



多面体近似球面反射体を用いた空中超音波触覚提示

A Single Spot Presentation in Midair Haptics Using Polyhedral Reflector

有賀健太郎¹⁾, 松林篤²⁾, 牧野泰才³⁾, 篠田裕之⁴⁾

Kentaro ARIGA, Atsushi MATSUBAYASHI, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

- 1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, ariga@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)
 2) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, matsubayashi@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)
 3) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5, yasutoshi_makino@k.u-tokyo.ac.jp)
 4) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5, hiroyuki.shinoda@k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 空中超音波触覚提示に関して, 凹面反射板を用いることでアレイ開口サイズ以上の位置に触覚を提示することが可能である. 本研究では多面体近似球面反射体で代用する場合の収束性を検証する. 反射波が一点に収束可能であるためには, 導出された反射体の近似精度の条件を達成する必要がある. 数値実験において収束性を検証し, 実機実験において十分に知覚できるレベルの焦点音圧を達成することを確認した.

キーワード: 触覚, 超音波, 反射, 干渉

1. はじめに

空中超音波触覚ディスプレイ [1][2][3] は非接触に人体へ触覚を与えることが可能な触覚デバイスである. その時間空間的な高い制御性から空中触覚において多くの研究に用いられており, 複雑な所望の音場を生成することをはじめ [4][5], AM, LM 変調のように効率よく触覚刺激を与えることができたり [6], STM 変調によって触覚パターンを提示することができる [7]. ただし, 超音波フェーズドアレイは発音源自体のスペック, 発音源の配置やデバイス形状によって性能が決まる. 焦点の大きさはデバイスの開口と開口からの距離に依存し, 波長程度の大きさを持つ焦点を形成できる限界は開口サイズと同程度の距離である [8]. そのため, 提示距離を延長したりワークスペースを拡大したりするためには, 主にデバイスを複数用意しアレイサイズを拡大したり, デバイスを物理的に動かすという手法が取られる [9].

著者らは先行研究において図 1 のように曲面反射板を用いて照射音波を反射集束させ触覚を提示する手法を提案した [10]. これは, 超音波触覚ディスプレイの提示距離の限界を超えて触覚提示を行うもので, アレイ開口サイズの数倍以上の距離でも焦点を形成し触覚を与えることができる. 遠距離超音波触覚提示は, 例えば車載触覚インターフェースのように, 広い空間内での触覚体験への応用が期待できる. 著者らはまた曲面反射板を用いた遠距離超音波触覚提示法のワークスペースの評価を行った [11] が, いずれも反射板の形状はある焦点距離を持ったきれいな凹面反射板のみを仮定していた.

本稿では, 図 1 の遠距離超音波触覚提示においてジオデシックドームのような多面体近似面を反射体として用いた

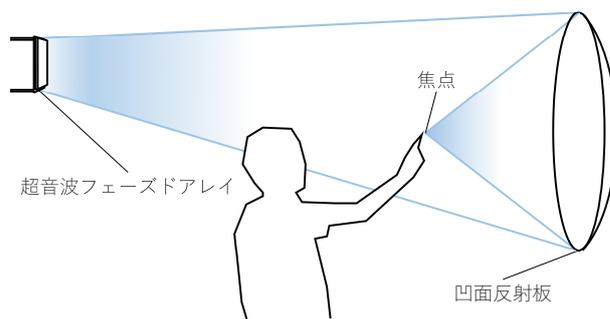


図 1: 曲面反射板を用いた遠距離空中超音波触覚提示

場合の焦点の収束性を検証する. 実用上, 開口が大きく滑らかな 1 枚の曲面を用意することは困難であり, 代わりに近似した曲面を作成し使用することが考えられるためである. まず, 2次元平面において平面分割近似面を用いて反射波を集束させた場合に焦点面で観測される音圧分布について考察する. 次に, 実際に多面体近似球面を反射体として用いて反射波を集束させた場合の焦点音圧分布を測定し, 理論との整合性と焦点の収束性を確認する.

2. 理論

2.1 問題設定

2次元平面上で, 球面反射体を等分割するように複数の平面で近似された反射体を考える. また簡単のため, 2枚の平面で構成された反射体を考える. 図 2 のように, 反射体は光軸 (y 軸) に対称で, またフェーズドアレイも同様に y 軸に対称に配置されており反射板に正対するとする. また, 焦点面がフレネル領域にあるとする.

