

電気刺激3点ファントムセンセーション像の 情報伝達特性

谷江和雄*・舘 暉*・小森谷 清*
阿部 稔*・浅羽 樹一郎**・富田良幸**

Information Transmission Characteristics of Two-Dimensional Electrocutaneous Phantom Sensation

KAZUO TANIE*, SUSUMU TACHI*, KIYOSHI KOMORIYA*, MINORU ABE*,
KIICHIRO ASABA** and YOSHIYUKI TOMITA**

This paper deals with the information transmission characteristics by two-dimensional electrocutaneous phantom sensation. Three sets of electrodes were triangularly located on the skin just above the biceps brachii and stimuli were given to each electrode simultaneously. The effects of relative magnitudes on the mental locations of two-dimensional phantom images and their just noticeable differences were first measured. Then the channel capacity and the maximum information transmission rates were studied in this electrocutaneous communication system by phantom sensation.

The following results were obtained. (a) The mental location of the two-dimensional phantom sensation is proportional to $\log [E_2/(E_0+E_1)]$, in which E_0 , E_1 and E_2 are the presented energy to the electrodes, respectively. (b) The just noticeable difference of the mental location has a tendency to become larger as the location approaches to the center of the triangle formed by the electrodes. The channel capacity is estimated to be about 4 (bits/symbol) from the just noticeable difference of the mental location. (c) The maximum information transmission rate is calculated to be 2.8 (bits/symbol) from the results of category discrimination tests. This value is larger than the corresponding value evaluated in other infor-

mational dimensions such as the frequency and the magnitude dimensions. Therefore this shows the fact that stimuli presented by the phantom sensation can be discriminated more easily in the absolute terms than those by other single dimensional information transmission methods. And also this is almost the same as that by vibro-tactile two-dimensional phantom sensation.

1. ま え が き

皮膚に刺激を加えて生体に適当な情報を送るいわゆる感覚代行の試みにおいて、伝達情報量を増やすためには空間情報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¹⁾。電気パルス刺激を用いる情報伝達システムでも、空間次元を利用する試みはいくつか行われている^{2),3)}。一般にそれらでは刺激部位数に応じて刺激電極を配列し、それにアイソレートされたパルスを伝達情報に応じて提示していく方式がとられている。しかしこの方式には、アイソレータを各電極に対応して配置するために装置が複雑になる、電極の最小形状に制限があるため高密度な刺激が提示できないなど、実用上いくつかの問題点がある。われわれは前報において、いわゆるファントムセンセーション(以下PSと略)現象^{8),9)}を利用することにより、上述のような空間情報伝達における問題点がある程度解消されることを指摘し、PS現象を利用する情報伝達方式の特性を明らかにした⁴⁾。しかしそれは、2点刺激によるPS像のみを問題としていたため、像の移動は1次元的な移動に限られたものであり、2次元的な刺激像の配位を要求される空間情報伝達に直接適用するものではなかった。このようなことから本論文で

* 機械技術研究所 茨城県新治郡桜村並木 1-2

** 早稲田大学理工学部 東京都新宿区大久保 3-4-1

* Mechanical Engineering Laboratory, Niihari-gun, Ibaraki

** Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo

(Received May 2, 1979)

(Revised March 19, 1980)

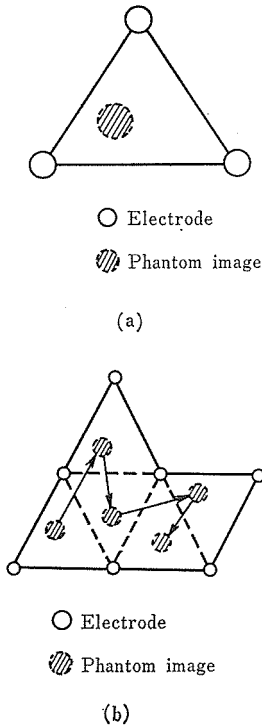


Fig. 1 Two-dimensional phantom display
 (a) Phantom image by three sets of electrodes
 (b) Extension of phantom display area by additional sets of electrodes

は、2次元的に電気刺激 PS 像を配位させる3点 PS 現象について検討を加えることを試みた。ここで3点 PS とは Fig. 1(a) に示すごとく皮膚上の3部位に刺激を加えたときに、それらの強度差に応じて、3部位内のある1領域にのみ刺激像をもつ現象を指すものとする。このような現象が発生する場合には、電極を Fig. 1(b) に示すごとく付け加えていくことにより、より少ない電極で適当な形状の領域に刺激像を提示することが可能となろう。Mann ら⁵⁾はすでに機械振動刺激においてこの3点 PS 現象が発生することを確認し、若干の実験を試みている。電気パルス刺激でも3点 PS 現象が発生し、その像が3組の電極へ加える刺激エネルギーの比率により移動することは、一応予備的実験により定性的に確認された。

