事象関連脳電位による変調振動刺激に対する認知評価

学生員 塩 崎 哲 也 (青山学院大学)

正 員 内 田 雅 文 (電気通信大学)

正 員 田 中 久 弥 (青山学院大学)

正 員 野 澤 昭 雄 (青山学院大学)

正 員 井 出 英 人 (青山学院大学)

The Evaluation of Cognition to the Modulated Vibration Stimulus by ERP

Tetsuya Shiozaki, Student Member (Aoyama Gakuin University), Masafumi Uchida, Member (The University of Electro-Communications), Hisaya Tanaka, Member, Akio Nozawa, Member, Hideto Ide, Member (Aoyama Gakuin University)

The purpose of this study is the development of the device which presents information by using the modulated vibration. However, there has been no study that tried to the evaluation of cognition to the modulated vibration in the tactile sensor of human.

In this paper, we propose the method that the cognition level of the discrimination to the modulated vibration stimulus is evaluated based on the Event Related Potential (From now on, it is written with ERP). Modulated vibrations (f_H, f_L)Hz generated from the high band component f_H (from 40,200Hz) and the low band component f_L (from 2,20Hz). Then, We expressed a certain modulated vibration as 1 point in the frequency area f_H vs. f_L . We measured the distribution of the discrimination threshold at the frequency area f_H vs. f_L based on the proposed evaluation method by the ERP. As a result of the experiment, it is reported because the effectiveness of the proposal method was confirmed.

キーワード：触感覚, 情報呈示, 変調振動, 事象関連脳電位

Keywords: Tactile sensor, Information presentation, Modulated vibration, ERP

1. ま え が き

振動を用いた触覚への情報呈示の形態はこれまで主に、視覚障害者向けの触覚ディスプレイや聴覚障害者向けの発話訓練器の補助機能といった限られた分野で利用されてきた^{(1)~(3)}。しかし近年、携帯電話等におけるコール信号の振動モードが普及し、振動による情報呈示がより身近な情報の呈示形態になっている。

触覚はその特殊性から、視覚、聴覚に比して受容情報量が極端に少ないものの、視覚、聴覚と同様に時空間情報を処理することができる。この点を考慮して伝達する情報を如何に多重化するかが、触覚における感覚代行の課題といえる。触覚ディスプレイの多くは、触刺激素子のマトリックス配列による空間情報呈示型が採用されており、伝達する情報を空間次元において多重化している^{(4)~(6)}。また、振動刺激と電気刺激の併用による伝達情報多重化の試みも報告されている^{(1)~(2)}。

本研究では、単一の触刺激素子 (PZT 振動子) による変調振動を用いて呈示する情報を多重化する方法を検討している。これまでの研究では、心理物理実験に基づき触覚の変調振動における周波数成分に関する感度特性、弁別閾特性を計測して、触感覚の異なる 16 種類の変調振動を見出し、単一の PZT 振動子による 2 次元情報の呈示様式を提案してきた^{(7)~(9)}。しかしながら心理物理実験では、明らかに弁別可能な 2 種類の振動を特定することは可能であるものの、2 種類の振動の弁別に関するヒトの認知のレベルを定量的に評価することは困難であった。結果として、被験者が振動変化を知覚し、知覚の意思を表明するまでの、意思表明を躊躇している間の認知過程は評価できず、この点が個人差として実験結果に大きく影響した。実験後の被験者への口頭試問から、被験者が振動弁別に関して、振動刺激ごとにその認知レベルが変化していることは推測できるが、心理物理実験によってこのレベルを定量的に捕らえることは、現時点において難しい。

誘発脳電位の一種である事象関連脳電位 (Event Related Potential:ERP) は、ある刺激入力やそれに伴う課題を被験者に課したときの種々の精神作業の負荷によって誘発される反応である。予期、注意、知覚、検索、識別、意思決定、記憶などの心理諸過程と対応した大脳活動を反映するものと言われている⁽¹⁰⁾。聴性刺激による弁別課題に対する ERP には、認知に関連した P300 波と呼ばれる成分が発現し、刺激の弁別に対応した反応を定量的に捕らえることができる。この P300 波は一般に、単発刺激 (刺激呈示時間約 100ms) によって誘発、発現するが、本研究で扱う変調振動刺激の周波数帯域では単発刺激は成立し得ない。したがって従来の聴性弁別パラダイムをそのまま変調振動刺激に応用することはできないものの、もし、変調振動刺激に対する ERP から認知・弁別に関連した成分が抽出できれば、変調振動刺激の弁別に関する認知レベルを定量的に評価できる可能性がある^{(11)~(13)}。

