

# 空中超音波振動子アニュラレイによる触覚提示

## Producing Tactile Sensation with Airborne Ultrasound Annular Array

立園真理 准 岩本貴之 正 篠田裕之 (東京大学)

Mari Tatezono, Takayuki Iwamoto and Hiroyuki Shinoda  
The University of Tokyo

In this paper, we propose a tactile display that uses acoustic radiation pressure. We fabricated a prototype. The prototype display consists of an annular array, a 12 channel driving circuit, and a PC. The array has 91 pieces of 40 kHz ultrasound transducer. We measured the output force, the frequency characteristics and the spatial distribution of radiation pressure. We confirmed that the output force were 0.8 gf at the focal region and 2.9 gf just above the surface of the array. The frequency characteristics were fine up to 1 kHz. The spatial resolution was about 20 mm.

**Key Words:** tactile display, airborne ultrasound, acoustic radiation pressure

### 1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックや視覚ディスプレイの分野では、触覚との相互作用を取り入れた研究が増えている。しかし、最近の3次元インタラクションシステムでは触覚のフィードバックを与えていない。そこで、そのようなシステムに触覚のフィードバックを与える方法について考えた。

自由空間で触覚のフィードバックを与える方法としては、手に触覚ディスプレイを装着する方法と、触覚ディスプレイの位置をコントロールし、フィードバックが必要なときにだけ手とディスプレイを接触させる方法[1]がある。手にディスプレイを装着する方法としては、ImmersionのCyberTouch[2]がある。CyberTouchは、指先と手のひらに装着したバイブレータを振動させることによって触覚の提示を行う。しかし、この方法の場合には常に皮膚とディスプレイが接触しているために触覚のフィードバックが必要ない場合にも何かしらの触覚が生じてしまうという問題がある。

また、その他の方法として、エアジェット[3]がある。エアジェットは、細いノズルから空気流を噴射するシステムであり、自由空間に非接触で触覚のフィードバックを与えることができる。しかし、エアジェットは拡散するため、力を集束することが出来ない。また、帯域幅が限られている。

そこで我々は、非装着で空中の任意の場所に触覚を提示するディスプレイとして、超音波による音響放射圧を用いた触覚ディスプレイシステムを提案する。既存の研究として、超音波を伝搬する媒質に水を用いた触覚ディスプレイがある[4]。超音波を用いると、高い空間分解能と時間分解能で圧力分布をコントロールすることができる。

提案手法では、媒質として空気を用いることで、空中に圧力を発生させ、何も装着することなく、人間の皮膚に直接触覚のフィードバックを与えることができる。

本研究では、超音波振動子による同心円アレイを用いて試作システムを製作し、性能の評価を行った。

### 2. 原理

#### 2.1 音響放射圧

音響放射圧とは、超音波の伝播が物体によって遮られる時に物体の表面に生じる力のことであり、その大きさ  $P$  [Pa] は式(1)で表される。

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

ここで、 $\alpha$  は物体表面における超音波の反射特性に依存する定

数であり、完全吸収の時に  $\alpha = 1$ 、完全反射の時に  $\alpha = 2$  である。一般には  $1 < \alpha < 2$  の値を取る。また、 $E$  [J/m<sup>3</sup>] は超音波のエネルギー密度、 $p$  [Pa] は音圧、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] は媒質の密度、 $c$  [m/s] は媒質中での音速である。音響放射圧は超音波のエネルギー密度に比例するため、エネルギー密度の空間分布を制御することによって空間中の圧力分布を制御することが可能である。

超音波を集束させた場合、その焦点の径の大きさは波長のオーダーになると考えられるため、空間分解能を mm オーダーにすることができる。また、時間分解能も高く、1 kHz まで十分に提示可能になると予想される。

#### 2.2 総出力の試算

一般的な距離計測用の超音波振動子では、振動子から 300 mm 離れた点での音圧は 20 Pa である。ただし、振動子の中心周波数は 40 kHz、外径は 10 mm とする。