本論文では Mann らとは異なる手法を用い、上腕二頭筋を刺激部位として電気パルス刺激3点 PS 像の配位特性、位置弁別特性、通信容量、情報伝達率などを定量的に評価した結果について報告する。

2. 実験装置

実験装置の構成を Fig. 2 に示す。図に示すごとく

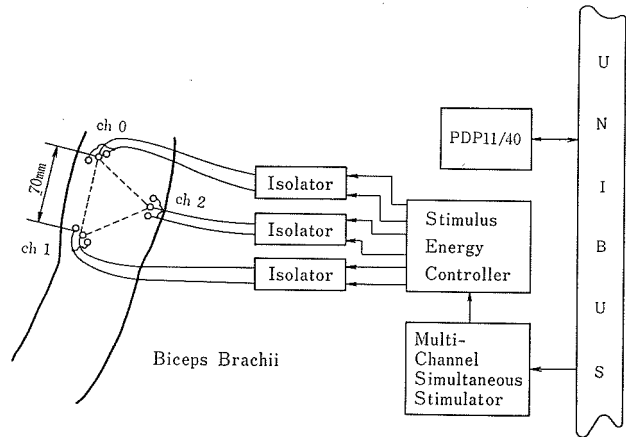


Fig. 2 Experimental setup

く、上腕二頭筋上に3組の電極 (Beckman 形, Ag-AgCl 電極, $\phi 8$ (mm), NaCl ペースト使用) を両面テープを用いて装着し、各電極の組に多点同時刺激装置⁶⁾で制御される刺激エネルギー制御装置⁷⁾および定電流形アイソレータを介して、1パルス当りのエネルギーが制御された刺激パルスを提示する。その際、各組の電極は 20 (mm) 間隔で配列された3個の電極で構成され、それらに加えられる刺激パルスの極性は、外側の二つの電極に対し中央の一つが負となるように選んだ。各電極の組にはチャンネル番号を付け、以下各チャンネルに関する諸量には、対応するチャンネルの番号を用いて、E0, E1, E2 のごとく示すものとする。各電極に提示されるパラメータは、多点同時刺激装置をコントロールする計算機内のプログラムにより、ハードウェアの制約内で任意に変更することが可能である。

なお、実験条件としては、前報⁴⁾で検討された2点 PS 現象の比較的発生しやすい条件と皮膚刺激面の形状の制約とから、電極間距離 d を 70 (mm) とし、刺激パルス周波数は 10 (pps) を選んだ。

3. 3点 PS 像の特性の定量化法

本研究は基本的には、3点 PS 像の配位特性、位置弁別特性を求め、その結果をもとに PS 像による情報伝達系の性能を検討しようとするものである。2点 PS 像の場合からの類推⁴⁾と予備実験によれば、3点 PS 像は3電極に加える刺激エネルギーの比率によって移動する。そこで、配位特性、位置弁別特性を評価するに際しては、まずその3電極への刺激エネルギーの比率の変化に対する像の移動をどのようにして定量化するかということが問題となる。前報⁴⁾の2点 PS 像の場合はこれらの特性の測定法として、恒常法¹¹⁾

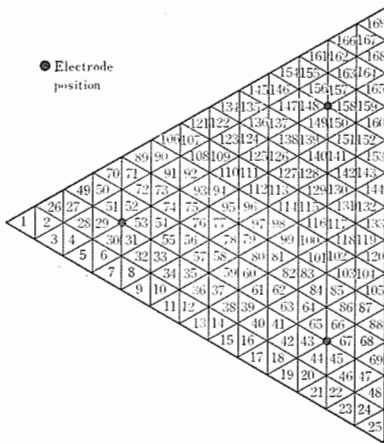


Fig. 3 Triangular scale

および AB 法⁹⁾を用いた。しかし、3 点 PS では像が 2 次元的に変化しうることから同一の方法を用いることは困難である。このようなことからここでは、スケールを使用する方法（以後スケール法と略す）を採用する。この方法では Fig. 3 に示すごとく、3 組の電極を頂点とする 3 角形の内部およびその周囲を 169 個の小さな 3 角形の格子に分割するスケールを電極とともに装着する。そして適当なエネルギー比を有する複数個の 3 点刺激がランダムに提示された時に、それぞれの刺激像の中心がどの格子内にあるかを格子に付された番号により回答させる。PS 像の配位特性は各刺激に対する回答結果の分布の座標平均で評価する。座標系としては、Fig. 4 に示すごとく電極位置を基準に定められた直交座標系 (x-y)、斜交座標系 (X-Y) を適宜用い(注 1)、各回答番号に対応する座標は各小 3 角形の重心で代表する。Fig. 4 中に示されている数字は座標値を示している。これは Fig. 3 において、一つの電極を原点 (ch 2) とし、小 3 角形の 1 辺の 1/3 を単位として目盛ったものである。PS 像の配位位置 (x₀, y₀) は次式により計算される。N 番の小 3 角形の重心の座標を (x_N, y_N)、それに対する回答頻度を α_N、刺激の提示総回数を m 回とすると、

$$x_0 = \left(\sum_{N=1}^{169} \alpha_N x_N \right) / m \quad y_0 = \left(\sum_{N=1}^{169} \alpha_N y_N \right) / m \quad (1)$$