本稿では、ヒトの変調振動刺激に対する弁別の認知レベルを ERP の電位振幅と潜時に基づいて定量評価する手法を提案する。変調振動刺激に対する弁別パラダイムを新たに設計することによって ERP の計測を行い、得られた ERP を提案手法に基づき評価することによって提案手法の有効性を示す。

2. 変調振動刺激に対する認知レベルの評価法

ERP は刺激入力やそれに伴う課題を被験者に課したとき、その精神作業の負荷によって誘発される反応である。本研究では特に、ERP が認知・弁別に関する心理諸過程を反映している点に着目している。

聴性 odd-ball 課題に対する ERP には、認知に関連した P300 波が発現し、刺激の弁別に対応した反応が定量的に捕らえられる⁽¹⁴⁾。P300 波は一般に単発刺激によって誘発、発現するが、本研究で扱う変調振動の周波数帯域では単発刺激は成立し得ない。

本研究ではまず、振動弁別に関するパラダイムを新たに設計する。次に、この振動弁別パラダイムに基づいて変調振動刺激に対する生理計測を行い、計測される ERP から振動弁別に関する認知レベルの評価方法を考案する。

〈2・1〉 振動弁別パラダイムの設計 臨床応用の分野では、ERP の計測に聴性 odd-ball 刺激が広く用いられる。被験者には、低頻度刺激 (2kHz burst tone) と高頻度刺激 (1kHz burst tone) がランダムに呈示され、低頻度刺激の計数課題が課せられる。このとき被験者には低頻度刺激を弁別するという認知処理が成立する。この被験者から計測される ERP の解析には、30~50 回の刺激に対する脳波の加算平均処理が必要である。この処理を経ることによって低頻度刺激、高頻度刺激それぞれの ERP 波形を得ることができる。以上が、一般に知られる聴性弁別パラダイムである。

特に低頻度刺激から得られる ERP 波形の特徴として、刺激呈示から約 300ms 後 (成人の場合) の時点で陽性電位の発

現が認められ、一般に P300 波と呼ばれている。通常、P300 波の振幅、面積、頂点潜時といった特徴量を抽出することによって、ERP の解析、評価が成される。これらの特徴量は認知処理に対応して変動し、また、2つの刺激が類似しているとき、P300 波の発現が抑えられる特性が知られている⁽¹⁰⁾。本研究では、この特性を利用して振動弁別パラダイムを設計し、ERP から振動弁別の認知レベルを評価する手法を提案する。振動弁別パラダイムでは、便宜上、聴性弁別パラダイムにおける低頻度刺激、高頻度刺激に対応する用語として、標的刺激 (target)、非標的刺激 (non-target) を用いることにする。

本研究で扱う変調振動は、低域成分 $f_L (= 2 \sim 20\text{Hz})$ で高域成分 $f_H (= 40 \sim 200\text{Hz})$ を振幅変調して生成する。振動が 2 種類の周波数成分からなることから、ある変調振動は周波数領域 f_H vs. f_L における 1 地点 (f_H, f_L) として表現できる。

変調振動の弁別に関する ERP の計測を行うために、領域 f_H vs. f_L において任意の 2 地点を指定し、一方が表す変調振動を非標的刺激とし、もう一方をその比較対象である標的刺激とする。この 2 つの振動刺激を単一の PZT 振動子を利用して利手指示先端部腹側に接触呈示する。呈示頻度は (非標的刺激) : (標的刺激) = 7 : 3 とし、標的刺激が稀に生じられるようランダム順に呈示する。このとき被験者には標的刺激に注意を向け、その呈示回数を数えるよう指示しておく。計数課題を課すことによって、標的刺激を弁別する脳内処理を強化させる効果が期待できる。また、被験者にはレスポンスボタンを持たせ、標的刺激が呈示されたときに素早くボタンを押すよう指示する。このボタン反応課題は、被験者が弁別パラダイムを確実に遂行する効果が期待でき、さらにボタン反応時間の記録が ERP の潜時評価に役立つ。