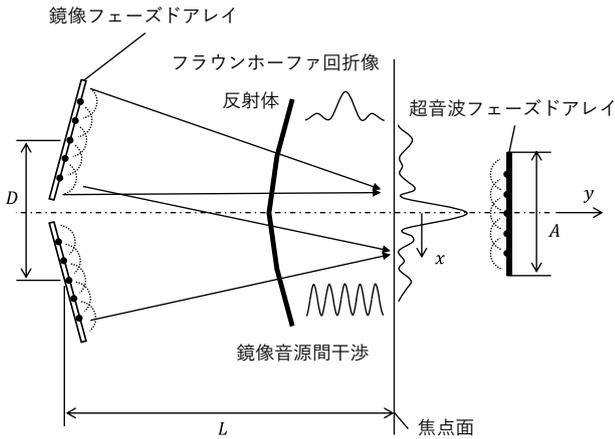


図 2: 反射板によって焦点を形成する様子。鏡像フェーズドアレイで焦点を形成しつつ、同一の実音源の異なる鏡像音源間に干渉が発生する。

鏡像法により、複数の平面反射面による鏡像位置に仮想的なフェーズドアレイがあると考えることができる。1つの鏡像フェーズドアレイの仮想音源に着目すれば、このフェーズドアレイはレンズの効果と同様に位相制御によってフレネル領域にアレイ開口のフラウンホーファ回折像を形成する [12][13]。しかし同時に、複数の鏡像フェーズドアレイを同時に着目すれば、同一の実音源の異なる鏡像音源間に生じる干渉効果を考える必要がある。したがって、この反射体による反射波で焦点を形成した場合、鏡像フェーズドアレイによってフラウンホーファ回折像が形成されるが、干渉の影響によって分布内に強め合いと弱め合いが発生する。

2.2 干渉縞

以降、反射体の 2 枚の平面がほぼ平行であるとし、鏡像フェーズドアレイと焦点面とが平行と見なせると仮定する。また、鏡像アレイが凡そ焦点方向を向いていると仮定する。鏡像フェーズドアレイの中心間距離を D とし、また鏡像フェーズドアレイの中心と焦点面までの距離を L とする。波長を λ とし、 $L \gg D, \lambda$ であるとする。提示面上位置 x ($x \ll L$) での 2 つの鏡像音源からの音波の経路差を l とすると、

$$l = \sqrt{L^2 + (x + D/2)^2} - \sqrt{L^2 + (x - D/2)^2} \approx \frac{Dx}{\sqrt{L^2 + D^2/4}} \quad (1)$$

となる。強め合いの干渉は経路差が波長の整数倍となる位置で起こるから、上式で強め合いの干渉が起こる条件は

$$\frac{Dx}{\sqrt{L^2 + D^2/4}} = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \dots) \quad (2)$$

である。したがって、鏡像フェーズドアレイ間の干渉で発生する提示面上での干渉位置の間隔 d_x は、 $d_x \cdot D / \sqrt{L^2 + D^2/4}$ であるから、

$$d_x = \frac{\sqrt{L^2 + D^2/4}}{D} \lambda \quad (3)$$

となる。

2.3 フェーズドアレイの収束効果

ここでは一旦干渉による影響を無視し、1つの鏡像フェーズドアレイによる音波の集束効果を考えるものとする。前節と同様に反射体の 2 枚の平面がほぼ平行に接続されているものとし、提示面上の位置 $x = 0$ が鏡像フェーズドアレイ中心線上にあると仮定する。フェーズドアレイの開口サイズを A とし、無限個の位相制御可能な点音源が並んだ発音源であるとする。また、 $L \gg A$ であるとする。提示面上にフェーズドアレイが生成する音場 $p_A(x)$ は

$$p_A(x) = \int_{-A/2}^{A/2} p_0 \frac{e^{-jk r(x,a)}}{r(x,a)} \cdot e^{j\phi(a)} da \quad (4)$$

