

電気パルス刺激における強度差ファントム センセーション像の位置弁別特性†

谷 江 和 雄*・館 暉*・小 森 谷 清*・阿 部 稔*

Basic Study on Discriminability of Mental Location of Electrocutaneous Phantom Sensation

Kazuo TANIE*, Susumu TACHI*, Kiyoshi KOMORIYA* and Minoru ABE*

In this paper, in order to develop the spatial electrocutaneous communication system with minimum size of hardware, fundamental experiments were performed to provide with various locations on the skin a continuously variable sensation by utilizing the phantom sensation. Two sets of electrodes were located on the skin just above the biceps brachii and stimuli were presented to each electrodes either simultaneously or with time delay. The effect of relative magnitudes and time delay on the phantom sensation was experimentally studied. The following results were obtained. (1) The magnitude-difference cue was found more distinct than the temporal-difference cue. The phantom sensation caused by a magnitude-difference cue becomes less clear as the energy level becomes high (above 40 erg/channel), and as the interval of pulse stimuli becomes short (under 50 ms). (2) The relation between the mental location of the relative magnitude phantom sensation and the ratio of the magnitude of stimuli E_0/E_1 , in which E_0 and E_1 are the energy levels of stimuli simultaneously presented to adjacent locations respectively, is linear, and does not depend on the stimulus energy level ($E_0 + E_1$) except in the vicinity of each electrode, where the relation depends on the energy level. (3) The just noticeable difference (jnd) of mental location has a maximum value at the central position between the two electrodes and a minimum value at the neighborhoods of the electrodes. The maximum information transmission rate calcu-

lated from jnd of mental location depends on the distance d between the two electrodes and ranges from 2.0 to 3.0 bits for d between 50 and 150 mm. (4) The advantages of employing the technique of the phantom sensation are that it can reduce the number of electrodes required for spatial electrocutaneous stimulation and also that it can distribute stimuli more densely without the restriction of electrode sizes.

1. ま え が き

電気パルス刺激を用いて情報を生体に伝達しようとする試み^{1)~5),7),8)}において、伝達情報量をふやすためには、空間次元を構成することが有効であることはよく知られている^{2),9)}。この空間次元を構成するためには一般に電極を多数配列し、それに信号に応じて逐次刺激を加えれば一応実現可能であるが、実際にこれを行うと、(i)刺激装置が複雑になる、(ii)電流集中を防止するという立場から電極の大きさがある程度制限されるために^{3),10)}、電極を密に配列して高密度に刺激像を呈示できない、などの問題が生ずる。

ところで、両耳効果による音の方向定位に相当する現象が皮膚感覚においても起ることが von Békésy によって確認され¹¹⁾、ファントムセンセーション (以下 PS) などと呼ばれている。この PS 現象は、ある条件のもとで 2 部位に刺激を加えることにより、刺激像を 2 部位間の電極装着部位以外の場所にも知覚させる現象をいう。そこで、もし電気刺激においてもこのような現象が生ずることが確認されるならば、それを利用して空間次元を構成する際の所要電極個数を省略できるなど、上述の問題点のある程度克服できることが予想される。本研究ではこのような観点から、現在までにほとんど研究例のない電気刺激における PS 像の発生の問題について検討を加え、その発生の有無、像

† 第 19 回自動制御連合講演会で発表 (昭 51・11), 第 16 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 52・8)

* 機械技術研究所 東京都杉並区井草 4-12-1

* Mechanical Engineering Laboratory, Suginami-ku, Tokyo

(Received September 18, 1978)

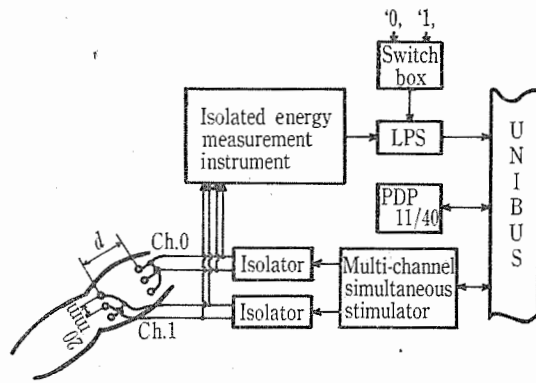


Fig. 1 Block diagram of experimental setup

の配位特性, 位置弁別特性, 伝達情報量などについて調べた. 以下その概要について報告する.

2. 実験装置

Fig. 1 に使用した実験装置のブロック図を示す. パルスの高さ, 幅, 間隔 (繰返し周波数の逆数), 持続時間を各チャンネルごとに独立に計算機 PDP 11/40 によって制御する多点同時刺激装置¹³⁾の内の2チャンネルにそれぞれアイソレータ (三栄測器製 5361) を接続し, これより電極を介して被験者の上腕二頭筋上に定電流刺激パルスを提示する. 刺激部位には各3個の電極を 20 (mm) 間隔に配し, それぞれの電極の中央が外側の二つに対し負となるような刺激を加える⁶⁾. 刺激時の1パルス当りの刺激エネルギーは, 前報で報告したエネルギー測定装置⁶⁾により測定され, その値は計算機を介してタイプライタに出力される. 一方, これら提示された刺激に対する被験者の反応は二つのマイクロスイッチを介して計算機に読み込まれる. 次節以降で述べる実験はすべてこのシステムを用いており, 実験過程およびデータ処理過程はすべて自動化されている. 電極としては, Beckman 形 Ag-AgCl 電極 (8 (mm)φ) を用いた. これに NaCl ペーストを貼付して粘着カラーで皮膚面へ装着した. なお以下においては, 肩に近いほうの電極の組を ch 0, 前腕に近いほうのそれを ch 1 と呼ぶことにする. また ch 0 に関する諸量には 0 を, ch 1 に関するものには 1 を付けて示す.

