

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19841

研究課題名（和文）衣服への空中超音波照射による非接触全身触覚提示システム

研究課題名（英文）Noncontact tactile presentation system for whole body by irradiating airborne ultrasound for clothing

研究代表者

神垣 貴晶（Kamigaki, Takaaki）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任助教

研究者番号：70866368

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：空中超音波を用いた触覚提示は、ユーザが何も身につけることなく触覚を体験できるが、生成できる物理的な力の上限から皮膚の露出部に対する触覚提示に留まっていた。また、これまでの空中超音波触覚では、振動覚などの機械的刺激での提示に重きが置かれていた。本研究では、衣服そのものをパッシブなアクチュエータとして活用することで、空中超音波を用いて全身へ触覚を提示する手法を提案した。提示する触覚は、振動覚だけでなく、温覚も提示できる。また衣服だけでなく、指輪型のパッシブなデバイスも実現した。さらに、二次元音場のリアルタイム計測法も確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、日常的にヒトが身につけるモノをパッシブなアクチュエータとして活用し、非接触に全身へ触覚を提示できる点において学術的意義がある。また、これまでの空中超音波を用いた触覚提示では、皮膚の露出部に対しどのような音場を設ければいいかに主眼が置かれ研究が行われていた。一方、本研究ではヒトの身に付けているモノにどのような音場を設ければいいかに主眼を置いている点で学術的意義がある。さらに、二次元音場のリアルタイム計測法は、ハプティクス分野での活用はもちろん、音響分野での活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Tactile presentation using airborne ultrasound, which enables users to experience tactile sensations without wearing any devices, has been limited to tactile presentation over exposed skin due to the upper limit of the physical force. In addition, the presentation sensation using this method has focused on mechanical stimuli such as vibrotactile sensation. In this study, we proposed a method of presenting tactile sensations to the whole body using airborne ultrasound by utilizing the clothing itself as a passive actuator. The presented tactile sensations include vibrotactile sensations as well as heat and cooling sensations. We have also realized a passive device of ring type in addition to clothing type. Furthermore, we established a real-time measurement method of a two-dimensional sound field.

研究分野：音響工学

キーワード：空中超音波 ハプティクス 音場計測 ヒューマンコンピュータインタラクション 振動覚 温覚

1. 研究開始当初の背景

非接触に触覚を提示する手法の一つに、空中超音波フェーズドアレイを用いた手法(空中超音波触覚)がある[1, 2]. この手法は、刺激位置や提示する力の空間分布を任意に変化させることができる. またユーザに一切の準備を必要とせず触覚を提示できるため、配線による動作の制限や装着の煩雑さといった接触,あるいは、装着を必要とする触覚提示手法での問題を解決できる.

ただし、典型的な空中超音波フェーズドアレイ 1 台 (20 cm 角程度の大きさ) で提示できる物理的な力は小さく、1 cm 角程度の大きさに最大で約 16 mN しか生成できない [2]. このパワーだと触覚の鈍感な部位や衣服越しでの触覚提示は難しく、衣服越しでの提示はデバイスの台数を増やしても困難であった[3]. また、これまでの空中超音波触覚では、振動覚などの機械的刺激での提示に重きが置かれていた.

空中超音波触覚を用いて全身へ振動覚が提示できれば、上述の利点を生かした様々な応用、例えば、公共空間における不特定多数の人に対するの歩行誘導ができる. また振動覚だけでなく、温覚も提示できれば、遠隔コミュニケーションにおける全身での触れ合いや仮想空間のキャラクターとの触れ合いなどで、温もりを伴う身体コミュニケーションが期待できる.

2. 研究の目的

本研究課題での目的は、空中超音波触覚での提示部位を広げて全身へ振動覚や温覚を提示する基礎技術の確立である.

3. 研究の方法

日常的に着用する衣服を音響パワーの変換器およびインピーダンス整合器として用いることで、特殊なデバイスを装着することなく、全身へ振動覚や温覚を提示する手法を提案する (図 1).

本研究期間では、上記触覚の提示対象部位を手から前腕部までに限定して、以下のように研究を進めた.

- (1) まずは感度の高い手に対して、振動覚と温覚を提示できる手法を確立する.
- (2) (1)の結果を元に、前腕部での提示方法を検討する.

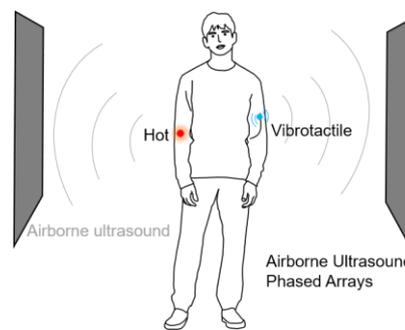


図 1: 研究目標のコンセプト図.