振動子を円形の振動板とみなすと、波長  $\lambda$  [m]、振動子からの距離  $z$  [m]、振動子の中心軸上での音圧  $p$  [Pa]、振動子の半径  $b$  [m]、円形ピストンの放射インピーダンスの実部  $r^A$  を用いて、振動子からの音響出力  $W$  [W] は、

$$W = \frac{\lambda^2 z^2 |p|^2}{2\pi \rho c b^2} r^A \quad (2)$$

と表される。また、 $b = 5 \times 10^{-3}$  [m]、 $\lambda = 8.5 \times 10^{-3}$  [m] の場合、 $r^A \approx 1$  となる。この時、 $z = 300 \times 10^{-3}$  [m]、 $|p| = 20$  [Pa]、 $\rho = 1.2$  [kg/m<sup>3</sup>]、 $c = 340$  [m/s] とすると、振動子 1 個あたりの音響出力  $W$  [W] は  $W \approx 0.0405$  となる。

そのため、振動子を 100 個使用した場合、全体の音響出力は

$$0.041 \times 100 = 4.1 \text{ [W]} \quad (3)$$

となる。振動子の総面積を  $S$  とすると、力の総和  $F$  は

$$\begin{aligned} F &= PS = \alpha \frac{4.1}{cS} S \\ &= 0.024 \text{ [N]} \\ &\approx 2.4 \text{ [gf]} \end{aligned} \quad (4)$$

となり、2.4 gf の力の提示が可能である。2.4 gf の力は、静的な圧覚を提示するには小さいが、変調により振動感覚を引き起こすには十分な出力である。

#### 2.3 周波数の選択

空間分解能は超音波の波長に比例するため、空間分解能を上げるためにはなるべく高い周波数を使用したほうが良い。しかしながら、空気中を超音波が伝播する際には空気の粘性による減衰が生じるため、使用できる周波数には上限がある。

空気の粘性による減衰を考えた時、エネルギー密度  $E$  [ $\text{J}/\text{m}^3$ ] は式(5)で表される。

$$E = \frac{p_0^2}{\rho c^2} e^{-2az} = E_0 e^{-2az} \quad (a \propto f^2) \quad (5)$$

ここで、 $a$  は空気の減衰定数、 $z$  は伝播距離、 $p$  [Pa] は  $z = 0$  の時の音圧、 $E_0$  [ $\text{J}/\text{m}^3$ ] は減衰が無い場合のエネルギー密度、 $f$  [Hz] は超音波の周波数である。空気の減衰定数は周波数のほぼ二乗に比例するとみなせるため、周波数が高くなるほど空気中での減衰が大きくなる。

40 kHz の超音波の空気の減衰定数は  $a = 1.0 \times 10^{-4}$  なので[5]、200 mm 伝播した時の 40 kHz の超音波のエネルギー密度  $E_{40k}$  [ $\text{J}/\text{m}^3$ ] は式(6)のように表される。

$$E_{40k} = E_0 e^{-2 \times 200 \times 10^{-4}} = E_0 e^{-0.04} \cong 0.96 E_0 \quad (6)$$

この減衰の様子をグラフに描くと、図 1 のようになる。横軸は周波数の対数をとったもの、縦軸はエネルギー損失率である。エネルギー損失率は、超音波の伝播距離が 200 mm の場合に、減衰の影響により失われたエネルギーと減衰の影響がない場合のエネルギーとの割合で定義した。

