

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 仲谷 正史

本論文は「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)」と題し、6章からなる。近年、感覚代行やバーチャルリアリティの分野において、触覚をコミュニケーションのためのモダリティとして利用することが緊要となってきた。しかし、触覚の情報を人間に提示する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かに関する系統的な議論が行われることは少なかった。その原因の一つとして、どのような触覚ディスプレイを開発すべきかの立場に立った人間の触覚メカニズムに関する知見が十分でないことが挙げられる。本論文は、触覚ディスプレイ設計の立場から形状知覚と材質知覚に関する人間の触覚特性の知見を得て、コミュニケーションに利用可能な触覚ディスプレイを製作する際に有用となる開発指針の幾つかを明確にし、今後の一般的な触覚ディスプレイ設計論への道を拓いている。

第1章「Introduction(序論)」は緒言で、人間に触覚情報を、実物に直接素手で触れたと同じように提示するための触覚ディスプレイを設計するという立場に立って、そのために必要な人間の触覚特性、形状知覚と材質知覚について明らかにし、それらの知見から触覚ディスプレイ製作に有効な設計指針を導いて行くという本研究の目的と立場と意義を明らかにしている。

第2章は、「Geometric perception: analysis on spatial acuity (形状知覚:解析と空間解像度)」と題し、指先における形状知覚情報の提示について調べている。まず、手の指腹部における空間解像度について、既往の心理実験の結果と、新たに理想接触子という幅およびサンプリング間隔が無限小な理想サンプリングの概念を利用して物理刺激のもつ時間周波数と空間周波数の関係を記述した結果とから、1.0 mmの空間解像度が人間の感覚閾値であるとしている。その上で、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理想接触子を体現した高密度ピンマトリクスを作成している。この高密度ピンマトリクスを利用した形状プリミティブの形状同定実験の結果、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程度であったことから、空間解像度 1.0 mm を有するピンマトリクス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といえるとしている。

第3章は「Material perception: tactile impression of texture (材質知覚:テクスチャ感)」と題し、指腹部における材質知覚について、材質感覚を司る心理物理量のうち縦弾性を排除した際に任意の材質知覚が表面粗さと温度感覚で表現されるか、例えば、材質知覚を布とは物性の異なる材料を利用して表現しうるかどうかを調べている。具体的には、アルミ材表面に微細な表面パターン(テクスチャ)を切削することによって、布の触感に近づけることを意図している。まず、指腹部が絹や綿やポリエステル製の布試料と4種類のテクスチャをもつアルミ材に触れた場合の指腹部内部の温度受容器周辺における熱流の時間変化を、布試料やアルミ材や指腹部が持つ物性値に基づいて有限要素モデルを構築しシミュレーションを行い比較したところ、アルミ材と指の接触表面積が少ないものほど絹や綿といった布素材と類似した温度時間変化が生じたとしている。次に、絹・ポリエステルの布素材と前述の4種類の表面パターンを実際

にアルミ片に加工したものの表面粗さ(中心線平均粗さ)を実測したところ、シミュレーションで布に最も温度時間分布が類似していたアルミ片は、今回用意した絹とポリエステル布の中心線平均粗さとほぼ同程度の表面粗さであった。さらに、アルミ材上の表面パターンと絹とポリエステル素材の触感を触覚のみで主観評価する実験を行った結果、指腹部と最も接触面積が小さいアルミ材と布試料を区別できず、また、アルミ材だけでなく鉄材に同様の加工を加えても鉄材表面に絹の触感を与えることができたとしている。以上の結果は、金属などに毛足の短い布の触感を再現するためには、似せたいと思う素材の表面粗さのパターンを与え、類似した熱流変化を素材の表面に持たせればよいことを示唆している。

第4章は「Depth perception: a part of geometric perception (凹凸知覚:形状知覚の一部)」と題し、指先における凹凸知覚に関して、新規に見出した Fishbone Tactile Illusion の機序を解明している。魚の骨のような形状を指先で触ると、それが平坦であるにも拘わらず中心部の背骨にあたるところが凹んで知覚されるという錯触覚現象である。この錯触覚は、表面パターンが滑らかで平らな面と、それを挟む二つの粗い面によって構成され、指と表面パターンが相対的に動く条件下で生じること、また、中心部の滑らかな面の横幅が 3.0 mm 程度であるときこの錯触覚が最も生じやすいこと、知覚上で生じる凹知覚の深さは最大 0.2 mm 程度であることを明らかにしている。次いで、簡易化した Fishbone Tactile Illusion に対して、指腹部の持つヤング率や表皮の厚さなどの物理量を利用した 3 次元有限要素モデルを構築し、外界からの物理刺激によって引き起こされる歪分布を計算したところ、簡易化した Fishbone Tactile Illusion において生じる凹凸知覚は、指腹部内部の機械変形によって説明されうることを見出している。これらの知見から、形状知覚の一種である凹凸知覚を生じさせる場合には、少なくとも凹凸の高さ差を 0.2 mm 以上にすべきであり、垂直変位・水平変位を問わず、指腹部内部の主歪分布が凸形状・凹形状を垂直に指腹部に対して押し当てた場合と類似するように提示すべきであるといった指針を得ている。

第5章は「Tactile Stimulus in Space (空間における触覚刺激)」と題し、腕が運動している最中に指腹部に提示された触覚刺激の主観的な空間位置と、実際に与えた物理的空間位置の間の誤差を調べている。ボイスコイル型振動モータを触覚提示装置として利用し、腕運動中の触覚刺激の定位性能を計測した結果、腕が運動開始した直前と直後および運動終了する直前の知覚における刺激提示位置と、実際の刺激提示位置との間に一定量の誤差が生じること、また短時間(20ms)提示される刺激と長時間(300ms)提示される刺激では定位誤差の傾向が異なることを示している。これらのことから、腕運動中に触覚刺激を時空間提示するには、腕の運動の開始と終了および刺激の開始と終了を考慮して触覚刺激の提示タイミングを決めるべきであり、また、運動開始と終了 100ms 前後において位置誤差が多いことから、触覚ディスプレイの持つべき応答速度は、少なくとも 100 ms 以下にすべきであるとしている。

第6章「Generalizations and Future Works (一般化と今後の課題)」は結論で、本論文の結論をまとめ、今後を展望している。

以上これを要するに、本論文では、実物に直接素手で触れたと同じように触覚情報を提示するための触覚ディスプレイを設計するという立場に立って人間の触覚特性を解明するとともに、それにより触覚ディスプレイの設計指針を積み上げていくという方法論を示して、今後の一般的な触覚ディスプレイ設計論への道を拓いたものであって、システム情報学、特に計測工学及びバーチャルリアリティ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。