

空中超音波触覚ディスプレイの可搬性の向上

Improvement of Portability of Airborne Ultrasound Tactile Display

○正 星 貴之 (名工大)

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

Recent researches show a wide application possibility of our product which produces tactile stimulation from a distance by utilizing airborne ultrasound, named as "airborne ultrasound tactile display." In this paper, a portable device of the tactile display is introduced. It is expected that more people can use it easily for wider variety of applications. The size of the device is $19 \times 19 \times 5 \text{ cm}^3$. 285 ultrasound transducers are used. In order to estimate the output force of the device, a simple model is developed and the output force is estimated to be 14 mN.

Key Words: Non-contact tactile display, Airborne ultrasound, Radiation pressure, Portability

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]. 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、離れた位置にある指に圧力を提示する. これまでに空中映像 [2] や空中インタフェース [3] に触覚フィードバックを付与してきた. また高い空間解像度を生かした、手掌部への運筆動作の提示 [4] や表面硬さ分布の非接触計測 [5] なども行っている. さらに、外部の研究グループも本手法を利用し始めている. Ciglar は触覚フィードバックのある楽器として用いており [6], また Alexander らはモバイルテレビと組み合わせることを提案している [7]. このように各方面で応用研究がなされるということは、本ディスプレイの需要があることを示唆している.

ところで本ディスプレイの従来デバイスは比較的大きいものであった. このため設置場所に制約があり、また他分野の研究者が「気軽に試す」ことも難しかった. これを小型・軽量化することができれば、様々な利用法を手軽に試せるようになり、応用がさらに広がることが期待できる.

本稿では、新たに開発した持ち運びが容易なデバイス (図 1) について報告する. そのサイズは $19 \times 19 \times 5 \text{ cm}^3$ であり、片手で持ち運び可能である. これは文献 [4] や文献 [8] で報告されているデバイスよりも小型である.

2. 空中超音波触覚ディスプレイの原理

2.1 音響放射圧

平面波が垂直に入射するとき、物体表面に生じる圧力 (音響放射圧) P [Pa] は次式で表される.

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

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 $\alpha=2$), I [W/m^2] は音響インテンシティ, c [m/s] は音速, p [Pa] は音圧 (実効値), ρ [kg/m^3] は媒質の密度である. 上式は、超音波の時空間パターンを制御することにより、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.

2.2 フェーズアレイ

単独の超音波振動子が生じる音響放射圧は微弱である. 手のひらで感じられる程度の出力を得るため、多数の超音波振動子を用いる. 各振動子の位相を適切に制御し、空中に単一

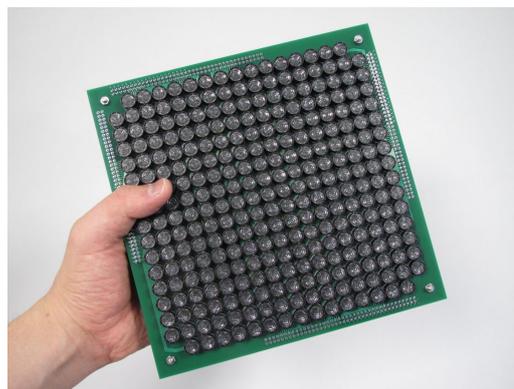


Fig. 1 Developed portable device ($19 \times 19 \times 5 \text{ cm}^3$).

の焦点を結ぶ. これまでに、384 個の超音波振動子を用いて 18 mN の力を提示できることが確認されている [4]. 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触覚を提示することができる.

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]. アレイの辺と平行な方向のメインローブの幅 (焦点径) w [m] は次式で与えられる.

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (2)$$

ここで λ [m] は超音波の波長, R [m] は焦点距離, D [m] は正方形アレイの一辺の長さである. この焦点径が本手法の空間解像度である. 上式から、アレイサイズと空間解像度がトレードオフの関係にあることが読み取れる.

3. 試作デバイス

3.1 概要

試作デバイス (図 1) は 2 枚の基板で構成されている. 1 枚は超音波振動子アレイ基板であり、もう 1 枚は FPGA とドライバ IC を搭載した制御基板である. どちらも $19 \times 19 \text{ cm}^2$ のサイズであり、ピンコネクタで互いに接続される.

アレイ基板には超音波振動子 (T4010A1, 日本セラミック株式会社製, 共振周波数 40 kHz, 直径 1 cm) 285 個が $17 \times 17 \text{ cm}^2$ の矩形領域内に配列されている. 式 (2) によるとアレイからの距離 20 cm における焦点径は 20 mm である.

Table 1 Specifications of previous and new devices.

	Previous	New
Transducer	384 pcs	285 pcs
Size	29×20×15 cm ³	19×19×5 cm ³
Weight	3.2 kg	0.6 kg
Phase data	Stored in flash memories	Calculated by FPGA in real time
PC interface	Digital I/O PC card	USB
Inter-board connection	Wirings	Pin connectors



Fig. 2 Previous (left) and new (right) devices.

