

超音波触覚ディスプレイによる触覚特性の解明

○岩本 貴之 (東京大学)

篠田 裕之 (東京大学)

Investigating Human Tactile Perception with Ultrasound Tactile Display

○Takayuki Iwamoto (The University of Tokyo)

Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo)

In this paper, we propose a new tactile display which produces spatio-temporal stress patterns on a 2-D plane. The first prototype of the display consists of an octagonal arrangement of ultrasound linear arrays. Each array has 40 pieces of PZT transducer. The 320 channel driving circuit was designed to produce 1000 frames of 2-D stress patterns per second. The 2-D stress patterns can cover 1cm by 1cm area. Simulation studies were carried out to examine the adequacy of the proposed design. It showed that the octagonal arrangement can produce a well-focused force spot to be scanned in the display area. The results were satisfactory compared to other polygonal arrangement.

1. はじめに

人間が触覚によってどのような物理量を取得しているか、という問題は、自然科学の問題としても、またセンサなどへの応用上の問題としても重要である。この問題に関して様々な研究が行われているが、未だ解明されていない部分が多い。一方で、視覚や聴覚に関しては、これまでに、その知覚特性に関して多くのことが解明されてきた。視覚や聴覚の特性の研究において大きな役割を果たしてきたのが、十分な能力を持った提示装置である。同様に触覚の解明においても、高精細な触覚ディスプレイは強力なツールとなることが期待される。

従来からある機械式の触覚ディスプレイ[1]のように、多数のアクチュエータを用いて刺激子を駆動する方法では、十分な空間分解能、時間特性を得ることが難しく、また、皮膚との接触状態による提示力の変化などの問題があった。我々は、このような問題を解決し、皮膚表面での応力分布を制御する手法として、超音波の音響放射圧による触覚提示を提案している[2][3]。音響放射圧による触覚提示手法は、様々な応力の時間空間パターンを皮膚表面上に容易に正確に生成可能であると考えられる。またこの触覚提示手法は通常の物体との接触では生じにくい皮膚変形パターンを提示することも可能である。

これまでの研究において、我々は、1次元リニアアレイを用いた試作システムを製作し、この提案手法の検証を行った。試作システムにおいて、3 MHz の超音波を用いた際に焦点径は1 mm となること、1 kHz までの周波数特性が良好であることを確認した。また、皮膚表面の1次元軸上において、様々な時空間パターンの触覚刺激を提示可能であることも確認できた。

本稿では、この原理を拡張した2次元走査型触覚ディスプレイを提案し、その詳細について論じる。2次元走査型触覚ディスプレイの概念図を図1に示す。振動子アレイから放射される超音波は焦点を形成し、皮膚表面において2次的に走査される。皮膚に超音波が透過することのないように、皮膚表面には超音波反射膜[2][3]を装着する。この超音波反射膜はポリウレタンフィルムとシリコンゴムでできており、非常に薄く、柔軟である。

本章の最後に、本稿の構成について説明する。第2章では、提案手法、および2次元走査型ディスプレイの設計の詳細について述べる。第3章では、振動子配置に関して行ったシミュレーション結果について論じる。試作システムの詳細に関しては第4章で述べる

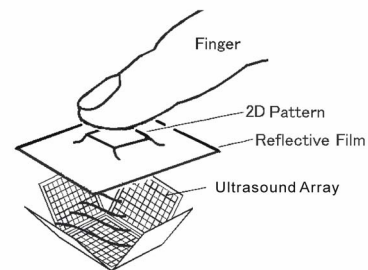


Figure 1. Concept of the two dimensional scanning tactile display.

2. 原理

2.1. 音響放射圧による触覚ディスプレイ

超音波の音響放射圧の触覚提示への利用は Dalecki ら[4]

により試みられている。Dalecki らの実験は、水槽底部に固定された固定焦点の超音波振動子から放射される集束超音波を、対象皮膚表面に貼付けた超音波反射体に照射し、照射する超音波強度やパルス幅などを変化させ、触覚の知覚特性を調べたものである。超音波の音響放射圧を触覚提示に用いる利点は、十分な空間解像度が得られること、周波数特性が触覚提示に必要と考えられる 1 kHz までの周波数において良好であること、などが挙げられる。

超音波による音響放射圧の強度 P は、以下の式により与えられる。

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

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 は超音波のエネルギー密度、 p は音圧、 c は媒質における音速、 ρ は媒質の密度である。音響放射圧の強度は、超音波のエネルギー密度に比例するため、超音波を集束し焦点を形成することで、その焦点において空間的に局在化された力を提示することが可能である。

