{(k)} = \sum_{i=n_p-25}^{n_p+25} e_m^{(k)}(i; r, a, \theta) \cdot 1(e_m^{(k)}(i; r, a, \theta)) \quad (2)$$

ERP の臨床応用では一般に P300 が発現していない ERP 波を解析処理から除外するため, 判読医が経験に基づき ERP 波の選別を行う。本稿では, M_0 本の単一試行波から得た $s_m^{(k)} = s_m^{(k)}(nr, a, \theta)$ の m に関する平均値と標準偏差を求め, (平均値) $\pm$ (標準偏差) の範囲から外れる単一試行波は以降の処理から除外することで ERP 波の選別を行う。結果, M_0 本の単一試行波は M ($M \leq M_0 < 15$) 本に目減りする。この M 本の中で改めて $s_m^{(k)} = s_m^{(k)}(nr, a, \theta)$ の m に関する平均値 $S^{(k)} = S^{(k)}(r, a, \theta)$ を (3) 式より算出する。

$$S^{(k)} = \frac{1}{M} \sum_m s_m^{(k)}(r, a, \theta) \quad (3)$$

図 6: $\tilde{S}^{(k)}$ と r_{80} の関係

図 7: $r < r_{80}$ における $Y_\rho(r)$ と $Y_S(r)$

r に関して $S^{(k)}$ が $0 < S^{(k)} < 100$ になるように規格化した $\tilde{S}^{(k)} = \tilde{S}^{(k)}(r, a, \theta)$ を (4) 式とし, 生理指標による刺激弁別の評価値とする。ただし, $\min_r(-)$ および $\max_r(-)$ はそれぞれ, r に関する最小値, 最大値とする。

$$\tilde{S}^{(k)} = \frac{S^{(k)} - \min_r(S^{(k)})}{\max_r(S^{(k)})} \times 100\% \quad (4)$$

一般にヒトの感覚量は刺激の単調変化に伴い Sigmoid 曲線の形を描くことが多い。本実験結果においても提示刺激の変化に伴い標的刺激正答率は Sigmoid 曲線を描くことが期待される。Sigmoid 曲線の傾きに相当する部分, すなわち $\rho^{(k)}$ および $\tilde{S}^{(k)}$ の微分量 $\frac{\partial \rho^{(k)}}{\partial r}$, $\frac{\partial \tilde{S}^{(k)}}{\partial r}$ が最大となる r 付近に弁別閾が存在すると仮定し, 新たに r の関数 $Y_\rho(r)$, $Y_S(r)$ をそれぞれ (5) 式, (6) 式のように定義する (図 7)。(5), (6) 式中の r_ρ , r_S は $\frac{\partial \rho^{(k)}}{\partial r}$, $\frac{\partial \tilde{S}^{(k)}}{\partial r}$ をそれぞれ最大にする r である。

$$Y_\rho(r) = \rho^{(k)} \Big|_{r=r_\rho} + (r - r_\rho) \cdot \frac{\partial \rho^{(k)}}{\partial r} \Big|_{r=r_\rho} \quad (5)$$

$$Y_S(r) = \tilde{S}^{(k)} \Big|_{r=r_S} + (r - r_S) \cdot \frac{\partial \tilde{S}^{(k)}}{\partial r} \Big|_{r=r_S} \quad (6)$$

本稿では $\rho^{(k)} \geq 80\%$ であれば被験者 k は 2 つの刺激を完全に弁別できていると仮定しているため $Y_\rho(r)$, $Y_S(r)$ も同様に 80% 以上であれば 2 つの刺激を弁別できていると考える。

$Y_\rho(r)$ と $Y_S(r)$ が 80% となる r を $Y_\rho^{-1}(80)$ と $Y_S^{-1}(80)$ とすると, $Y_\rho^{-1}(80)$ と $Y_S^{-1}(80)$ をそれぞれ心理物理指標による弁別閾および生理指標による弁別閾の推定値とする (図 8)。