制御基板には、FPGA がひとつと、4 チャンネルドライバ IC (L293DD, STMicroelectronics 製) 72 個が搭載されている。FPGA は PC と USB 経由で通信を行い、指令値 (焦点位置) にもとづいて各振動子の適切な位相を算出し、40 kHz 矩形波を駆動信号として生成する。駆動信号はドライバによって 24 Vp-p に増幅され、振動子へ送られる。

3.2 従来デバイスとの比較

従来デバイス [4] と新デバイスの特徴を表 1 に示す。新デバイスの容積は従来の 5 分の 1 になっている (図 2)。その大きな要因としては、フラッシュメモリを用いないこと、FPGA の数を減らしたこと、高集積のドライバ IC を採用したこと、が挙げられる。振動子数が 99 個少なくなっているが、これは FPGA の持つ I/O ピンの数によって決められたものである。振動子数が減少したことによる提示力の低下は評価しておくべき点である。さらに実測によらず評価することができれば、設計にも役立つ。そこで次節では振動子数と提示力の関係をモデル化し、新デバイスの提示力を見積もる。

3.3 提示力の見積り

現在のデバイスで採用している平面上に振動子を並べる方式では、中央に焦点を生成するとき、周辺部の振動子の寄与は小さい。その要因はふたつある。入射角と振動子の指向性である。超音波の入射角が θ [rad] のとき物体表面にかかる力への寄与は $\cos\theta$ 倍になる。また振動子の指向性関数 $d(\varphi)$ は次式で表される (円形ピストンからの音の放射)。

$$d(\varphi) = \frac{2J_1(ka \sin\varphi)}{ka \sin\varphi} \quad (3)$$

ここで J_1 は第一種一次ベッセル関数、 k [rad/m] は超音波の波数、 a [m] はピストンの半径 ($a = 4$ mm) である。

Table 2 Sum of contribution and output force.

Array size	17×17	18×18	20×20
Transducer	289 pcs	324 pcs	400 pcs
Sum of contribution	219.9	239.8	279.5
Output force (measured)	Not-yet	16 mN	18 mN
Output force (estimated)	14.2 mN	15.4 mN	-

各振動子の提示力への寄与を見積もる。厳密さには欠けるが、簡単のため寄与が $\cos\theta \times \{d(\varphi)\}^2$ で与えられ、提示力はその総和に比例すると仮定する。焦点位置をアレイ中央、焦点距離 20 cm に設定し、20×20 及び 17×17 アレイについて各振動子の寄与の総和を計算したところ、228.6 と 186.6 であった (表 2)。これは振動子の個数が 28 % 減少したとき提示力は 21 % の低下で済むことを表している。また 20×20 アレイは提示力 18 mN であったことから、開発した 17×17 アレイでは 14 mN 程度が期待される。なお、同様の計算によって 18×18 アレイの提示力の実測値 16 mN [1] が 4 % 程度の誤差で推定される (表 2) ことから、ここで行った見積りは妥当なものであると考えられる。

4. おわりに

本稿では、空中超音波触覚ディスプレイの持ち運びが容易なタイプのデバイスについて報告した。これによって他分野の研究者が本ディスプレイを試す機会が増え、応用分野が拡大されることを期待している。また振動子の個数と提示力の関係をモデル化し、開発したデバイスの提示力が 14 mN 程度となることを見積もった。

今後、本デバイスのソフトウェアを整備し、提示力を実機で確認する。その後、本デバイスを用いて新たな応用の可能性を探っていく予定である。

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] T. Hoshi, M. Takahashi, K. Nakatsuma, and H. Shinoda: Touchable Holography, Proc. SIGGRAPH 2009, Emerging Technologies, article no. 23, 2009.
- [3] 星貴之: 触覚フィードバックのある空中インタフェース, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 (ROBOMECH2011) 講演論文集, 2P1-O11(1-3), 2011.
- [4] 星貴之: 非接触触覚ディスプレイによる手掌部への情報提示, 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 732-733, 2011.
- [5] 藤原正浩, 中妻啓, 高橋将文, 篠田裕之: 超音波音響放射圧を用いた非接触表面硬さ分布計測法, 第 11 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 (SI2010) 論文集, pp. 145-148, 2010.
- [6] M. Ciglar: An Ultrasound Based Instrument Generating Audible and Tactile Sound, Proc. International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME 10), pp. 19-22, 2010.
- [7] J. Alexander, M.T. Marshall, and S. Subramanian: Adding Haptic Feedback to Mobile TV, CHI Extended Abstracts 2011, pp. 1975-1980, 2011.
- [8] 高橋将文, 篠田裕之: 分散型大口径超音波触覚ディスプレイの開発と評価, 第 11 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 (SI2010) 論文集, pp. 184-187, 2010.