皮膚上に提示する力の時間空間パターンを制御するには、様々な方法が考えられるが、我々は、超音波の焦点を人間の触覚よりも十分に高速に走査し、各刺激点での焦点の滞在時間を変えることにより、皮膚表面上に応力分布を生成する方法を提案している。Lamore ら[5]は、通常は知覚不可能である 1 kHz~2kHz の振動ピンの振幅変調により、その変調成分を触覚刺激として与えられることを示したが、我々の手法においても同様に 1 kHz 以上のフレームレートで皮膚表面上の応力分布パターンを更新する。この提示手法が有効であることは 1 次元振動子アレイを用いた試作機により確認している。

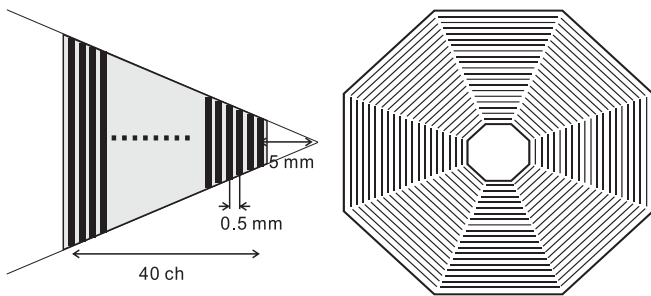


Figure 2. Octagonal arrangement of eight linear arrays. Left: A schematic drawing of a single linear arrays. Right: An arrangement of the eight units of the linear arrays.

2.2. 超音波振動子アレイの構造

音響放射圧による触覚提示手法を 2 次元に拡張するためには、単純には格子状の振動子アレイを用いればよい。しかしながら、格子状の振動子アレイは現状では製作が難しく、また、配線数が膨大になるなどの問題がある。そこで、我々は、

格子状の振動子アレイではなく、通常のリニアアレイを同心八角形状に配置することで、2 次元走査型触覚ディスプレイの実現を試みる。図 2 に提案する八角形配置振動子の概要を示す。全体は 8 個のリニアアレイにより構成され、ひとつのリニアアレイ上の PZT の素子数は 40 枚である。このような構成にした場合、格子状アレイとは異なり、通常に入手可能なリニアアレイの組み合わせでよく、また、配線する素子数も減らすことができるという利点がある。

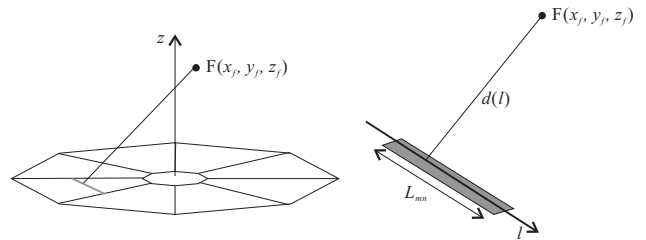


Figure 3. Parameters in equation (1). Left: A PZT piece on the octagonal arrangement of the linear array components. Right: The n th PZT piece on m th array component ($m = 1, 2, \dots, 8, n = 1, 2, \dots, 40$).

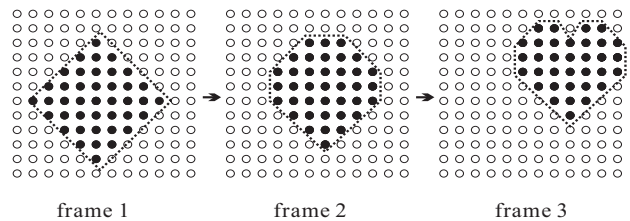


Figure 4. Method for producing spatio-temporal patterns of tactile stimuli. Several points are selected as stimulation points and the display produces the radiation pressure on the points. The frame rate is 1 kHz.

2.3. 2 次元触覚刺激パターンの時間空間制御

本節では、2.1 でも述べた、2 次元触覚刺激パターンの時間空間制御の詳細を説明する。まず、提案する八角形配置振動子における各振動子の振動位相の計算方法に関して説明する。2.1 で述べたように、我々の手法では、単一の焦点を走査することで、2 次元の触覚刺激パターンを生成する。そのため、与えられた焦点座標において、全ての振動子からの超音波の位相が揃うように、各振動子の振動位相は制御される。 m 番の振動子アレイ ($m = 1, 2, \dots, 8$) 上の n 番目の振動子 ($n = 1, 2, \dots, 40$) から放射された超音波の、焦点 $F(x_f, y_f, z_f)$ における位相 $\phi_{mn}(x_f, y_f, z_f)$ は、各振動子を線音源とみなすと以下の式で計算される。

$$\phi_{mn}(x_f, y_f, z_f) = \arg \left(\int_0^{L_{mn}} e^{j2\pi \frac{d(l)}{\lambda}} dl \right) \quad (2)$$

