



# 球面配置型超音波触覚ディスプレイの曲率変化による焦点 奥行方向移動の予備的検討

Preliminary Study of Distance Movement of the Focal Point by Curvature Change in Spherical Arrangement Ultrasonic Tactile Display

今笙羽<sup>1)</sup>, 成田叡賦<sup>2)</sup>, 溝口泉<sup>2)</sup>, 梶本裕之<sup>2)</sup>

Shoha KON, Eifu NARITA, Izumi MIZOGUCHI and Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, shoha.kon@kaji-lab.jp)  
2) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {narita, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

**概要** : 集束超音波による圧覚提示において、位相制御を必要としない球面の焦点を利用した手法が知られている。しかし超音波素子が静的な球面上に固定されるため、圧覚点の移動が制限される。そこで我々は、素子を取り付ける曲面の曲率を動的に変化させることで、奥行方向の圧覚点の移動を実現する手法を提案する。本稿ではその予備検討として、曲率の異なる二つの曲面における音響放射圧分布をメッシュスクリーンの温度変化計測によって観察した。

**キーワード** : 超音波触覚、空中超音波、曲率変化、焦点移動

## 1. はじめに

触覚や圧覚の提示は、VR 空間への没入感を高める技術として多く利用されている。特に、空中超音波を用いた触覚ディスプレイはデバイスとの接触を必要としない提示手法として知られている。超音波触覚の提示には超音波素子を平面に規則的に並べたデバイスが主に用いられ、各素子の位相制御により超音波を集束させることで圧覚点を作り出す。このような位相制御を利用した超音波焦点の研究は数多く行われている[1][2][3][4][5]。例えば、星ら[1]は位相制御により焦点位置を空間に自由に配置できるようにした。また Carter ら[2]は位相制御を利用して同時に複数個の焦点を制御する手法を提案した。Fan ら[3]はケーブル駆動の力と超音波触覚フィードバックを統合し、マルチモーダルな触覚刺激を生成した。Shen ら[4]は超音波焦点の数とその描画速度がユーザの応答にどのような影響を及ぼすのか調査した。さらに、位相制御された超音波焦点を応用した研究も存在する。Freeman ら[5]は位相制御を用いた超音波触覚フィードバックと LED によりユーザの手の位置を補正した。また、Seifi ら[6]は、超音波空中触覚を素早く作成・編集するためのグラフィカルデザインツールを紹介した。

一方で、位相制御を必要としない、物理的手法によって超音波焦点を形成する手法が存在する。Ariga ら[7]は放物面鏡を使うことで焦点を生成する手法を提案し、また

Matsubayashi ら[8]は、要素に分割された反射体上の音場に対する境界積分方程式を解くことにより、反射超音波を集束させる方法を提案した。星ら[9]は、球面に超音波素子を配置することで、球面の中心点に超音波焦点を形成する手法を提案した。しかし静的な球面に超音波素子を張り付けた場合、形成された超音波焦点の移動は制限される。特に球面をパンチルト機構に搭載する状況を想定すると、焦点位置を上下左右方向に移動することは容易であっても、前後、すなわち奥行方向に移動することは難しいと考えられる。

我々は、球面に超音波素子を配置し、その曲率を動的に変化させることで超音波焦点を奥行方向に移動させることができるのではないかと推測した。曲率の変化による焦点位置の移動の様子を図 1 に示す。球面に配置された超音波素子は球の中心点で焦点を結び、位相制御を行わずとも超音波による圧覚点を形成する。曲率が変化すれば、超音波焦点はそれに伴い奥行方向に移動する。

本稿では上記手法の予備検討として、奥行方向における超音波焦点の音響放射圧が曲面の曲率によってどのように変化するかを検証する。音響放射圧の変化はメッシュスクリーンを用いた温度分布計測[10]により観察する。実験では曲率の異なる 2 つの曲面に超音波素子を配置し、それぞれについて奥行方向の温度変化を調査した。