3. PS 現象に関する定性的実験

音像の定位とのアナロジーからすれば, PS を起す要因には, 2 刺激部位に強度差のある刺激を与えるものと, 時間差のある刺激を与える場合の2種の刺激提示形態が考えられる. ここではこれらによって生ずる PS 現象を, 強度差 PS, 時間差 PS と呼ぶことにす

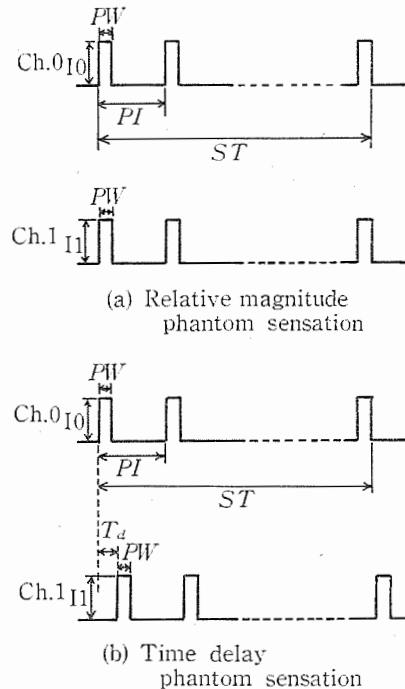


Fig. 2 Stimulation pulse presented to the electrodes (I0, I1: Pulse height mA)

る. この2種の刺激提示形態に対し, まず PS 像が発生するかどうかを確認するための実験を行った. すなわち, 前節の実験装置を用い, 2 刺激部位間距離 d を 50 (mm) として, Fig. 2(a) に示すごとく, 強度差 PS の場合には, ch 0, ch 1 にそれぞれ刺激1パルス当りのエネルギーが E_0, E_1 であり, かつ同一のパルス間隔 ($PI=100$ (ms)) をもち, パルス幅 PW が 100 (μ s) なる電気刺激パルスを提示する. 一方, 時間差 PS の場合には, Fig. 2(b) に示すごとく, ch 0, ch 1 への刺激強度が等強度になるように刺激エネルギーを調節したうえで, それぞれの刺激に T_d なる時間差を与えた電気刺激パルス提示する ($PI=100$ (ms), $PW=100$ (μ s)). 刺激提示時間 ST はいずれも 2 秒とした. このようにして提示された刺激に対し, 被験者は刺激が何点に感じられるか, またどの辺の位置にそれを感じるかを回答することを求められる. このような実験を2名の被験者について行ったところ, つぎのような結論を得た. まず強度差に対しては, 種々のエネルギーレベルにおいて, 被験者はそれぞれの電極に対し個別の感覚をもたず, 2 刺激電極間の1点にのみ刺激感覚をもつ. そして強度差を変えた信号を順次提示していくと, その刺激像の位置は2組の電極の間を動いて行くことが観察される.

一方, 時間差に対しては, 刺激を2刺激部位間の1点に感じるということに関しては強度差の場合と同様であるが, T_d の変化に対する刺激像の移動に関して

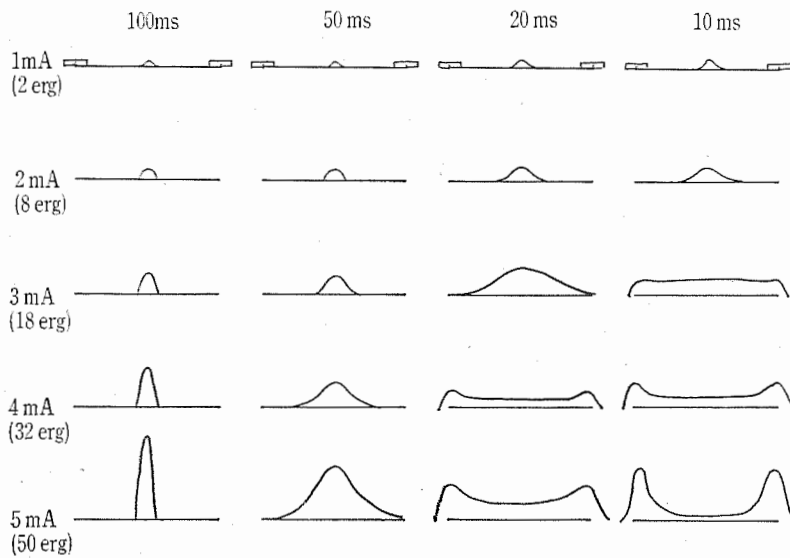


Fig. 3 Phantom sensation as a function of frequency and stimulus energy per pulse (subject: K. T.)