図 8: $Y_p(r)$ と $Y_s(r)$ より推定される弁別閾

3. 実験結果および考察

心理物理測定法の恒常法に基づき、 $a=(40, 2)$ [Hz], $r=(r, 90\pm)$, ($r=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20$ [Hz]) における弁別閾の推定を行った。被験者は健康成人7名(年齢22~24歳)である。推定した弁別閾を図9に示す。本実験で r_{80} は8Hzとなり、推定した弁別閾はほぼ8Hz以下であるため図9では $r=2$ から10[Hz]とした。心理指標による弁別閾、従来の加算平均波による弁別閾、提案した単一試行波による弁別閾、および各弁別閾の全被験者の平均および標準偏差を示している。心理物理指標による弁別閾と単一試行波による弁別閾は概ね一致している。心理物理指標による弁別閾との差の平均値を算出しても0.83[Hz]となり、本手法による弁別閾は心理物理指標と同等の弁別閾を得ることが出来ている。この結果より、弁別閾の推定に単一試行波を用いることは有効であることが確認できた。また、被験者7人中5人が心理物理指標より弁別閾が狭くなっていた。心理物理指標では明らかに弁別可能な2種類の変調振動を特定することが可能であるが、被験者が刺激の違いを知覚・弁別の後、意思表示するまでの間に被験者の性格に起因する躊躇や戸惑いなどの意思決定に関する心理過程が入る。弁別閾付近の提示刺激は弁別課題が困難なためこの心理過程の影響が大きく反映されるが、生理指標を用いることで躊躇や戸惑いが軽減される結果となった。単一試行波による弁別閾は加算平均波による弁別閾と同様の弁別閾が推定されている。従来の加算平均法によるERP計測では、非標的刺激と標的刺激を8:2の割合で標的刺激の提示回数が30回となるまで提示していたため、ある標的刺激の加算ERP波を得るのに約4時間を要していた。これに対して本手法では、標的刺激の提示回数が最大15回であるため、弁別評価の効率は約50%向上し、約半分の計測時間で弁別閾の推定が可能である。計測時間の短縮は被験者の負担軽減や計測に対する集中力低下の抑制にもつながる。また、全被験者で加算平均波より弁別閾が狭くなっていた。加算平均処理によりERP波は平滑化されるため、P300はなだらかに発現するが単一試行波では加算平均波と比べP300の振幅が大きくかつ鋭く発現している波形が確認された。本稿では刺激提示後250~600ms間におけるERP波の頂点潜時 ± 50 ms間での面積値を求めるた

図 9: 推定した弁別閾

めP300が鋭く発現している単一試行波の面積値の方が加算平均波より大きくなる場合がある。弁別閾が狭くなった要因としてこの面積値の影響が考えられるが、この点に関しては今後の検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、単一触刺激素子の変調振動による触覚ディスプレイの開発を目標に、 f_H-f_L 上における弁別閾マップの完成を目指している。本稿は、弁別閾推定するための刺激弁別の評価作業を心理物理指標と生理指標の併用により効率化する手法の提案である。生理指標としてERPの単一試行波を用いERP波中のP300の面積値を算出することで刺激弁別の定量評価を行った。実験の結果、全被験者で心理物理指標で推定される弁別閾とほぼ同等な弁別閾が生理指標により得られ、提案手法は有効であることを確認した。生理指標による従来の方法と比べ、提案手法は刺激弁別評価に要する時間をほぼ半減させており、刺激弁別評価の作業効率を50%向上させることが可能となった。

参考文献

- 1) 福田他: 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-C, 7, 915-916, 1999
- 2) 内田他: 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-C, 6, 825-830, 2000
- 3) 内田他: 変調波振動による情報呈示のための基礎特性, 平成13年度電気学会全国大会論文集3, 337, 2001
- 4) 塩崎他: 事象関連電位を用いた触覚認知に関する定量評価法, 電気学会計測研究会資料, Im-02-41, 31-34, 2002
- 5) 塩崎他: 事象関連電位による変調振動刺激に対する認知評価, 電学論C, 122-C, 9, 1567-1572, 2002
- 6) 北村他: 脳波検査マニュアル, 文光堂, pp. 92, 2002
- 7) 脳波筋電図学会誘発電位検査法委員会: 誘発電位測定指針案, 1984
- 8) 投石他: 内因性ERP成分同定と主成分分析, 臨床脳波, 26, 623-628, 1984