〈2・2〉 認知レベルの評価 ERP は 2 つの刺激の違いが大きいほど明確に発現する。聴性刺激の場合は単発刺激が可能で、単発刺激に対する認知過程は P300 波に反映される。P300 波を解析することにより、聴性刺激における認知レベルは推定できる。

一方、本研究が扱う変調振動刺激、周波数領域 f_H vs. f_L は連続刺激になるので、単発刺激における P300 波に相当する ERP 成分が複雑に重畳されてしまうことが予想される。また、図 1 のような高域成分の等しい 2 つの変調振動刺激 (f_H, f_{L1}), (f_H, f_{L2}), ($f_{L1} > f_{L2}$) の場合、ERP の指標となる刺激呈示時刻をどの時点で設定すべきか不明である。振動刺激呈示の開始時刻は図中 t_s であり、この刺激に対する ERP は t_s から発現するが、振動弁別の認知過程がこの時点から進展するとは考え難い。(f_H, f_{L1}) と (f_H, f_{L2}) に違いが現れるのは t_s から $\frac{1}{2f_{L1}}$ 経過した後であり、それ以前において (f_H, f_{L1}) と (f_H, f_{L2}) は全く同じ振動である。したがって振動弁別の認知過程が始まる時刻は、少なくとも (f_H, f_{L1}) と (f_H, f_{L2}) に違いが現れる $t_s + \frac{1}{2f_{L1}}$ 以降と考えるべきである。以上の理由から、変調振動刺激

図 1 刺激呈示時刻

Fig. 1. The time of a stimulus presentation.

の ERP では、潜時 300ms の波形に認知過程が十分に反映されるとは言い難く、認知レベルの評価に ERP のどの成分を参照すべきか問題である。この問題に対して本研究では、ERP の電位振幅と潜時を総合的に評価し、参照する成分を動的に決定する方法をとる。

変調振動刺激 (f_H, f_L) に対する ERP の電位波形を $e(t; f_H, f_L)$ とする。典型的なパラダイムである聴性 odd-ball 課題における脳波判読法では、陽性電位の頂点潜時が 300ms 付近にある、いわゆる P300 波を潜時 200ms から 400ms、すなわち 300ms から $\pm 100\text{ms}$ ($=\pm 0.1\text{sec}$) の区間において判読している。本研究もそれに習い、陽性電位の頂点潜時の $\pm 0.1\text{sec}$ に着目、図 2 のように $e(t; f_H, f_L)$ が $t_s + \frac{1}{2f_{L1}}$ からレスポンスボタン押下時刻 t_r の間で、陽性の最大振幅を示した時刻 t_p から $\pm 0.1\text{sec}$ の区間における電位面積 $E(f_H, f_L)$ を次式のように仮定する。

$$E(f_H, f_L) = \int_{t_p-0.1}^{t_p+0.1} \psi(e(t; f_H, f_L)) dt, \dots\dots (1)$$

$$t_s + \frac{1}{2f_{L1}} \leq t_p \leq t_r \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\psi(-)$ は次式とする。

$$\psi(x) = \begin{cases} x, & (x \geq 0) \\ 0, & (x < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

弁別に関連する成分は、呈示刺激による感覚受容器興奮の時刻からレスポンスボタン押下運動開始時刻の間に含まれているはずである。また、認知過程には P300 波が何らかの形で関わることから、誘発電位は陽性電位として発現するはずである。 $E(f_H, f_L)$ はこの 2 つの要件を反映する ERP の特徴量であり、このパラメータが参照する成分は $t_s - t_r$ 間で動的に決められる。本研究では、 $E(f_H, f_L)$ を変調振動刺激 (f_H, f_L) に対する認知過程を反映した ERP の特徴量、すなわち認知レベルの評価値として提案する。

3. 実験方法

本研究では評価値 $E(f_H, f_L)$ を利用して、変調振動の周波数領域 $f_H \text{ vs. } f_L$ 内の任意の地点 (f_H, f_L) を中心に、その周囲に分布する弁別閾を明らかにしたい。この目的を

図 2 $E(f_H, f_L)$ と $e(t; f_H, f_L)$ の関係

Fig. 2. Relationships between $E(f_H, f_L)$ and $e(t; f_H, f_L)$.