は、強度差の場合ほどには顕著な感覚は得られない。この結果から、一応時間差 PS の効果は 2 次的であると考えて、以下ではさらに強度差 PS の場合に対してのみ、その PS 像の性質を詳細に調べた。今後この報告で単に PS といった場合は、この強度差 PS を意味するものとする。Fig. 3 に各チャンネルに種々のレベルの同一強度の刺激を提示した時に発生する PS 像の形状を、1 人の被験者に主観的に判断させた結果を示す。図中の山の高さは像の強さを、また幅は像の広がり示している。この図では、たとえば $PI=100$ [ms] のような低周波のパルス列では各電極あたりのエネルギーが約 2 [erg] (パルス高約 1 [mA]) というしきい値付近のところから、50 [erg] (パルス高約 5 [mA]) という常用しうる上限に近い所まで非常によく PS が生じ、その大きさは刺激エネルギーとともに増し、刺激の広がりも 1 電極で刺激される場合とほぼ同程度であることが示されている。また、 $PI=50$ [ms] の場合にも強度の広い範囲について PS 現象が起こることがわかる。ただし、 $PI=100$ [ms] の刺激と比べると、刺激が空間的に広がる傾向がある。このことは、 $PI=100$ [ms] の刺激と $PI=50$ [ms] の刺激を交互に比較提示することにより確認した。一方、 $PI=20$ [ms], 10 [ms] に対しては、特に高い刺激レベルにおいて PS は発生せず、電極上にピークをもつ刺激像となる傾向が見られる。

以上の実験結果は、定性的ではあるが電気刺激においても強度差刺激に対しては、パルス間隔に対して刺激エネルギーレベルを適切に選べば、PS 現象が発生することを裏づけるものである。

ところで、上記の一連の実験において、2 刺激部位が 2 点弁別閾内である場合は、それら 2 部位への刺激が 1 点に感じられるのは当然のことである。したがって、上記実験結果から PS が発生することを最終的に結論づけるためには、この実験がすべて 2 点弁別閾の外側で行われていることが前提となる。この点に関しては AB 法¹⁴⁾により 2 点弁別閾 Δd の測定を行い、本実験がそのような条件を満たしていること、すなわち $\Delta d < 25$ [mm] であることを確認した¹⁶⁾。

4. PS 像の配位特性

本節では、前節で定性的に確認した刺激エネルギー比 (刺激強度差) $E0/$

$E1$ (あるいは $E1/E0$) の変化による PS 像の移動の様子をさらに定量的に把握するとともに、その簡易的な測定法についても言及する。本節の結果は次節の実験においても利用される。

4.1 実験方法

PS 像の配位位置を刺激エネルギー比の変化に対し連続的に測定することは不可能である。それで本研究では、一応電極間の中央、1/4, 3/4, 1/8, 7/8 などの点および、両端点 (ch 0, ch 1 の電極上) を測定点として選定し、それらに対して得られた結果を滑らかな曲線で補間することにより求めた。測定は 2 種の方法で行った。その一つは恒常法、もう一つは被験者調整法に基づく前者よりもより簡易的な方法である。前者では変化刺激の選定の関係上、測定点は中央、1/4, 3/4 の 3 点とし、また後者では、上述の中央~7/8 すべてについて測定を行った。まず恒常法は以下のようにして行った¹⁵⁾。すなわち、Fig. 1 に示した電極配置に対しさらに、ch 0 および ch 1 の間の適当な位置 (ここでは中央、1/4, 3/4) にもう一組の電極を装着し、これに位置の基準を与えるための刺激 E_s をアイソレータを介して提示する。一方、これに対して ch 0, ch 1 への刺激エネルギー E_0, E_1 の和を一定に保持しつつ、4 種の適当なエネルギー比をもつ変化刺激の組 $\alpha_a < \alpha_b < \alpha_c < \alpha_d$ を選び、それらと基準刺激との対 $(E_s, \alpha_a), \dots, (E_s, \alpha_d)$ をランダムに提示して、変化刺激の PS 像が基準刺激よりも上にあるか下にあるかを判定させる。この結果を、横軸にエネルギー比 α 、縦軸に上 (あるいは下) と判断した確率 P をとって整理する。こうして得られた曲線は一般に精神測定関数と

呼ばれるが、この関数から上下の判断確率が0.5になる時の変化刺激のエネルギー比 $\alpha_{0.5}$ を算出し、これを基準刺激の位置と等価な位置にPS像を発生する刺激エネルギー比とする。この $\alpha_{0.5}$ は $P=0.5$ をはさむ2刺激のデータから直線補間して求めた。変化刺激の選択に際しては予備実験を行い、丁度 α_b, α_c なる刺激に対する判断確率を P_b, P_c とした時、 $P_b < 0.5 < P_c$ となるように配慮した。また各刺激の提示時間は2秒とし、刺激提示回数は80回とした。したがって各刺激の組はほぼ20回ずつ提示される。