4. 研究成果

研究の方法に従い、以下に、主に得られた成果を示す.

(1) 手に対する振動覚・温覚(温かさ、涼しさ)の提示手法の確立 (図 2)

空中超音波フェーズドアレイにより集束させ生成した超音波焦点をユーザが着用したグローブに照射することで振動覚と温覚を提示する手法を確立した (図 3, 左). グローブは吸音特性を持つメッシュ状のものであればよく、本研究では一般的な軍手を用いた. 温覚と振動覚の切り替えは、超音波焦点での振幅変調の有無により実現される.

また研究計画当初、温覚は温かさのみを想定していたが、超音波焦点から生じる音響流を活用 (図 3, 右) することで、涼しさも提示できることを確認した.

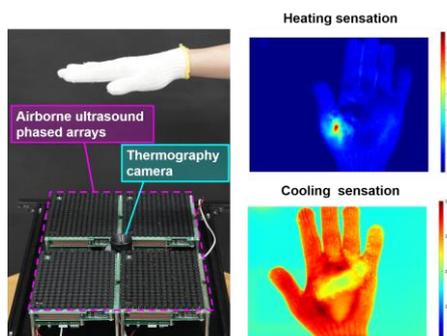


図 2: 実際に製作したシステムの外観図. 示, (右上) 温覚を提示した際の軍手表面の熱画像, (右下) 涼しさを提示した際の軍手表面の熱画像.

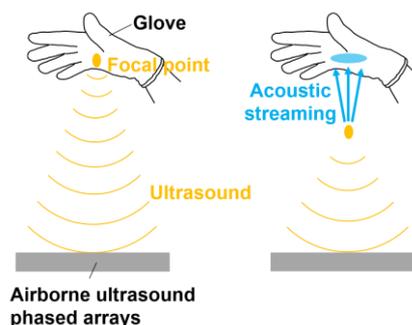


図 3: グローブに対する超音波の照射パターン. (左) 振動覚と温覚を提示, (右) 涼しさの提示.

(2) 前腕部に対する振動覚・温覚の基礎的検討

手に対してメッシュ素材の布越しに振動覚を提示することはできたが、前腕部に対しては困難であった。そこで、図4に示すように、皮膚と密着しないよう規則的な膨らみパターンを施した布に超音波焦点を照射し、布を揺らすことで振動覚を提示する手法を検討した。図5に示すようなシステムを製作し、5人の被験者で実験を行ったところ、超音波を照射したときのみ、100%の割合で振動覚を提示できることが分かった。

温覚については、図4の布と皮膚の接触部に超音波焦点を照射することを想定して、この手法に適した素材を調べた。人肌と等価な物理特性を備えた構造体を製作し、この上に異なる種類の素材を配置して、超音波照射時における素材表面と構造体内部のヒトの温度受容器と等価な位置での温度変化を測定することで、素材の選定を行った。

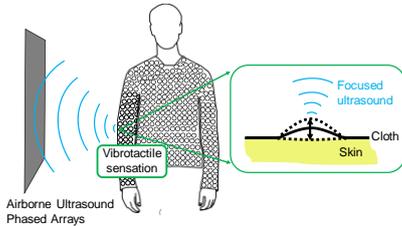


図4: 空中超音波触覚を用いた全身への触覚提示システムのコンセプト図。

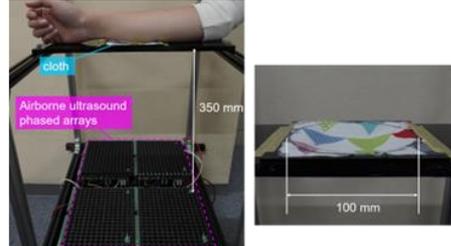


図5: (左) 製作したシステムの外観図, (右) 振動提示部となるポリエステル布. この布に超音波(20 Hzの矩形波)焦点を照射した場合と照射なしの場合との2パターンを10回ずつ、計20回ランダムに提示した. 各試行での提示時間は、5秒間とした。

