

触覚フィードバックのある空中インタフェース

Aerial Interface with Tactile Feedback

○星 貴之 (熊本大)

Takayuki HOSHI, Kumamoto Univ., star@kumamoto-u.ac.jp

This paper introduces the system which enables a user not only to interact with a computer by moving one's hand in midair but also to feel touch feedback on one's hand. It would be used as an interface with PCs, games, portable devices, digital signage, and so on. It is also promising in hospitals, food factories, and public spaces. The system consists of a PC, a hand tracker for input, and a tactile display for feedback. The hand tracker uses a depth camera and needs no markers attached on one's hand. The tactile display utilizes ultrasound to produce tactile feedback from a distance. Owing to them, a user does not need to put any devices on one's hand in using the system. The principles are described and the prototype system is presented.

Key Words: Aerial interface, Tactile display, Airborne ultrasound, Acoustic radiation pressure

1. はじめに

近年、空中で手指を動かすことによってコンピュータへの入力を行う技術が開発・発表されている[1][2][3][4][5]。小型携帯機器、エンターテインメント、デジタルサイネージ、そして非接触で衛生的という理由から医療現場や食品工場などへの応用が期待される。現状、入力が行われたことの利用者のフィードバックは、もっぱら視覚あるいは聴覚によって行われている。また文献[3]では携帯機器を持つ手に触覚（振動刺激）を提示している。より直観的なフィードバックを実現するには、入力を行う指に触覚を直接提示することが望ましい。

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[6]。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。本手法は超音波を用いているため、高い時間・空間分解能が見込まれる。また視界や手指の動きを妨げるような装置は必要なく、前述の目的に適している。

筆者はこれまでに、触覚フィードバックのある空中入力システムを構築している[7]。触覚提示は空中超音波触覚ディスプレイによって非接触で行われるが、手の位置計測は指に装着した赤外線 LED を赤外線カメラ 2 台で検出するという簡易的なものであった。位置計測に関しても装着物が不要であれば素手でシステムを利用することができる。

本稿では既報[7]に改良を加えたシステム (図 1) についての報告を行う。改良点は、深度カメラを導入してマーカーレスで位置計測を行う点である。以下、空中超音波触覚ディスプレイの原理と構築したシステムについて述べる。

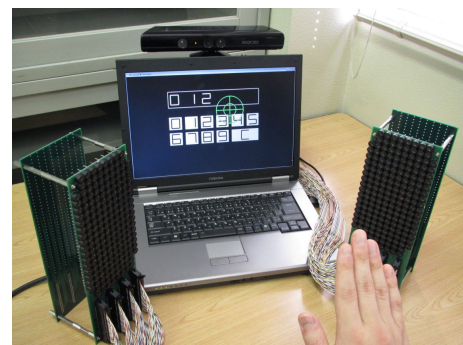
2. 空中超音波触覚ディスプレイ

2.1 音響放射圧

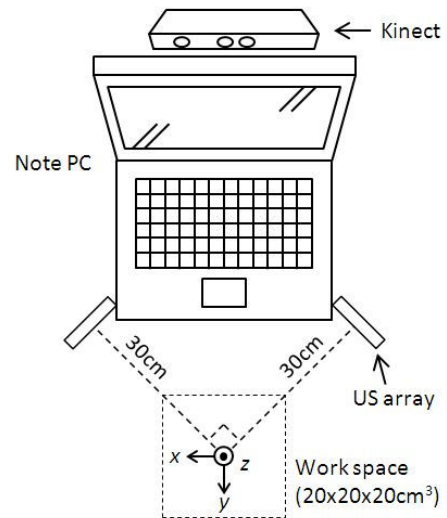
平面波を仮定すると、音響放射圧 P [Pa] は次式で表される。

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

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/m²] 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/m³] 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の提示が可能であることを示している。



(a) Photo.



(b) Illustration (top view).

Fig.1 Developed aerial interface system.

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。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、空中に単一の焦点を結ぶ (図 2)。これまでに数 100 個の超音波振動子を用いて、空気中で数 10 mN の力を提示できることが確認されている。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。

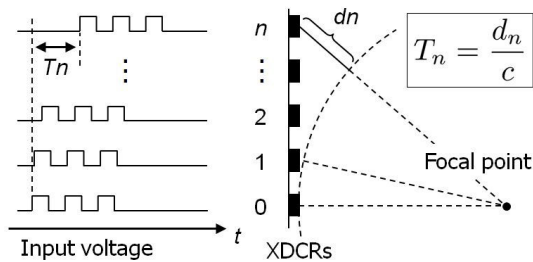


Fig.2 Phased array focusing. The time offset T_n [s] of the n -th transducer is determined based on the extra distance d_n [m] and the sound speed c [m/s].