また PS 像の位置弁別特性は回答のばらつき具合によって評価できると考え、その弁別閾の大きさは回答位置に関する座標系の各軸方向の標準偏差から求める。

(注 1) 以後直交座標系における諸量は小文字で、斜交座標系におけるそれは大文字で示す。

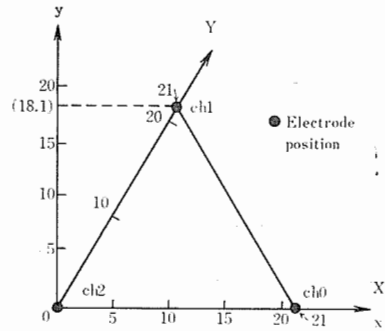


Fig. 4 Coordinates systems used to express the location of phantom image

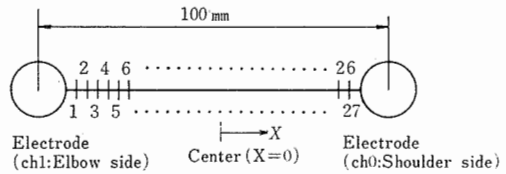


Fig. 5 Two sets of electrodes and one-dimensional scale attached on the biceps branchii to compare the scale method with the constant and AB method

すなわち回答の平均座標 (x₀, y₀) まわりの標準偏差を $\bar{\sigma}_{x_0}, \bar{\sigma}_{y_0}$ とすると、これは、

$$\bar{\sigma}_{x_0} = \sqrt{\left\{ \frac{\sum_{N=1}^{169} \alpha_N (x_N - x_0)^2}{N} \right\} / m} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{y_0} = \sqrt{\left\{ \frac{\sum_{N=1}^{169} \alpha_N (y_N - y_0)^2}{N} \right\} / m}$$

と書ける。ただし各パラメータは (1) 式と同一である。この $\bar{\sigma}_{x_0}, \bar{\sigma}_{y_0}$ に適当な定数 β を乗じた値の 2 倍、2β $\bar{\sigma}_{x_0}, 2\beta\bar{\sigma}_{y_0}$ の積を PS 像の配位位置 (x₀, y₀) における位置弁別閾とする。なお上式 (1), (2) は直交座標系について示したものであるが、斜交座標系の場合は x → X, y → Y とすればよい。

以上のような評価法を想定したうえで、つぎにその検定と、上述の β の具体的数値の推定を行う。2 点 PS 現象の配位特性、弁別特性をスケール法で測定し、その結果を前報の恒常法、AB 法の結果と比較する。この測定ではまず上腕二頭筋上に筋方向に 100 (mm) 間隔で 2 組の電極を装着し、この電極間に前述の 3 角形スケールの目盛とはほぼ同様の間隔 (約 3 (mm)) で 1 ~ 27 番までの目盛を付ける (Fig. 5)。この状態で各電極への刺激エネルギー E₀, E₁ の総和を 70 ~ 100 (erg) に保持しつつ、5 種の刺激エネルギー比 E₀/E₁ を有する刺激の組をランダムに提示 (各刺激当り 20 回) して、各刺激がどの位置に配位したかを番号で回答さ

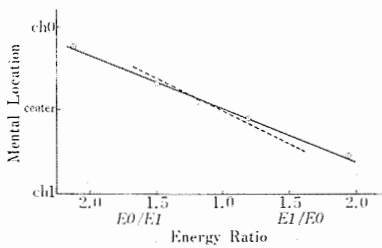


Fig. 6 Comparison of the relation between the mental location of the phantom image and the stimulus energy ratio measures using the constant method with that measured using the scale method (Subject; K. T.)

せ、回答結果を上式(1),(2)に基づいて整理する(ただし、この場合 $y_n=0$ である)。回答の座標平均を各刺激に対して計算した結果を Fig. 6 に示す。図中の点線は前報で恒常法から求められた配位特性を示している。これから、一応スケール法と恒常法の結果は比較的良好に一致することがわかる。Fig. 7 に回答結果の標準偏差を $\sigma(x)$ とした時の $\Delta x=2\sigma(x)$ および $\Delta x=J(x)$ を示す。ただし、 Δx は二つの PS 像の配位位置間の距離を示す変数、 x は PS 像の配位位置、 $J(x)$ は AB 法で評価された jnd である。Fig. 7 の各軸は電極間距離で正規化されている。またこれらでは前報⁴⁾の結果と比較するために、電極間中央と肩側の電極との間のデータのみ表示している。この図から、スケール法から得られた 2σ と AB 法による jnd とは、絶対値は異なるもののほぼ同様の特性を示していることがわかる。