達成するために、実験では高頻度に呈示される非標的刺激に (f_H, f_L) を設定し (以後、基点と呼び、 $(f_H, f_L)_{nt}$ と記す)、弁別しうる標的刺激 (以後、 $(f_H, f_L)_{ta}$ と記す) を領域 $f_H \text{ vs. } f_L$ の中から探索することによって、基点の周囲に分布する弁別閾を特定していく方法をとる。ただし、任意の地点 $(f_H, f_L)_{ta}$ に対する弁別閾分布の特定は次稿とする。その手始めとして、基点 $(f_H, f_L)_{nt} = (40, 2)_{nt}\text{Hz}$ について、前述の振動弁別パラダイムに従って以下の実験を行い、その周囲に分布する弁別閾を評価値 $E(f_H, f_L)$ に基づいて特定することによって、提案する評価値 $E(f_H, f_L)$ の有効性を検証する。

基点となる非標的刺激 $(40, 2)_{nt}\text{Hz}$ に対する標的刺激 $(f_H, f_L)_{ta}$ には、 $f_H = 40\text{Hz}$ のときの

$$f_L = 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20\text{Hz}$$

および、 $f_L = 2\text{Hz}$ のときの

$$f_H = 50, 55, 60, 65, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 180, 200\text{Hz}$$

とし、 $(40, 2)_{nt}\text{Hz}$ を中心に f_L 軸方向と f_H 軸方向にある弁別閾を推定する。

実験システムの構成を図 3 に示す。PZT 振動子 (村田製作所製 77B-21-19R7DM-4A0) は、事務作業用指ゴムサックを加工して利手 (右手) 示指先端部腹側に装着する。PZT 振動子への印加電圧は矩形波で、計測ステーション WE400 (横河電機) のファンクションジェネレータモジュール WE7121 (横河電機) によって生成し、 $32V_{p-p}$ に増幅する。この矩形波を構成する高域成分 f_H 、低域成分 f_L は、イーサネットモジュール WE7051 (横河電機) を介してパーソナルコンピュータから制御する。

呈示する変調振動は呈示頻度 (非標的的刺激) : (標的的刺激) $= 7 : 3$ とし、呈示順序はランダムである。非標的的刺激、標

図 3 実験装置と計測システム

Fig. 3. Experimental setup and measurement system.

的刺激のうち、一方の変調振動を 2sec 呈示、引き続いて 2sec 間の振動休止の後、次の変調振動を呈示する。WE400 は、矩形波信号出力と同時に誘発脳波記録装置 MEB-5508(日本光電)へ計測開始のトリガー信号を送出する。MEB-5508 は、WE400 からのトリガー信号に対応して矩形波信号出力時刻、すなわち刺激呈示時刻から 2sec 間の脳波を記録する。以上のプロセスが、標的刺激の呈示回数 30 回になるまで自動的に実行される。

脳波計測は、両側乳様突起を reference とする基準導出法とした⁽¹⁵⁾。探查電極の装着部位は、脳波筋电图学会の指針に基づき Fz(前頭部)、Cz(頭頂部)、Pz(後頭部)とした。サンプリング周波数は 500Hz、低域遮断周波数は 0.1Hz、高域遮断周波数は 50Hz とした。PZT 振動子からの漏れ電流の脳波への混入を防ぐため、被験者の右手首に接地電極バンドを装着させた。被験者は安楽椅子に座り、姿勢は安静安楽仰臥、閉眼、PZT 振動子の振動音で弁別が行われないよう両耳に遮音ヘッドフォンを装着させた。実験時間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とした。被験者には実験前の薬剤服用、食事摂取などに制限を与え、常に一定のコンディションで実験が行われるよう留意した。今回の被験者は 23 歳の健常男性 1 名である。

4. 実験結果および考察

非標的刺激 $(40, 2)_{nt}$ Hz における誘発反応に対して評価値 $E(40, 2)$ を算出し、基準値とする。非標的刺激 $(40, 2)_{nt}$ Hz に対する標的刺激 $(40, f_x)_{ta}$ Hz, $(f_x = 3, 4, 5, \dots, 15, 20)$ の評価値 $E(40, f_x)$, ならびに標的刺激 $(f_x, 2)_{ta}$ Hz, $(f_x = 50, 55, 60, \dots, 180, 200)$ の評価値 $E(f_x, 2)$ について、それぞれの $E(40, 2)$ に対する相対値 $\frac{E(40, f_x)}{E(40, 2)}$, $\frac{E(f_x, 2)}{E(40, 2)}$ をプロットすると、図 4, 図 5 のようになる。

