

論文の内容の要旨

論文題目 **Transmission of Spatially Distributed Haptic Information**
(分布触力覚情報伝達の研究)

氏名 佐藤 克成

ヒトがモノに触れた時に感じる感覚、触力覚 (Haptic sense) は、視覚や聴覚と同様にヒトが外界を知覚し適切に行動するうえで重要な役割を果たす。特に触力覚は、触れたモノの特性や接触状態の認識に関わり、モノの適切な把持・操作を可能とし、さらにモノの存在を確認させる働きを持つ。本論文は、この触力覚情報の伝達技術の構築を目的とした。近年、3D テレビ放送や 5.1ch サラウンド放送など、視覚や聴覚情報の伝達技術は既に実用の閾に達しているが、これに触力覚情報の伝達技術が組み合わさることで、遠隔地のヒトやモノをあたかも自分の手で直接触れたように感じる事が可能になる。そのため触力覚情報の伝達技術は、遠隔手術などの作業支援やテレビ電話を超えるコミュニケーションツールとしての応用が期待されている。触力覚情報の伝達にはヒトの触知覚特性に基づき設計されたセンサとディスプレイが必要であり、ヒトの触知覚特性の解明やデバイスの開発が盛んに行われている。

ヒトの触力覚の知覚メカニズムとしては、力覚と触覚、温度覚という異なる感覚を統合的に解釈している、ということが知られている。力覚は、皮膚内部の機械受容器により知覚される、手指の位置や運動、力の感覚である。触覚は、皮膚表面の機械受容器により知覚される、振動や圧の感覚である。そして温度覚は、皮膚表面の温度受容器により知覚される温や冷の感覚である。このヒトの統合的な触知覚メカニズムに基づけば、触力覚情報伝達は、力覚と触覚、温度覚を同時に伝達することで実現される。従来の触力覚情報伝達システムは、主に能動的な触動作による物体知覚を前提とし、力覚や触覚（振動）情報の同時伝達が実現されている。そのため従来の伝達システムでは、遠隔地の物体に触れた際に、物体表面を押し・なぞるといった動的な触動作によって硬さやテクスチャといった物体の触感を認識できる。その一方で、物体に触れた瞬間にその物体の触感を知覚することは困難である。ヒトは物体と接触したとき常に触知覚を行っていることから、物体と接触直後の触知覚が不完全であることは、伝達される触力覚情報のリアリティを大きく低下させると考える。接触直後の触知覚に関する従来研究では、物体の粗さや硬さ、形状、温度といった触感を、主に分布触覚と温度覚情報として知覚することが示唆されている。

本論文では以上の背景から、接触直後の触知覚が可能な触力覚情報伝達システムを実現するた

めに、分布触覚と温度覚情報の同時伝達技術の構築に取り組んだ。

触力覚情報伝達システムを構築するにあたり、まずその設計要件をまとめた。知覚可能な物体の触感としては、従来研究から物体の粗さや硬さ、形状、温度の4種類が挙げられる。この場合、分布触覚情報として力分布を、温度覚情報としては温度変化を同時に伝達することが求められる。また、将来的に能動的な触動作が可能なシステムへと拡張するためには、コンパクトなデバイスとしての実装することが望まれる。これらの要件を満たすために、光学式の力・温度計測技術を用いたセンサと経皮電気刺激を用いたディスプレイを提案した。光学式の力分布計測は、透明弾性体内部に配置したマーカの移動量をカメラと画像処理により計測し、マーカの移動量から弾性体表面に加わる力分布を算出する技術である。また、光学式の温度計測は、示温塗料の温度変化に伴う色相変化をカメラと画像処理により計測し、弾性体表面の温度を算出する技術である。これらの光学式計測技術を組み合わせることで、力分布と温度を同時計測可能なヒト指型のセンサを実現する。一方、経皮電気刺激は、皮膚表面に配置した電極マトリクスから皮膚内部に電流を流し触覚受容器に繋がる神経を直接発火させることで、力分布をバーチャルに再現できる。触覚提示部が電極のみで構成されるため、小型で軽量、柔軟な実装が可能である。この特徴を生かし、電極板をペルチェ素子と組み合わせることで、力分布と温度の同時提示が可能なディスプレイを実現する。

まず、光学式計測技術を用いた指型センサの実装と性能評価に取り組んだ。物体の形状を力分布として計測するために、光学式の力分布計測技術に実測ベースのキャリブレーション手法を導入することで、従来の平面型センサと同等の計測精度を持つ指型センサを実装した。また、ヒト指と物体との相互作用性を再現した正確な力分布計測を実現するために、センサの弾性体素材と構成を再検討し、ヒト指と同等の柔軟性を持つセンサを構築した。構築したセンサを評価した結果、計測点間隔の精度で平面とエッジの差を計測可能であることを示した。さらに、示温塗料を用いた温度計測技術を用いた指型センサのプロトタイプを実装し、金属と木材の差を温度変化として計測可能であることを確認した。

次に、経皮電気刺激を用いたディスプレイの有効性評価と信号設計に取り組んだ。経皮電気刺激を用いた触覚の空間分布情報提示は、力分布を正確に再現するものではない。そこでまず、経皮電気刺激を用いた力分布提示の空間分解能を評価し、エッジを電極ピン間隔の精度で提示可能であることを示した。さらに、力覚と統合提示した場合の形状認識実験により、力分布提示により平面と曲面、エッジの差を判別可能であることを示した。また、従来の経皮電気刺激による2次元的な力分布提示から3次元的な力分布提示への拡張を目指し、電気刺激の信号設計に取り組んだ。皮膚変形が生じた際の受容器の時間的、空間的な応答を有限要素法により推定し、推定された受容器応答を基に電気刺激信号を設計することで、少なくとも3方向の力の向きを提示可能であることを示した。

最後に、光学式計測技術を用いた指型センサと経皮電気刺激を用いたディスプレイによる、分布触力覚情報伝達システムの構築に取り組んだ。まず、力分布情報のみを扱う1本指用の伝達システムを実装し、システムの空間分解能を検証した。その結果、力分布の伝達によりエッジの特徴を知覚可能であることを確認した。さらに、接触直後に平面とエッジ、金属と木材の差を判別可能な分布触覚と温度覚の同時伝達システムを実装した。また、本論文で提案する伝達システムは、多指システムへの拡張性を考慮した設計となっている。そこで多指システムへの応用例として、力分布情報を伝達可能なロボットハンドのマスタースレーブシステムを実装した。今後はこのシステムを発展させていくことで、能動的・受動的両方の触動作により物体の触感を知覚可能な触力覚情報の伝達システムが実現できると考える。

以上のように本論文では、接触直後の物体の触感を知覚可能な分布触覚と温度覚の同時伝達システムの構築を目指した。まず、ヒト指と同等の形状・大きさ・柔軟性を持つ光学式計測技術を用いた指型センサを実装し、接触した物体の形状と温度を計測できることを検証した。次に、経皮電気刺激を用いたディスプレイとして、力分布をバーチャルに再現した場合に使用者は物体の形状を知覚可能であることを検証した。さらに、接触直後の物体形状と温度の触知覚が可能な分布触覚と温度覚の同時伝達システムを構築した。今後はセンサとディスプレイの要素技術をさらに発展させ、多指ロボットハンドを用いた伝達システムとして再構成することで、より触知覚のリアリティが高い触力覚情報の、さらには五感情報の伝達システムが実現されると期待する。