

非接触インタラクションのための小型超音波集束装置

Compact Ultrasound-Focusing Device for Noncontact Interaction

星 貴之¹⁾

Takayuki HOSHI

1) 名古屋工業大学 若手研究イノベータ養成センター
(〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町, star@nitech.ac.jp)

Abstract: This paper introduces a compact device for noncontact interaction. It can push objects from a distance by utilizing focused ultrasound. The maximum output force at the focal point is 16 mN. The position of the focal point can be moved quickly and precisely. The device is small (19×19×5 cm³), light (0.6 kg), and compact so that one can pick it up with one hand and install it at various places. This easy-to-use device is expected to lead to a wide variety of application.

Key Words: Noncontact interaction, Ultrasound, Acoustic radiation pressure.

1. はじめに

物体と非接触でインタラクションするシステムを構築する際、物体自体にアクチュエータを組み込む方法と、外部から物体に力を加える方法が考えられる。前者ではアクチュエータの小型化や給電方法などが課題となる。一方、後者を採用する場合にはこれらの課題はなく、物体の選択の自由度もある。このようなシステムは近年いくつか報告されている。文献[1]では物体をエアジェットで3方向から押すことにより平面上での移動を実現している。ZeroN [2]はXYステージに搭載した電磁石によって磁石を内蔵した物体を浮上させ、三次元的に動かすことのできるシステムである。Ultra-tangibles [3]では四方から集束超音波を照射することで物体に力を加えている。時分割で切り替えることにより、複数物体を同時に移動させることもできる。

これらのシステムでは、センサやアクチュエータは環境に埋め込まれ固定されている。煩雑な構造や配線が付随しているためである。それらが制約となって、システムの移動や配置変更には手間がかかる。また他の応用を試そうとする場合にも、その煩雑さのために可能性が限られてしまう。もしアクチュエータを小型・軽量にすることができれば配置の自由度が上がる。さらに第三者が自分の目的のために気軽にそのアクチュエータを試すことも可能となり応用分野の拡大も期待できる。

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きた [4]。超音波振動子アレイの各振動子の位相を制御して超音波を集束させ、離れた位置から手指に触覚刺激を提示する。時間・空間解像度が高いという特長があり、非接触で 10 mN 程度の力を発生させることができる。

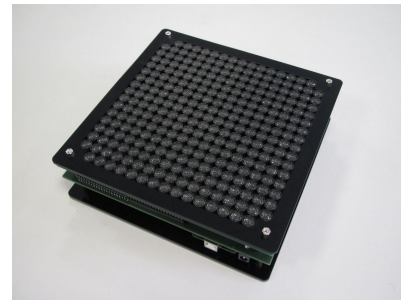


図 1: 開発した小型デバイス

本稿では新たに開発した小型超音波集束デバイス (図 1) について報告する。19×19×5 cm³のサイズに必要な回路が納められており、設置が容易である。また片手で持ち運ぶこともできる。これにより触覚提示以外の分野への応用が見出されることを期待している。

2. 空中における力発生の原理

2.1 音響放射圧

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

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

ここで α は物体表面の反射特性に依存する係数 (全反射の場合 $\alpha = 2$)、 E [J/m³] は音響エネルギー密度、 c [m/s] は音速、 p [Pa] は音圧 (実効値)、 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。

2.2 フェーズドアレイ

単独の超音波振動子が生じる音響放射圧は微弱である。数 10 mN 程度の出力を得るため、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 [4]。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

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。重量の合計は 0.6 kg である。

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。また発生力は最大で 16 mN（実測）である。

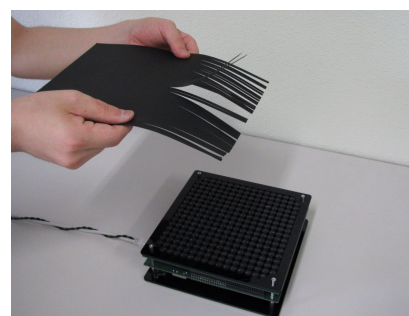
制御基板には FPGA がひとつと、4 チャンネルドライバ IC（L293DD、STMicroelectronics 製）72 個が搭載されている。FPGA は PC と USB 経由で通信を行い、指令値（焦点位置）にもとづいて各振動子の適切な位相を算出し、40 kHz 矩形波を駆動信号として生成する。駆動信号はドライバによって 24 V_{pp} に増幅され、振動子へ送られる。

4. インタラクション可能な物体

発生力が最大 16 mN であることから、本デバイスは柔軟あるいは軽量の物体とのインタラクションが可能と考えられる。例えば水面に軌跡を描いたり、煙の流れを変えたり、紙の小片を吹き上げたり、パーティクルの粗密を操作したり、泡を消したり、風船を運んだり、などである。非接触で対象表面を振動させることによる新しい計測法の研究がなされるなど、他分野の研究者が抱える課題を本デバイスによって解決できる可能性もある。



(a) 水面



(b) 紙片

図 2: 非接触インタラクションの例

5. おわりに

本稿では、新たに開発した持ち運びが容易なタイプの超音波集束デバイスについて報告した。非接触で 16 mN の力を空中で発生させることができる。これによって利用の自由度が上がり、また他分野の研究者が本デバイスを試す機会が増え、応用分野が拡大することを期待している。

今後、本デバイスのソフトウェアを整備し、希望があれば研究者に貸し出すなど、新たな応用の可能性を探っていく予定である。

参考文献

- [1] S. Iwaki, H. Morimasa, T. Noritsugu, and M. Kobayashi: Contactless manipulation of an object on a plane surface using multiple air jets, Proc. ICRA 2011, pp. 3257–3262, 2011.
- [2] J. Lee, R. Post, and H. Ishii: ZeroN: Mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation, Proc. UIST 2011, pp. 327–336, 2011.
- [3] M.T. Marshall, T. Carter, J. Alexander, and S. Subramanian: Ultra-tangibles: Creating movable tangible objects on interactive tables, Proc. CHI 2012, pp. 2185–2188, 2012.
- [4] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound, IEEE Trans. Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.