と書ける。ただし、 k は波数、 $r(x,a)$ はフェーズドアレイ上の点 a から位置 x までの伝播長、 $\phi(a)$ は点 a での位相を表す。いま提示面上の位置 x_0 で 1 つの鏡像フェーズドアレイによる音波の位相を揃えるものとする (つまり、 $\phi(a) = k(r(x_0, a) - r(x_0, 0))$ である)。 $L' = \sqrt{L^2 + D^2/4}$ とおくと、伝播長 $r(x,a)$ は仮定より

$$r(x,a) \approx L' + \frac{(x-a)^2}{2L'} \quad (5)$$

と近似できるため、式 (4) を整理すると、

$$p_A(x) \approx p_0 \frac{e^{-jk\left(L' + \frac{x^2}{2L'}\right)}}{L'} \cdot \text{sinc}(k(x-x_0)A/2L') \quad (6)$$

となり、フラウンホーファ回折像が現れる。ただし、 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$ である。回折像の頂点 x_0 から零点までの距離を w_x とすると、 $w_x \cdot kA/2L' = \pi$ より

$$w_x = \frac{\sqrt{L^2 + D^2/4}}{A} \lambda \quad (7)$$

を得る。

2.4 アナロジーと一点収束可能条件

これまで扱ってきた問題は、鏡像フェーズドアレイをスリットと見なすことにより、複数スリット干渉問題として捉えることができる。したがって、提示面上の音圧分布は干渉項と回折項の積の形で表されるため、アレイ開口の回折像を包絡線とする干渉縞が形成されると考えられる [14][15]。

いま N 個の鏡像アレイが y 軸対称に距離 D で等間隔に並んでいると仮定すると、式 (1) より経路長差は Dx/L' であるので、式 (6) を用いて

$$p(x) \approx p_A(x) \sum_{n=1}^N e^{jk \frac{Dx}{L'} (n - \frac{N+1}{2})} = p_A(x) \cdot N \frac{\text{sinc}(kNDx/2L')}{\text{sinc}(kDx/2L')} \quad (8)$$

と表せる。上式より、焦点の半径を r_f とすると

$$r_f = \frac{\sqrt{L^2 + D^2/4}}{ND} \lambda \quad (9)$$

であるが、これは反射体の開口が焦点を形成する角度によって焦点径が決定することを示している。

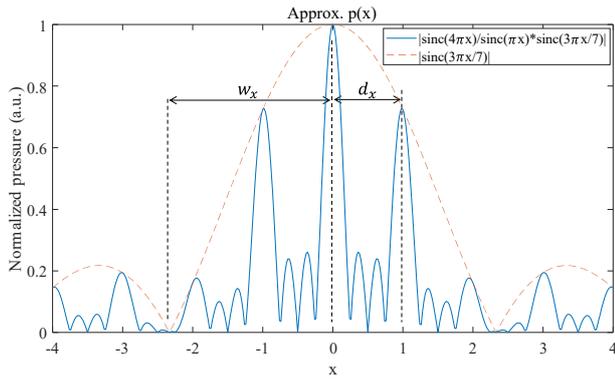


図 3: 提示面上の音圧分布の概形

次に、焦点が一点に収束する条件について考察する。図 3 の青線は式 (8) で表される提示面上の音圧分布の概形を示している。赤い点線の開口回折像を包絡線とし、干渉明線が間隔 d_x で現れる。開口回折像は単スリット開口内の干渉と捉えることができるので、ここでは干渉明線、回折明線、などと呼び分けることとする。式 (3), (7) より、 $d_x < w_f$ ならば、回折 0 次明線内に複数の干渉明線のピークが存在することとなる。空中超音波触覚では音圧の 2 乗に比例する音響放射圧を利用して触覚を提示するが、ここで開口回折像について、式 (6) より 0 次回折明線と比較して 1 次以降の回折明線の強度は $4/9\pi^2$ 以下と非常に小さいことがわかる。

