

粘性流体を用いた空中超音波触覚ディスプレイの圧力分布の可視化

Visualization of Pressure Distribution of Airborne Ultrasound Tactile Display Utilizing Viscous Fluid

○正 星 貴之 (名工大)

Takayuki HOSHI, Nagoya Institute of Technology, star@nitech.ac.jp

In the process of developing our ultrasound-based non-contact tactile display, it is needed to check whether the ultrasound is focused as intended. It takes a lot of time to scan a microphone, feeling tactile stimulation by hand lacks spatial resolution, and other conventional visualization methods are not available in our case. This paper proposes a visualization method using viscous fluid. The viscous fluid functions as a low pass filter and eliminates undesired components such as splashes, bubbles, and traveling waves. Then it shows the spatial distribution of the DC component, i.e. acoustic radiation pressure, which is the origin of the tactile stimulation of our tactile display.

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

1. はじめに

著者の所属するグループは、超音波の音響放射圧を利用した触覚ディスプレイの開発を行っている[1][2]。超音波振動子アレイの各振動子の位相・強度によって超音波の空間分布を制御し、離れた位置にある手指に圧力を提示する。本装置を開発する過程においては、超音波が意図した通りに集束していることを確認する必要がある。マイクロフォンの走査により音圧の空間分布が得られるが、データ取得に時間がかかるのが難点である。作業の効率化のため、音場を容易に調べられることが望ましい。簡易的には、手のひらに集束超音波を照射して圧力を感じることで集束していることが確認できる。しかし焦点の直径や対称性など、詳細な空間分布まで感じ取ることができない。

既存の音場可視化手法は、上記の目的への適用が困難である。シュリーレン法は媒質の密度勾配分布を撮影する方法であるが、調査した範囲では水中超音波[3]や空中衝撃波[4]などが対象であり、空中超音波の撮影は行われていない。また光学系を精密に構築する必要もある。微粒子を混入することで定在波を可視化する方法[5]もあるが、進行波の場合には微粒子の流れを生じるため、音圧の空間分布（特に超音波ビームの断面）の観察には不向きと考えられる。

本稿では容易に実施可能な方法として、粘性流体を用いた圧力分布の可視化を提案する。集束超音波を粘性流体表面に垂直に照射したとき、高周波（超音波）成分は粘性により除去され、直流（放射圧）成分が表面を押し込む。表面張力が十分弱ければ、表面は放射圧分布に従って変位すると考えられる。以下、空中超音波触覚ディスプレイの紹介のあと、可視化の結果について報告する。

2. 空中超音波触覚ディスプレイ

2.1 原理

物体が超音波の進行を遮るとき、物体表面には超音波の進行方向の応力が発生することが知られている（音響放射圧）。超音波の平面波が垂直に入射するとき、物体表面に生じる音響放射圧 P [Pa] は次式で表される。

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

ここで α は物体表面の反射特性に依存する係数（全反射の場合 $\alpha = 2$ ）、 c [m/s] は音速、 p [Pa] は超音波の音圧（実効値）、

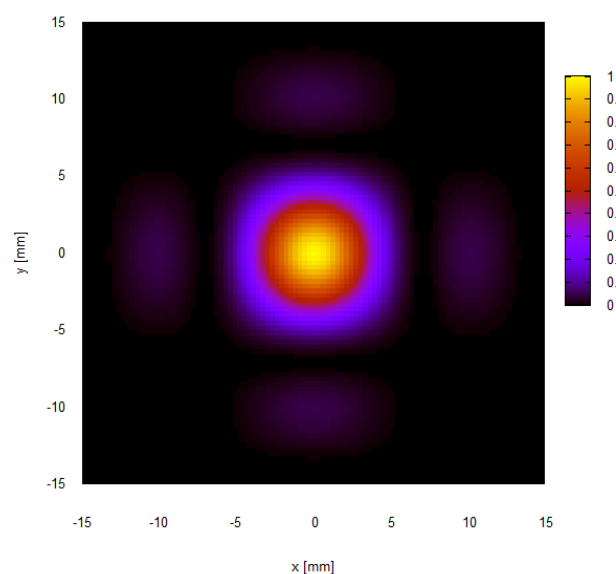


Fig. 1 Theoretical distribution of acoustic radiation pressure.