ここで、 L_{mn} は振動子の長さ、 λ は超音波の波長、 $d(l)$ は振動子上の点 l から焦点までの距離である。(図 3 参照)

2次元のパターンは、1フレームに提示する点を複数選ぶことで形成される(図4参照)。また、各点における強度は、その点に放射圧焦点が滞在する時間で変調される。これまでの研究[2][3]において、3 MHzの超音波を用いた場合、その焦点の径は1mmになることがわかっている。そのため、1cm²の2次元パターンを形成する場合、100点を提示する必要がある。また、不要な高周波の振動を避けるために、その100点は1kHzのフレームレート、つまり1msの内に提示されなくてはならない。すなわち、提示する点は10μsごとに更新される。

この提示手法は実際の試作機では以下のように実装された。まず、触覚刺激提示面上の128×128点を提示点の候補とし、それらの座標に関して、あらかじめ、位相 $\phi_{mn}(x_f, y_f, z_f)$ を全て計算し、各振動子の駆動の際の遅延時間を求めておく。求めた遅延時間を、システムの初期化の際に、駆動回路上のメモリに書き込んでおく。触覚提示を行う際には、10μsごとに、提示すべき座標点をPCから駆動回路上のCPLDに与え、CPLDは、各振動子の遅延時間をメモリから読み出し、駆動信号を生成する。

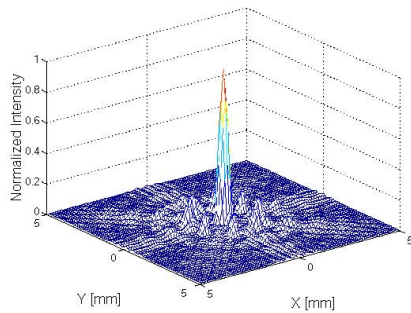


Figure 5. Simulation results for the octagonal arrangement. X axis and Y axis represent XY coordinates ranging from -5 mm to 5 mm. Z axis represents the normalized intensity of the radiation pressure.

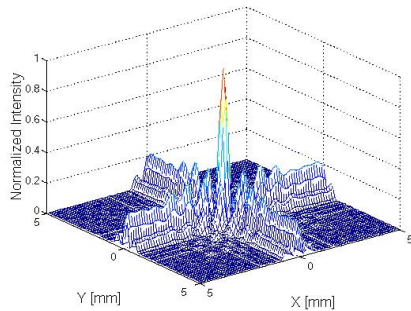


Figure 6. Simulation results for the square arrangement. X, Y, and Z axes are the same as Fig. 5.

3. シミュレーション

提案する八角形配置の有効性をシミュレーションにより検

証した。シミュレーションにおいては、八角形配置の中心軸上に焦点を形成した際の放射圧の強度分布と他の多角形配置によるものとの比較が行われた。

計算をする際、個々の超音波振動子は、近似的に、点音源が線状に配置されたものとみなした。八角形配置は図2にあるような形状とした。単一のリニアアレイ上の振動子の個数は40個であり、最も短い振動子の長さは3.3mmで中心軸上から5mmの距離を離して置かれた。また、焦点は中心軸上、距離30mmの位置とした。他の多角形配置に関しても同様の条件とした。

以下に結果を示す。図5が八角形配置の場合の結果である。x軸、およびy軸は焦点を含む平面上の座標を表し、範囲は-5mmから5mmである。z軸は、焦点における強度で正規化した放射圧強度を表している。図5を見ると、焦点付近にサイドローブが見られる。八角形配置の場合、サイドローブにおける強度は、焦点における強度の13.1%であった。次に、他の多角形配置に関しての結果を示す。図6は、四角形配置の時、図7は12角形配置の時のシミュレーション結果である。また、図8は、八角形配置において焦点座標を中心からずらし、 $(x_f, y_f, z_f) = (5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$ とした時のシミュレーション結果である。ただし、図8においては、x軸、y軸の範囲は、-10mmから10mmとした。

結果を定量的に比較するため、様々な多角形配置について、サイドローブの高さをグラフにプロットした。図9にそれを示す。横軸は、多角形の辺の数を、縦軸は焦点における強度に対するサイドローブの強度をそれぞれ示している。グラフに見られるように、多角形の辺の数が増すほど、サイドローブの高さは小さくなる。一方で、駆動回路などを含めたシステム全体は、チャンネル数の増大とともに複雑化する。我々は以上を踏まえて、2次元ディスプレイの最初のプロトタイプとして、八角形状の振動子配置を選んだ。

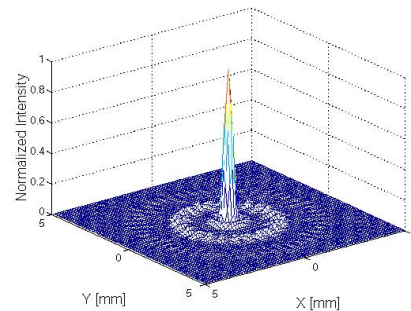


Figure 7. Simulation results for the dodecagonal arrangement. X, Y, and Z axes are the same as Fig. 5. The intensity at the second peaks is lower than that in Fig. 5.