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[6]。アレイの辺と平行な方向 (U、V 方向) のメインローブの幅 (焦点径) w_u [m]、 w_v [m] は次式で与えられる。

$$w_u = \frac{2\lambda R}{D_u}, \quad w_v = \frac{2\lambda R}{D_v} \quad (2)$$

ここで λ [m] は超音波の波長、 R [m] は焦点距離、 D_u [m]、 D_v [m] はアレイの U、V 方向の幅である。この焦点径が本手法の空間解像度である。

本システムでは、振動子アレイを PC の両隣に配置することを想定して、システム全体が幅を取りすぎないよう短冊形のものを使用する。振動子 192 個が高さ $D_u = 20$ cm、幅 $D_v = 10$ cm の領域に配列されている。周波数 40 kHz ($\lambda = 8.5$ mm)、焦点距離 $R = 30$ cm のとき、この振動子アレイが生成する焦点の高さ方向の径は $w_u = 2.6$ cm であるが、幅方向の径は 2 倍の $w_v = 5.1$ cm となり圧力が分散する。このように広がった圧力分布は指 1 本 1 本を狙う用途には適していないため、今回は手のひら、あるいは指 3 本程度を対象として触覚を提示する。

3. 空中インタフェースシステム

3.1 概要

素手で扱うことのできる、触覚フィードバックのある空中インタフェースシステムを構築した (図 1)。これは、前述の非接触触覚ディスプレイと、深度カメラ Kinect [5] を利用したハンドトラッキングを組み合わせたものである。

Kinect は、投影した赤外線パターンにもとづいて対象物体までの距離を算出する。本体から 60 cm 離れた位置で 1 mm 程度の分解能を持つ。今回は本体に最も近い点とその近傍を手として検出する。今後、手指のボーン推定を導入するなどしてロバスト性を高めることも考えられる。

作業領域は PC より手前の $20 \times 20 \times 20$ cm³ の空間である。幅と奥行き (X、Y 軸) を 0.5 cm 刻み、高さ (Z 軸) を 1.25 cm 刻みに離散化した座標値で表現し、その座標に超音波焦点を生成する。40 kHz 搬送波を 200 Hz 矩形波で振幅変調した振動刺激を提示する。また、刺激強度は PWM 変調により変えることもできるが、今回は一定 (常に最大) としている。

手の三次元位置に応じて PC 画面上のカーソルを動かし、クリック、ドラッグ、描画などに応じて触覚フィードバックを行う。図 1 の XZ 平面をバーチャル画面とし、手がそれよりも PC 側 ($y \leq 0$) にあるときを接触状態と判定する。手の奥行き方向の位置をカーソルの大小で表し、手前にあるとき大きく表示する。また XZ 平面へのカーソルの影も表示する。バーチャル画面上に手があるとき、カーソルと影は一致する。

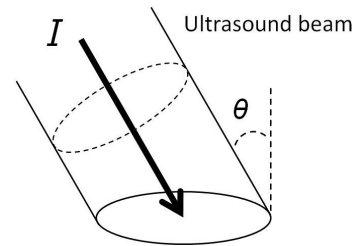


Fig.3 Sound intensity I of ultrasound beam at incident angle θ .

3.2 入射角による影響

本システムでは超音波の入射角について考慮する必要がある。以前の研究[6]では 1 枚の振動子アレイと手のひらが平行に向かい合う状況のみを扱っていた。一方、本システムでは直観的に操作できるように PC 画面を正面に配置し、2 枚の振動子アレイを画面の両隣に配置している。このようなアレイ配置のとき、超音波は手のひらに対して斜めに入射する。放射圧は音響インテンシティに比例するベクトルであるため入射角の影響を受ける (図 3)。入射角 θ [rad] のとき手のひらに発生する垂直方向の放射力 (放射圧を面積について積分したもの) F_θ [N] は、次式のように表される。ここで F_0 [N] は超音波が垂直に入射したとき ($\theta = 0$ rad) の放射力である。

$$F_\theta = F_0 \cos \theta \quad (3)$$

振動子アレイ 1 枚によって生じる放射力を電子秤で実測したところ 12 mN であった。本システムではアレイ 2 枚からの超音波が入射角 $\theta = \pi/4$ rad で入射するため、 2×12 mN $\times \cos(\pi/4) = 17$ mN の放射力が手のひらに対して垂直に働く。