β の値は AB 法で測定された jnd を基準として定めた。すなわち、Fig. 7 において、 jnd の示す特性を $\Delta \bar{x}=J(\bar{x})$ 、配位位置の標準偏差の 2 倍が示す特性を $\Delta \bar{x}=2\sigma(\bar{x})$ とした時、

$$T(\beta) = \int_0^{0.5} (J(\bar{x}) - 2\beta\sigma(\bar{x}))^2 dx \rightarrow \text{最小} \quad (3)$$

を満たすように β を定めた。ただし、 $\bar{x}=x/d$ 、 $\Delta \bar{x}=\Delta x/d$ である。

実験結果より、2名の被験者に対し $\beta=0.81, 0.84$ を得た。Fig. 7 中の一点鎖線はこうして求められた $2\beta\sigma$ を示したものである。以後の検討ではスケール法による位置弁別閾としては、 $1.6\bar{\sigma}_x, 1.6\bar{\sigma}_y$ を用いている。

4. 3点 PS 像の特性実験

本章では、3点 PS 像の配位特性、位置弁別特性について検討を加える。

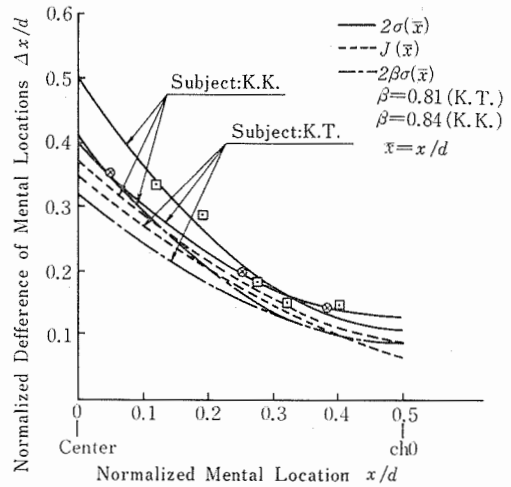


Fig. 7 Comparison of the just noticeable difference of the mental location measured by using the AB method with that measured by the scale method

4.1 実験方法

上腕二頭筋上にスケールとともに装着した3組の電極の内の ch0, ch1 に対し、まず適当なエネルギー比 $E1/E0$ を選定し、さらに ch2 に対して数種(5~6個)のエネルギー $E2_1, E2_2, \dots$ を有する刺激を選んで $(E0, E1, E2_1), (E0, E1, E2_2), \dots$ なる刺激の組をランダムに提示し、前章に述べた要領で刺激像の配位位置を回答させ、その座標平均、標準偏差を求める。各刺激の提示回数は約20回である。 $E1/E0$ は予備実験により、ch0, ch1の中央、1/4, 3/4の位置にPS像が配位するようなものを選び、そのおののに対して、 $E0+E1$ は一定(30~50(erg))に保持した。さらに $E2$ の刺激エネルギー値の選定に際しても予備実験を行い、5~6種の刺激 $(E0, E1, E2_i) (i=1\sim5 \text{ or } 6)$ の各像が、刺激 $(E0, E1)$ のみによる像の位置と ch2 との間にはほぼ等間隔に配位するように配慮した。ただし、これらの刺激のうちの一つは刺激 $(E0, E1, 0)$ と判別がつかなくなる刺激 $(E0, E1, E2)$ のうちで最大の $E2$ を有するものとした。なお、ch0, ch1の中央-ch2間に関しては、 $E0+E1=25, 30, 40, 50$ (erg)とした場合についても測定を行った。

以上の実験において、被験者数は健常男子3名(22~32才)である。また刺激・応答過程はすべて自動化されており、計算機と対話しながら進められる。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 配位特性

回答の座標平均を計算し、それを片対数上にプロッ

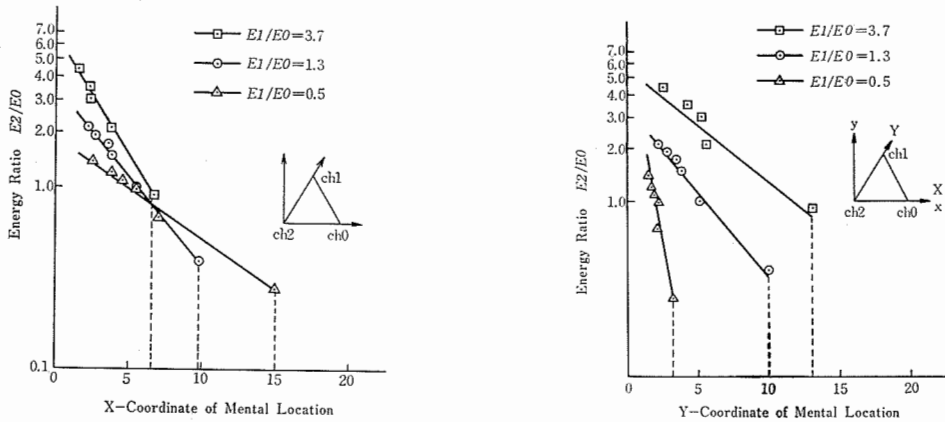


Fig. 8 The movement of the mental location as a function of the stimulus energy ratio $E2/E0$ (Subject: K. A.)