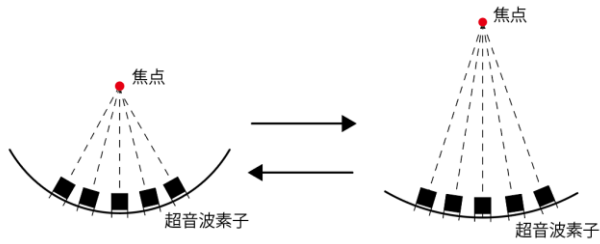


図 1 曲率の変化による焦点位置の移動

## 2. 実験

### 2.1 実験システム

本実験の概略図を図 2 に示す。本実験で超音波焦点の形成に利用したのは、パラメトリック・スピーカー実験キット (K-02617, 秋月電子通商) である。振動子の共振周波数は 40kHz であり、オーディオ入力に応じて FM 変調される。実験キットに同封の超音波素子 50 個を、曲面を形成するフレームに取り付けて球面を作成した。フレームは 10 個の羽から構成され、羽それぞれに超音波素子 5 つが取り付けられている。これらのフレームは、その上部に並べられた超音波素子の先から 10cm, 20cm の位置 (図 2 中の結像距離) に球面の中心点が来るように設計されている (以下、この機構を超音波焦点形成装置と呼ぶ)。音圧分布の測定には、メッシュスクリーンによる温度分布測定を用いた。メッシュ (N NO.420S, 日本特殊織物) 表面の温度測定には、サーモカメラ (FLIR-E6390) を用いた。メッシュスクリーンは水平に固定し、鉛直上向き (図 2 中の z 軸方向) に超音波焦点形成装置を移動することで、それぞれの結像距離に作られた焦点に対して、メッシュスクリーンの高さを変えながら表面の温度を観察した。

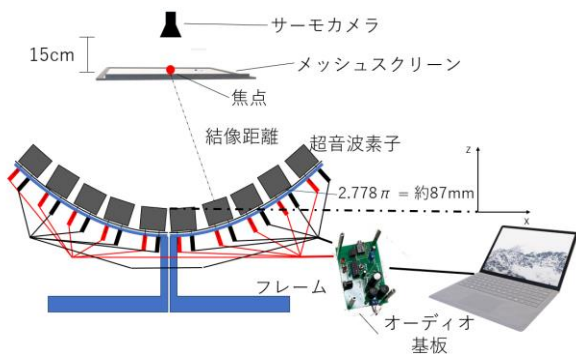


図 2 実験システムの概略図

### 2.2 実験条件

超音波焦点の結像距離は 10cm, 20cm の 2 条件である。図 3 にそれぞれの高さに焦点を作る超音波焦点形成装置を示す (図 3 左: 焦点 10cm, 図 3 右: 焦点 20cm)。これに対してメッシュスクリーンと本装置の距離は、図 2 中において底面の素子の先端から、5cm から 25cm を 1cm 刻

みにした 21 条件である。焦点の結像位置 2 条件×メッシュスクリーンの位置 21 条件の計 42 条件について、測定を行った。

メッシュスクリーンは、超音波焦点形成装置が置かれている床に対して水平に固定されて設置された。また、サーモカメラはメッシュスクリーンから鉛直上方 15cm の上に固定されて設置された。

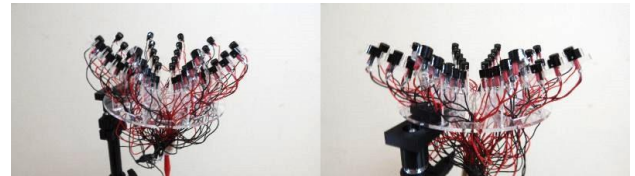


図 3 異なる高さの超音波焦点を形成する超音波焦点形成装置 (左図: 焦点 10cm, 右図: 焦点 20cm)

### 2.3 実験手順

実験時の様子を図 4 として示す。はじめに焦点を 10cm の位置に形成する超音波焦点形成装置をオーディオ基板に接続し、メッシュスクリーンに対して、超音波焦点形成装置を鉛直方向に移動させて、各高さ条件におけるメッシュスクリーン表面の温度分布を計測した。温度分布はメッシュスクリーン配置後、十分時間が経ったのちに観測を行った。サーモカメラを用いた温度計測において、計測範囲は 27.4°C から 30.0°C の範囲とした。これは事前の予備実験から、超音波の音圧分布を計測するのに容易である温度範囲として利用した。また測定前には事前に計測を行う室内の温度および湿度を計測した。