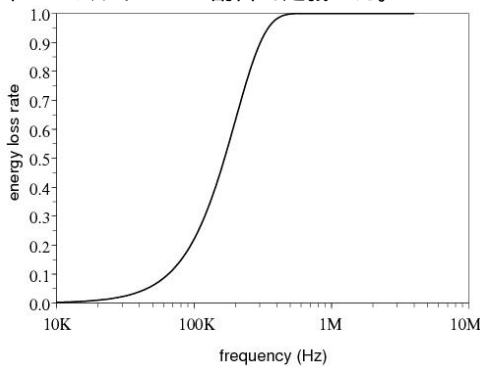


Fig.1 Energy loss rate

例えば、160 kHz の超音波の場合は

$$E_{160k} = E_0 e^{-2 \times 200 \times 4^2 \times 10^{-4}} \cong 0.53 E_0 \quad (7)$$

となり、200 mm 伝搬する間にエネルギーの 50 % 程度が空気中で失われる。

今回の実験には、入手が容易で、減衰の影響が少ないという理由から、共振周波数が 40 kHz の振動子を用いた。40 kHz の振動子を用いた場合には、空間分解能は 1 cm 程度と予想される。

#### 2.4 素手への触覚の提示

2 つの媒質の境界でのエネルギーの反射率  $R^2$  は、それぞれの媒質の固有音響インピーダンスを  $z_1$ 、 $z_2$  とした時、

$$R^2 = \left| \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right|^2 \quad (8)$$

で表わされる。空気の固有音響インピーダンスは 0.0004

[ $\text{Mkg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ ]、皮膚の固有音響インピーダンスは 1.52 [ $\text{Mkg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ ] であるので

$$R^2 \cong 0.9989 \quad (9)$$

となり、皮膚に透過するエネルギーは全体の 0.1 % 程度であることが分かる。40 kHz の超音波の波長は 8.5 mm なので、約 1  $\text{cm}^2$  に集束していると考えれば、式(3)より

$$4.1 \times 0.001 = 0.0041 \text{ [W]} \\ = 4.1 \text{ [mW]} \quad (10)$$

となり、皮膚に透過するエネルギーは 4.1 [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ] であることが分かる。日本超音波学会規格によると、皮膚に透過しても安全なエネルギーは 240 [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ] であるため[6]、この安全基準も十分に満たしている。

また、水の固有音響インピーダンスは皮膚とほぼ同じであるため、媒質として水を用いた場合には超音波のエネルギーが皮膚に透過して危険である。そのため、先行研究[4]では皮膚と媒質の間に反射膜を挟む必要があった。それに対し、今回はほとんどのエネルギーが皮膚表面で反射されるため、反射膜を使わずに素手で放射圧を感じる事が出来る。また、完全反射体とみなせるため、超音波のエネルギーを効率よく圧力として取り出せる、という利点もある。

### 3. 試作システム

図 2 に試作システムの写真を示す。試作システムは、PC、デジタル I/O (株式会社インターフェース CSI-291144)、駆動回路、超音波振動子アレイで構成されている。駆動回路では、信号の増幅と直流成分のカットを行っている。PC から位相を制御した信号を出力し、駆動回路でそれを増幅する。増幅された信号が超音波振動子に伝えられ、超音波を発生する。

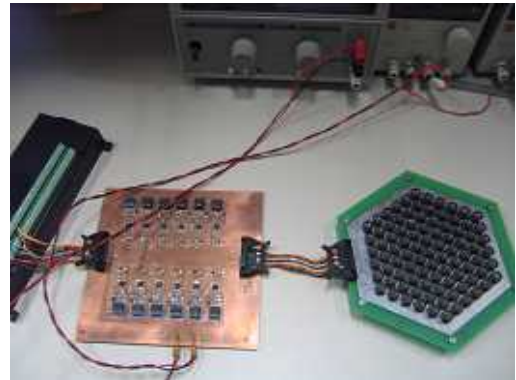


Fig.2 The driving circuit and the annular array.

