

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3543097号

(P3543097)

(45) 発行日 平成16年7月14日(2004.7.14)

(24) 登録日 平成16年4月16日(2004.4.16)

(51) Int. Cl.⁷

F I

G 0 6 F 3/00

G 0 6 F 3/00 6 8 0 B

// A 6 1 N 1/36

A 6 1 N 1/36

請求項の数 18 (全 12 頁)

(21) 出願番号	特願2001-540447 (P2001-540447)	(73) 特許権者	899000024
(86) (22) 出願日	平成12年11月20日 (2000.11.20)		株式会社先端科学技術インキュベーション センター
(86) 国際出願番号	PCT/JP2000/008173		東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 新 丸の内ビルディング6階
(87) 国際公開番号	W02001/038958	(74) 代理人	100103137
(87) 国際公開日	平成13年5月31日 (2001.5.31)		弁理士 稲葉 滋
審査請求日	平成15年11月10日 (2003.11.10)	(72) 発明者	館 ▲すすむ▼
(31) 優先権主張番号	特願平11-332177		茨城県つくば市梅園二丁目31番14号
(32) 優先日	平成11年11月24日 (1999.11.24)	(72) 発明者	前田 太郎
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		東京都台東区谷中一丁目2番19号
早期審査対象出願		(72) 発明者	川上 直樹
			鳥取県鳥取市大工町頭九番地

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電気刺激を用いた触覚呈示方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

皮膚表面からの電気刺激によって受容器に繋がった神経軸索を選択的に発火させる触覚呈示方法であって、皮膚表面からの陽極電流によって、皮膚深さ方向に延びた神経軸索のみを刺激することを特徴とする触覚呈示方法。

【請求項2】

皮膚表面からの電気刺激によって受容器に繋がった神経軸索を選択的に発火させる触覚呈示方法であって、皮膚表面からの電流の陽陰を選択することによって、神経軸索の延びる方向に対応して選択的に神経軸索を刺激することを特徴とする触覚呈示方法。

【請求項3】

皮膚深さ方向に延びた神経軸索は陽極電流によって刺激することを特徴とする請求の範囲2に記載の触覚呈示方法。

【請求項4】

皮膚表面方向に延びた神経軸索は陰極電流によって刺激することを特徴とする請求の範囲2に記載の触覚呈示方法。

【請求項5】

前記皮膚深さ方向に延びた神経軸索は、マイスナー小体あるいはルフィニ終末に繋がった神経軸索であることを特徴とする請求の範囲1,3いずれかに記載の触覚呈示方法。

【請求項6】

前記皮膚表面方向に延びた神経軸索は、パチニ小体あるいはメルケル細胞に繋がった神経

10

20

軸索であることを特徴とする請求の範囲4に記載の触覚呈示方法。

【請求項7】

皮膚表面からの電気刺激によって受容器に繋がった神経軸索を選択的に発火させる触覚呈示方法であって、皮膚表面に一元状あるいは二次元状の複数のアレイ電極を設け、該アレイ電極の重み付け変化によって刺激深度を変化させ、皮膚表面に対して深度の異なる神経軸索を刺激することを特徴とする触覚呈示方法。

【請求項8】

前記神経軸索は、皮膚表面方向に延びているものであることを特徴とする請求の範囲7に記載の触覚呈示方法。

【請求項9】

皮膚表面からの電気刺激によって受容器に繋がった神経軸索を選択的に発火させる触覚呈示方法であって、皮膚表面に一元状あるいは二次元状の複数のアレイ電極を設け、該アレイ電極の重み付け変化によって、神経軸索の延びる方向に対応して選択的に神経軸索を刺激すると共に、刺激深度を変化させて皮膚表面に対して深度の異なる神経軸索を選択的に刺激することを特徴とする触覚呈示方法。

【請求項10】

前記アレイ電極の重み付け変化は、陽陰の電極の配設を選択することによって、皮膚表面からの電流の陽陰を選択すると共に、刺激関数の深さ方向の減衰を選択することを含むことを特徴とする請求の範囲7,8,9いずれかに記載の触覚呈示方法。

【請求項11】

選択された神経軸索はマイスナー小体に繋がった神経軸索であり、前記アレイ電極の中心電極が陽極であり、該中心電極の周りには陰極電極が配設されることを特徴とする請求の範囲10に記載の触覚呈示方法。

【請求項12】

選択された神経軸索はメルケル細胞に繋がった神経軸索であり、前記アレイ電極の中心電極が陰極であり、該中心電極の周りには陽極電極を配設することで刺激関数の深さ方向の減衰を早めることを特徴とする請求の範囲10に記載の触覚呈示方法。

【請求項13】

選択された神経軸索はパチニ小体に繋がった神経軸索であり、前記アレイ電極の中心電極が陰極であり、該中心電極の周りにはさらに陰極電極を配設することで刺激関数の深さ方向の減衰を遅くすることを特徴とする請求の範囲10に記載の触覚呈示方法。