焦点 10cm における計測終了後、焦点を 20cm の位置に形成する超音波焦点形成装置においても同様の作業を行った。

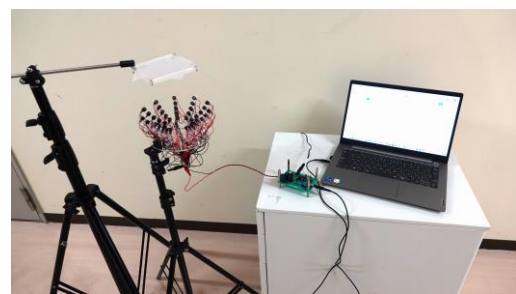


図 4 実験時の様子

## 3. 実験結果

焦点位置 10cm における計測を始めた際の室内温度は 25.9°C、湿度は 59% であった。また焦点位置 20cm における計測を始めた際の室内温度は 26.1°C、湿度は 53% であった。

### 3.1 奥行方向の温度変化

超音波焦点の位置 10cm, 20cm のそれぞれにおいて、奥行方向の各距離におけるメッシュスクリーンの最大温度

を図 5 として示す。焦点位置 10cm における計測の場合 (図 5 中の青線)、メッシュスクリーン表面の温度が最大であったのは、メッシュスクリーンの位置が 10cm の場合で 30.7°C であった。一方で焦点位置 20cm における計測の場合 (図 5 中のオレンジ線)、メッシュスクリーンの温度が最大であったのはメッシュスクリーンの位置が 20cm の場合で 29.8°C であった。メッシュスクリーンの位置が焦点形成位置とはずれている場合、どちらの焦点位置の計測においても大きな温度変化は見られなかった。

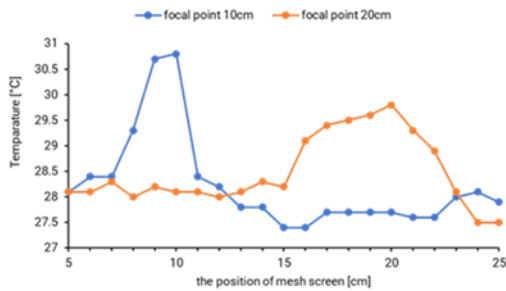


図 5 奥行方向の各距離におけるメッシュスクリーン表面の最大温度

3.2 奥行方向の温度分布

焦点 10cm、20cm のそれぞれについて、奥行方向へのメッシュスクリーンの温度分布を表したものを図 6 として示す。

焦点位置 10cm について、メッシュスクリーンの位置が超音波焦点位置の 10cm に近い高さである場合 (図 6 中の焦点 10cm の 8cm, 9cm, 10cm)、温度が局所的に高くなる部分が確認できる。しかし焦点位置より奥行方向に大きくずれた際は、温度が局所的に高くなる場所は確認できない。

焦点位置 20cm について、メッシュスクリーンの位置が超音波焦点位置の 20cm に近い高さである場合 (図 6 中の焦点 20cm の 18cm, 19cm, 20cm, 21cm)、同様に温度が局所的に高くなる部分が確認できる。しかし焦点位置より大きくずれた際は温度が局所的に高くなる部分は観察できない。

メッシュスクリーンと超音波焦点形成装置の距離が近い場合 (図 6 中の 5cm, 6cm, 7cm など)、メッシュスクリーンの表面温度は音圧による温度変化がまばらに観察できる。しかし、メッシュスクリーンと超音波焦点形成装置の距離が遠い場合、温度が局所的に高くなった部分を除いて、大きな温度変化は見られずメッシュスクリーンの表面温度は低いことが確認できる。