超音波振動子アレイによって触覚ディスプレイを作製すると、振動子を個別に駆動することによって空間中の圧力分布を自由に作る事が出来る。今回の実験では、超音波振動子アレイを用いてどの程度の出力が出せるかを調べるために、一番出力が大きくなる場合、すなわち圧力がある 1 点に集中した状態を実現できるシステムの製作を行った。

圧力を 1 点に集中させるためには、全ての振動子から放射された超音波が、ある 1 点で位相が揃うように駆動する必要がある。今回は簡単のためアレイは同心円アレイとした。アレイは振動子 91 個を用いて、12 チャンネルで構成されている。今回使用した超音波振動子は日本セラミック株式会社の T4010A1 であり、共振周波数は 40 kHz、外形は 10 mm である。

同心円アレイは図 3 のようになっている。(a)はアレイの超

音波発生面である。裏面は(b)のようにになっている。

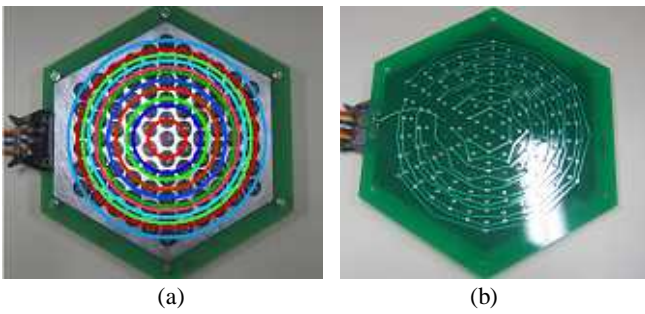


Fig.3 Annular array: (a) front side (b) back side

#### 4. 試作システムの評価

試作システムを定量的に評価するため、音響放射圧の総出力、周波数応答、空間分解能を調べた。周波数応答と空間分解能の測定の際には、開口 2 mm のマイクを用いた。また、空間分解能の測定の際には、マイクは精度 0.1 mm の XYZ ステージに取り付けて移動した。

##### 4.1 総出力

まず、総出力の測定を行った。焦点を振動子から 220 mm の高さに設定し、焦点位置と放射面近傍での出力を電子秤を用いて測定した。秤の上 220 mm の高さに、超音波発生面が秤の方を向くようにしてアレイを設置し測定を行った。その時の入力信号は 40 kHz の矩形波とし、変調はかけずに行った。その結果、焦点位置では 0.8 gf、放射面近傍では 2.9 gf の出力が出ることが分かった。

放射面近傍での測定値は、試算値の 2.4 gf に近い。また、放射面近傍での値に比べて焦点位置での出力が小さくなっていることも分かる。一般的な理由としては、集束効率の影響と減衰の影響とが考えられるが、(2.3)で述べたように、40 kHz の超音波の場合、伝搬距離 200 mm においては、減衰の影響はほとんど無いと思われる。

##### 4.2 周波数応答

次に、変調周波数の値を変化させた時の放射圧の周波数応答について調べた。この時、焦点は  $x = 0, y = 0, z = 200$  mm に設定し、変調周波数を 20 Hz ~ 2 kHz の範囲で変化させて焦点位置での放射圧を測定した。測定したデータについて 2500 点サンプリングでフーリエ変換を行い、変調周波数の成分の振幅について調べた結果は図 5 のようになった。横軸は周波数、縦軸は放射圧の強度を 20 Hz の時の値を基準としたデシベル値で表わしたものである。