【請求項14】

皮膚表面からの電気刺激によって受容器に繋がった神経軸索を選択的に発火させる触覚呈示装置であって、該装置は皮膚表面に一元状あるいは二次元状に配設される複数のアレイ電極を有し、該アレイ電極の重み付けは選択自在に構成されており、該アレイ電極の重み付けの変化によって、神経軸索の延びる方向に対応して選択的に神経軸索を刺激すると共に、刺激深度を変化させて皮膚表面に対して深度の異なる神経軸索を選択的に刺激するように構成されていることを特徴とする触覚呈示装置。

【請求項15】

前記アレイ電極の重み付けの選択は、アレイ電極を構成する各電極の陰陽の選択および各電極の配設の選択によって行うことを特徴とする請求の範囲14に記載の触覚呈示装置。

【請求項16】

皮膚表面からの電気刺激を用いた記号呈示方法であって、皮膚の浅部に位置すると共に、皮膚深さ方向に延びた神経軸索を刺激することを特徴とする記号呈示方法。

【請求項17】

前記神経軸索はマイスナー小体に繋がった神経軸索であることを特徴とする請求の範囲16に記載の記号呈示方法。

【請求項18】

陽極電流によって神経軸索を刺激することを特徴とする請求の範囲16に記載の記号呈示方法。

10

20

30

40

50

【発明の詳細な説明】

技術分野

本発明は、触覚呈示方法及び装置に係り、詳しくは、皮膚表面からの電気刺激によって受容器に繋がった神経軸索を発火させる触覚呈示方法及び装置に関するものである。本明細書において、「発火」とは、神経軸索上の刺激部位の電位が急激に上昇し、さらにその電位上昇現象が軸索を伝搬する現象を意味するものとする。

背景技術

人間の感覚は一般に特殊感覚と体性感覚とに分けられる。特殊感覚とは、視覚と眼球、聴覚と耳というように対応した感覚器がある感覚を指す。一方体性感覚とは大きく分けると皮膚に由来する皮膚感覚と、内部の筋や腱に由来する固有受容感覚とに分けられ、この体性感覚が広い意味での触覚を意味する。また、狭い意味では触覚は、温、冷、痛等の感覚を含む皮膚感覚の中の接触覚や圧覚を意味する。

10

接触覚や圧覚などは皮膚の中にあるメルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体等の感覚受容器に対応しており、皮膚がへこんだり引っ張られたりした場合にその変形や振動が受容器に伝わり感覚が生じる。また、皮膚感覚においては、感覚点に対応する種々の感覚受容器があり、受容器には基本的に変位と速度と加速度を見るものがあり、それによって触れた物の細かいパターン等を認識している。

ここで、仮に、何かを触る、あるいは擦るときに生じる皮膚感覚をVR空間内で呈示できれば、より現実世界に近付いた実在感を得られるとともにより高度な作業が可能となる。このような触覚を再現する方法には、機械的に行う手法あるいは電気的に行う手法がある。機械式のものには、振動子で振動を起こし、振動の周波数やインパルス成分の頻度を変更させるもの、電気式のものには、皮膚電極を介して電気パルスを呈示して、振動感覚に似た感覚を伝えるようなものがある。機械式と電気式との大きな違いは、機械式が各受容器を直接刺激するものであるのに対して、電気式は受容器に繋がった神経軸索を刺激するものであるという点にある。

20

そして、過去の多くの皮膚感覚ディスプレイはアレイ状に並べたピン構造か、またはベルト状かのどちらかに分類できる。これらは可動部を持つため構造が大型となるという欠点があり、研究の主体は小型化に絞られている。しかも現在のところ原理的に、皮膚感覚のごく一部しか呈示できていない。

これに対して、外部からの電流によって神経活動が誘発されることを利用する電気触覚ディスプレイの研究も行われている。皮膚には電極を取り付けるだけで良いため小型化は容易となった。しかしながら、ほとんどの研究が電流と皮膚下の神経活動の関係を定式化せずシステムを組んでいるためアドホックなものに終わっていた。

30

本発明は、皮膚下に存在する数種類の受容器を選択的に刺激することで、よりきめの細かい触覚呈示を提供することを課題とするものである。

発明の開示

本発明は、かかる課題を解決するために創案されたものであって、人間の皮膚下には数種類の機械受容器が存在することに着目し、これらを皮膚表面の電極から選択的に刺激することを特徴とするものである。具体的には二つの手法を提案する。一つは、これまでの電気刺激が陰極電流を刺激として用いていたのに対し陽極電流を使うことで神経軸索の方向に選択的な刺激を行う手法である。もう一つは、電流をアレイ状とし、各電極に流す電流の重み付け変化で刺激深度を変化させる手法である。また、陽極電流を用いた電気刺激によって記号呈示を行なう。