一方、簡易的方法ではつぎのような手順で測定を行う。まず第1, 第2の刺激としてch0, ch1の電極上に順次刺激を提示し、さらに第3の刺激としてあるエネルギー比をもつ刺激を提示する。そして被験者は、この第3刺激が第1と第2刺激の間にあるかどうかを判定する。もし判定の結果中間にない場合は、第3刺激のエネルギー比に修正を加え、再度第1, 第2, 第3の刺激を順次提示し、同様の判定を行う。このような操作を繰り返し実行し、被験者がほぼ中央にくる刺激エネルギー比 E_{1M}/E_{0M} を見出したら、つぎにたとえばch0上の刺激と、今見出した中央に配位する刺激の組(E_{0M}, E_{1M})を第1, 第2刺激とし、第3刺激のエネルギー比を上記と同じ手順で調整して、電極間の1/4に配位する刺激エネルギー比を決定する。以下同様にして1/8に配位する刺激エネルギー比までを測定する。刺激提示時間および各刺激を提示する際に、両電極へ加える刺激エネルギーの和 $E_0 + E_1$ を一定に保持することなどは、恒常法の場合と同じである。

つぎに両端点における刺激エネルギー比を決定することを考える。この場合には上述の方法を用いることはできない。というのは、この端点における刺激像をはさむような刺激の組(E_0, E_1)を選定することが不可能だからである。それでここでは、単一電極のみの刺激と同等の効果を与える刺激エネルギー比の内で、

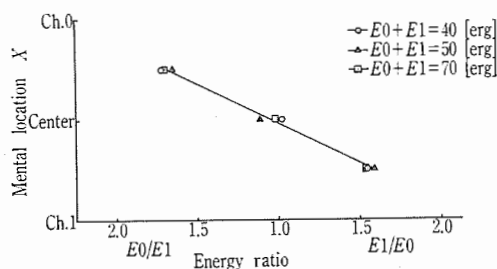


Fig. 4 Relation between the mental location and energy ratio E_0/E_1 (or E_1/E_0) of stimuli measured by constant method ($PI=100$ ms, subject: K. T.)

最大(あるいは最小)のものを選び出すという観点から、つぎのような手順により測定を行った。たとえば、ch0側を例に説明すると、まず基準刺激Aとして、 $E_0=E_s$ [erg], $E_1=0$ [erg]なる刺激を選び、また変化刺激Bとして、 Δr_1 をパラメータとする $E_0=E_s$, $E_1=\Delta r_1$ なる刺激を選ぶ。そしてそれらをランダムに20回提示してAかBかを判定させ(AB法)、次式により情報伝達率 R を算出する。

$$R = 1 + \frac{1}{2} \left\{ (P_A + Q_B) \log_2 \frac{1}{P_A + Q_B} + (P_B + Q_A) \log_2 \frac{1}{P_B + Q_A} - P_A \log_2 \frac{1}{P_A} - P_B \log_2 \frac{1}{P_B} - Q_A \log_2 \frac{1}{Q_A} - Q_B \log_2 \frac{1}{Q_B} \right\} \text{ [bit]} \quad (1)$$

ただし、提示される2種の刺激をA, Bとした時、 P_A : A刺激に対しAと答える確率, P_B : B刺激に対しBと答える確率, Q_A : A刺激に対しBと答える確率, Q_B : B刺激に対しAと答える確率。この R が0 [bit]から立ち上がり始める時の Δr_{1a} を $R-\Delta r_1$ 線図から求め、 $\Delta r_{1a}/E_s$ を求めるエネルギー比とする。

なお以上の実験は、前節の結果に基づき、最もPSが生じやすい $PI=100$ [ms]の場合について行った。

4.2 実験結果と考察

Fig. 4に恒常法による刺激エネルギー比とPS像の配位位置の関係の測定結果(電極間距離 $d=100$ [mm])を示す。この図で横軸は刺激エネルギー比を示し、1.0を中心に比の値が1以上になるように目盛っている。縦軸はPS像の位置を示し、基準刺激の提示位置に対応する。また図中の各プロットは、刺激エネルギーの和 $E_0 + E_1$ の値を40, 50, 70 [erg]とした時の結果を示している。この結果から、PS像の位

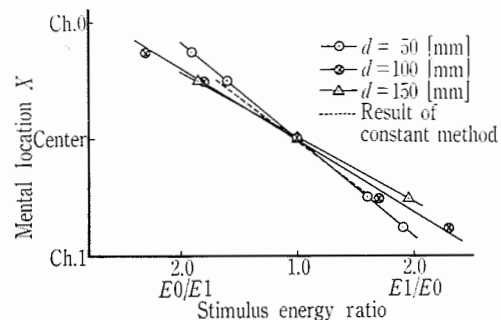


Fig. 5 Relation between the mental location and energy ratio E_0/E_1 (or E_1/E_0) of stimuli measured by method of adjustment ($PI=100$ ms, $E_0 + E_1 = 50$ erg, subject: K. T.)