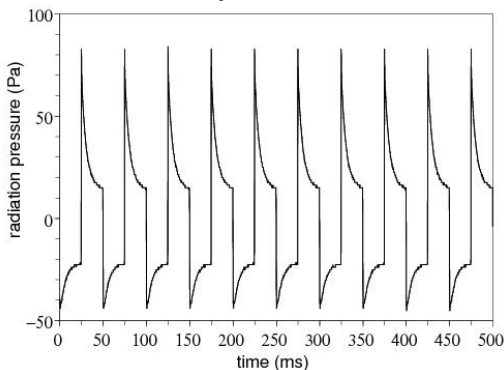


Fig.4 Radiation pressure

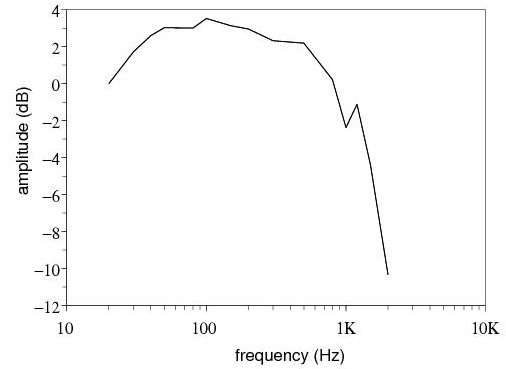


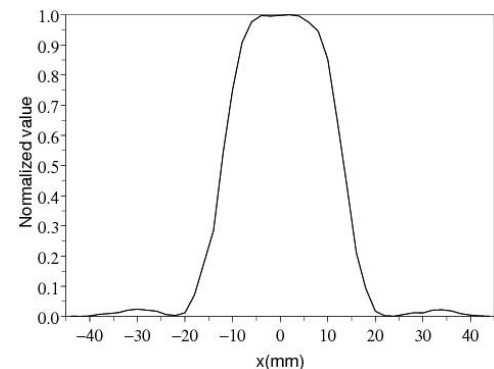
Fig.5 Frequency characteristics

また、図 4 は 20 Hz の矩形波によって変調をかけた放射圧の波形を表している。横軸は時間、縦軸が放射圧を示している。グラフを見ると、変調をかけた放射圧は矩形波に近い形をしていることが分かる。

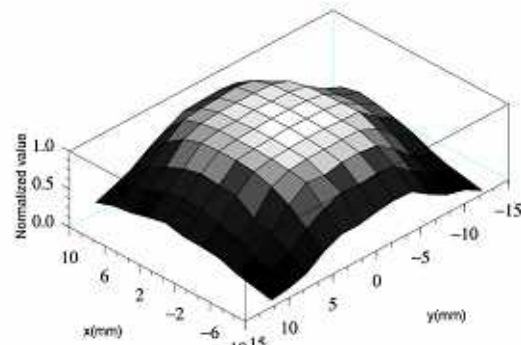
図 5 を見ると、変調周波数 20 Hz ~ 1 kHz の間では、音響放射圧の強度は比較的フラットであり、最大値と最小値の幅が 6 dB 程度であることが分かる。この結果から、作製したディスプレイは触覚の提示に必要な 1 kHz までを提示可能であると考えられる。

##### 4.3 空間分解能

次に、焦点が  $x = 0, y = 0, z = 250$  mm の場合について、音響放射圧の 1 次元分布と 2 次元空間分布を測定した。



(a)



(b)

Fig.6 Spatial distribution of radiation pressure: (a) 1-D distribution (b) 2-D spatial distribution

その結果は図 6 のようになった。(a)は  $y = 0, z = 250$  mm に固

定し、x 方向について  $-44 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$  の範囲で  $2 \text{ mm}$  刻みで変化させた時の放射圧の分布、(b)は  $z = 250 \text{ mm}$  に固定し、x 軸方向、y 軸方向共に  $2 \text{ mm}$  刻みで変化させた時の放射圧の分布を表している。変調周波数は  $100 \text{ Hz}$  であり、測定したデータについてサンプリング周波数  $25 \text{ kHz}$ 、 $2500$  点サンプリングでフーリエ変換を行い、変調周波数成分の振幅について調べた。(a)の縦軸及び(b)の z 軸は測定された放射圧の強度を表し、最も強度が高い点の値で正規化を行った。

強度がピークの半分になる境界を集束径と定義すると、集束径が  $20 \text{ mm}$  程度であることが分かる。

## 5. 応用

次に、試作システムを用いたデモシステムの作製を行った。

### 5.1 目的

4 章の評価により、試作システムを用いて空中で触覚の提示が行えることが確認された。そこで、試作システムと 3 次元の映像物体を組み合わせたインタラクションシステムの作製を行うことを考えた。今回は、手の位置を計測し、手が仮想の物体に触れている時のみディスプレイを駆動して触覚を生じさせるシステムを作製した。