40

図面の簡単な説明

図1は、人の無毛部の皮膚構造を示す図であり、RAはマイスナー小体、SAIはメルケル細胞、PCはパチニ小体を示している；

図2は、指先における、各種小体の深さとそれに接続される軸索の直径を示す表である；

図3は、皮膚表面からの電気刺激を説明する断面図と等価回路図である；

図4は、皮膚表面からの電流刺激を説明する図であり、二次元、単一電極の場合を示している；

50

図5は、水平方向に伸びた軸索の刺激関数を示す図であり、単一電極からの陰極電流の場合を示している；

図6は、1次元アレイ電極を示す図である；

図7は、陰極電流による刺激を示す図であり、水平に伸びた軸索の刺激関数が正の値をとるのに対して、垂直に伸びた軸索の刺激関数は負の値をとる；

図8は、陽極刺激を示す図であり、刺激関数が正負逆転し、このものでは、皮膚垂直方向の軸索のみ刺激される；

図9は、単一電極による、メルケル細胞とパチニ小体の神経軸索の刺激を示す図である；

図10は、アレイ電極による、メルケル細胞の神経軸索の刺激を示す図である；

図11は、アレイ電極による、パチニ小体の神経軸索の刺激を示す図である；

10

図12は、実施の形態に係るシステム構成図である；

図13は、入力パルス波形を示す図である；

図14は、感覚の移動現象を説明する図であり、被験者はつねに電極から1~3mmほど指先方向にずれた場所に振動覚を感じることを示しており；

図15は、SAIモードにおける対象物体の弾性を示す図であり、指を動かさないときナイフエッジのように感じていたものが、微小に動かした途端軟らかい弾性体の棒を触っているように感じる；

図16は、各電気刺激モードにおける刺激点と感覚生起点のずれを示す図であり、左は陰極(SAI)モード、右は陽極(RA)モードである。

発明を実施するための好ましい形態

20

まず、皮膚感覚生成のメカニズムについて説明する。皮膚には4種類の機械受容器が存在する。マイスナー小体(RA)、メルケル細胞(SAI)、ルフィニ終末(SAII)、パチニ小体(PC)である。ルフィニ終末(SAII)は密度が低いので、以下RA、SAI、PCを中心に話を進める。

図1は無毛部の皮膚の構造であり、一般にRAとPCは高速の変化、ないし振動を感知し、SAIは圧力を感知すると考えられている。そして、全体の構造に関しては、1 各種小体は種類によって決まった深さに存在する、2 各種小体に接続される神経軸索は種類によって決まった太さを持つ、という特徴が知られている。図2は各種小体の深さとそれに接続される軸索の直径である。この深さは体の部分によって異なるが、ここに挙げた数値は指先のものである。

30

指先の皮膚の特徴は角質の厚さにあり、指先では600 μ mであるのに対して体の他の部分では15 μ m程度である。RAはDermalpapillae先端に存在し、表面からの深さは700 μ m程度である。SAIの深さはglandular ridgeの高さから計算して900 μ m程度とされる。PCは真皮と皮下組織部の間に存在し、2mmから3mmの深さである。

機械受容器に接続される神経軸索はA型とされ、これは指に存在する求心性神経としてはもっとも太い。RAの直径が他の二つの軸索の直径の半分程度であることに留意する必要がある。皮膚には他にも求心性軸索は各種存在する(痛覚、温覚等)が、全て機械受容器の軸索に比べて1/10程度の直径しか持たない。このことにより、電気刺激の閾値は機械受容器のほうが他の神経よりはるかに低くなり、安定して(例えば痛みを伴うことなく)刺激を行うことができる。

40

電気刺激で重要なのは軸索の方向と深さである。皮膚下に存在する神経軸索の経路を定量的に詳細に調べた研究はなく、したがって、いくらかの推量が必要となる。発生の研究から、RAの軸索はdermal領域から垂直に伸びていることが判っている。これに対してSAIの軸索の伸び方ははっきりしていない。幾つかのスケッチは軸索が真皮(dermalregion)を水平に走っている様を描いている。このことからSAIの軸索は皮膚表面に対して水平であると仮定する。PCの軸索は多くの研究で皮膚水平に走っていることが判っている。したがって、SAI、RA、PCに接続された軸索を別々に刺激することで各刺激の組み合わせによりあらゆる皮膚感覚を生成できる。本明細書では、各刺激を、RAモード、SAIモード、PCモードと呼ぶことにする。

個々の刺激手法について述べる前に、電気刺激の原理について説明する。図3は神経軸索

50

をモデル化したもので、 x 軸を軸索の方向にとる。軸索の細胞膜はキャパシタンス C_m とコンダクタンス G_m を持つ。軸索内部のコンダクタンスを G とおく。膜を隔てた外部電位と内部電位をそれぞれ $V(x, t)$ 、 $V_m(x, t)$ とし、電位差 $V - V_m$ を $V_m(x, t)$ とする。ここから、入力として時間的インパルス入力を仮定すると、式 (1) が求められる。

$$V_m(t=0, x) = \frac{\lambda^2}{\tau} u_{xx}(x) \quad (1)$$

$$\text{ただし } \lambda = \sqrt{\frac{G}{C_m}}, \quad \tau = C_m / G_m$$

10

式 (1) の右辺を刺激関数 (AF) と呼ぶことにする。これはインパルス入力時の膜間電位差の最大値を予測する物差しであり、よって神経が発火するかどうか判定するための判断基準として用いることができる。もし、神経軸索が軸索上のどこでも発火可能とすれば、電気刺激でその神経の発火しやすさを判定するためには軸索上に沿った刺激関数の最大値を評価すればよい。

