

触覚フィードバックのある空中入力システムの開発

○星 貴之 (熊本大学)

Development of Aerial Input System with Touch Feedback

○Takayuki HOSHI (Kumamoto Univ.)

Abstract: This paper introduces the system which enables users not only to interact with a PC by moving their fingers in midair but also to feel touch feedback on their fingers. It consists of a PC, a hand tracker for input, and a tactile display for feedback. The tactile display utilizes ultrasound to produce tactile feedback from a distance.

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⁾。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へのユーザへ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いる。また文献⁴⁾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⁵⁾。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。

本稿では超音波触覚ディスプレイを用いて空中入力システムに触覚フィードバックを付与する試み(Fig.1)について報告する。

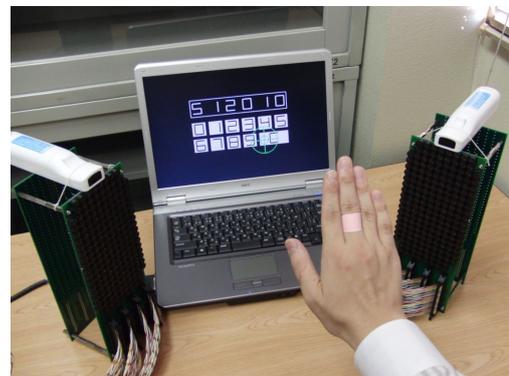
2. 空中超音波触覚ディスプレイ

2.1 原理

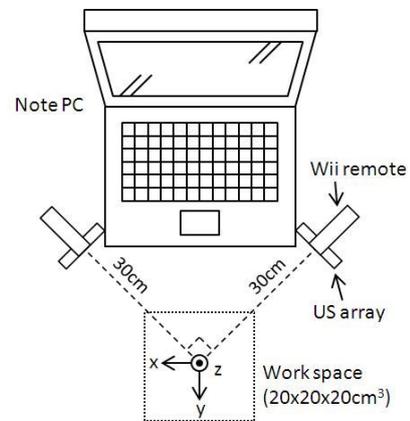
音響放射圧 P [Pa] は、式 (1) によって与えられる。

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

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] は超音波のエネルギー密度、 p [Pa] は音圧、 c [m/s] は媒質における音速、 ρ [kg/m³] は媒質の密度である。上式によると、超音波のエネルギー密度の時空間パターンを制御することにより任意



(a) Photo.



(b) Illustration (top view).

Fig.1 Developed aerial input system.

の圧力パターンが提示できる。これまでに数 100 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。

2.2 実装

超音波振動子アレイは、ノート PC の両隣に配置することを想定する。システム全体が幅を取りすぎないよう短冊形(幅 10 cm, 高さ 29 cm)とし、空中超音波送

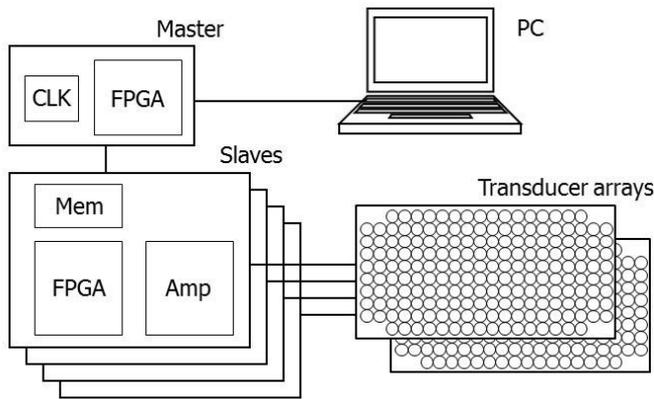


Fig.2 Block diagram of tactile display.