変調振動の周波数領域 f_H vs. f_L において、地点 $(f_H, f_L)_{nt}$ が表す刺激を基点とし、その基点からほんの少しだけ離れた位置にある刺激を呈示しても、その違いは認知できない。 $(f_H, f_L)_{nt}$ からある距離以上離れたとき、初めて触感覚の違いが認知できるようになる。すなわち f_H vs. f_L におい

図 4 非標的刺激 $(40, 2)_{nt}$ Hz に対する標的刺激 $(40, f_x)_{ta}$ における認知レベルの相対値 $\frac{E(40, f_x)}{E(40, 2)}$

Fig. 4. The relative value $\frac{E(40, f_x)}{E(40, 2)}$ of cognition level in “target” $(40, f_x)_{ta}$ Hz to “non-target” $(40, 2)_{nt}$ Hz .

て基点 $(f_H, f_L)_{nt}$ の周囲には、変調振動刺激に対する弁別閾が分布している。基点 $(40, 2)_{nt}$ Hz の周囲にも弁別閾は分布しており、この弁別閾より内側の領域が表す刺激は、 $(40, 2)_{nt}$ Hz との違いを認知することができない。一方、弁別閾の外側の領域が表す刺激は、 $(40, 2)_{nt}$ Hz とは異なる刺激として認知できる。この観点から本研究では、 $(40, 2)_{nt}$ Hz における f_x vs. $\frac{E(40, f_x)}{E(40, 2)}$ および f_x vs. $\frac{E(f_x, 2)}{E(40, 2)}$ の関係が、(4) 式のような sigmoid 曲線となり、その変極点 $(f_x = \beta)$ 付近に弁別閾があるものと仮定する。

$$S(f_x; \alpha, \beta, \gamma) = 1 + \frac{\alpha}{1 + e^{\frac{\beta - f_x}{\gamma}}} \dots \dots \dots (4)$$

最小 2 乗法に基づいて (4) 式のパラメータ α, β, γ を決定すると、 $(40, f_x)_{ta}$ Hz で $S(f_x; 3.80, 5.65, 0.45)$, $(f_x, 2)_{ta}$ Hz で $S(f_x; 1.17, 60.3, 0.28)$ が得られ、それぞれ図中の曲線となった。この結果から $(40, 2)_{nt}$ Hz の刺激において、その周囲に分布する弁別閾のうち f_L 軸方向には 5.65Hz 付近に、 f_H 軸方向には 60.3Hz 付近にそれぞれ弁別閾が存在すると推測される。

弁別閾を ERP の特徴と心理物理実験の観点で考察する⁽⁹⁾。ERP の陽性電位の大きさは、2 つの刺激の弁別の難易度と被験者の課題に対する注意力に支配されている⁽¹⁶⁾。非標的刺激に対して明らかに弁別の容易な標的刺激の評価値は、被験者の課題に対する注意力を評価していることになる。弁別が容易にもかかわらず評価値が低い場合の解釈は、被験者が課題に注意が向いていないと考えるべきである。したがってこの場合、再度、計測実験を行うと、評価値の向上が期待できる。ただし脳のシナプス数は有限であるから、ERP には一定の最大値があり、本研究の提案する評価値にも最大値があると言える。ただし評価値の最大値を測ることは難しいので、被験者に最大限の協力を得て計

図5 非標的刺激 $(40, 2)_{nt}$ Hz に対する標的刺激 $(f_x, 2)_{ta}$ Hz における認知レベルの相対値 $\frac{E(f_x, 2)}{E(40, 2)}$

Fig. 5. The relative value $\frac{E(f_x, 2)}{E(40, 2)}$ of cognition level in “target” $(f_x, 2)_{ta}$ Hz to “non-target” $(40, 2)_{nt}$ Hz.

