

複数の超音波振動子アレイを用いた全周囲触覚提示

All-around Tactile Stimulation by Using Multiple Arrays of Ultrasound Transducers

○渡邊雅之 星貴之 鳥越一平 (熊本大)

Masayuki WATANABE, Takayuki HOSHI, and Ippei TORIGOE, Kumamoto Univ.
071t3848@st.kumamoto-u.ac.jp, {star, torigoe}@kumamoto-u.ac.jp

A noncontact tactile display is developed in our laboratory, which provides tactile stimulation in midair by utilizing a nonlinear phenomenon of ultrasound; Acoustic radiation pressure. In the previous reports, a single or two arrays of ultrasound transducers are used and the resulting force acts only in one direction. That would limit the application area of the tactile display. In this paper, four arrays are arranged so that a user's hand is surrounded by them. The user can feel sufficient tactile stimulation in any direction owing to this array configuration.

Key Words: Tactile display, Airborne ultrasound, Acoustic radiation pressure.

1. 緒言

我々の研究室では、超音波を用いて非接触で触覚を提示する装置の開発を進めている。手にデバイスを装着する必要がなく、近年注目を集めている 3D テレビ・空中映像やコントローラ不要のインタフェース (NUI: Natural User Interface) との親和性がよい。それらに触覚フィードバックを与えることにより、現実感や操作性の向上が期待できる。これまでに空中映像への触感の付与[1][2]や、手の三次元位置によってカーソルを操作するシステムにおける触覚フィードバック[3]などを行っている。

本手法では、超音波振動子アレイの各振動子の位相・強度を制御することで超音波焦点を生成する。この焦点に手をかざすと応力が感じられる (音響放射圧)。この応力は手のひらがアレイと平行であるとき最大値をとり、傾くに従って減少する。つまり 1 枚のアレイによって効率よく触覚提示可能な方向はアレイに垂直な方向のみである。文献[1]では、アレイを 1 枚用いて触覚提示を行っている。また文献[3]ではアレイ 2 枚を使用しているものの、一方向の応力を意図している。それらに対し文献[2]では、アレイ 2 枚を用いて 90 deg の範囲での触覚提示を行っている。

本稿では、4 枚のアレイを用いて全周囲からの触覚提示を提案する。これによりユーザの手がどの方向を向いていても一定以上の強度の触覚刺激を感じることができる。以下、触覚提示の原理と試作システムについて報告する。

2. 空中超音波触覚ディスプレイ

2.1 原理

空中超音波触覚ディスプレイは、超音波の音響放射圧を利用して空中に触覚を提示する。音響放射圧は、超音波の伝搬を物体がさえぎる時、物体の表面に生じる。その圧力 P [Pa] は式(1)のように表される。

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

ここで α は物体表面における超音波の反射特性によってきまる定数 (全反射のとき $\alpha = 2$)、 E [J/m³] は超音波のエネルギー密度、 p [Pa] は音圧、 ρ [kg/m³] は媒質の密度、 c [m/s] は媒質中の音速である。超音波の空間分布を制御することにより、空間中の圧力分布の制御が可能である。これまでに数百個の超音波振動子を用いて、空気中において数 gf 程度の力を発生できることが確認されている。

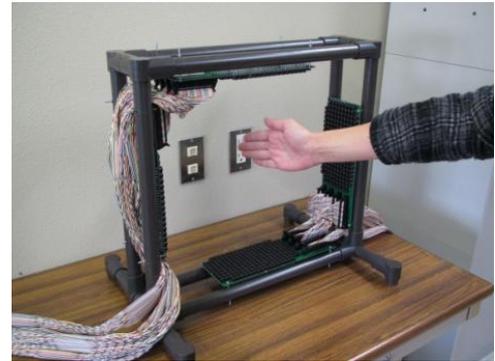


Fig. 1 Arrangement of ultrasound transducer arrays.

2.2 使用する振動子アレイ

超音波振動子アレイは短冊形で、超音波振動子 (日本セラミック株式会社製、共振周波数 40 kHz、直径 1 cm) 192 個を 10×20 cm² の領域内に配列したものである。今回はこのアレイ 4 枚を図 1 のように配置する。焦点をアレイの中心、高さ 30 cm の位置に設定したときの DC 出力を電子秤によって実測したところ、アレイ 1 枚による提示力は 1.2 gf であった。

2.3 放射圧分布

図 2 のように振動子アレイの各辺を x 、 y 方向とし、各方向の幅を D [m]、 L [m] とすると、放射圧の焦点径を表す理論式は式(2)で与えられ、振動子アレイの辺の長さに反比例する。

$$W_x = \frac{2\lambda R}{D}, \quad W_y = \frac{2\lambda R}{L} \quad (2)$$

ここで W_x [m]、 W_y [m] は x 、 y 方向の焦点径、 λ [m] は超音波の波長、 R [m] は焦点距離である。今回の焦点距離とアレイサイズのと看、 $W_x = 17$ mm、 $W_y = 34$ mm と算出される。

振動子アレイ上部 200 mm の圧力分布を、コンデンサマイクロフォンを用いて二次元的に計測した。アレイの中心を原点として、図 3 のように x 、 y 、 z 軸をとる。コンデンサマイクロフォンを振動子アレイの上部 $z = 200$ mm で固定し、アレイを自動 xy ステージに載せて動かした。 x 軸方向に 3 mm、 y 軸方向に 5 mm 刻みで、 -30 mm $\leq x \leq 30$ mm、 -30 mm $\leq y \leq 30$ mm の領域を 20 × 12 = 240 点計測した。超音波に 100 Hz の変調をかけ、デジタルオシロスコープの FFT 機能を利用して 100 Hz 成分の振幅を計測した。