信用振動子（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 $10 \times 20 \text{ cm}^2$ の領域内に配列した（このことによる超音波分布への影響は 4 章で述べる）．今回はこのアレイを 2 枚用いる．

Fig.2 にシステム構成を示す．1 枚が振動子 96 個を駆動するスレーブ基板 4 枚と，それらを統括するマスタ基板 1 枚からなる．スレーブ基板上のフラッシュメモリには各振動子に関する位相と強度のデータが格納されている．位相は $0 \sim 2\pi \text{ rad}$ を 16 段階に離散化したもの，強度は 40 kHz 矩形波のデューティ比 $0 \sim 50\%$ を 8 段階に離散化したものである．超音波出力時，マスタが PC からの指令をスレーブにブロードキャストする．各スレーブではそのデータにもとづいて駆動波形が生成され，アンプを介して振動子を駆動する．アンプから出力される波形は振幅 24 Vp-p，周波数 40 kHz の矩形波である．現在は提示する圧力分布を単一焦点に限定し，各振動子から焦点までの距離から遅延すべき位相を計算している．また搬送波 40 kHz に対して矩形波による変調をかけることができ，その周波数は DC と， $1 \sim 1000 \text{ Hz}$ を対数軸上で 31 等分したものから選択可能である．

3. 空中入力システム

前述の触覚ディスプレイと三次元トラッキングを組み合わせ，触覚フィードバックのある空中入力システムを構築した（Fig.1）．

触覚提示領域は PC より手前の $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ の空間とした．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する．よって，計算すべき位相のデータ数は 384 振動子 \times 25,600 座標点である．今回は強度を最大に固定し，200 Hz 変調の触覚刺激を提示するものとした．指のトラッキングはマーカを用いて簡易的に実装した．2 台の赤外線カメラ（Wii リモコン，任天堂）を用いて，ユーザの中指

に装着した赤外線 LED の三次元位置を特定する．

指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，描画などに応じた触覚フィードバックを行う．Fig.1 の XZ 平面に PC 画面があるものとし，指がそれよりも PC 側（ $y < 0$ ）にあるとき入力が行われていると判定する．奥行き方向の指の位置はカーソルの大小で表し，手前にあるとき大きく表示する．またカーソルの XZ 平面への影も表示する．カーソルと影が一致する位置に PC 画面がある．

4. 設計上の留意点

理論上，超音波焦点と振動子アレイの径は反比例の関係にある．今回の振動子アレイの場合，30 cm 離れた位置に焦点を結ぶとき，高さ方向の焦点径は 2.5 cm であるが，幅方向には 2 倍の 5.0 cm となり圧力が分散する．指 1 本 1 本を狙う用途には適していないため，今回は指 3 本を対象としている．将来的に PC 本体に振動子アレイを搭載するなどの際には，分解能とサイズのトレードオフに注意が必要である．

また振動子アレイと指表面のなす角は発生する放射力（放射圧 \times 面積）に影響する．アレイと指表面が平行なときを $\theta = 0 \text{ rad}$ とすると，角度 θ のときの放射力は 0 rad のときの $\cos\theta$ 倍になる．一方，振動子は指向性を持つため，提示位置によっては必ずしも平行のときに最大の放射力が得られるとは限らない．今回は最適化を考えず，配置のしやすさから $\theta = \pi/4 \text{ rad}$ とした．

5. おわりに

空中入力システムに触覚フィードバックを付与した．現在は単一焦点，200 Hz 変調に限定しているが，位相・強度・変調周波数の制御によって時間・空間的なバリエーションを持たせることも可能である．

謝辞 本稿の内容は Samsung Electronics Co., Ltd. との共同研究によって得られた成果である．

参考文献

- 1) WiimoteProject, <http://johnnylee.net/projects/wii/>.
- 2) Mgestyk, <http://www.mgestyk.com/>.
- 3) aeroTap, <http://www.aerotap.net/>.
- 4) 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)
- 5) 星貴之, 高橋将文, 岩本貴之, 篠田裕之: 324 チャンネル超音波振動子アレイによる触覚提示, 第 9 回 SICE SI 部門講演会論文集, 959/960 (2008)