したがって、

$$d_x \gtrsim w_x \quad (10)$$

または、これを変形して

$$A \gtrsim D \quad (11)$$

とすれば、1 次以降の干渉明線の強度を低く抑えることができるため、空中超音波触覚提示においては一点集束すると見なすことができる。

フェーズドアレイと反射体との距離を H 、反射体の隣接する 2 枚の平面のなす角で小さい方を θ とすると、 θ が微小ならば $D = 2H\theta$ であるから、式 (11) は

$$\theta \lesssim \frac{A}{2H} \quad (12)$$

と変形できる。以上の式 (10)~(12) が複数の平面で近似された曲面反射板による反射波が一点に収束するための条件である。式 (12) から、一点収束可能条件はフェーズドアレイ開口サイズと反射体との距離によって決定することができる。

3. 実験

実際に多面体近似球面反射体を用いた場合の音圧分布を測定し、収束性を検証した。

図 4 のように、超音波アレイから多面体近似球面反射体に超音波を照射し、反射音波によって焦点を形成した。図の

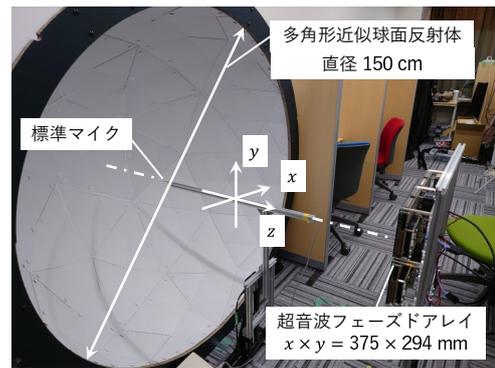


図 4: 測定実験の様子。フェーズドアレイと反射板の底の距離は約 150cm。

ように座標軸を取り、 xy 平面は反射板開口面、 z 軸は反射板の中心軸、音源アレイの中心軸と一致するように設定した。

音源アレイは AUTD [3] を 2×2 に並べたものを使用した。開口サイズは $x \times y = 375 \times 294 \text{ mm}$ だった。AUTD には 40 kHz 音源である T4010A1 ((株) 日本セラミック) が 249 個搭載され、開口から距離 18 cm に 1 台で焦点を形成した時の焦点音圧は 6.13 kPa である [11]。フェーズドアレイは反射板に正対させ、 $z = 75 \text{ cm}$ の位置に配置した。

反射板として、Paperdome HD150 ((有) スープスタジオ一級建築士事務所) を用いた。Paperdome HD150 は段ボール製の、半径約 75 cm の 4V ジオデシックドームである。

標準マイク (Brüel & Kjær 製, 4138-A-015) を用いて音圧を測定した。マイクの位置は $z = -32 \text{ cm}$ であり、 z 軸と並行にかつ z 軸正の方に向くよう配置した。マイクは 2 軸ステージを用いて xy 方向に移動させた。

焦点は $(x, y, z) = (0, 0, -32 \text{ cm})$ の位置に形成した。観測データの位同期期によって焦点を形成した。2 mm 間隔、 $-50 \leq x, y \leq 50 \text{ mm}$ の範囲で焦点面上の音圧分布を測定した。

図 5 は測定結果を示す音圧分布である。焦点音圧は $(x, y) = (0, 0 \text{ mm})$ で 4.14 kPa である。

比較のため、シミュレーションにより求めた焦点面上での正規化音圧分布を図 6 に示す。シミュレーションにおいては、音速を 340 m/s とし、実機と同じ配置、トランスデューサの指向性と音圧レベル、40 kHz における空気の減衰係数を再現し、音圧正規化を行った。半球の焦点距離を半径の半分の 375 mm とすると、4V ジオデシックドームの底面の正三角形と隣接する 3 枚の三角形とのなす角 $\theta = 0.18 \text{ rad}$ 、 $A/2H = 0.12 \text{ rad}$ である。

測定実験による焦点音圧値は触感を与えるのに十分な値である。シミュレーションにおいても測定実験においても十分に小さな焦点が形成された。また、目的位置でのみ鋭い音圧ピークが観測され、それ以外の位置では音圧値が低く抑えられていることが確認でき、一点収束可能条件は妥当であると言える。