- (a) The relation between the X-coordinate of mental location and the stimulus energy ratio $E2/E0$
 (b) The relation between the Y-coordinate of mental location and the stimulus energy ratio $E2/E0$

In those figures, the coordinates of ch 0, ch 1 and ch 2 electrodes correspond to (21, 0), (0, 21) and (0, 0) respectively

とした結果の一例を Fig. 8 に示す。図の横軸は座標の平均値の X, Y 成分の値、縦軸は ch 0 への刺激エネルギー $E0$ で正規化された ch 2 における刺激エネルギー $E2/E0$ に対応している。各プロットはそれぞれ刺激エネルギー比の相異を示す。これらの結果から刺激エネルギー比 $E1/E0$ を一定として $E2$ を増加させると、配位像の X-Y 座標値は片対数上でほぼ直線的に原点 0 に近づいていくことがわかる。このことは ch 2 に適当な強度の刺激を加えると、その強度の増加とともに PS 像は ch 0, ch 1 の間から ch 2 側へ直線的に移動することを意味している。像の移動軌跡は $E2/E0$ と配位像の座標との関係が $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を被験者およびエネルギー比 $E1/E0$ によって定まる定数とすれば、

$$E2/E0 = 10^{(-\alpha X + \beta)},$$

$$E2/E0 = 10^{(-\gamma Y + \delta)} \quad (E1/E0 = \text{一定}) \quad (4)$$

と書けることより、上式の左辺を等しいと置いて、

$$Y = (\alpha/\gamma)X - (\beta - \delta)/\gamma \quad (5)$$

として 1 次関数で表わすことができる。

一方、Fig. 8 中の点線は $E2$ を 0 近くへと減少させた時の PS 像の配位位置の特性を推定したものである。本実験では $E2$ が閾値近傍における値をとる場合の詳細な検討は行っていないが、少なくとも $E2$ が閾値以下の時には PS 像の位置は $E2$ の影響を受けず、 $E0, E1$ のみで決定されることは確認した。この事実と本実験における提示刺激の設定法を考慮すれば、図のごとく端点近傍の特性が推定される。

また Fig. 8 の傾向は $E0 + E1$ を 25~50 (erg) ($E1/E0 = 1.3$) 程度変化させてもほぼ一定であることも確認された。本実験手法を考慮すれば、この $E0 + E1$ の変化に対する特性の不変性は、 $E2$ の変化領域 (10~40 (erg) 程度) と $E0 + E1$ の変化領域を加算したエネルギー総量 $E0 + E1 + E2$ の変化領域 30~80 (erg) において、エネルギー総量に依存しないと表現することもできる。このことは、PS 像の配位位置が $E1/E0$ および $E2/E0$ の二つの比、すなわち 3 電極への刺激エネルギーの比 $E0 : E1 : E2$ によって確定されることをも意味するものである。

さて、つぎに刺激エネルギーと PS 像の配位位置との関係式に注目する。まず (4) 式において両辺の対数をとると次式が得られる。

$$X = k_1 \log (E2/E0) + m_1,$$

$$Y = k_2 \log (E2/E0) + m_2 \quad (6)$$

ただし、 $k_1 = -1/\alpha$, $m_1 = \beta/\alpha$, $k_2 = -1/\gamma$, $m_2 = \delta/\gamma$ である。この式から PS 像の座標は $E2/E0$ の対数に比例して定まることがわかる。もし本実験のごとく $E0$ が一定に保持されるような場合には、上式から PS 像の位置はほぼ $E2$ の対数すなわち刺激エネルギー $E2$ に対する主観的強度に比例して定まるといえる。また、(6) 式の特性において、

$$E0 + E1 = E01 \quad (=25 \sim 50 \text{ (erg)}) \quad (7)$$

$$E1/E0 = c \quad (\text{一定}) \quad (8)$$

なる条件のもとで c に対して固有の k_1, k_2, m_1, m_2 が存在するから、(6), (7), (8) 式より次式が得られる。

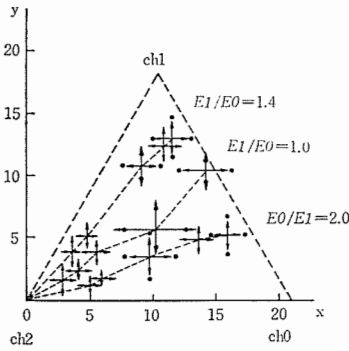


Fig. 9 The standards deviation of the mental location as a function of the mental location. Dots show the results calculated from experimental equations (Subject: K. T.)