刺激関数について、もう少し具体的に説明する。 $\lambda^2 / \tau = G / C_m$ であり、 G 、 C_m はそれぞれ軸索単位長当たりのコンダクタンスと膜間キャパシタンスであり、以下のことがわかる。無髄神経の場合は、神経が n 倍太くなったとき G は n^2 、 C_m は n 倍となり、したがって n 倍刺激しやすくなる。有髄神経の場合には、解剖学的的知見として、Ranvier 間隙の幅は神経の太さによらないが、間隙同士の間隔は神経の太さに比例する。このことに注意して計算すると、神経が n 倍太くなったとき G は n^2 、 C_m は変化せず、したがって n^2 倍刺激しやすくなる。また、同じ大きさの無髄神経と有髄神経を比べた場合、 C_m は無髄神経の方が $10^1 \sim 10^3$ 倍大きい。したがって、無髄神経は $10^1 \sim 10^3$ のオーダーで有髄神経より電気刺激しにくい。ここにおいて、機械受容器の軸索は最も太く、かつ有髄であり、最も刺激しやすい。

20

刺激関数において、 $u_{xx}(x)$ は軸索に沿った電位の空間 2 回微分である。電位は皮膚表面からの電流によって発生する。このため刺激関数は皮膚表面の電流源密度によって表さなければならない。まず二次元、単一電極の場合を考える (図 4)。電流を I とする。この電流は陰極電流である (吸い出し)。簡単のため均一の無限空間とする。 x 軸を皮膚表面方向にとり、 y 軸を皮膚深さ方向にとる。電極を原点にとる。 (x, y) における電流密度 i は、 $i(x, y) = I / 2\pi R$ (但し、 $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ は電極からの距離である)。 (x, y) における電位 $\Psi(x, y) = -I \log(R) / 2\pi$ (ρ は単位体積当たりの抵抗、無限遠電位を 0 と仮定) となる。

30

ここで刺激関数を計算すると、もし軸索が x 軸方向に伸びていれば、

$$\begin{aligned} AF &\propto \frac{\partial^2 \Psi(x, y)}{\partial x^2} \\ &\propto \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2} \quad (2) \end{aligned}$$

40

となる。

式 (2) をプロットすると図 5 のようになる。図 5 からは以下のことが判る。まず、刺激関数は $x = 0$ で最大値をとる。これは電極直下でもっとも刺激されやすいことを意味する。 $AF_{x=0} \propto 1/y^2$ より、これは軸索深さ y の二乗に比例して減衰する。すなわち浅い部分ほど刺激されやすい。また、図 5 は水平に伸びた軸索に対する陰極性電流に対する結果を示している。もし陽極性となれば図は正負反転し、刺激関数は負の値を持つ。このことが、従来電気刺激実験が陰極性電流を用いている理由である。

また、一般に電流源が皮膚上に分布している場合には、

$$AF(x, y) \propto \int I(x') \frac{y^2 - (x - x')^2}{((x - x')^2 + y^2)^2} dx'$$

となり、

櫛形電極を使う場合には離散的になり(図6)、

$$AF(x, y) \propto \sum_{i=1}^M I_i \frac{y^2 - (x - x_i)^2}{((x - x_i)^2 + y^2)^2}$$

10

となる。但し、 I_i は*i*番目の電極からの電流である。Mは電極の個数、 x_i は*i*番目の電極の座標を表す。

皮膚構造および電気刺激の原理について述べたところで、本発明の主要部である各受容器を種類ごとに個別に刺激する手法、すなわちRA、SAI、PCに接続された軸索を個別に刺激するRAモード、SAIモード、PCモードについて説明する。

[RAモード]

RA軸索のみ刺激するRAモードについて述べる。RA軸索が皮膚表面に垂直に伸びていることを利用する。刺激関数は軸索に沿った電位の2回微分である。したがって、図7においてx方向に伸びた軸索の刺激関数は d^2V/dx^2 であるのに対して、y方向に伸びた軸索の刺激関数は d^2V/dy^2 である。ガウスの法則により電荷の湧き出しの無い空間では、 $d^2V/dx^2 = d^2V/dy^2$ であり、すなわち、 $d^2V/dy^2 = -d^2V/dx^2$ となる。すなわち通常の陰極電流による刺激では皮膚水平方向に伸びている軸索は刺激できるが、マイスナー小体の軸索のように皮膚深さ方向に伸びている軸索は刺激できない。刺激関数が負の値をとってしまうためである。ここで陽極電流を用いる。すると電位分布が反転し、そのため刺激関数も反転する(図8)。すなわち、マイスナー小体の軸索のみ刺激され、他の水平方向に伸びた軸索は発火を押しえられる。

20

[SAIモード]

