

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 梶本裕之

本論文は「触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイ」と題し、6章からなる。人工現実感あるいはバーチャルリアリティの分野で視覚提示システムは広く提案され研究されているが、触覚提示の研究は相対的に立ち後れている。触覚は、固有受容感覚と皮膚感覚に大別され、前者のディスプレイについては既に製品も多く販売され新しい方式の研究も進展しつつあるのに対して、後者の皮膚感覚の触覚ディスプレイは甚だしく遅れている。その理由の一つに人間における皮膚感覚のメカニズムが明らかになっていないため、アドホックな触覚提示装置しか現在までに構成されてこなかった点が挙げられる。本論文では、生体における皮膚感覚のうち機械的な受容に限定して、日常的に生じる自然な皮膚感覚を提示する触覚ディスプレイを経皮電気刺激により実現することを目的として、その触覚情報処理メカニズムを触原色の観点から理論的に解明し、その原理に基づく触覚ディスプレイの設計法を明確にして、さらに実際にディスプレイを構成し、その有効性を示すことにより応用への道を拓いている。

第1章「序論」は緒言で、自然な触覚の生じさせるために必ずしも現実と同一の外界状態を提示する必要はなく、人間の触覚センサに同一の状態を生じさせれば良い、従って人間の触覚情報処理のメカニズムを触原色の立場で解明し、経皮電気刺激により適切な神経を選択的に刺激することにより、自然な触覚提示法が見出しうるという本研究の目的と立場と意義とを明らかにしている。

第2章は、「電気刺激による触原色生成」と題し、電気刺激による神経活動閾値の判定に使われる最も基本的な指針である Activating Function を導入した後、単一電極が作る Activating Function の形から、以下の二つの方法で神経軸索を選択刺激することを提案している。即ち、一つは、深さの違う軸索を選択的に刺激するためにアレイ電極を用い、隣り合ったアレイ電極から逆の極性をもった電流を流し電流経路を皮膚表面付近に限定することで浅い部分の軸索のみ刺激するという方法である。第二の方法は、神経軸索の向きと電流の極性に関連があることを利用する方法であり、皮膚水平に走行する神経軸索に対しては通常通り陰極性の電流で神経発火を生じさせ、皮膚垂直に走行する神経軸索に対しては、陽極性の電流で神経発火を生じさせる。具体的には二つの方法を組み合わせ、皮膚深部に存在する Pacini 小体に対してはアレイ電極を用いた深部刺激を行い、皮膚浅部に存在する Meissner 小体、Merkel 細胞に関してはアレイ電極を用いた浅部刺激を行うと共に、Meissner 小体の神経軸索が皮膚垂直方向に走行していることを利用して、陽極電流によって Meissner 小体を、陰極電流によって Merkel 細胞をそれぞれ刺激する方式を提案している。なお、Meissner 小体、Merkel 細胞、Pacini 小体の選択刺激をそれぞれ RA モード、SAI モード、PC モードと呼んでいる。次に、この問題を、刺激を実現したい軸索の Activating Function を一定に保ったまま、活動を抑えたい軸索の Activating Function を下げるといふ Activating Function 最適化問題としてとらえ、この最適化問題を線形計画問題として扱えることを示し、皮膚表面に配置した複数の電極から流す電流の重み付けパターンを求めたところ、ここで計算されたパターンは、前述の提案法と一致したとしている。

第3章は「触原色の検証」と題し、提案した選択刺激手法の検証を三つの観点から行っている。即ち、神経イオンチャンネルのダイナミクスを含んだシミュレータを用いたもの、心理実験によるもの、直接の神経

活動計測による検証である。シミュレータによる検証では、機械受容器として適当な神経軸索末端の境界条件を付与してシミュレーションし、各刺激モードにおいて選択刺激が可能であることを検証している。心理実験による検証では、RAモードにおいては空間的に局在化した振動感覚が、SAIモードにおいては純粋な圧覚が、PCモードにおいては広範囲に及ぶ振動感覚が生起することを確認している。しかし同時に電流量をうまく調整しないと純粋な原色としての感覚が得られないこと、具体的にはSAIモードにおいて圧覚のみを生成することの難しさも観察している。また振動感覚をつかさどる Meissner 小体と Pacini 小体に関して、心理物理実験により選択刺激を定量的に評価している。RAモードにおいて本来 Pacini 小体が担当すべき高周波の刺激を与えた場合、被験者は振動周波数の高低を正しく判断できない。しかし PC モードで刺激すると判断できるようになる。この結果から、少なくとも RA モードにおいて Pacini 小体が活動していないことが検証されたとしている。さらに、下腕正中神経に刺入した電極で各受容器に接続された神経に陽極刺激、陰極刺激を加えた場合の閾値を計測し、Merkel 小体、および Pacini 小体は陰極刺激の方が低い閾値を示し、逆に Meissner 小体では陽極刺激のほうが低い閾値を示すデータを得ることに成功し検証としている。

第4章は「神経選択刺激の最適設計」と題し、選択刺激が皮膚感覚提示にとどまらず、電気刺激共通の課題であることを述べ、一般的な神経選択刺激の課題を解くための手法を構築している。触覚で論議する神経は有髄神経であり、限られた有限の箇所(Ranvier Node)でしか神経発火を起こさず、皮膚表面電流源分布も電極マトリクスによる有限個の点と仮定できることから、神経活動を示すシステムは状態方程式で表せる。この状態方程式に対して時間的な離散化を行うことにより、全軸索上の場所における膜間電位差の全刺激時間分の情報を持ったベクトルが、インピーダンスのマトリクスと全電極からの全刺激時間分の電流値を持ったベクトルとの積によって得られることを示し、選択刺激問題を Activating Function による設計と同様で規模の異なる線形計画問題として定式化することに成功している。この定式化によって良く知られた条件下での選択刺激問題を解き、それらの条件下で既に知られている選択刺激手法が、提案手法で自動的に得られることを確認している。さらに従来の刺激手法が刺激電流の時間波形か空間的な荷重のいずれかを調整するに留まっていたのに対して、刺激電流の時空間分布を最適化することにより、従来知られていなかった新たな選択刺激方法を見出している。

第5章は「電気触覚ディスプレイの応用」と題し、実際の応用のための電気触覚ディスプレイを作成、評価している。その結果、作成した電気触覚ディスプレイが生起する感覚の点で充分実用に耐えるだけでなく、電気触覚ディスプレイの特長を生かした、これまでにない超薄型触覚ディスプレイとして新たな応用の可能性を持つことを示している。

第6章「結論」は結語で、本論文の結果をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、従来理論的に検討されることの少なかった経皮電気刺激による皮膚感覚のメカニズムを理論的に考察し、人間の皮膚表面に配した電極から皮膚下の受容器神経を種類別に刺激する触原色触覚提示手法を提案し検証するとともに、この選択刺激法を神経選択刺激問題とし一般化し、数理モデルに基づく刺激の設計法を構築し、その理論の有効性を実験的に明らかにするとともに設計法を明確に示して、それに基づいて実際に利用可能なディスプレイを試作することでその有効性を示して応用への道を拓いたものであってシステム情報学及び人工現実感工学に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。