3.3 実験：バーチャル画面の位置認識

バーチャル画面の位置の認識精度を調べた。被験者は男性 10 名 (右利き、21~30 才)。被験者には着座状態で右手を PC に向かって Y 軸に沿ってゆっくり進めさせ、触覚刺激を感じた (バーチャル画面に触れた) 位置で手を停止させた。その位置座標を記録し、次の試行へと進んだ。これを一人に被験者に対して 10 回繰り返した。視覚と聴覚の影響を抑制するため、被験者には閉眼させ、またヘッドフォンで十分な音量のホワイトノイズを聞かせた。

手がバーチャル画面を突き抜けた距離を図 4 に示す。各被験者について平均値、最大値、最小値がプロットされている。平均値は位置認識のオフセットを、最大値と最小値の差はそのばらつきを表す。オフセットは平均 17 mm 程度であった。このオフセットについては、個人ごとにあらかじめ測定しておき、補正することで低減が可能である。一方、ばらつきは平均 19 mm であった。これは、例えばバーチャル画面を多層に配置するなどの際、各層を個別に認識するためには 2 cm 程度の間隔が必要であることを示唆している。

4. おわりに

空中超音波を利用した非接触触覚ディスプレイと深度カメラを用いたハンドトラッキングを組み合わせることで、素手で扱うことのできる空中入出力システムを構築した。触覚提示用のデバイスも、位置検出用のマーカーも装着する必要がない。使用準備の手間がかからないため、数秒間だけ操作をしたい、作業中で手が汚れている、複数ユーザが交互あるいは同時に使う、などの状況でも使用可能である。評価実験により ± 1 cm の誤差で奥行きを認識できることが示された。

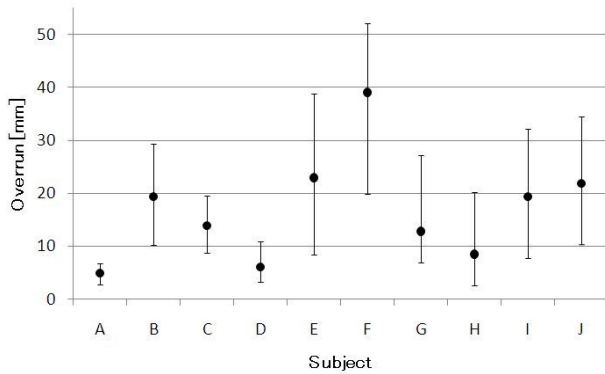


Fig.4 Experimental results. The black dot is the mean value for each subject, and the bar connects the maximum and minimum values.

また空中超音波触覚ディスプレイに関して、振動子アレイのサイズと空間解像度はトレードオフの関係にあること、および入射角が出力に影響することを述べた。これらは今回の目的に限らず、本ディスプレイの応用を進めていく上で注意すべき事項である。アレイの立体形状や空間配置などの最適化によって、解像度や出力を改善できる可能性もある。

今後は触覚ディスプレイの性能向上を目指す。具体的には出力の向上、作業領域の拡大、提示可能な刺激のバリエーションの増加、などである。また空中入出力システムについて触覚フィードバックが操作性や疲労感などに与える影響を調べていく予定である。

謝 辞

本稿で用いた超音波装置は Samsung Electronics Co., Ltd. との共同研究において製作したものである。また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）の助成を受けている。

文 献

- [1] WiimoteProject, <http://johnnylee.net/projects/wii/>.
- [2] aeroTAP, <http://www.aerotap.net/>.
- [3] T. Niikura, Y. Hirobe, A. Cassinelli, Y. Watanabe, T. Komuro, M. Ishikawa: In-air Typing Interface for Mobile Devices with Vibration Feedback, Proc. SIGGRAPH 2010, Emerging Technologies, article no. 15, 2010.
- [4] Mgestyk, <http://www.mgestyk.com/>.
- [5] Kinect, <http://www.xbox.com/kinect>.
- [6] 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.
- [7] 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.