

論文内容の要旨

論文題目 空中超音波制御による手指表面への触覚レンダリング

氏名 松林 篤

昨今の視覚及び聴覚ディスプレイの発展と共に、現実世界を拡張または再構築する技術が一般的なものとなってきている。触覚もまた人間の知覚を構成する重要な要素であり、その再現技術は視聴覚と比べると未だ発展途上ではあるものの、現実感に寄与することは明らかである。特に、人体に何も接触させずに触覚を提示する技術は、不要な装着感や移動の制限を与えずに触覚再現を実現するものとして近年注目を集めている。多様な空中触覚提示技術が提案されているが、中でも超音波を使用したものは空間的、時間的な解像度が高く、空中に触れることのできる仮想的な物体を表現し得る。これまでに、超音波焦点生成や空中音圧分布制御による触覚像提示手法が提案されているが、これらは提示可能な触覚の多様性の低さ及び強度変化の乏しさという点で課題が存在する。

本論では、これらの問題を解決する新たな超音波触覚提示手法について述べる。この手法では、超音波振動子アレイを用いて指先皮膚上に所望の圧力分布をリアルタイムに生成する。人間が物体に触れる際には指先を用いるのが一般的であり、指先に生じる圧力を制御することは物体接触感を再現する上で本質的であるといえるが、そのような局所的圧力分布制御の例は今まで報告されていない。指先の物体への接触を検知し、その接触状況に応じた触覚情報を提示することで、物体の位置や形状、柔らかさ等の特性を伝達することを目的とする。

指先圧力分布提示を通じて空間中に仮想物体を表現する技術は、様々な分野に応用される可能性を持つが、その応用先に応じて提示手法に必要とされる性質が異なると考えられる。医療手術シミュレーションのような場面では、柔らかい物体の触感を忠実に再現することが求められる。一方で3Dインターフェースでの触覚フィードバックとして利用する場合には、ボタンやつまみのような硬い物体を、提示可能な圧力に制限のある超音波触覚を用いて忠実に再現することは困難である。このような場合には、接触した物体の位置及び形状を強く表現する別の触覚提示手法が必要となると考えられる。本論ではこれらの応用先に応じて、2種の超音波触覚提示手法を提案する。

第1の手法では、物理的に正確な分布再現を目指し手表面での音場の散乱を考慮したうえで、指先に生じる音圧分布を制御する。この手法では、デプスカメラで計測された手の形状に応じてリアルタイムに生成されたポリゴンメッシュモデルを用いる。そ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は、境界要素法の様式で定式化される。その関係式に基づいて、表面音圧に関する最小二乗問題をLevenberg-Marquardt法を用いてリアルタイムに解くことで、所望の分布を生成する超音波振動子位相を決定する。この手法は手表面上での音場の散乱を考慮した上で所望の圧力分布を皮膚表面上にリアルタイムに生成する初の試みである。

本手法の有効性を検証するために境界要素法を用いた数値シミュレーションを行った。シミュレーション結果は、本手法により様々な形状の圧力分布を指先に生じさせることができ、また、手表面での散乱を考慮することでより正確な分布を生成可能であることを示している。また、手全体のメッシュモデルを使用することで、触覚を提示する領域以外の部分に発生する音圧を軽減可能であることが明らかとなった。

本手法により、実際に識別可能な程の圧力分布の差をつくりだすことが可能かを検証するために、被験者実験を実施した。この実験では、被験者は3種類の幅を持つ一様圧力分布に対しそれを識別するタスクを行う。実験結果は、散乱を考慮することで識別精度が上がることを示し、これにより本手法により実際に正確な圧力分布が生成されることが示唆される。現状では幅の知覚に関してのみ実験を行っているが、本手法は様々な分布を生成可能である。例えば、指先に生じる圧力分布の勾配を変化させることで、物体の柔らかさを表現することができると考えられ、そのような場合における知覚の変化を検証することが今後の課題の一つである。

第2の手法では、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。焦点位置は時間に応じて離散的に更新され、いくつか設定された通過点を順次周回する。その周回経路に沿った時間平均圧力分布が知覚されると考えられる。本手法では、デプスカメラから得られる点群から物体表面付近のものを取り出したものが交差領域を形成しているとみなし、その中に等しく分布するように焦点周回点を設定する。表面点群を最小二乗平面に射影した後に、それらを角度に基づいて分割し、各分割領域の重心を求めることにより、通過点が決定される。物体と指の接触状況に応じて、通過経路が変わりそれに伴った圧力分布が知覚されることで、局所的な物体形状が認識できると考えられる。境界要素法を用いた数値シミュレーションの結果は、触れている物体の局所的な形状に応じて、その交差領域に沿った分布が形成されることを示している。また、指が平面に触れている場合にも、その指の接触領域に応じた分布が生成されることが示されている。押し込みに応じた指先の圧力分布の広がりには、実際の物体に触れている際にも生じる現象であり、これにより物体の現実感が高まることが予想される。

更にこの手法を用いた、仮想物体の直接操作が可能なシステムを提案する。このシステムは、指の接触時に触覚フィードバックを提示すると同時に、物体の物理的応答をシミュレートし3Dディスプレイに反映させることで、ユーザーが実際の物体に触れるかのように3D映像を操作することを可能にする。現在までに、このような3D映像と超音波触覚を伴うインタラクションを行えるシステムは提案されていない。そのため、いくつかの被験者実験を行い、そのようなシステムにおける触覚フィードバックの有効性を、最もシンプルな触覚提示方法である単焦点法と、提案手法である周回焦点法の両方で検証した。1つ目の実験では、被験者は4種の形状を持つ仮想物体上部1.5cmに触れその形状を識別するタスクを行う。実験結果は、単焦点法でもある程度の局所的な形状知覚が可能であるが、周回焦点法はより高い精度で認識可能であることを示している。2つ目の実験では、被験者は面に触れた際の意その角度及び位置を正しく認識できるかの検証を行った。実験結果は、面の位置認識に関しては2手法での精度に差はないが、角度認識については周回焦点法がより精度が高められることを示している。これらの形状や角度に関する認識精度向上が、実際に物体操作に影響するかを検証するために更なる実験を行った。この実験では、被験者は仮想的な立方体を持ち上げるタスクを繰り返し行い、それに要する時間でその操作性を評価する。3Dディスプレイ上に映される立方体を持ち上げる場合には、触覚フィードバックの影響は小さく、視覚情報のみで十分な精度で操作が可能であることが実験により示された。一方で、立方体前面に壁を配置している状態で、触覚のみで持ち上げるタスクを行った場合には、周回焦点法のタスク実行時間が有意に短く、システムの操作性が高められていることが示された。また、被験者の主観的なシステムの操作性及び物体の現実感もまた、周回焦点法により高められることがアンケートにより明らかとなった。

上記の2種の触覚提示手法は完全に独立するものではない。散乱を考慮した分布再現法は振動子複素振幅と指先に生じる圧力の関係が与えられる一方で、超音波焦点の高速周回による手法は、知覚強度の高い触覚刺激を提示できるという利点を持つ。それらを組み合わせ、指先に生じる時間平均圧力分布を再現できるような焦点の移動経路を求めることで、両者の利点を併せ持つ手法が構成され得る。そのような手法の提案や、それを利用したインタラクションシステムの構築が今後の展開と一つとなるだろう。