また、研究開始当初に想定していなかった以下の研究も行った。

(3) 力を増幅する指輪型デバイスの検討

衣服以外にヒトが日常的に身につけるモノ自体を活用して、空中超音波触覚での物理的な提示力を高めることができないかと考えた。

そこで、図6に示すような圧力を増幅する指輪型のパッシブデバイスを製作し、被験者実験によりその有効性について検討した。

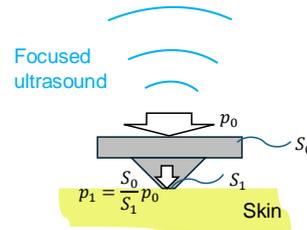


図6: 圧力を増幅する指輪型デバイスのコンセプト図. 皮膚との接触部の面積 S_1 を超音波焦点の放射圧 p_0 を受ける面積 S_0 に比べて小さくすることで、提示圧力 p_1 を高めることができる。

(4) 二次元音場のリアルタイム計測手法の確立

(1)の研究を進めている中で、超音波の照射された物体表面の温度分布をサーモカメラでリアルタイムに測定していた。従来の音場の計測は、マイクロホンの走査やシュリーレン法などリアルタイムでの計測が困難であり、この問題を解決する新たな計測手法としてサーモカメラによる温度分布測定法を確立できないかと考えた。

測定対象の音場にナイロンメッシュを配置し、この表面をサーモグラフィカメラで計測するシステム(図7)を製作して研究を進め、以下の結果が得られた。

- 二次元音圧分布を0.5秒で可視化できることを実験的に確認した。
- 構築した理論をもとに推定した音圧が、マイクロホンで測定した音圧とほぼ同じであり、定量的な測定が可能であることを確認した。
- 定在波の音圧の反節点における温度上昇の観察から、この現象が超音波で加熱された周囲の空気からメッシュへの熱伝導によるものであることを確認した。
- 上記現象の発見から、超音波をほぼ完全に反射する手の表面における空中超音波場のパターンが観察できることが示唆された(図8上)。
- 焦点位置が指先の場合、波長よりも細かい分解能で特定することが可能であることを確認した(図8下)。

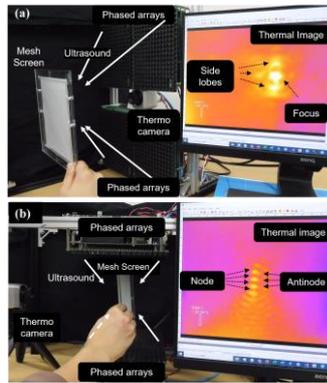


図 7: 製作した計測システムの外観図.
4 台の空中超音波フェーズドアレイで
(上)単一の焦点を形成した場合, (下)
定在波を形成した場合.

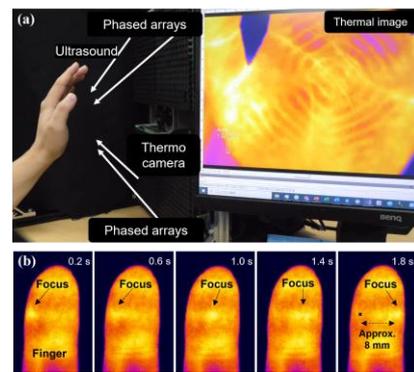


図 7: 4 台の空中超音波フェーズドア
レイから(上)手に単一の焦点を形成した
場合の熱画像, (下) 指先での熱画像.

参考文献

- [1] T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda, “Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, 2008, pp. 504-513.
- [2] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, Jul. 2010, doi: 10.1109/TOH.2010.4.
- [3] S. Suzuki, R. Takahashi, M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, “Midair Haptic Display to Human Upper Body,” in *2018 57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Sep. 2018, pp. 848-853, doi: 10.23919/SICE.2018.8492582.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Onishi Ryoya, Kamigaki Takaaki, Suzuki Shun, Morisaki Tao, Fujiwara Masahiro, Makino Yasutoshi, Shinoda Hiroyuki	4. 巻 18
2. 論文標題 Two-Dimensional Measurement of Airborne Ultrasound Field Using Thermal Images	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 44047
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.18.044047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 関口葵葉, 荒川岳斗, 森崎汰雄, 神垣貴晶, 牧野泰才, 篠田裕之
2. 発表標題 圧力増幅構造を用いた空中超音波による振動触覚提示
3. 学会等名 第28回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ZHU Qirong, KAMIGAKI Takaaki, MASUDA Yuichi, FUJIWARA Masahiro, MAKINO Yasutoshi, SHINODA Hiroyuki
2. 発表標題 Noncontact Heat Presentation for Whole Body Using High Intensity Ultrasound
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takaaki Kamigaki, Shun Suzuki, and Hiroyuki Shinoda
2. 発表標題 Mid-air Thermal Display via High-intensity Ultrasound
3. 学会等名 In SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies (SA '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神垣 貴晶, 篠田 裕之
2. 発表標題 空中超音波を用いた衣服の振動励起による振動覚提示
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------