各点において 1 分間観察したときの振幅の最大値と最小値

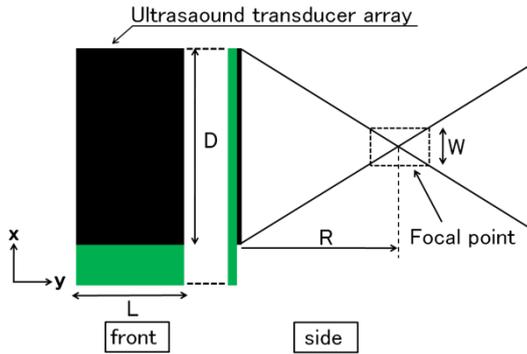


Fig. 2 Illustration of ultrasound array and focal point.

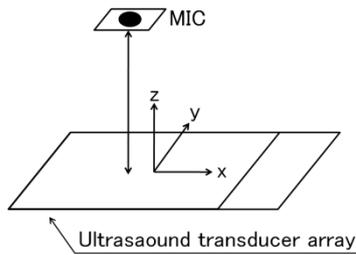


Fig. 3 Illustration of setup for spatial distribution measurement.

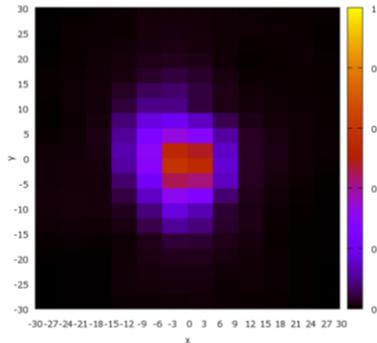


Fig. 4 Measured distribution of radiation pressure ($z = 200$ mm).

を記録し、その平均値をグラデーションであらわしたものを図 4 に示す。平均値の最大値で規格化してある。この結果をみると理論から予測された通り、焦点が楕円になっていることがわかる。

3. 放射力の合成

振動子アレイを図 1 のように配置し、超音波を上、下、右、左方向に放射する。各アレイからは、アレイに垂直な方向に放射力（放射圧を面積に関して積分したもの）が生じるとする。単一の焦点を結ぶよう位相を制御したとき、手のひらに垂直な方向の力は、各アレイからの寄与のベクトル和と考えられる。

手のひらに垂直な方向に生じる力を試算する。手のひらと向かい合うアレイ 2 枚を図 5 に示す。反対側の 2 枚は手の甲に作用し、手のひらには寄与しないためここでは考慮しない。角度 θ [rad] のとき、左側のアレイからの寄与は $F_0 \cos \theta$ [N] と表せる。 $F_0 (= 1.2 \text{ gf})$ はアレイと手のひらが平行なときに生じる放射力の大きさである。一方、下側に配置したアレイからの寄与は $F_0 \cos(\pi/2 - \theta)$ [N]。したがってこれらの合力 F_θ [N] は

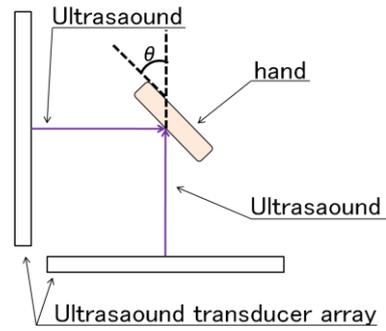


Fig. 5 Illustration of two arrays facing user's palm.

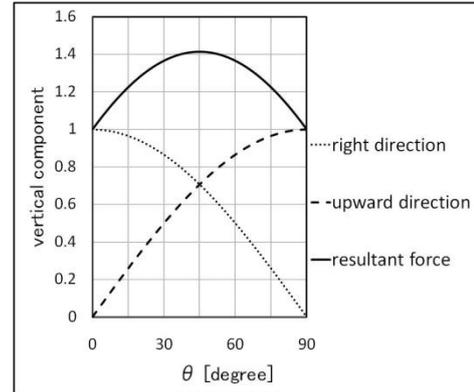


Fig. 6 Simulation results of individual and summed radiation force.

$$F_\theta = F_0 \left\{ \cos \theta + \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right\} \quad (3)$$

と表される。各アレイからの寄与と合力を F_0 で割った値を図 6 にプロットする。90 deg の範囲でアレイを単独で用いたとき以上の力を提示することができる。したがって対称性から、図 1 のアレイ配置により、全周囲にわたって 1 倍以上の力が提示可能であると言える。

4. 結言

本稿では、複数の超音波振動子アレイを用いた全周囲触覚提示を提案した。使用した振動子アレイが長方形のため焦点は楕円形であった。放射力の合成を試算した結果、ユーザの手がどの方向を向いていても、一定以上の触覚提示が可能になったことがわかった。今後、向かい合ったアレイの相互作用などについても検討する。

謝 辞

本研究は日本学術振興会・科学研究費補助金・研究活動スタート支援（研究課題番号：21800039）の助成を受けたものである。

文 献

- [1] T. Hoshi, M. Takahashi, K. Nakatsuma, and H. Shinoda: Touchable Holography, Proc. SIGGRAPH 2009, E-Tech, article no. 23, 2009.
- [2] 渡邊雅之, 星貴之, 鳥越一平: 空中映像との多方向触覚インタラクションシステムの開発, 第 29 回 SICE 九州支部学術講演会予稿集, pp. 303-304, 2010.
- [3] 星貴之: 触覚フィードバックのある空中入力システムの開発, 第 11 回 SICE SI 部門講演会論文集, pp. 182-183, 2010.