ρ [kg/m³] は媒質の密度である。上式は、超音波の時空間パターンの制御により、任意の圧力パターンが提示可能であることを示している。

単独の超音波振動子が生じる音響放射圧は微弱である。数 10 mN 程度の発生力を得るため、数 100 個の超音波振動子を使用する。各振動子の位相を適切に制御し、空中に単一の焦点を結ぶ。また、位相を操作することで焦点の位置を変えることもできる。すなわち、離れた場所から空間中の任意の位置に力を発生させることができる。

2.2 装置

文献[2]において製作した小型超音波装置を使用する。アレイのサイズは 17 cm 四方であり、その矩形領域内に 285 個の超音波振動子（共振周波数 40 kHz）が配列されている。装置に内蔵された FPGA が焦点位置にもとづいて振動子間の適切な位相差を算出し、各振動子に応じた駆動信号を生成する。焦点における発生力の最大値は 16 mN である。焦点位置は 0.5 mm 刻みで指定可能である。超音波を ON / OFF することによりインパルスや振動刺激を対象に与えることができる。

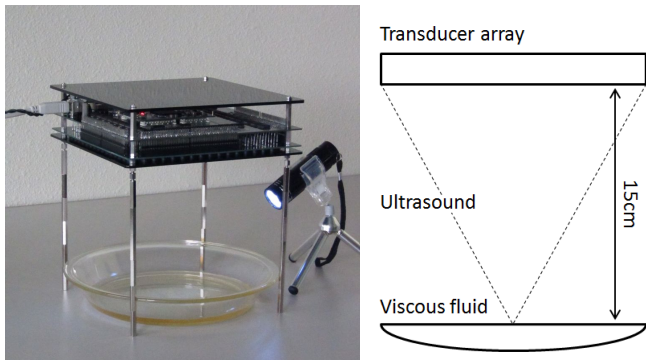


Fig. 2 Experimental setup.

矩形の振動子アレイを用いたとき、焦点面に生じる超音波の音圧分布はほぼ sinc 関数に従うことが理論的に導かれている[1]。放射圧分布はその二乗に比例する。図 1 に放射圧分布の理論値を示す。これは焦点距離を 15 cm に設定したときのものである。メインローブ周囲に 4 個のサイドローブがある点が特徴的である。

3. 粘性流体を用いた可視化

粘度の低い流体（水，粘度 1 mPa·s 程度）の表面に集束超音波を照射すると、水滴が弾け飛ぶ、泡立つ、波紋が表面を伝搬する、などの現象が見られる。この状態では超音波が集束していること以上の情報は得られない。一方、粘度の高い流体（蜂蜜，粘度 10 Pa·s 程度）の表面に照射した場合にはそのようなノイズとなる現象は生じにくく、放射圧による静的な押し込みが支配的となる。本節では、粘性の高い流体の表面に焦点を合わせる場合および焦点を合わせない場合のそれぞれについて観察された表面変位を報告する。

表面変位を観察するため、図 2 に示すような実験系を構築した。粘性流体としては市販の蜂蜜を使用した。振動子アレイから流体表面までの距離は 15 cm とした。斜めから光を照射すると、表面変位に応じた濃淡像が容器底面に映し出される（図 3）。これを表面側から観察する。像が拡大される、表面変位と重なった部分が歪んで見える、などの欠点はあるが簡便であるため本稿ではこの方法を採用した。

3.1 表面に焦点を合わせる場合

振動子アレイから流体表面までの距離と同じ 15 cm に焦点距離を設定した際の表面変位を図 4 に示す。メインローブの周囲に 4 個のサイドローブの存在を確認することができる。

3.2 表面に焦点を合わせない場合

焦点距離を前後に 8 cm ずらした際の表面変位を図 5 及び 6 に示す。すなわち一旦焦点を結んでから拡散した状態とこれから焦点を結ぼうとしている状態である。焦点以外も観察できることから、焦点固定のまま粘性流体を上下させることにより音圧の三次元分布が取得できると考えられる。

4. おわりに

本稿では容易に実施できる集束超音波の可視化手法として粘性流体を用いる方法を提案した。従来は手のひらで集束の有無のみ確認していたが、提案手法を用いることにより集束の様子を目視で手軽に確認することができる。焦点及びその前後について観察した結果を報告した。

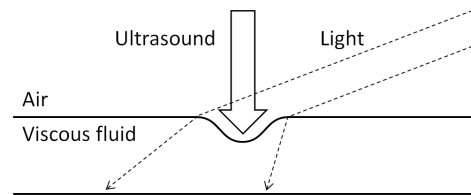


Fig. 3 Cross-section of viscous fluid layer.

