

審査の結果の要旨

氏 名 松林 篤

本論文は、空中超音波を用いて指先皮膚上に所望の圧力分布をリアルタイム生成する手法を提案し、その効果を検証したものである。人間の指先が物体に触れる際、指先の圧力分布は物体との相対位置に応じて時々刻々変化する。その時空間的なパターンが接触の状況や表面形状の知覚を可能にし、それらを複合した把持感覚を形成するが、空中触覚提示において指先内の局所的圧力分布を制御し、その効果を検証する研究はこれまで行われていなかった。本論文では、リアルタイムで圧力分布を生成する計算手法を提案・検証するとともに、指先表面の位置姿勢と形状を計測しながら圧力分布を制御可能な実験システムを構築した。これらの触覚提示と3次元映像の提示を同時に行うことで、3次元VR物体を把持操作できることを実証し、触覚だけでも操作が可能であることを示した。論文は以下の5つの章から構成されている。

第1章では本研究の背景と問題設定について述べられている。これまでに提案されている触覚提示手法の問題点と、その解決を目指す本手法の応用例及びそれに応じた方針について説明している。特に、応用例として作業シミュレーションやテレグジスタンスのように現実世界を再構成する用途と、空中インタフェースにおける触覚フィードバックとしての利用を挙げ、それぞれの場面で触覚に求められる要件を説明している。本論文では続く第2、3章でこれらの応用目的に応じた2種の超音波触覚提示手法を提案している。

第2章では、手掌部表面での音場の散乱を考慮した音圧分布制御手法について述べている。まず、デプスカメラの計測データから生成された手のメッシュモデル上の音圧と、超音波振動子の複素振幅の関係を境界要素法の様式で定式化する。そこから表面音圧に関する最小二乗問題を解くことで、所望の圧力分布を生成する超音波振動子位相をリアルタイムで決定する。この手法の有効性を検証するために境界要素法による数値シミュレーションを行い、散乱を考慮しない音圧制御手法と比較して正確な圧力分布が生成可能であること、及び本手法により様々な形状の圧力分布が再現可能であることを実証している。また、アルゴリズム処理に要する時間を計測することで、この手法のリアルタイム性を評価している。最終的に被験者実験を実施し、複数の表面形状が識別可能であることを実証している。

第3章では、物体の輪郭形状を強調した触覚提示手法を提案している。この手法は、

指が物体に触れた際にその交差領域の形状を周回するように超音波焦点を高速で動かすことで、その物体の局所的な形状及び面の相対位置を表現するものである。デプスカメラから得られた点群をもとに、交差領域周囲に均等な滞在時間で焦点を通過させるアルゴリズムについて述べられている。境界要素法を用いた数値シミュレーションを行い、触れている物体の局所的な形状を反映した圧力分布が指先表面に形成されることを示している。また、指がVR平面に触れている場合に、その指の接触深さに応じて分布領域が広がる制御が可能であることを示している。

本章では、さらに上記手法を用いて仮想物体の把持操作が可能なシステムを検証している。物体の物理的応答をシミュレートしながら3次元ディスプレイによる視覚提示と触覚提示を同時に行うことで、ユーザーは3次元映像を実物体のように操作することができる。試作システムを使用して被験者実験を行い、提示された触覚像から物体の表面位置、角度が認識できること、触覚情報のみが与えられた場合でもVR物体の把持操作が可能であることを実証している。これらは空中触覚フィードバックによる3次元VR物体の操作について検証した初めての例である。

第4章では、第2章、3章で述べられている被験者実験に使用したハードウェア及び実装したアルゴリズムについて具体的に説明している。

第5章では、第2、3章で述べられた2種の提案手法の比較を交えながら、本論文の結論および今後の展望について述べられている。

以上要するに、本論文は超音波振動子アレイを用いて指先皮膚上に圧力分布をリアルタイム生成することで、触れている物体の位置や形状、把持状態を、触覚を通じて伝達する手法を提案するものである。

本論文の成果は、超音波触覚提示の表現力を高めてその応用範囲を拡大するとともに、人間の触覚を解明する新たなツールを提供するものであり、ハプティクス、VR、インタフェースなどの分野に貢献している。

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。