

## 論文の内容の要旨

Title: Characteristics of Human Tactile Perception for the Design Guidelines of Tactile Display  
(触覚ディスプレイ設計のためのヒト触覚特性の研究)

仲谷 正史

触覚は人間の五感の中でプリミティブな外界の情報取得に優れており、視覚で情報を取得できない真っ暗な中でも人は触覚だけを信頼して行動することができる。とりわけ、手の指腹部の触覚感度は鋭く、大まかな形状のみならず局所的な凹凸や材質感まで判定することが可能である。ゆえに、手による器用な操作・把持が可能となっていると考えられる。

これまで多くの触覚研究が心理学、解剖学、神経生理学、機械工学、コンピュータ科学およびバーチャルリアリティ学など幅広い分野で行われてきている。その中でも工学的に触覚を再現する装置である「触覚ディスプレイ」の製作は、視覚による情報取得が困難な人間に対する代替手法として広く研究されてきている。しかしながら、触覚ディスプレイの製作にあたってどのような設計指針を持つべきであるかについて統一的に議論されることは少ない。その原因の一つとして、人間の触覚メカニズムに関する研究がまだまだ発展途上にあるため、どのような触覚ディスプレイを開発するべきかについての知見が十分ではないことが挙げられる。

触覚ディスプレイ作成に関わる人間の触覚特性についてよりよく知っておくことは、正確にかつ効率よく情報を伝達するために必要になると考えられる。また、視覚や聴覚と同様に、人間の主観的な触体験が必ずしも物理世界に基づくわけではなく、物理刺激の一部を利用して知覚している可能性も考えられる。ゆえに、人間にとって触覚ディスプレイを簡便に作成する手法を人間の感覚知覚特性から導き出すことも可能と考えられる。本論文は上述の視座に立って、触覚ディスプレイを製作する際に有用となる知見を得て、今後の触覚ディスプレイの開発の指針を与えることを目的とする。そのために、触覚ディスプレイの発展に重要となる形状知覚・材質知覚・凹凸知覚およびこれらの触覚刺激の空間定位に関して、それぞれの知覚を生む上で重要な刺激特性を検討した。

本論文は6章から構成される。

1章では、これまでの人間の触覚特性に関する研究を博士論文の背景として網羅的に概説し、これまでの触覚ディスプレイ開発のための知見を整理して概説する。

2章では、指先における形状知覚を、本論文が提案する新規の評価デバイス(高密度ピンマトリクス)によって検討する手法を述べる。高密度ピンマトリクスは、垂直方向にのみパッシブな運動が許されるように拘束された径の細いピン(0.3–1.8 mm)を多数本1次元もしくは2次元状に

配置することによって、ピン型の触覚ディスプレイによって生じる触覚を体感させる装置である。また、自由に空間配置が変えられるため、最小限の労力でさまざまな空間解像度を持つピン型触覚ディスプレイを実質的に体験することが可能となる。表面形状に対して、素手もしくは1.0, 1.5, 2.0 mm 間隔のピンマトリクスを利用して触れてその形状を回答させる実験を行ったところ、素手と1.0 mm 間隔のピンマトリクス使用時の正答率が同等であった。これより、本実験で行った条件においては、空間解像度が1.0 mm 程度のピン型触覚ディスプレイは素手で触れた場合と同等の形状情報を伝達する能力があることが示唆された。

3章では、指先における材質知覚に関して、対象物体の表面粗さと接触している指腹部の温度時間変化の二つを検討し、毛足の短い布の触感を再現する手法を提案した。具体的には、縦弾性を排除した場合に、絹糸・化学繊維糸（ポリエステル）によって編まれた目の細かい布の触感を金属板表面上に再現した。表面粗さの実測、および有限要素法を利用した指腹部内部の温度時間変化シミュレーションを行い、理論的に検証した。加えて、製作した金属薄板を利用した心理実験によって、確かに指腹部における材質知覚が表面粗さと指腹部内部の温度時間変化によって左右されることを行動データとして確認した。

4章では、指先における凹凸知覚に関して、新規に見出した Fishbone Tactile Illusion を利用した研究手法を提案した。Fishbone Tactile Illusion が生じるためには、滑らかで平らな面と、それをはさむ2つの粗い面によって構成される物理刺激が必要となる。人間が手の指腹部によって上述の物理的に平らな面をなぞると、主観的にはくぼんで感じられると体験されることから、錯覚と呼ぶことができると考えられる。4章では上述の錯覚現象が生じる物理条件を調べることで、凹凸知覚に関する簡便な提示方法について検討した。

5章では、腕運動時における指先に対する触覚刺激の感覚的な空間位置と、物理的に与えた空間位置の間の誤差に関して評価を行った。結果、腕が運動開始した直前直後および運動終了する直前に定位誤差が生じることを示した。さらに、短時間(20ms)提示される触覚刺激と長時間(300ms)提示される触覚刺激が生じ始める/生じ終えた場所を答えさせる場合では、定位誤差の傾向が異なることを示した。以上の結果より、触覚ディスプレイが2次元平面上に移動しかつ触覚刺激の提示時間が変化する場合に、触覚刺激の位置まで正確に伝えるためには、上述の特性に基づいて触覚刺激を提示するべきであることを示した。

6章では、前章までの結果をまとめ、触覚ディスプレイを製作する際の具体的な指針を示した。

上述のように、触覚ディスプレイの発展に重要と考えられる、形状知覚、テクスチャ知覚、凹凸知覚に触覚刺激の空間定位に関して、各々の触覚を生む上で重要な刺激特性を検討した。本論文が与える知見は、触覚ディスプレイによって意図しない誤った触覚を生じさせないための

注意を促すのみならず、人間の触知覚特性を明らかにしたという点で意義深い。本論文によって明らかになった触知覚特性と以後の同様な研究成果によって、より人間にとって正確に情報が伝達可能な触覚ディスプレイ開発につながられるだろうと考えている。