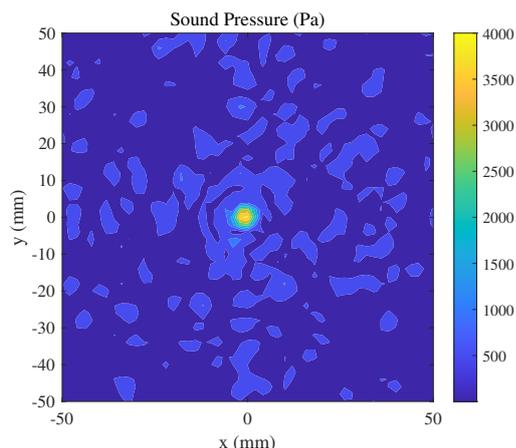


図 5: 焦点面 $z = 32$ cm 上で測定した音圧分布

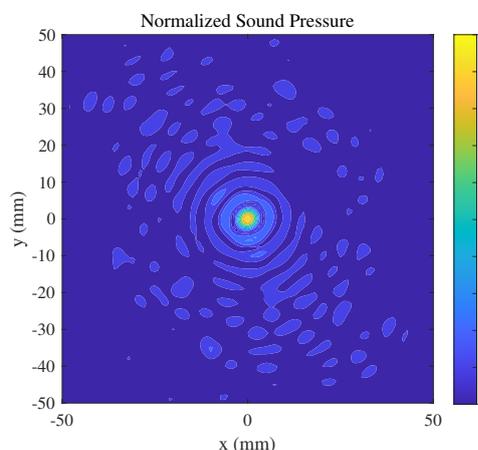


図 6: シミュレーションで算出した正規化音圧分布

4. おわりに

本稿では、曲面反射板を用いた遠距離空中超音波触覚提示において多面体近似球面反射体を代用したときの収束性について検証した。反射体を構成する複数の平面それぞれに対する鏡像フェーズドアレイにより焦点が形成され、同時に鏡像音源間で干渉が発生する。干渉縞の間隔がアレイ開口回折像の零点位置と同程度かそれ以上となるときに一点に収束し、この集束条件はフェーズドアレイ開口サイズと反射体との距離によって定まる。実験により、導出された条件式を満たす設計において多面体近似球面反射体による反射波がフェーズドアレイの位相制御により一点収束可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Takayuki Iwamoto, Mari Tatezono, and Hiroyuki Shinoda. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 504–513. Springer, 2008.
- [2] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. Ultrahaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch

- surfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 505–514, 2013.
- [3] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(4):740–749, 2021.
- [4] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram. In *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 362–367. IEEE, 2015.
- [5] Atsushi Matsubayashi, Tomohisa Yamaguchi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Rendering softness using airborne ultrasound. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 355–360, 2021.
- [6] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 276–288. Springer, 2018.
- [7] William Frier, Damien Ablart, Jamie Chilles, Benjamin Long, Marcello Giordano, Marianna Obrist, and Sriram Subramanian. Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air. In Domenico Prattichizzo, Hiroyuki Shinoda, Hong Z. Tan, Emanuele Ruffaldi, and Antonio Frisoli, editors, *Haptics: Science, Technology, and Applications*, pages 270–281, Cham, 2018. Springer International Publishing.
- [8] Keisuke Hasegawa and Hiroyuki Shinoda. Aerial display of vibrotactile sensation with high spatial-temporal resolution using large-aperture airborne ultrasound phased array. In *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pages 31–36. IEEE, 2013.
- [9] Thomas Howard, Maud Marchal, Anatole Lécuyer, and Claudio Pacchierotti. Pumah: Pan-tilt ultrasound mid-air haptics for larger interaction workspace in virtual reality. *IEEE Transactions on Haptics*, 2019.
- [10] Kentaro Ariga, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Midair haptic presentation using concave reflector. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pages 307–315. Springer, 2020.
- [11] Kentaro Ariga, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Workspace evaluation of long-distance midair haptic display using curved reflector. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pages 85–90, 2021.
- [12] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, 3(3):155–165, 2010.
- [13] Frank Träger. Springer handbook of lasers and optics. 2007.
- [14] Donald H Kobe. Aharonov-bohm effect revisited. *Annals of Physics*, 123(2):381–410, 1979.
- [15] Timothy H. Boyer. Classical electromagnetic deflections and lag effects associated with quantum interference pattern shifts: Considerations related to the aharonov-bohm effect. *Phys. Rev. D*, 8:1679–1693, Sep 1973.