SAIの軸索のみ刺激するSAIモードについて述べる。SAIは圧覚を司ると考えられており、このモードは圧覚呈示刺激となることが期待される。ここで、RA軸索は最も浅く、皮膚垂直方向に伸びているという特徴があった。RA軸索も真皮下層部(deep dermal region)に達すると水平方向に走るようになるが、RA軸索の直径はSAIやPCの軸索の半分程度であるため刺激関数は1/4となり、刺激しにくい。したがって、水平方向に伸びたSAIとPCの軸索のみを考える。

30

図9は、単一の陰極電流によってできるSAIとPCの刺激関数である。SAIのほうが浅部に存在するためにSAIの刺激関数のほうが大きくなっている。したがって、SAIのみの刺激は比較的容易である。さらにアレイ電極を用いると、SAIの刺激関数を保ちながら、PCの刺激関数を抑制することができる。

単一の電極を陰極として使う場合に比べ、その周りの電極を陽極として加えてやると刺激関数の深さ方向の減衰が早くなるので、安定してSAIだけを刺激することができる(図10)。すなわち、ここで言う重み付け変化とは、単一の陰電極の周りに陽電極を配設して、刺激関数の深さ方向の減衰を早めることを意味している。ここで注意すべき点は、一点の提示のために3つ以上の電極を用いているという点である(過去の電気触覚ディスプレイは高々陰極とその周りの不関電極しか用いていない)。あくまで、所望の深さに所望の刺激関数を作るために使用している。

40

[PCモード]

次に、PCの刺激について説明する。これはSAI小体よりも深いところにあり、さらにSAIとPCの軸索の直径は略等しいので、PCだけを刺激することはできない。なぜなら、PCの刺激関数の最大値は常にSAIの刺激関数の最大値より小さいからである。これは以下のようにして示すことができる。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 AF}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 AF}{\partial y^2} &\propto \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \\
&= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \\
&= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \\
&= 0
\end{aligned}$$

10

ここでAFは皮膚に対して水平な軸索の刺激関数を表す。最後の等式はガウスの法則から得られる。この結果は、刺激関数が調和関数であることを表している。調和関数ではその最大値、最小値を境界線上でとり、この場合、SAIの刺激関数の最大値はPCの刺激関数の最大値より必ず大きい。

しかし、なるべくPCをSAIと同じくらいに刺激することはできる。これはSAIモードの場合とは逆で、中心陰極電極の周りのアレイにも陰極電流を流してやり、電極サイズをパーティクルに大きくしてやることによって行う。すると重なり合った刺激関数はSAIの深さでは強め合わないのにPCの深さでは（そもそも刺激関数が広がっているため）強め合う（図11

20

）。こうして刺激関数の減衰を遅くしてやり、理想的にはSAIと同等の刺激関数を与えることができる。すなわち、ここで言う重み付け変化とは、陰極電極の周りにさらに陰電極を配設して、刺激関数の深さ方向の減衰を遅くすることを意味している。

PCを発火させようとしたときSAIも発火してしまうというのは問題であるように見える。しかしながら、PCが振動覚、SAIが圧覚を担当していて、現実の場面ではPCが発火する多くの状況ではSAIも発火していることが過去の知見から判っていることに鑑みれば（少なくとも数100ヘルツの振動まで）それほど問題とはならないと考えられる。

30

尚、ルフィニ終末の軸索については垂直方向に延びているものと考えられる。またその神経軸索はマイスナー小体の軸索の倍程ある。したがって、陽極電流による刺激で、かつアレイ電極を用いて刺激関数が深部まで届くようにすれば、単独で発火させることが可能であると

と考えられる。

[システム構成]

本発明を具現するシステムの構成について図12に基づいて説明する。1チャンネル高速パルス信号（1MHz）と8チャンネル低速重み付け信号をアナログ乗算し、完全に同期させた8チャンネル刺激信号を得る。これをV-Iコンバータで電流に変換し、被験者に通電する。被験者は指を電極アレイに載せ、接地された指輪をはめる。

アレイは8本の等間隔線状電極から構成される。間隔は1mmで電極一つのサイズは0.5mmX10mmである。

安全のため以下のような制限を設ける。まず一つの電極から流れる電流は2mAに制限する。次にアレイの重み付けの和を0とし、電流が指先に限定して流れるようにする。最後に一つの電極からの電流の時間平均が0になるようにし、皮膚への電荷の蓄積を防ぐ。

40

図13は高速パルスの波形である。陰極性電極に見えるが、乗算する重み付け信号を負にとれば陽極性刺激となる。パルス幅は現在のところ200 μ sに固定している。

実際に最適なアレイの重み付けパターンを求めるには、最適化問題を解く必要がある。以下にその方法を述べる。神経がその軸索上で刺激関数が最大値をとる場所で発火することを利用する。制限は、重み付けの合計は0である（電流を指先に閉じ込めるため）ことと、電極間隔は固定であるということである。最適化問題は以下のように定式化される。

