

## 審査の結果の要旨

氏名 中島 允

本博士論文は空中超音波フェーズドアレイを利用し、遠隔から非接触で冷覚を提示する手法について論じたものである。論文は主に3つの成果からなる。1つめは超音波により生じる音響流を用いて、冷気を手掌に輸送することで遠隔的に冷覚を提示する手法について、2つめは微小な水滴（ミスト）を皮膚表面で急速に気化させることによる気化熱により冷覚を提示する手法について、3つめはそのような冷覚提示と空中映像技術を組み合わせる方法として、冷覚提示用のミストを映像投射用のスクリーンとしても活用する手法についてであり、それぞれ評価を行っている。

触覚研究の分野において、温度感覚の提示は対象物体の材質感を表現するために重要な要素であり、これまでに多くの研究がなされている。一般的に触覚は対象と接触した時に生じる感覚であるため、遠隔から非接触で触刺激を提示するというのは特殊なケースであるが、近年 *mid-air haptics* として注目を集めている研究領域である。この非接触の触覚提示における温覚提示については、赤外線レーザーを利用するなど遠隔からの刺激方法がいくつか提案されているが、遠隔から冷感を提示する方法についてはほとんど議論がなされていなかった。本研究はそこにアプローチしたものであり、実際に人が金属に触れた時に生じる温度変化と同程度の時間特性で温度低下を提示可能にする新しい手法を提案するものである。本研究は空中触覚提示の分野に冷覚という新しいモダリティを追加可能にする手法を示したという点で、その貢献は大きい。

1章から4章までに本研究の位置づけと、人の温度知覚に対する基礎特性といった基本的な情報を記載し、以降の章にて実際の提案手法の説明と評価を行っている。第5,6章の音響流を利用した方法では、超音波フェーズドアレイによりベッセルビームと呼ばれるビーム状の場を生成し、その際に副次的に生じる音響流により、冷却された気体や液滴を輸送することで冷却を行う手法を示した。ドライアイスから発生する冷気を輸送したり、あるいは微小なミストを浮遊させそれを輸送し手掌を冷却したり、ということが可能となることを示した。

第7章では気化を用いた遠隔からの冷覚提示について論じた。本手法はミストを利用するという点においては前章と同じであるが、それを輸送して冷やすのではなく、手掌の周囲に充満させ、超音波を照射して気化を促進させることで、急速な冷却を行う手法である。ミストの密度や更新の程度によって、冷却効果がどう変化するかなど、実際に人の皮膚上で基礎的な特性を検証し、提案手法の時空間的な冷却性能の高さを立証している。本手法の高い時空間分解能で冷覚を提示できるという特長は、バーチャルリアリティなどでの応用のほか、人の知覚特性を解明するための基礎ツールとしての利用も期待できる手法である。

第8章では、前章で提案した気化促進による冷却手法の基礎冷却特性を検討するために、皮膚以外の熱特性が既知の物体における温度低下の推移を計測し、その冷却能力を定量的に評価した。具体的には、熱容量と熱伝導度が既知の皮膚表面より温度が低い材料を冷却したときの熱

流束を見積もった。この熱流束を温冷感の指標として比較し、今回のシステムにより 10 秒間冷却した時の温度低下は、25℃の鉄に 10 秒間触れたときのものと同程度の温度変化を示すことを確認した。すなわち、何もない空中で、そのような金属に触れたときのような温度変化を体験可能にする手法であることが示された。

第 9 章では、冷却材として用いたミストをフォグスクリーンとして活用し、冷覚提示と空中映像技術を組み合わせる冷覚フィードバックを有するインタラクティブなフォグディスプレイを提案した。これは、ミストでできたスクリーンに映像を投影し、映像に触れたときの位置情報をセンシングし、その位置に集束超音波を照射するという方法である。結果的に、視認できる程度の投影映像が得られる状況下で、皮膚表面温度を低下させられることが確認された。指先における知覚特性の定量評価など、心理物理実験的な課題は残るが、冷覚を伴う新しいインタフェースを提案できた。

第 10 章では、本論文の結論が述べられている。

以上まとめると、本論文は超音波フェーズドアレイとミストを組み合わせることで、空中で高い時空間解像度をもつ冷覚刺激を提示可能であると実証したものである。非接触でありながら、金属に触れたときと同程度の温度変化を提示できる手法であり、既存の空中触覚提示手法等と組み合わせることで、多様な触感再現が可能になると期待される。本論文の成果は、バーチャルリアリティ、ヒューマンインターフェース、ロボティクス、等の工学的な応用の他に、人の触覚特性を解明するための新しいツールとしての利用の期待でき、幅広い分野に貢献する。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 2001 字