4. 試作システム

第2章で述べた原理を用いて、2次元走査型放射圧触覚ディスプレイを試作した。試作システムは、PC、駆動用ボード、八角形配置リニアアレイからなる。本章では、試作システム各部の詳細について説明する。また、その試作システムを用いて行った予備実験の結果についても簡単に述べる。

4.1. リニアアレイ

1つのリニアアレイ（日本電波工業株式会社製）は40チャンネルのPZT素子からなる。これらのPZTは0.5mmピッチで配置されている。最も短い素子と最も長い素子の長さは、それぞれ、3.3mm、19.9mmである。PZT素子の共振周波数は3MHzである。PZTは、キュリー温度を超える温度において、分極が消失する。そのため、放熱対策として、各PZT素子は、金属ブロック上に取り付けられている。

合計8個のリニアアレイは、図10にあるように、水槽底面に八角形上に配置されている。各振動子は、指向性を考慮し、底面に対して20°の角度をなすように取り付けられている。水槽の幅は80mmである。

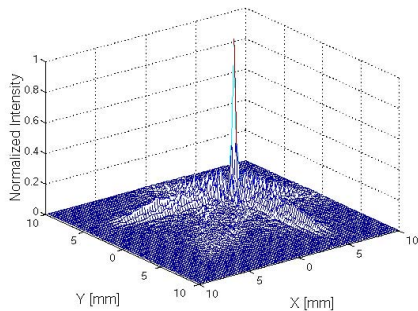


Figure 8. Simulation results for the octagonal arrangement. Note that XY coordinates are ranging from -10 mm to 10 mm. Z axis represents the normalized intensity of the radiation pressure. The coordinate of the focal point was (5mm, 5mm, 30mm).

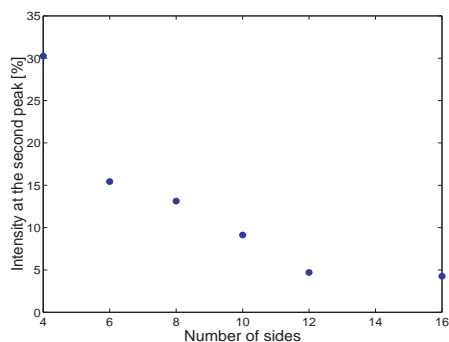


Figure 9. Intensities at the second peak for polygonal arrangements. The horizontal axis represents the number of sides of the polygon. The vertical axis represents the intensities at the second peaks.

4.2. 駆動回路

試作システムのブロック図を図11に示す。各駆動用ボード上には、CPLD、メモリ、40チャンネルの増幅回路が搭載されている。CPLDは、各素子駆動用の遅延信号生成を行う。遅延信号の生成は4bitのカウンタによって実装されている。信号増幅部分には、高耐圧MOSFET (supertex社製)を用いている。

2.3で述べたように、メモリには、焦点の座標とそれに対応する各素子の遅延時間をテーブル化し、初期化の際に記憶させる。駆動の際には、10μsごとに、提示すべき座標点をPCから駆動回路上のCPLDに与える。CPLDは、40チャンネル分の遅延時間情報をメモリから読み出し、駆動信号を生成する。

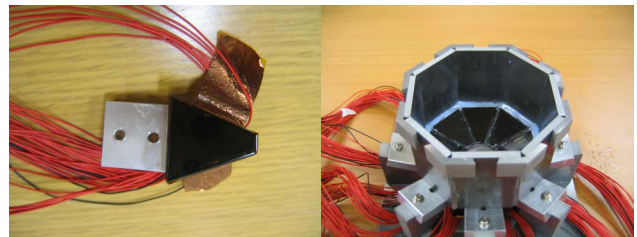


Figure 10. Linear arrays used in the prototype system. Left: One unit of the linear array. It includes 40 pieces of PZT. Right: Linear arrays arranged at the edge of the octagon. Each linear array is fixed at the bottom of the water bath.