RAモードについては、式（3）が最適化問題となり、これを数値的に解くことでアレイの重み付けを得る。

$$\min_{\vec{w}} \frac{\max_{x,y}(AF_{PC}, AF_{SAI})}{\max_{x,y}(AF_{RA})} \quad (3)$$

$$\text{subject to } \sum w_i = 0$$

ただし AF_{RA} 、 AF_{SAI} 、 AF_{PC} は RA、SAI、PC の activating function、 \vec{w} は求める重みベクトルである。

10

式(3)の分子、分母はそれぞれPC、SAI、RAに対する刺激関数の、軸索に沿った最大値である。式(3)はRAの刺激関数を保存しつつ、PC、SAIの刺激関数を押えようとしている。これによってRAのみ発火する重み付けが得られる。

SAIモードに対しては、式(4)が最適化問題となり、これを数値的に解くことでアレイの重み付けを得る。

$$\min_{\vec{w}} \frac{\max_{x,y}(AF_{PC}, AF_{RA})}{\max_{x,y}(AF_{SAI})} \quad (4)$$

PCモードに対しては、式(5)が最適化問題となり、これを数値的に解くことでアレイの重み付けを得る。

20

$$\min_{\vec{w}} \frac{\max_{x,y}(AF_{RA}, AF_{SAI})}{\max_{x,y}(AF_{PC})} \quad (5)$$

すなわち、軸索の方向を選択するというのと、軸索の深さを選択するという二つの現象を、刺激関数(軸索の方向をも考慮した)によって統一的に記述できる。前述した各モードの原理からすると、それぞれの重み付けの傾向は、RAでは中心電極が陽極で刺激関数は減衰しやすい方が望ましく、SAIでは中心電極が陰極で刺激関数は減衰しやすい方が望ましく、そしてPCでは中心電極が陰極で刺激関数は減衰しにくい方が望ましい。これについて、上記最適化問題に基づいて数値計算しても同様の結果が得られる。アレイ間隔が1m 30
mでアレイが7個の場合には、RA用[0.2,0.2,0.1,-1.0,0.1,0.2,0.2]、SAI用[0.5,-0.5,-0.5,1.0,-0.5,-0.5,0.5]、PC用[-1.5,0.0,1.0,1.0,1.0,0.0,-1.5]となる。ここで、元のパルスが陰極電流であるから、重みが正のときは陰極電流、負のときは陽極電流となる。重み付けの和が0になるという制約条件のため、PC用でも端に陽極がある。SAIとRAの場合はごく浅い範囲の刺激を実現するために中心電極の周りは反対符号の電極で囲まれている。

【実験1】

[PCモードにおける感覚の移動現象]

PCモードにおいて、電流を0から徐々に上げて行った。パルスの周波数は100Hzから800Hzとした。このとき被験者は振動を感じた。被験者の振動感覚と入力パルスの周波数の間の 40
関係については現時点では詳細には調べていないが、振動感覚の生成する場所が中心電極の真下ではなく、つねに1mmから3mmほど指先方向にずれていることが分かった(図14)。このことは、電流が機械受容器そのものではなくそれに接続された軸索を刺激していることの明白な証拠となる。

【実験2】

[SAIモードにおける物体の硬さの感知]

SAIモードで安定して圧覚を感じているとき、指は電極の形で押し付けられているように感じる。電極は線であるから、この感覚はナイフエッジを押し付けられた場合に近い。このとき押し付けられる指の圧力を微小に変化させる(接触面積が変わらない程度に)。するとナイフエッジの感覚であったものが突然軟らかい弾性体の棒に変化した(図15)。被 50

験者によってはその部分が「へこんだ」と表現した。

これは次のように説明される。本来SAIは圧力に応じて発火頻度が変化する。圧力が高ければ発火頻度は増す。もし「硬い」ものをさわっていたのなら、指を押したとき圧力の増加に伴って発火頻度は増すはずである。しかしこの場合、指を押しても電流の周波数は変えていないため発火頻度は変化していない。これを脳は「押したとき反力が帰って来ない」、すなわち「軟らかい」と判断したと考えられる。尚、この現象からは次の2点が示唆される。第一に皮膚感覚も軟らかさを感じるということである。第二にある硬さを呈示するためには指圧をパルス周波数にフィードバックすることが必要となるということである。

【実験3】

10

[RAモードの振動覚]

RAモードにおいて被験者は安定して振動を感じた。パルス周波数が100Hz以下のとき、生成した感覚はスピーカのコーンを触っている場合に近かった。200Hzを超えると何とも形容しがたい感覚となった。これは次のように説明される。実験ではRA軸索を刺激していた。RAは低周波振動(20から70Hz)に反応する受容器として知られている。そしてこのレンジでは、機械振動周波数がそのまま神経の発火周波数となる。よって我々の場合、被験者は電気パルスで与えた信号と同じ周波数の振動を感じたと考えられる。しかしRAのみの200Hz以上の振動は実際にはあり得ない(200Hz以上の振動はPCの方がはるかに発火しやすくなる)ため、これを被験者は不自然と感じたと思われる。