測した上で、 f_x 間の相対評価をせざるを得ない。図5より、 $(100, 2)_{ta}$ Hz で $\frac{E(100, 2)}{E(40, 2)} = 2.70$ となり、評価値の最大値を示した。 $(40, 2)_{nt}$ Hz と $(100, 2)_{ta}$ Hz は文献(9)の心理物理実験で明らかに弁別可能であることが分かっている。したがって f_H 軸方向の弁別閾は、 $(f_x, 2)_{ta}$ ($f_x > 100$) の評価値が低くても、100Hz 未満に存在すると考えられる。

心理物理実験で定められる弁別閾よりも内側は、上述の通り認知レベルの評価が難しい領域である。提案する評価方法は、刺激後 2sec までの誘発反応を計測するので、被験者が意思表示を躊躇する前後の初期の認知過程を評価できる。文献(9)では、 $(40, 2)$ Hz の周囲に広がる弁別閾を f_L 軸方向で 5Hz、 f_H 軸方向で 60Hz としている。本実験で得られた弁別閾の推定値は f_L 軸方向 5.65Hz、 f_H 軸方向 60.3Hz という値を示しており、結果として文献(9)の結果を裏付ける形となった。(4)式の仮定に基づき算定した f_L 軸方向 5.65Hz、 f_H 軸方向 60.3Hz なる値は、(4)式のパラメータ β である。パラメータ γ は(4)式において変極点付近の傾きを定めるパラメータである。 γ を評価することにより、心理物理実験では捕らえきれない認知レベルの評価が難しい領域、被験者が意思表示を躊躇してしまうような弁別の曖昧な領域、いわゆる弁別閾のグレーゾーンが定量的に捕えられる可能性がある。

図4では、 $(40, f_x)_{ta}$ Hz、($f_x = 3, 4$) のときの評価値が $(40, 2)_{nt}$ Hz を下回り、相対値 $\frac{E(40, f_x)}{E(40, 2)}$ 、($f_x = 3, 4$) はそれぞれ 1.00 未満となっている。この結果は、被験者が $(40, 2)_{nt}$ Hz に対して $(40, 3)_{ta}$ Hz ならびに $(40, 4)_{ta}$ Hz を取り違えるほど弁別が難しかったと解釈できる。

図5では、 $\frac{E(f_x, 2)}{E(40, 2)}$ 、($f_x = 65, 100$) が示すように評価値が一旦、ほぼピークに達した後、若干低下して安定値となっている。この結果は、(4)式の仮定から考察すると解釈が難しい。再度、計測実験を行い、再評価すべきであるが、一つ

の解釈として被験者の注意力との関連を考えることができる。評価値は弁別の難易度を反映すると同時に、被験者の弁別課題への注意力にも支配されている。実験では被験者のコンディションが一定になるよう留意しているが、課題に対する注意力を計測中、常に一定を保つことは困難である。したがって認知レベルを注意力に左右されずに評価するには、注意力を測る指標を新たに用意する必要がある。本実験では被験者にボタン反応課題を課しており、ERP と共に弁別課題に対する正解率が計測される。注意力はこの正解率から推定できる可能性があり、認知レベルの評価は、本稿提案の評価値と正解率から総合的に行うことが有効と考えられる。この点については今後の課題となっている。

5. まとめ

本研究では、単一の PZT 振動子による変調振動を用いて呈示する情報を多重化する方法を検討している。研究では、心理物理実験に基づいて変調振動刺激に対する触覚の弁別閾特性を計測し、単一の PZT 振動子による情報呈示様式を検討してきた。しかしながらこれまで用いてきた心理物理実験では、明らかに弁別可能な 2 つの振動刺激を特定することが可能であるが、ヒトの振動弁別に関する認知レベルの変化を定量的に捕らえることができなかった。

弁別課題に対する ERP は、認知・弁別に関連した成分が発現し、刺激の弁別に対応した反応を定量的に捕らえることができる。本稿では、ヒトの変調振動刺激に対する弁別の認知レベルを ERP の電位振幅と潜時に基づいて定量評価する手法を提案する。通常、ERP は聴性刺激が一般的であるが、本研究では新たに振動刺激に対する弁別パラダイムを設計し、ERP の計測を行った。得られた ERP を提案手法に基づいて評価し、弁別閾を推定、これまでの心理物理実験との比較検討を行った。個人差に関する検討は今後の課題であるが、提案した評価値 $E(f_H, f_L)$ により、弁別閾を特定する評価指標が、心理物理実験に比べ、客観的に捕えられるようになった。