$$X = k_1 \log \frac{E_2}{E_{01}} + m_1' \quad (9)$$

$$Y = k_2 \log \frac{E_2}{E_{01}} + m_2'$$

$$\text{ただし, } m_1' = k_1 \log(1+c) + m_1,$$

$$m_2' = k_2 \log(1+c) + m_2$$

である。この(9)式は、3点PS像の配位位置はエネルギー比を一定に保持した二つのチャンネルの刺激エネルギーの総和と、もう一つのチャンネルのエネルギーとの比で決定されることを示している。これはたとえば、ch0, ch1間の1点からch2を結ぶ線上に配位する3点PS像の特性は、ch0, ch1間の1点に配位するPS像をあたかもその部位に実際に電極を装着して刺激を与えた時の刺激像と同等のものと解釈することにより、2点PS像の場合と同様にして取り扱うことを示唆するものである。ただし、この3点PS像の配位特性と2点PS像のその、より詳細な類似性については今後の検討を要する問題である。しかし、上述の性質は3点PS像の配位位置の設定に際し有効となろう。

4.2.2 位置弁別特性と通信容量

Fig. 9に各PS像の配位位置における標準偏差を計算した結果の一例を示す。この図から3電極で構成される3角形領域内のほぼ中央付近で位置弁別閾が最大になることが示唆される。

3点PS像の配位位置に情報をのせる場合の通信容量は上述の結果を用いて以下のごとく求める。まず通信容量はよく知られているごとく、ダイナミックレンジの間に取りうる弁別閾のステップ数の2を底とする対数として定義される。この定義から3点PSの通信容量 PR_{\max} は一般的には次式で算出される。

$$PR_{\max} = \log_2 \left\{ \int_S \frac{dS}{f(x, y)} \right\} \quad (\text{bit/symbol}) \quad (10)$$

ただし、 S : PS像が発生する領域、 $f(x, y)$: PS像の配位位置 (x, y) の関数として表わされた弁別閾の面積。上式の $f(x, y)$ は実験的に求めることは可能であるが、ここでは以後の計算を容易にするために前章で述べたごとく、弁別閾は x, y 軸方向に対し独立と仮定し、次式によりこれを評価する。すなわち x, y 軸方向の標準偏差を $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$ とすると、

$$f(x, y) = 4\beta^2 \sigma_x(x, y) \sigma_y(x, y) \quad (11)$$

ただし、 β は前章で決定された定数である。この式を用いれば(10)式はつぎのように書くことができる。

$$PR_{\max} = \log_2 \left\{ \iint \frac{dx dy}{4\beta^2 \sigma_x(x, y) \sigma_y(x, y)} \right\} \quad (\text{bit/symbol}) \quad (12)$$

なお標準偏差の分布の形は刺激領域中央で最大値をとることなどから一応球面で記述できるものと仮定し、その球面の方程式のパラメータを最小2乗法により決定した。Fig. 9中の黒点はこの球面近似式により計算された各PS像の主な配位位置における標準偏差を示している。実験式による値と実験データとは比較的よく一致していることがわかる。こうして決定された σ_x, σ_y に対し(12)式の具体的計算は数値積分により行った。

Table 1に通信容量の算出結果を示す。これより通信容量は4 [bit/symbol] 程度であることがわかる。

つぎに、この値を複数個の電極を装着して情報を提示する場合のそれと比較することを考える。電極を複数個配置し、それらへの刺激の有無により「0」、「1」という情報を提示する時の通信容量 PR'_{\max} は次式により概算することができる。

$$PR'_{\max} = \log_2(S/\pi r^2) \quad (\text{bit/symbol}) \quad (13)$$

ただし、 S は電極を装着する領域の面積、 r は隣接電極中心間距離の1/2である。ここで、電極を装着する際、領域の境界上に電極の中心がくるようにするものとすれば、上述の実験のごとく刺激領域が一辺7 [cm]

Table 1 The channel capacity of the electrocutaneous communication system using the two-dimensional phantom sensation (N_s : number of the discriminable mental locations, PR_{\max} : channel capacity)

Subjects	N_s	PR_{\max} bit/symbol
K. T.	19	4.2
K. A.	15	3.9
Y. T.	17	4.1

の3角領域の場合の PR'_{max} は

$$PR'_{max} = \log_2 \left\{ \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left(2 + \frac{70}{r} \right)^2 \right\} \quad (\text{bit/symbol}) \quad (14)$$