前述したように、SAIの軸索が皮膚水平方向に伸びていると仮定した。もしSAIが垂直方向に伸びていれば、RAモードによる縦神経刺激で圧覚も感じたはずであるが、実際には常に安定して振動覚を感じた。このことからSAIが基本的に横であるという仮定は棄却されていない。強い振動覚によって圧覚がマスクされたとも考えられるが、実用上はそれで問題ないと考えられる。

20

[記号呈示デバイス]

本発明に係る触覚呈示は、記号呈示としても応用できる。具体的には、本発明を全盲者への点字呈示デバイスとして利用することが挙げられる。

記号呈示に要求される最大の要件は狭い受容野、すなわち解像度である。過去の電気刺激を用いた記号呈示の研究では、電極の存在位置と皮膚感覚の生起点がずれる。あるいはぼやけてしまうという現象が観察された。我々の研究によると、この「ぼけ」の原因は、電気刺激によって直接刺激されるのが神経軸索であるのに対して、脳によって解釈される刺激部位は軸索先端の機械受容器であるために、感覚生起点の「ずれ」が生じ、このずれの多方向の累積が感覚の「ぼけ」を生んだと考えられる(図16左図)。

30

ずれ効果を減らす第一の方法は皮膚浅部を刺激することである。浅部の軸索ほど神経末端、すなわち受容器に近いと考えられるためである。このため従来の電気刺激による記号呈示は多くが同心円電極を採用し、電流の流れる領域を限定することで解像度の向上をはかっている。しかしこれでも、ずれを完全に無くすることはできない。軸索の先端付近で最も発火しやすい部位は、先端に最も近いRanvier Nodeであることがシミュレーションからわかった。このために発火部位は最低でも先端から髄鞘一つ分(約0.5mm)ずれる。これが累積することを考えると、受容野を直径1mm以下に押さえることは原理的に不可能である。

40

ここで注意すべきことは、このずれ効果が、水平方向に走る軸索に対して最大値を取ることである。逆に垂直方向に走る軸索を刺激するのであれば、やはり軸索発火部位と機械受容器の存在位置はずれるものの、皮膚鉛直方向のずれを感知する手段が無いため実質上ずれを生じないはずである(図16右図)。

したがって、電気刺激によって記号呈示を行なうには、浅部の、縦方向に伸びた軸索を刺激すれば最も受容野を限定できると考えられる。これは、前記陽極刺激(RA Mode)に対応する。

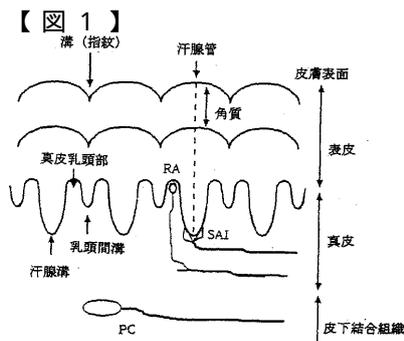
RA Modeの場合に生起する感覚が振動覚であることがわかっている。振動感覚は気付き易さと安全性を兼ね揃えており、記号呈示としての役割を考えると他の皮膚感覚に比べて有

50

利である。実際に全盲者二人に対し、陽極刺激 (RA Mode)、陰極刺激 (SAI Mode) を行なったところ、陽極刺激が「針のように」鋭い感覚を生起するのに対して陰極刺激では、「感覚が広がっていく」というコメントを得た。

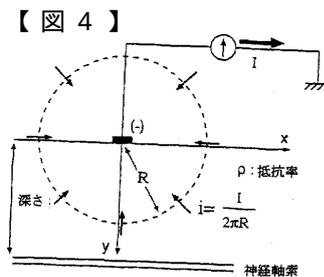
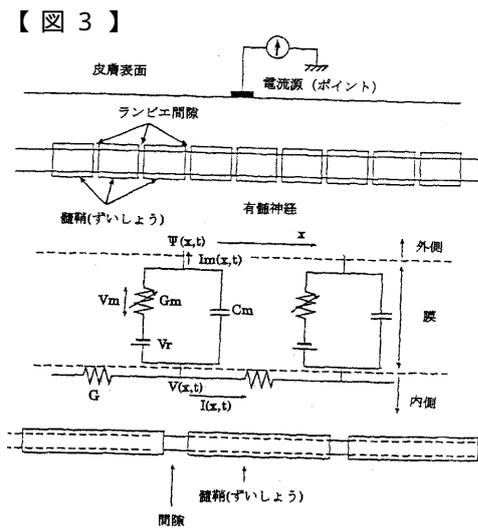
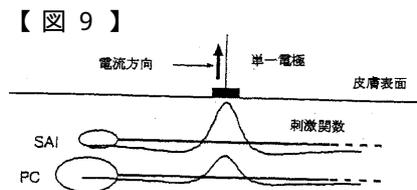
産業上の利用可能性

本発明によれば、皮膚感覚神経を選択的に刺激することにより、知覚可能なあらゆる皮膚感覚を呈示することができ、電気触覚ディスプレイとして利用することができる。また、本発明に係る刺激手法を記号呈示デバイスに応用することで、例えば、点字呈示デバイスとしての利用が可能である。

