

空中超音波フェーズドアレイによる触覚ディスプレイ

Tactile Display Using Airborne Ultrasound Phased Array

星貴之¹⁾, 岩本貴之²⁾, 篠田裕之¹⁾

Takayuki HOSHI, Takayuki IWAMOTO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {star, shino}@alab.t.u-tokyo.ac.jp)

2) キヤノン株式会社
(〒146-8501 東京都大田区下丸子 3-30-2, iwamoto.takayuki951@canon.co.jp)

Abstract: In this paper, a tactile display is described which reproduces spatiotemporal pressure patterns in 3D space by using nonlinear phenomenon of ultrasound; acoustic radiation pressure. Combined with a 3D stereoscopic display and a hand tracking system, the tactile display enables us to “touch” virtual objects. The prototype consists of 324 pieces of 40 kHz ultrasound transducers and controls their phase and intensity individually. When it reproduces a single point at 100 Hz modulation frequency with 50 % duty cycle, the total output force within the focal region is 0.8 gf.

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

1. はじめに

我々は超音波の音響放射圧を利用した触覚ディスプレイの提案と開発を行っている。音響放射圧による触覚提示法は高い時間空間分解能が見込まれ、またピンなどのように提示力が皮膚との接触状態に依存することもない。これまでに、水中を伝搬する超音波を用いて焦点の二次元スキャンを行う同心多角形アレイ[1]と、空中を伝搬する超音波を用いて中心軸上に焦点を生成する同心円アレイ[2]が発表されている。

これらの発展形として、空中に超音波を放射する振動子を二次元的に配列した触覚ディスプレイを開発した(図1)。各振動子の位相と強度を個別に制御することで、三次元空間に任意の圧力パターンを生成する。振動子アレイは触覚提示領域から離れた場所に設置される。また、媒質である

空気と皮膚の音響インピーダンスが大きく異なるため、超音波は皮膚表面で反射される。したがって、ユーザは自由空間において何も装着することなく触覚を感じることができる。これは立体視ディスプレイやHMDによる映像提示に触覚フィードバックを付加する際に有用な特長である。

以下に本稿の構成を示す。まず第2章で触覚提示の原理について述べる。音響放射圧を紹介した後、空中超音波による提示力を見積もる。第3章では開発した触覚ディスプレイの構成を説明し、その出力を実測する。最後に第4章でまとめと今後の展望を述べる。

2. 原理

音響放射圧 P [Pa] は、式(1)によって与えられる[3]。

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

ここで α は対象物体の超音波反射特性に依存する係数、 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って、任意の圧力パターンを提示できることがわかる。