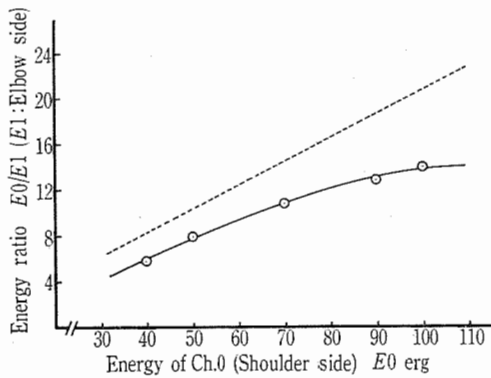


Fig. 6(a) Energy ratio E_0/E_1 necessary to allocate the phantom sensation on ch 0 as a function of the energy of ch 0, E_0 ($PI=100$ ms, subject: K. T.). Dot line shows $E_0/\Delta r_i$ vs. E_0 , in which Δr_i is threshold energy of subjective magnitude on ch 1

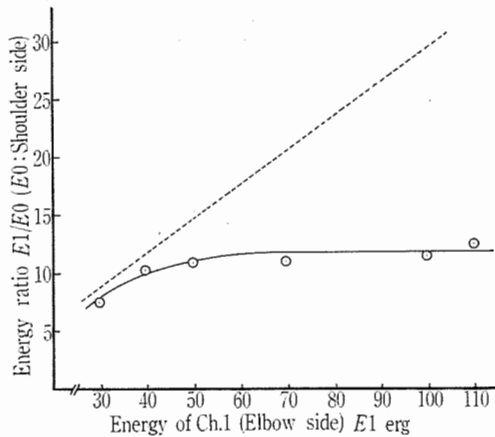


Fig. 6(b) Energy ratio E_1/E_0 necessary to allocate the phantom sensation on ch 1 as a function of the energy of ch 1, E_1 ($PI=100$ ms, subject: K. T.). Dot line shows $E_1/\Delta r_i$ vs. E_0 , in which Δr_i is threshold energy of subjective magnitude on ch 0

置と刺激エネルギー比の関係はほぼ線形の関係にあることがわかる。さらに、刺激エネルギーの総量に変化しても PS 像の位置はそれほど変化せず、エネルギー比 E_0/E_1 (または E_1/E_0) にのみ固有に関係することも認めることができる。Fig. 5 に被験者調整法による測定結果を示す。図中の横軸、縦軸は Fig. 4 と同様である。この実験の場合、 $E_0 + E_1 = 50$ (erg) の場合についてのみ行っている。また各曲線は $d = 50, 100, 150$ (mm) とした時の結果を示している。この結果と上述の恒常法の結果 (Fig. 4 中の点線) は比較的よい一致を示している。このことは、今後この種のデータを求める際には、被験者調整による簡易的な方法を用いても十分であることを示すものである。本実

験から得られた経験によると、この簡易的な方法を用いた場合は、恒常法による場合に比べて 5~6 倍程度測定時間が短縮される。

Fig. 6 に端点に関する実験結果を示す。この図の横軸は基準刺激を提示する際に、片側の電極に加えられる刺激のエネルギーレベル E_s ($=E_0$: ch 0 側の場合, E_1 : ch 1 側の場合) を、また縦軸は $C = (E_0/E_1)^{-1}$ or $(E_1/E_0)^{-1}$ を示している。図中の \circ と $\dots\dots$ はそれぞれ $C_a - E_s$ 特性 ($C_a = (\Delta r_{ia}/E_s)^{-1}$), および $C_i - E_s$ 特性 ($C_i = (\Delta r_i/E_s)^{-1}$) をプロットしたものである。ただし、 Δr_i はエネルギー Δr_i を提示する側の部位における強度感覚のしきい値である。これらの結果は、片側の電極にあるレベル以上のエネルギー E_s をもつ刺激を加えている状態でもう一方の電極に刺激を加えると、その強度感覚のしきい値が上昇すること、すなわちマスキング現象が現われることを示すとともに、 Δr_i を加える刺激部位のしきい値が低いほど、より低い刺激レベルでそれが発生することをも示している。また、図から明らかごとく、 E_s がある値以上になると、 $C_a = (\Delta r_{ia}/E_s)^{-1} = \text{一定}$ となる傾向が見られる。これは、上述の端点以外の点における実験結果をも総合した時、 $E_0 + E_1$ があるレベル以上 (ここでは 60 (erg) 程度) であれば、PS 像の位置は電極間のほぼすべての位置において、2 部位への刺激のエネルギー比 E_0/E_1 (あるいは E_1/E_0) にのみ関係し、刺激エネルギーのレベルの影響はほとんど受けないということを示唆するものである。一方、エネルギーレベルが低い時は、端点に配位する PS 像のエネルギー比は $C_i = (\Delta r_i/E_s)^{-1}$ に漸近する。 Δr_i は部位に固有の値であるから、したがって、低エネルギーレベルにおいては、刺激エネルギーレベルにより端点付近における PS 像の配位位置が変動することになる。

5. PS 像の位置弁別特性と伝達情報量の評価

本節では、PS 像の位置弁別特性を 2 点弁別関 (jnd) から評価する。さらにこの結果をもとに PS 像を利用する情報伝達方式と、刺激部位に対応づけて電極を装着する従来の情報伝達方式の性能の比較を行う。