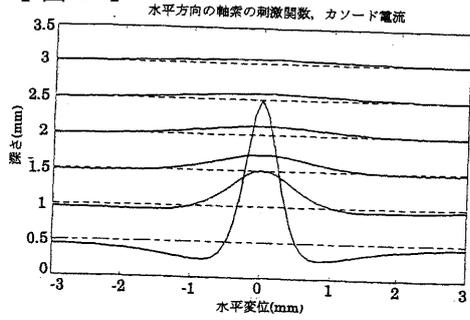


【図2】
(指先)

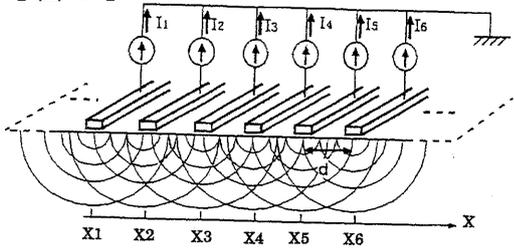
	深さ (mm)	直径 (μm)[13]
マイスナー (RA)	0.7	3~5
メルケル (SAI)	0.9	7~12
PC(パチエ)	2.0~	5~13



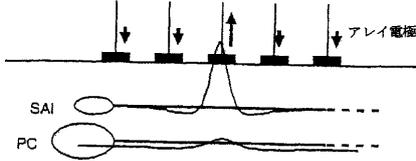
【図5】



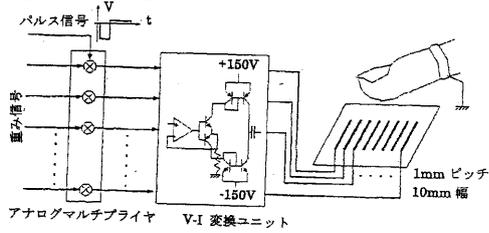
【図6】



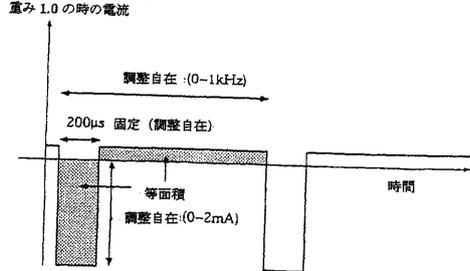
【図10】



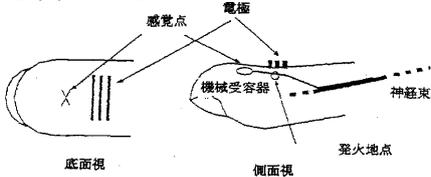
【図12】



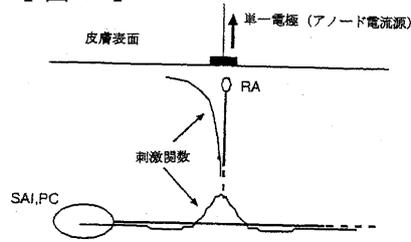
【図13】



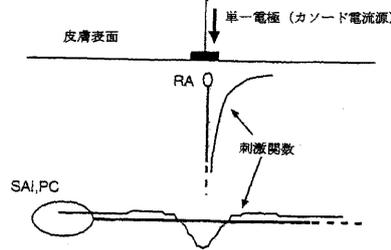
【図14】



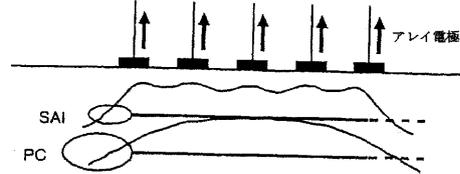
【図7】



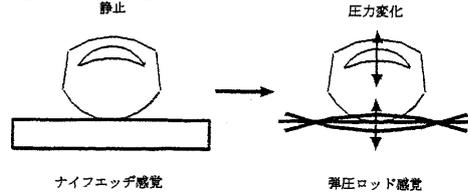
【図8】



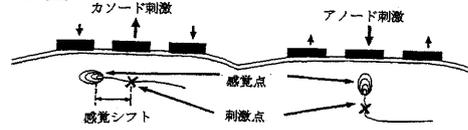
【図11】



【図15】



【図16】



フロントページの続き

(72)発明者 梶本 裕之
神奈川県横浜市戸塚区下倉田町828-362

審査官 井出 和水

(56)参考文献 国際公開第96/04574(WO, A1)
特開平8-90472(JP, A)
米国特許第4950229(US, A)
欧州特許出願公開第167471(EP, A2)
欧州特許出願公開第184332(EP, A2)
米国特許第4926879(US, A)
特開平7-20978(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)
G06F 3/00 - G06F 3/033
A61N 1/00 - A61N 1/40
A61N 1/44
B25J 3/00
B25J 13/02
G09B 21/00 - G09B 21/06
A61F 9/08
A61F 11/04
JICSTファイル(JOIS)
INSPEC(DIALOG)