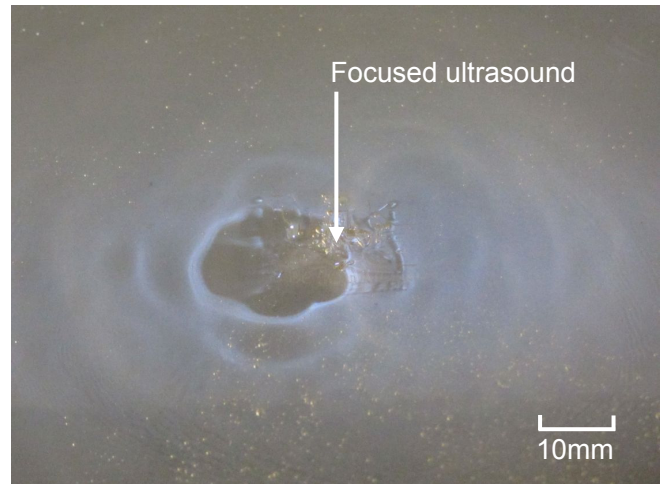


Fig. 4 Observed pattern at focal point (focal length = 15 cm).

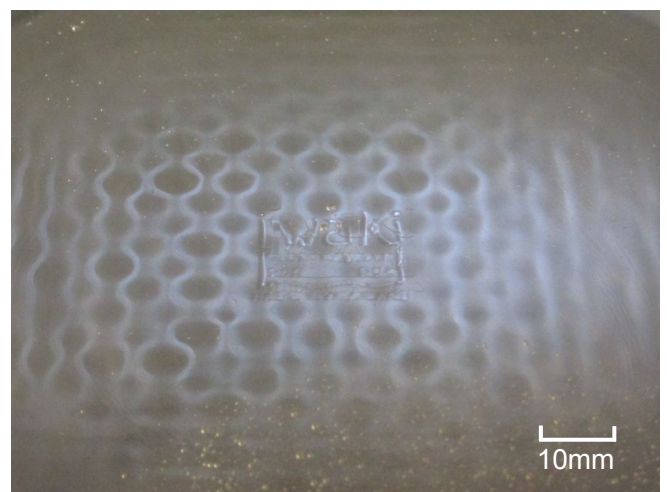


Fig. 5 Observed pattern after focal point (focal length = 7 cm).

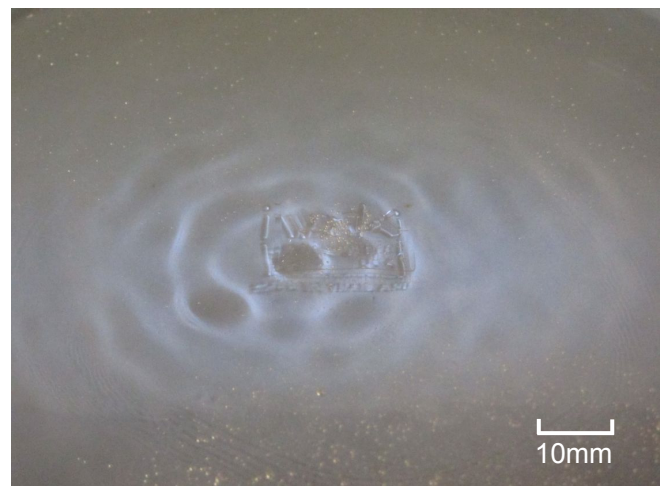


Fig. 6 Observed pattern before focal point (focal length = 23 cm).

現段階では目視による定性的な評価に留まっている。計測法として確立するためにはインパルス応答などを考慮した放射圧と表面変位の関係を求める必要がある。流体の粘性や深さなどの条件も最適化する。流動による表面変位の時間変化もあるため、それが計測に与える影響も調べる。また表面変位の撮像法にも改善が求められる。流体内から撮像する、スリット光を表面に照射する、などが候補として挙げられる。

ところで教育用の実験としてクント管[5]やクラドニ図形[6]などの音波・振動の可視化が用いられている。提案手法では焦点の前後における放射圧分布も観察できることから、波の干渉や伝搬の教材としての活用も考えられる。

文 献

- [1] 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, 2010.
- [2] 星貴之: 空中超音波触覚ディスプレイの可搬性の向上, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH2012) 講演論文集, IA1-A03(1-2), 2012.
- [3] 宮下英樹, 工藤信樹, 山本克之: 超音波音場可視化のための簡易型シュリーレン法に関する研究 -強力超音波音場の可視化-, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 106, no. 127, pp. 5-8, 2006.
- [4] 渡辺好章, 大谷隆彦, 卜部泰正: 火花放電および細線爆発により発生する衝撃波のシュリーレン法による観測, *日本音響学会誌*, vol. 37, no. 6, pp. 267-273, 1981.
- [5] 上野佳奈子: 連載企画 -音の博物館- クントの実験による定在波の可視化, *日本音響学会誌*, vol. 63, no. 2, p. 116, 2007.
- [6] 坂上公博: 連載企画 -音の博物館- クラドニパターン, *日本音響学会誌*, vol. 65, no. 6, p. 337, 2009.