5.1 実験方法

2 点弁別関の測定法は以下のようなものである。まず刺激強度感覚が刺激エネルギーと相関をもつという 1 ch 刺激の場合のデータとの対比から⁶⁾ 2 部位への刺激のエネルギーの総和を一定に保つという条件を設定した。この条件のもとで、適当な刺激エネルギー比 E_0/E_1 をもつ刺激の組 $E_s = (E_0, E_1)$ を基準刺激とし

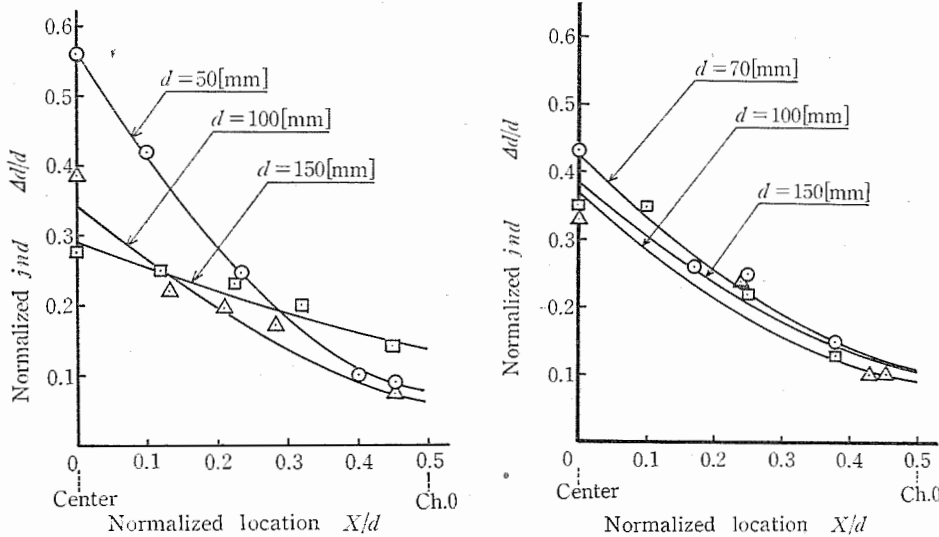


Fig. 7 Normalized jnd of mental location as a function of normalized location ($PI=100$ ms, $E_0+E_1=50$ erg)
 (a) Result of subject K.T. (b) Result of subject K.K.

て、またこれに対し、 $E_0/E_1 < E_{0v}/E_{1v}$ なるエネルギー比をもつ刺激の組 $E_v=(E_{0v}, E_{1v})$ を変化刺激として選定し、これらを被験者に提示(20回)してその差を判定させた結果を、すでに述べた端点配位 PS 像のエネルギー比の測定などの場合と同様にして AB 法を用いて評価する。 $E_s=E_0/E_1$ に対して丁度 1 (bit) になる $E_v=E_{0v}/E_{1v}$ を、種々の変化刺激に対して求められた情報伝達率 R からこれを直線で外挿して決定し、つぎに刺激エネルギー比を PS 像の配位位置に変換する操作を行う。この場合には、刺激エネルギー比と PS 像の配位位置との関係を知る必要があるが、これは前節で得た知見に基づき、簡易的手法により測定した電極間の中央、 $1/4$, $3/4$, $1/8$, $7/8$ の各点のデータを直線で結んで求める。また端点近傍に関しては、前節の端点データをそのまま用い、これと $1/8$, $7/8$ の点との間を直線補間して求めた。この測定結果から、 E_0/E_1 および E_{0v}/E_{1v} に対応する PS 像の配位位置 X_s および X_v を読み取れば、PS 像の配位位置 X_s における 2 点弁別閾は次式により算出される。

$$\Delta d(X_s) = |X_s - X_v| \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

なお、以上の実験において、配位像-エネルギー比特性がエネルギー比=1.0 を中心にほぼ対称となっていることから、弁別閾特性も一応電極間の中央位置に対し対称になるものと仮定し、ch 0 から中央位置の間に関してのみ測定を行った。各刺激の提示時間は 2 秒である。またパルス間隔は前節の実験同様、 $PI=100$ [ms] とし、刺激エネルギーレベルは $E_0+E_1=50$ [erg] とした。電極間距離 d は 50(70), 100, 150 [mm] の場合について検討した。

5.2 実験結果と考察

Fig. 7 に弁別閾特性の測定結果の一例を示す。図の横軸は基準刺激による PS 像の位置を、そして縦軸はそれに対する弁別閾を示しており、各軸はそれぞれ電極間距離 d で正規化されている。図中の各プロットは種々の d に対する特性を示している。さらにこの図において、たとえば $d=50$ (mm) の場合、中央位置の弁別閾が $0.5d$ 以上となっているが、これは $R < 1$ のデータ群を外

挿した直線を 1.0 (bit) の点まで延長した結果として得られたものである。これらの結果から明らかなごとく、弁別閾は中央で大きく、電極周辺へ行くに従って減少していくことがわかる。これは電極中央における像が電極周辺におけるものよりも広がっていることを示唆している。このような傾向は、すでに Allesらにより測定されている機械振動刺激による PS 現象の性質とも一致するものである¹²⁾。