と書ける。これから PR'_{max} が 4 [bit] になる時の r を求めると $r \approx 8$ [mm] となる。すなわちこの結果から $r > 9$ [mm] となる電極を用いる場合には、PS 像を利用したほうが通信容量は多くなること、が判明する。通常の電気刺激条件では、電極直径は 10 [mm] 以上であることが必要とされる¹⁰⁾。またそのような電極を用いる場合、装着方式などを考慮すると $r > 10$ [mm] となることはよく経験するところである(本実験の r は 10 [mm] である)。このようなことから上述の結果は、PS 現象の利用が空間情報の高密度な提示に有利であることを示唆するものである。

5. 3点PS像を用いる情報伝達系の多カテゴリー判断実験

本章では、複数個のカテゴリーのPS像を含む刺激像をランダムに提示した場合のカテゴリー認知能力を測定することにより、PS像を用いる空間情報伝達系の特性を評価する。

5.1 実験方法

3組の電極で構成される3角形領域内の N カ所に配位するPS像を含む N 種の刺激を選定し、それらにカテゴリー番号(1~ N)を付加する。そしてこれらの刺激をランダムに提示して、それがどのカテゴリーの刺激像かを番号により回答させる。この実験過程から得られたカテゴリー判断結果をもとに、次式により伝達情報量を計算し、それをPS像を含む刺激提示系の情報伝達特性の評価指標とする。

$$H(x; y) = H(x) - H_y(x) \quad (\text{bit/symbol}) \quad (15)$$

$$\text{ただし, } H(x) = -\sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i),$$

$$H_y(x) = -\sum_i \sum_j p(x_i, y_j) \log_2 p(x_i/y_j)$$

で、 x_i は入力カテゴリー、 y_j は回答のカテゴリー、 i, j はカテゴリー番号、 $p(x_i)$ は入力カテゴリー x_i が生起する確率、 $p(x_i/y_j)$ は y_j が既知の条件のもとで x_i が生起する条件付確率を示す。

刺激のカテゴリーとしては、Fig. 10に示すような各点を選んだ。これらの各部位にPS像を配位させる際は、前章の配位特性を参考に行った。また実験に先立って極限法によりまず配位位置の変化に対するPS像の等強度特性を測定し、この結果をもとに、各カテゴリーの刺激像の強度は、ほぼ等しくなるように3電極への刺激エネルギーの総和を調節しつつ設定した。

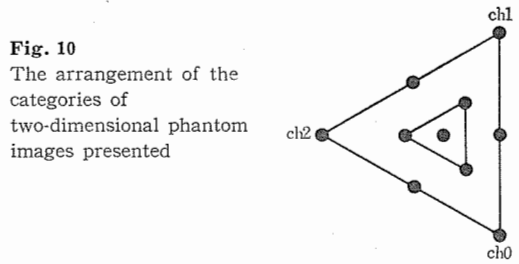


Fig. 10 The arrangement of the categories of two-dimensional phantom images presented

なお刺激の提示時間は2秒、各カテゴリーの提示回数は20回とし、各試行は適当な時間(2~5分程度)練習を積んだ後行った。実験過程は前章と同様自動化されており、計算機と対話しながら行うようになっている。被験者数は健康男子3名である(22才~32才)。

5.2 実験結果と考察

Table 2に実験結果を示す。この表の1番上の欄から、2点PSでは3カテゴリー提示に対し100 [%]の正解率が得られることがわかる。また、その以下の欄に示されているごとく、この3カテゴリーを提示する2点PSを2~3組複合して、提示カテゴリー数を5~6と増加させてもほぼ100 [%]の正解率が得られる。このことは、3カテゴリー提示の2点PSを本実験のような配置で複合させて提示すれば、それらによって提示される刺激はほぼ独立に認知できることを示しており、刺激電極を適切な位置に一つ追加することにより、少なくとも3個の認知しうる刺激カテゴリーが追加できることを示唆するものと考えられる。一方、3角形の辺上に配位した6個の刺激カテゴリーに

Table 2 Information transmission rate of the electrocutaneous communication system using the two-dimensional phantom images sensation

Phantom images	Number of input category	Input information [bit symbol]	Information transmission rate [bit symbol]		
			Subject:K.T.	Subject:K.A.	Subject:Y.T.
	3	1.6	1.6	1.6	1.6
	3	1.6	1.6	1.6	1.6
	4	1.9	1.9	1.9	1.9
	5	2.3	2.3	2.1	2.1
	6	2.6	2.3	2.4	2.3
	7	2.7	2.5	2.6	2.6
	8	3.0	2.7	2.8	2.6
	9	3.1	2.6	2.7	2.8