### 5.2 作成したデモシステム

今回はカメラによって手の位置を計測し、それを用いて CG とのインタラクションを行うデモシステムの作製を行った。デモを行っている様子を図 7 に示す。使用した装置は 3 章で述べた触覚ディスプレイの試作システムと、Web カメラ (Logicool Qcam Pro 9000) である。

このデモシステムでは、横方向から 1 台のカメラで振動子アレイの焦点付近を撮影している。そして、カメラで取得した画像を PC に取り込み、それに対して背景差分を行うことで手の位置を求めている。

また、CG 画面上には 2 つの物体を表示する。1 つは自分の手を表す丸い物体、もう 1 つが触る対象の物体である。カメラの画像から求めた手の位置に合わせて丸い物体を上下に動かす、手と対象の物体が触れている時のみ振動子を駆動して触覚のフィードバックを与えている。

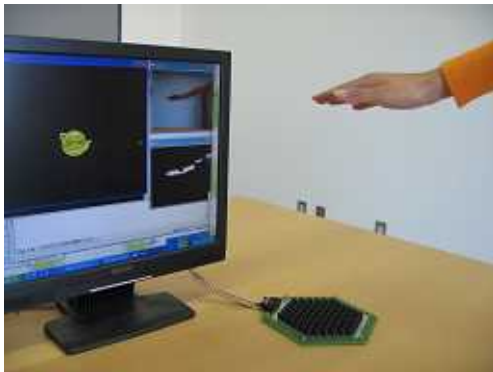


Fig.7 Demonstration system

## 6. まとめと考察

本稿では、超音波による音響放射圧を用いた触覚ディスプレイを提案した。

この触覚ディスプレイは、超音波振動子 91 個からなる同心円アレイを用いて、非接触で触覚を提示することができる。出力はアレイから  $220 \text{ mm}$  の距離において  $0.8 \text{ gf}$ 、放射面近傍では  $2.9 \text{ gf}$  出すことができる。集束径は  $20 \text{ mm}$  程度で、 $1 \text{ kHz}$

まで提示可能である。定常的に放射圧を出力した場合は、力が弱く、触覚を生じさせることは難しいが、変調をかけることによって十分に触覚を提示することが出来る。集束径は  $20 \text{ mm}$  であるため、指のどの部分に当たったか、どんな触感のものかなど、細かなことを表現することは難しいが、視覚ディスプレイなどと組み合わせて触覚のフィードバックを与えるのには十分役に立つと考えられる。

また、試作システムを用いて簡単なデモシステムの作製も行った。今回はカメラを使って手の位置を計測し、CG 画面内で物体に触れた時のみ触覚のフィードバックを与えるというシステムの作製を行った。非接触で手の位置を取得するためにカメラを用いたが、その場合、カメラのフレームレートによって提示できる周波数や、対応できる手の速度に制限が生じることが分かった。

今後は、アレイを 2 次元化することによって空間中任意の場所に対して圧力分布を生成することを目指す。

## 文 献

- [1] Sato, K., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S., "Electrotactile Display for Integration with Kinesthetic Display," In Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2007), pp. 3-8, 2007.
- [2] Immersion Corporation: CyberTouch. <http://www.immersion.com/>
- [3] Suzuki, Y., Kobayashi, M., "Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, pp. 44-47, Issue 1, 2005.
- [4] 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.
- [5] H.E. Bass, L.C. Sutherland, A.J. Zuckerwar, "Atmospheric absorption of sound: Update," Journal of the acoustical society of america, Vol. 88, No.4, pp. 2019-2021, 1990.
- [6] 辻本文雄, "超音波医学辞典," 秀潤社, 2000.