さて、このように弁別閾の特性が決定されれば、PS 像が重なることなく電極間に配位できる数 N を算出することができる。ここでは各配位位置に 0, 1 という信号をのせることを想定して、PS 像の配位位置に応じて情報を送る場合の最大伝達情報量 PR_{\max} を算出してみる。Fig. 7 の特性を $\Delta d = \Delta d(X)$ とし、 d を電極間距離とすれば、

$$N = 2 \int_0^{1/2d} (1/\Delta d) dX + 1 \quad (3)$$

であるから、 PR_{\max} は次式で算出される。

$$PR_{\max} = \log_2 \left\{ 2 \int_0^{1/2d} (1/\Delta d) dX + 1 \right\} \quad (\text{bit}) \quad (4)$$

Fig. 7 の各曲線を 2 本の折線で近似して PR_{\max} を計算した結果を Table 1 に示す。この表から、電極間距離を増加しても無制限に情報が增加するわけではないことがわかる。この実験結果から判断する限り、 $d=100$ [mm] 程度がこの種の情報伝達を行う場合の最適電極間距離である。つぎに今述べたような PS 像の位置に応じて 0, 1 信号を送る情報伝達方式を、Fig. 8 に示すごとく複数個電極を配置して行うことを考え、

Table 1 Channel capacity estimated from jnd of mental location vs. distance between the electrodes ch 0 and ch 1 ($PI=100$ ms, $E0+E1=50$ erg)

Subject	Distance d mm	Channel Capacity PR_{max} bit
K. T.	50	2.5
	100	2.8
	150	2.4
K. K.	70	2.6
	100	2.8
	150	2.6

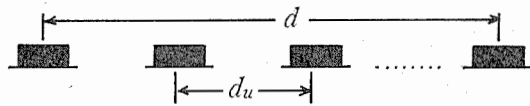


Fig. 8 Electrode array

上記の結果と比較してみる。この場合の最大伝達情報量 PR^*_{max} は次式で算出される。すなわち、 d を最大電極間距離、 d_u を隣接電極間距離とすれば、

$$PR^*_{max} = \log_2 \left(\frac{d}{d_u} + 1 \right) \quad [\text{bit}] \quad (5)$$

となる。この式中の d_u は、さらに詳しくいえば物理的に可能な隣接電極間の最小距離を示すもので、使用電極の種類により異なるが、すでに述べたように電気刺激条件により、少なくとも $d_u \geq 10$ [mm] としなければならない。

Fig. 9 に PS 像による最大伝達情報量と (5) 式によって、 $d_u=10, 20, 30$ [mm] の場合について算出した複数電極配置の場合の最大伝達情報量との比較を示す。この図中の点線は、まったく PS が発生しないとした時に二つの電極による刺激の有無によって伝送される最大伝達情報量、すなわち $\log_2 2=1$ [bit] を示したものである。この線と実験結果の曲線との間が PS により送られる情報量となり、これを像の配位数に変換すれば、省略しうる電極個数が求まることになる。この結果からするとその数は最大 5 個程度である。また、複数電極配置の場合の曲線と PS 像による結果の曲線とを比較すると、たとえば $d_u=20$ [mm] とした時は $d=100 \sim 120$ [mm] 以下にして PS 像を提示すれば、単に電極個数が省略できるというだけでなく、より多くの情報を伝達できるという点でも PS による情報伝達方式はすぐれていることが認められる。

なお、以上の検討では、位置弁別特性の測定を便宜上、2 部位への刺激エネルギーの和 $E0+E1$ を一定に保持するという条件のもとで行ったが、これは厳密

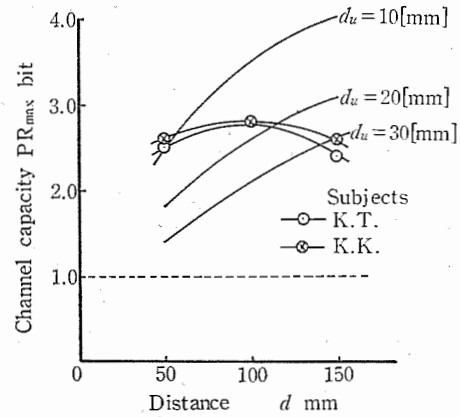


Fig. 9 Channel capacity estimated from either jnd of mental location or the unit distance d_u of electrode array as functional of the distance between the electrodes ch 0 and ch 1 ($PI=100$ ms, $E0+E1=50$ erg)

に考えれば、位置弁別特性に強度弁別特性が含まれてくることを意味している。というのは、前述した Alles らによる、上腕の 2 部位に刺激子を配列した機械振動刺激 PS の場合の結果から類推して、 $E0+E1$ を一定とした場合、電極中央部における PS 像の強度は、端点電極付近のそれよりも減少すると考えられるからである¹²⁾。強度感覚に補正を加えつつ弁別閾を測定する場合には、本実験で得られた PS 像の最大伝達情報量は当然のことながら若干減少するであろう。この点に関しては PS 像の強度次元の問題とも関連させて今後検討を進めていく予定である。