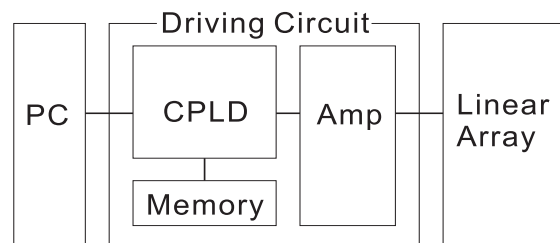


Figure 11. Block diagram of the system. A driving circuit board includes a CPLD, a memory, and 40 channel amplifiers. The memory is capable of storing 4 bit data for the delay times associating with 128 by 128 coordinates.

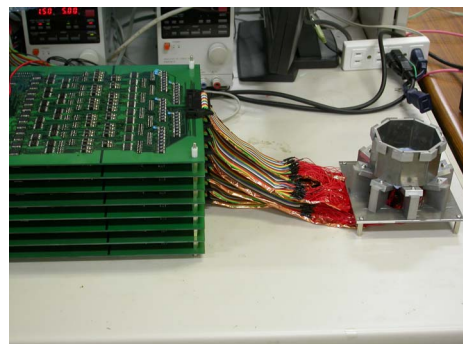


Figure 12. A photograph of the prototype system. Eight linear arrays are connected to eight driving circuit board. The driving circuit is connected to

the PC with USB cable.

4.3. 試作システム

図 12 は、試作システムの駆動回路、および振動子アレイ部分である。駆動回路は USB2.0 を介して PC と接続されている。駆動用ボードは、各リニアアレイに 1 つずつ、合計 8 枚のボードが用いられている。

予備実験として、各リニアアレイ上の 40 チャンネルのうち 16 チャンネルのみ（すなわち、全体で 320 チャンネル中 128 チャンネル）を用いて放射圧の生成を行った。駆動する素子は、八角形の中心に近い方から 16 チャンネルが選ばれた。駆動波形は、最大値を 35 V、最小値を 0V とする、3MHz の矩形波であった。駆動信号は 100 ms 間与えられた。焦点は八角形中心、水槽底部より 30mm の位置とした。図 13 に結果を示す。焦点における放射圧の影響で、水槽中心から水が吹き上がる様子が観察された。

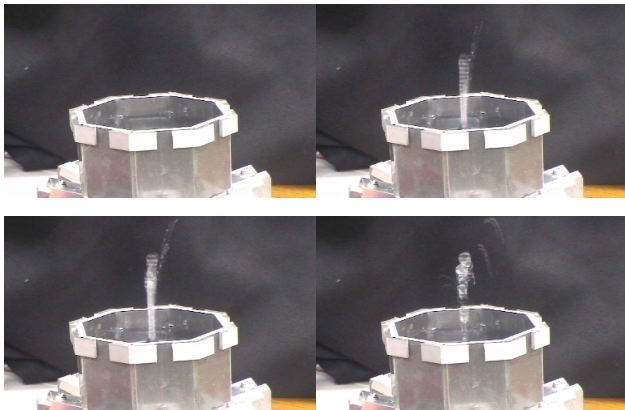


Figure 13. A jet of water created by the prototype tactile display.

5. おわりに

本稿で我々は、2次元走査型放射圧触覚ディスプレイを提案し、その設計の詳細を述べた。また実際に試作システムを駆動し、集束超音波の焦点において十分な放射圧が得られていることが確認された。今後は、空間分解能や提示力の定量的な評価、および 2次元時間空間パターン触覚刺激の提示実験を行う。

謝辞

本研究の一部は文部省科研費補助金（特別研究員奨励費 15-11561）によっている。

参考文献

[1] Ian R. Summers and Craig M. Chanter: "A broadband tactile array on the
第 22 回センシングフォーラム講演論文集, pp.321-325, 2005

fingertip," *Journal of Acoustical. Society of America.*, Vol. 112, No. 5, Pt. 1, Nov. 2002

- [2] T. Iwamoto and H. Shinoda, "High Resolution Tactile Display using Acoustic Radiation Pressure," in *SICE Annual Conference 2004*, 2004.
- [3] T. Iwamoto and H. Shinoda, "Ultrasound Tactile Display for Stress Field Reproduction -Examination of Non-vibratory Apparent Movement-", *Proc. of World Haptics Conference 2005*, pp. 220-228, 2005
- [4] D. Dalecki, S.Z. Child, C.H.Raeman and E. Carlstensen, "Tactile Perception of Ultrasound," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97 (5), Pt.1, pp. 3165-3170, May 1995.
- [5] P. J.J. Lamore, H. Muijser and C.J. Keemink, "Envelope detection of amplitude-modulated high frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79 (4), pp. 1082-1085, April 1986.