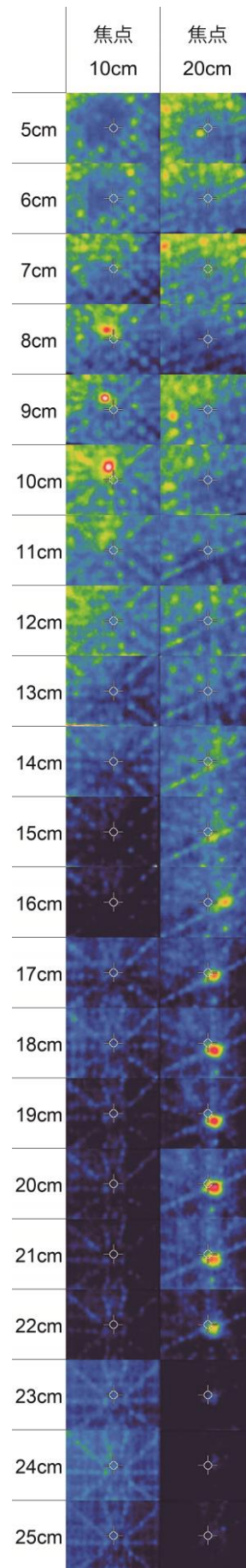


図 6 奥行方向の温度分布

#### 4. 考察

本実験の測定において確認された、局所的な温度上昇箇所を観察したメッシュスクリーンの位置は、超音波焦点を形成した位置と一致するため、図 5 で確認された局所的な温度上昇箇所は超音波焦点によるものだと考えられる。また図 6 の結果から、曲率の異なる超音波形成装置によって形成された焦点は、曲率の違いにより奥行方向におけるその形成位置も異なると考えられる。これは当初の想定であった、曲率を動的に変化させることで超音波焦点を奥行方向に移動させることができるのではないかと推測を裏付けるものであるといえる。

#### 5. むすび

本研究では、曲率の変化により奥行方向へ超音波焦点を移動することができると考え、その予備検討として曲率の異なる曲面における音響放射圧を観察した。

実験では、超音波素子から 10cm, 20cm の位置に超音波の音響放射圧を集中させ、その周辺において音響放射圧による温度変化を観察した。超音波焦点をメッシュスクリーン表面の温度分布により観察することができ、曲率が異なれば、形成される焦点の位置は奥行方向で異なることが確認できた。

今後は、本実験の内容を踏まえたうえで動的に曲面の曲率を変化させ、奥行方向へ超音波焦点を自在に動かせる機構を制作していく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] Takayuki Hoshi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda : Non-contact tactile sensation synthesized by ultrasound transducers, World Haptics 2009 Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2009.
- [2] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian : UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces, UIST '13: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 505-514, 2013.
- [3] Liqiang Fan, Aiquo Song, and Haochen Zhang : Development of an Integrated Haptic Sensor System for Multimodal Human-Computer Interaction Using Ultrasonic Array and Cable Robot, IEEE Sensors Journal, Vol. 22, No. 5, pp. 4634-4643, 2022.
- [4] Zhouyang Shen, Madhan Kumar Vasudevan, Jan Kučera, Marianna Obrist, and Diego Martinez Plasencia : Multi-point STM: Effects of Drawing Speed and Number of Focal Points on Users' Responses using Ultrasonic Mid-Air Haptics, CHI '23: Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, No. 83, pp. 1-11, 2023.
- [5] Euan Freeman, Dong-Bach Vo, and Stephen Brewster : HaptiGlow: Helping Users Position their Hands for Better Mid-Air Gestures and Ultrasound Haptic Feedback, IEEE World Haptics Conference, 2019.
- [6] Hasti Seifi, Sean Chew, Antony James Nascè, William Edward Lowther, William Frier, and Kasper Hornbæk : Feellustrator: A Design Tool for Ultrasound Mid-Air Haptics, CHI '23: Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, No. 266, pp. 1-16, 2023.
- [7] Kentaro Ariga, Masahiro Fujikawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda : Midair Haptic Presentation Using Concave Reflector, EuroHaptics 2020: Haptics: Science, Technology, Applications, pp. 307-315, 2020.
- [8] Atsushi Matsubayashi, Kanta Shiku, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda : Focusing Reflected Ultrasound Using Boundary Element Model for Mid-Air Tactile Presentation, IEEE Transactions on Haptics (Early Access), pp. 1-6, 2023.
- [9] 星貴之 : 電子工作キットで自作するインタラクティブ音響浮遊装置, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 12, 2016.
- [10] Ryoya Onishi, Takaaki Kamigaki, Shun Suzuki, Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda : Two-Dimensional Measurement of Airborne Ultrasound Field Using Thermal Images, Phys. Rev. Applied 18, 2022.