6. むすび

本報告では、電気刺激 PS 現象に伴う基本的問題について検討してきた。ここでの実験は 2 名の被験者についてのものであることから、データの個人差などについて一般的結論を出すには不十分であり、さらにデータの集積を必要とすることはいうまでもない。しかし、本研究における被験者が十分な心理学的測定実験の経験を有するうえに、1 点の計測量を多数の繰り返し実験に基づき求めていることを考慮すれば、両者の一致する傾向から確かな定性的事実を見出すことは十分可能であると思われる。このような認識を前提として本研究の結論を整理するとつぎのようになる。

電気パルス刺激においては、強度差刺激によるほうが時間差刺激の場合よりも明瞭に PS 現象が発生する。そしてこの強度差 PS 現象は、パルス間隔が短く (50 [ms] 以下)、かつ刺激エネルギーレベルが高い (40 [erg] 以上) 場合には、比較的発生しにくくなる。また、強度差 PS 現象が発生する条件のもとでの PS

像の配位特性, 位置弁別特性には以下のような傾向がある.

(1) PS 像の配位位置と刺激エネルギー比の関係はほぼ線形となり, 各電極の周辺をのぞきそれは刺激エネルギーの総量の影響をうけない. 一方, 電極周辺ではエネルギーレベルに依存する.

(2) 強度差 PS 像の2点弁別特性は, 電極間中央で最大となり, 電極周辺へ行くに従って減少する. また, この弁別特性に基づいて算出した PS 像を用いる情報伝達方式における最大伝達情報量は, 約2.0~3.0 bit 程度であり, かつそれは電極間距離 d によって変化し, $d=100$ [mm] くらいの時にほぼ最大となる.

なお, この PS を利用した情報伝達方式は, 電極がある程度以上の大きさを有する場合には, 複数電極配列に対応する情報伝達方式による場合よりも, より多くの情報を送ることができる.

以上の結果は, 適切な条件のもとでは, 強度差 PS 現象を利用することにより, 空間情報伝達における電極個数の省略が可能なることを意味する. またそればかりでなく使用電極の形状的制約に起因する限界をこえて, より高密度に空間刺激情報を提示することも可能なることを示唆するものである.

最後に, 常日頃ご指導いただく早稲田大学 加藤一郎教授, また本研究に対し多大のご支援をいただいた機械技術研究所 本田富士雄所長, 金井実徳次長, 木村誠システム部長, 岡本純三機械部長, 清水嘉重郎バイオメカニクス課長, および実験にご協力いただいた早稲田大学学生 浅羽樹一郎, 富田良幸君に謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) T.W. Beeker, J. During and A. Den Hertog: Artificial Touch in a Hand Prosthesis, *Med. Biol. Eng.*, 5, 47/49 (1967)
- 2) P. Bach-y-Rita, C.C. Collins, P. Saunders, B. White and L. Scadden: Vision Substitution by Tactile Image Projection, *Nature*, 221, 963/964 (1969)
- 3) 恒川, 加藤: 電気刺激に対する人間の情報処理能力, *人間工学*, 6-4, 181/187 (1970)
- 4) R.E. Prior: Study on Electrocutaneous Parameters Relevant to Dynamic Tactual Communication Systems, Doctoral Thesis, UCLA (1972)
- 5) 市川, 山本, 三淵, 阿部: 皮膚電気刺激による情報伝達の基礎的特性, *バイオメカニズム* 4, *バイオメカニズム学会編*, 17/24, 東大出版会 (1978)
- 6) 館, 谷江, 阿部: 経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果, *医用電子と生体工学*, 15-5, 13/18 (1977)
- 7) I. Kato, S. Yamakawa, K. Ichikawa, and M. Sano: Multifunctional Myoelectric Hand Prosthesis with Pressure Sensory Feedback-Waseda Hand 4P, *Advances in External Control of Human Extremities*, 155/170 (1970)
- 8) 谷江, 館, 小森谷, 阿部: 電気パルス刺激エネルギーに対する皮膚の強度感覚と丁度可知差異, *計測自動制御学会論文集*, 13-6, 595/602 (1977)
- 9) J.C. Bliss and H.D. Crane: Experiments in Tactual Perception, Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., Final Rept. on SRI Project 4656, Contract Nas 2-1679, Jan. (1965)
- 10) J.L. Mason and N.A.M. Mackay: Pain Sensation Associated with Electrocutaneous Stimulation, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, BME-23-5, 405/409 (1976)
- 11) G. von Békésy: Sensory Inhibition, Princeton Univ. Press, 108 (1967)
- 12) D.S. Alles: Information Transmission by Phantom Sensation, *IEEE Trans., on Man Machine Systems*, MMS-11-1, 85/91 (1970)
- 13) 谷江, 館, 谷, 前田, 大野, 藤川, 阿部: 多点同時刺激装置の開発, *機械技術研究所所報*, 31-2, 32/44 (1977)
- 14) W.A. Munson and J.E. Karlin: The Measurement of Human Channel Transmission Characteristics, *J. Acoust. Soc. Am.*, 26, 542/553 (1954)
- 15) J.P. Guilford: Psychometric Methods, McGraw-Hill (1954)
- 16) 谷江, 館, 小森谷, 阿部: 電気刺激における Phantom Sensation, 第16回日本 ME 学会大会論文集, 140/141 (1977)