対し、中央に伝達情報量を低下させることなく配位できる刺激像の数は約2個である。中央に3個提示し、提示カテゴリー数が9となると伝達情報量は飽和する傾向があり、最大で送れる情報量 $R(=\max\{H(x; y)\})$ は 2.7~2.8 [bit/symbol] 程度である。この種のカテゴリー提示実験では、入力カテゴリーが強度次元の場合3~4、周波数次元の場合4~5程度で伝達情報量は飽和し、最大伝達情報量はそれぞれ 1.7, 2.1 [bit/symbol] 程度¹⁰⁾となるが、PS方式での情報量の最大値はこれらに比べれば比較的高いことがわかる。この傾向はPS像のカテゴリーの記憶のしやすさを示唆するものであり、また同時にPS像が位置の情報を含んだ形で提示されていることの新たな証拠を提供するものとも解釈される。というのは、身体の一部を刺激された際にその部位を同定するいわゆる感覚定位は、刺激強度レベルの判定などよりも比較的正確で、周波数感覚などととも比較絶対判断が可能とされている¹¹⁾ことから、PS像が位置の情報として提示されれば、このような皮膚の感覚定位特性により当然伝達情報量も増加すると考えられるからである。さらにこのことは、本実験で得られた最大伝達情報量の通信容量に対する比率 (R/PR_{\max}) が各被験者に対し 0.64, 0.71, 0.68 となり、絶対感覚が得にくいとされる強度次元 (0.4~0.5) などと比べ大きく、周波数次元 (0.6~0.7) などと同等の値を示していることから裏づけることができる。

この3点PS像を含む刺激のカテゴリー識別力は、Mannら⁴⁾により機械振動刺激に対しても測定されている。それによれば、ほぼ100(%)正解できるカテゴリー数は7、すなわち最大伝達情報量は約2.8 [bit/symbol] であり、ほぼ電気刺激の場合と同等の値を有することが示されている。この点でPS現象においても他の情報次元同様、電気刺激は機械振動刺激と同等の情報伝達特性を有することがわかる。

6. むすび

以下に得られた結論をまとめる。

(1) 3角形の頂点に装着された3組の電極の内の二つに加える刺激エネルギーを E_0, E_1 とし、第3の電極に加える刺激エネルギーを E_2 としてこの E_2 を徐々に増加すると、PS像は刺激エネルギー E_0, E_1 の刺激で決まる配位位置から直線的に E_2 を加える電極側へと移動する。またその時の像の位置は $\log\{E_2/(E_0+E_1)\}$ に比例して決定される。この配位特性は30~80 [erg] 程度では刺激エネルギーレベルの影響をうけない。

(2) 3点PS像の位置弁別閾は、PS像を発生させる3組の電極間の中央部において最大になり、電極周辺部に行くに従い小さくなる。またこの性質は配位特性の場合同様、30~80 [erg] の範囲では刺激エネルギーレベルの影響をうけない。この位置弁別特性から3点PSの通信容量を評価すると3.9~4.2 [bit/symbol] 程度となる。

(3) 多カテゴリー判断実験により評価された3点PS像最大伝達情報量は約2.8 [bit/symbol] である。この種の情報伝達方式は、強度、周波数情報次元を用いる方式よりもより多くの情報が伝達できるとともに、通信容量に対する伝達情報量の比率も高い値を示す。このことから、3点PS像は比較絶対判断可能な形で提示される刺激像であることが示唆される。また、3点PSを含む情報伝達系の最大伝達情報量は機械振動刺激のそれとほぼ同等の値を示す。

最後に、常日頃ご指導いただき早稲田大学 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、木村 誠次長、清水嘉重郎システム部長に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) J. C. Bliss and H. D. Crane: Experiments in Tactile Perception, Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif., Final Rept. on SRI Project 4656, Contract Nas 2-1679, Jan. (1965)
- 2) 加藤, 恒川, 大西, 浜田: 人体へのフィードバック信号としての電気刺激, 第2回バイオメカニズムシンポジウム論文集, 35/48 (1971)
- 3) C. C. Collins: Tactile Image Perception, IEEE Inter. Con. Tech. Paper, 1/4 (1974)
- 4) 谷江, 鎰, 小森谷, 阿部: 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, 計測自動制御学会論文集, 15-4, 505/512 (1979)
- 5) R. W. Mann: Force and Position Proprioception for Prostheses, The Control of Upper-Extremity Prostheses and Orthoses, 201/219, Charles C Thomas Publisher (1974)
- 6) 谷江, 鎰, 谷, 前田, 大野, 藤川, 阿部: 多点同時刺激装置の開発, 機械技術研究所報, 31-2, 32/44 (1977)
- 7) 谷江, 鎰, 小森谷, 阿部, 三浦: 定エネルギー型電気パルス刺激情報伝達装置のための刺激エネルギー制御装置, 医用電子と生体工学, 18-1, 40/42 (1979)
- 8) G. von Békésy: Neural Funneling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea, J. Acoust. Soc. Am., 31-9, 1236/1249 (1959)
- 9) D. S. Alles: Information Transmission by Phantom Sensation, IEEE Trans. on Man Machine Systems, MMS-11-1, 85/91 (1970)
- 10) 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)
- 11) 和田, 大山, 今井編: 感覚・知覚心理学ハンドブック, p. 816, 誠信書房 (1969)