本稿では、変調振動の周波数領域 f_H vs. f_L 領域内の $(40, 2)_{nt}$ Hz を基点として、その周囲のうち f_L 軸方向と f_H 軸方向の 2 方向に限って弁別閾の推定結果を示した。今後、基点 $(40, 2)_{nt}$ Hz 周囲の弁別閾の分布をより詳細に計測すると共に、領域 f_H vs. f_L 内の他の基点についても弁別閾の分布を明らかにしていく予定である。また、領域 f_H vs. f_L の弁別閾の分布に基づいて、 f_H vs. f_L 領域の情報呈示に関する尺度構成を行い、触覚を介して伝達する情報の多重化を検討していく計画である。

(平成 13 年 12 月 25 日受付、同 14 年 4 月 3 日再受付)

文 献

- (1) K.A.Kaczmarek, J.G.Webster, P.Bach-y-Rita and W.J.Tompkins: "Electro-tactile and vibro-tactile displays for sensory substitution systems," IEEE Trans. on Biomedical Engineering, vol.38, no.1, pp.1-16(1991)

- (2) E.T.Auer,L.E.Bernstein: "Temporal and spatio-temporal vibrotactile displays for voice fundamental frequency: An initial evaluation of a new vibrotactile speech perception aid with normal-hearing and hearing-impaired individuals," Journal of the Acoustical Society of America, vol.104,pp.2477-2489(1998)
- (3) 井出英人, 内田雅文, 横山修一: "センサ・フュージョンを利用した視覚障害者のための文字認識訓練器," 日本ロボット学会誌, vol.12, no.5, pp.1-9(1994)
- (4) C.Domenici,D.Derossi: "A stress-component-selective tactile sensor array," Sensors and Actuators, vol.13, pp.97-100(1992)
- (5) B.L.Gray,R.S.Fearing: "A surface-micromachined micro-tactile sensor array," IEEE Int. Conf. Rob. and Auto., vol.1, pp.1-6(1996)
- (6) 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)
- (7) 福田真樹, 内田雅文: "PZT 振動子を用いた 3 次元位置情報提示のための基礎特性," 電気学会論文誌 C, vol.119-C, no.7, pp.915-916(1999)
- (8) 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," 電気学会論文誌 C, vol.120-C, no.6, pp.825-830(2000)
- (9) 内田雅文, 田中久弥, 井出英人, 横山修一: "変調波振動による情報提示のための基礎特性," 平成 13 年電気学会全国大会論文集 [3] エレクトロニクス/情報工学システム/センサ・マイクロマシン, p.977(2001)
- (10) 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, Vol.26, pp.623-628(1984)
- (11) 枝元祐介, 内田雅文, 井出英人: "Fluency 理論の事象関連電位解析への応用," 電気学会論文誌 C, vol.114-C, no.10, pp.1056-1057(1994)
- (12) 内田雅文, 松島昌輝, 井出英人: "Air-puff を用いた触覚刺激に伴う誘発脳波の解析," 電気学会論文誌 C, vol.114-C, no.11, pp.1328-1329(1994)
- (13) 井出英人, 内田雅文: "Tactile board を用いた触覚刺激の誘発脳波の解析," 青山インフォメーション・サイエンス, vol.24, no.1, pp.3-10(1996)
- (14) 誘発電位検査法委員会: "誘発電位測定指針," 脳波と筋電図, vol.13, no.1(1985)
- (15) 北村元他: "脳波検査マニュアル," 文光堂, pp.1181(1988)
- (16) 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)

田中久弥 (正員) 1997 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (情報工学専攻)。生体情報工学の研究に従事, 青山学院大学理工学部電気電子工学科助手を経て現在, 広島市立大学情報科学部認知数理学科講師。工博。電子情報通信学会, 日本 ME 学会会員。

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 (電気電子工学専攻)。現在, 青山学院大学理工学部電気電子工学科助手。

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。1996 年より 2002 年まで同学部長。工博。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会会員。

塩崎哲也 (学生員) 2002 年青山学院大学理工学部電気電子工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程在籍。

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。日本ロボット学会会員。