次に空中超音波によって提示できる力の大きさを試算する。ここでいくつかの粗い仮定をおくが、おおよその提示力を見積もる目的には十分である。超音波の放射には、

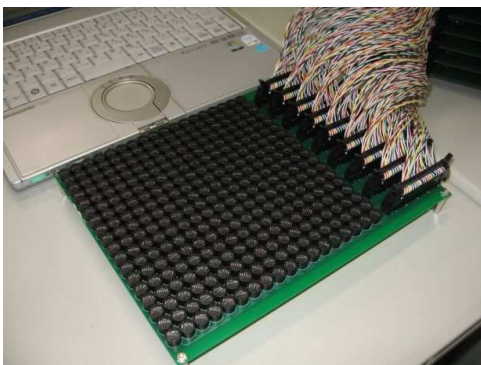


図1 超音波振動子二次元アレイ

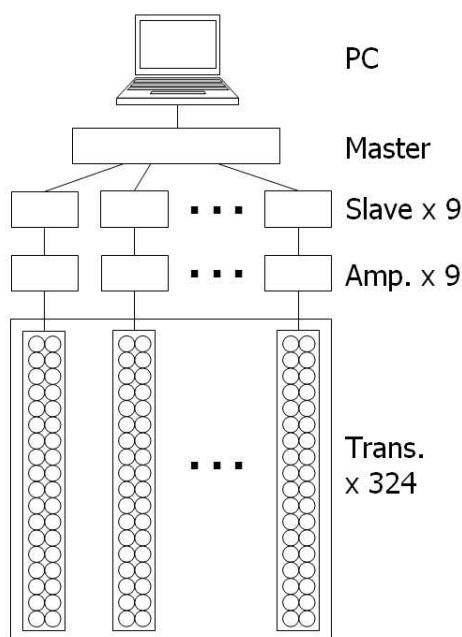


図2 システム構成

距離センサの空中超音波送信用振動子を用いる。 N 個の振動子から放射された超音波の位相が提示領域において揃い、単純に音圧の足し合わせが起こるとする。そのとき音圧の総和は、単一の振動子によって生成される音圧 p' [Pa] を用いて Np' と表される。また皮膚と空気との境界で超音波は全反射するものとする ($a=2.0$)。1 個の振動子が放射面から 300 mm 離れた点において生成する音圧は 20 Pa (実測) である。空気の密度は $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$ である。超音波の周波数を 40 kHz、空気中での音速 c を 340 m/s とすると波長はおよそ 8 mm である。全ての振動子から一つの焦点を結ぶように超音波を放射したとき、波長を直径とするおよそ 50 mm^2 の円状領域に集束し、その領域内において音圧は均一であるとする。324 個の振動子を用いた場合、式 (1) に基づいて計算すると、放射圧によって焦点に提示される力は 3.0 gf となる。

3. デバイス

超音波振動子アレイの写真を図 1 に示す。324 個の空中超音波送信用振動子 (日本セラミック株式会社製、共振周波数 40 kHz、直径 10 mm) を、 18×18 の二次元アレイ状に配列したものである。

図 2 にシステム構成を示す。PC が各振動子に関する位相と強度のデータをあらかじめ計算し、マスタを介してスレーブのメモリに書き込んでおく。超音波出力時にはその

データをもとに各スレーブが駆動波形を生成する。アンプから出力される駆動波形は振幅 24 Vp-p、周波数 40 kHz の矩形波である。現在は単一の焦点を生成するプロトコルを実装している。各振動子から焦点までの距離を用いて遅延すべき位相が計算される。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。また 40 kHz 搬送波に 100 Hz 矩形波による変調をかけることで振動刺激を生成している。将来的には変調周波数を可変とし、DC と、 $1 \sim 1000 \text{ Hz}$ を対数軸上で 31 等分した周波数を選ぶようにする予定である。

焦点をアレイの中心、高さ 200 mm の位置に設定し、100 Hz 変調をかけて強度最大で出力すると、焦点において手のひらで十分に触覚を感じることができた。このときのデバイスの出力を電子秤によって実測したところ、提示力は 0.8 gf であった。変調はデューティ比 50% で行っているため、DC 出力時の提示力は 1.6 gf 程度と推測される。

4. おわりに

自由空間に触覚を提示するため、各振動子を個別に駆動する二次元アレイを開発した。100 Hz 変調をかけた場合の提示力は 0.8 gf であった。

提示力が見積もられた値よりも小さい理由としては、超音波振動子の指向性および位相のばらつき、位相を離散化したことによる誤差、サイドローブへのエネルギーの分散などが考えられる。サイドローブの存在は、コントラストの低下や提示パターン of 不正確さの要因ともなる。現在、各振動子は位相のみ個別に制御されており、強度に関しては共通である。強度についても個別に制御し、提示パターンに対応した適切な重み付けをすることによりサイドローブを低減することが可能である。

今後、デバイスの詳細な性能評価を行うとともに、手のトラッキングなどと組み合わせることでバーチャル物体とのインタラクションを実装していく。

参考文献

- [1] 岩本貴之, 篠田裕之: 音響放射圧の走査による触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 11, no.1, pp. 77-86, 2006.
- [2] 立藪真理, 岩本貴之, 篠田裕之: 空中超音波振動子アレイによる触覚提示, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 講演論文集, 1P1-I06(1-4), 2008.
- [3] 超音波技術便覧 改訂新版, 日刊工業新聞社, 1966.