

分散型大口径超音波触覚ディスプレイの開発と評価

○高橋 将文 , 篠田 裕之

Development of Large Aperture Airborne Ultrasound Tactile Display

Using Distributed Array Units

○Masafumi TAKAHASHI, and Hiroyuki SHINODA

Abstract: Airborne Ultrasound Tactile Display (AUTD) can provide tactile sensation in midair without any equipment attached on your hands. However, its generating power is weak and the “arbitrary point” is small. To avoid these weaknesses of AUTD, we try to realize a large aperture of array by synchronized multiple AUTD units. In this paper, we describe the detail of our method.

1. 導入

近年空中立体映像に対する関心が高まってきており、従来の特殊なメガネ等を装着する方法のみならず裸眼で実現する技術が発表、商品化されつつある。また、GrImage[1]のようにマーカを用いないハンドトラッキングシステムによって空中に投影されたバーチャル物体と直接インタラクションを行うシステムも発表されている。しかしながら空中映像に触れても触覚は生起されないため、視覚情報と触覚情報の乖離によって違和感が生じる恐れがある。そこでこれら空中映像ディスプレイに触覚フィードバックを付加することによって、インタラクションシステムの操作性や臨場感のさらなる向上が可能であると考えられる。

バーチャル物体とのインタラクションに適応可能な触覚提示手法としては、手に振動子やモータで駆動するベルトなどのデバイスを装着する方法[2][3]や外骨格型アームによって触力覚を提示する手法[4]などが挙げられるが、前者は常にデバイスが皮膚に触れることによる不必要な触覚が生じるという問題があり、後者はデバイスによって使用者の行動範囲が制限されるという問題がある。それに対し我々はそれら問題を解決可能な触覚提示手法として、空中に非接触かつ自由度の高い触覚を提示することが可能な超音波の音響放射圧を利用した空中超音波触覚ディスプレイの提案と開発[5]を行ってきており、またそれを利用した空中映像とのインタラクションシステムの発表[6]を行っている。しかしながら現状では提示可能な力は 1.6×10^{-2} N 程度と非常に弱いためヒトの手のひらにおいて最も閾値の低い 200Hz の振動としてしか提示出来ず、また提示範囲も水平方向に 20 cm 四方、高さ方向に 40 cm と限られている。焦点の位置はその有効範囲の中で 1cm おきにしき設定できず、またその焦点の更新頻度は秒間 10 回程度までである。この出力が向上し 200Hz 以外の振動での触覚提示も可能となれば、高周波振動(200~300 Hz)によって発火する触覚受容器のパチニ小体と低周波振動(30~50 Hz)で発火するメルケル触盤との組み合わせにより多彩な触覚の提示が可能になると期待される。有効範囲の拡大はデバイスによる使用者の行動範囲の制限を取り払うという目的のために改善が不可欠であり、焦点位置解像度の高精度化ならびに焦点更新頻度

の向上によって、現状の点的な触覚の提示から手のひら全体で感じるような面的な触覚の再現の道が開かれる。そこで本稿ではより高い自由度の触覚提示を実現するための空中超音波触覚ディスプレイの改良案について述べる。

2. 原理

超音波触覚ディスプレイでは音響放射圧と呼ばれる超音波の非線形現象を利用している。これは媒質中を伝搬している超音波を遮った時、物体表面に圧力場が生じるという現象である。音響放射圧 P [Pa]は次式のように表すことができる。

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

ここで E [J/m³]は超音波のエネルギー密度、 p [Pa]は音圧の実効値、 ρ [kg/m³]は媒質の密度、 c [m/s]は媒質中の音速、 α [-]は超音波の反射条件によって 1~2 の値をとる定数である。式(1)は、超音波のエネルギー密度の空間分布を制御することで任意の圧力分布が提示できることを示しており、超音波触覚ディスプレイでは

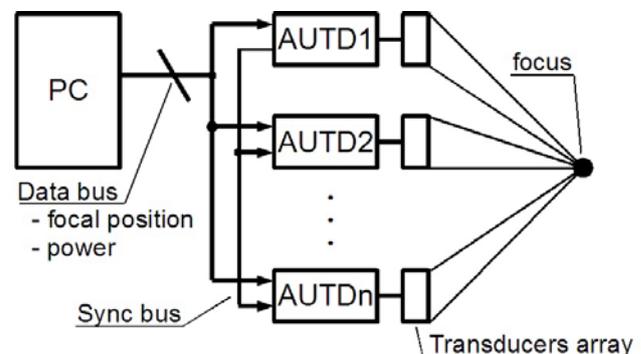


Fig.1 Concept image of Distributed Array Units. The information of focal position and stimulating power are broadcasted by PC and received by AUTD units. All units cooperate to make one focus. The power of stimulus is strengthened by increasing the number of AUTD units, and the effective range is adjusted by modifying the arrangement of units.

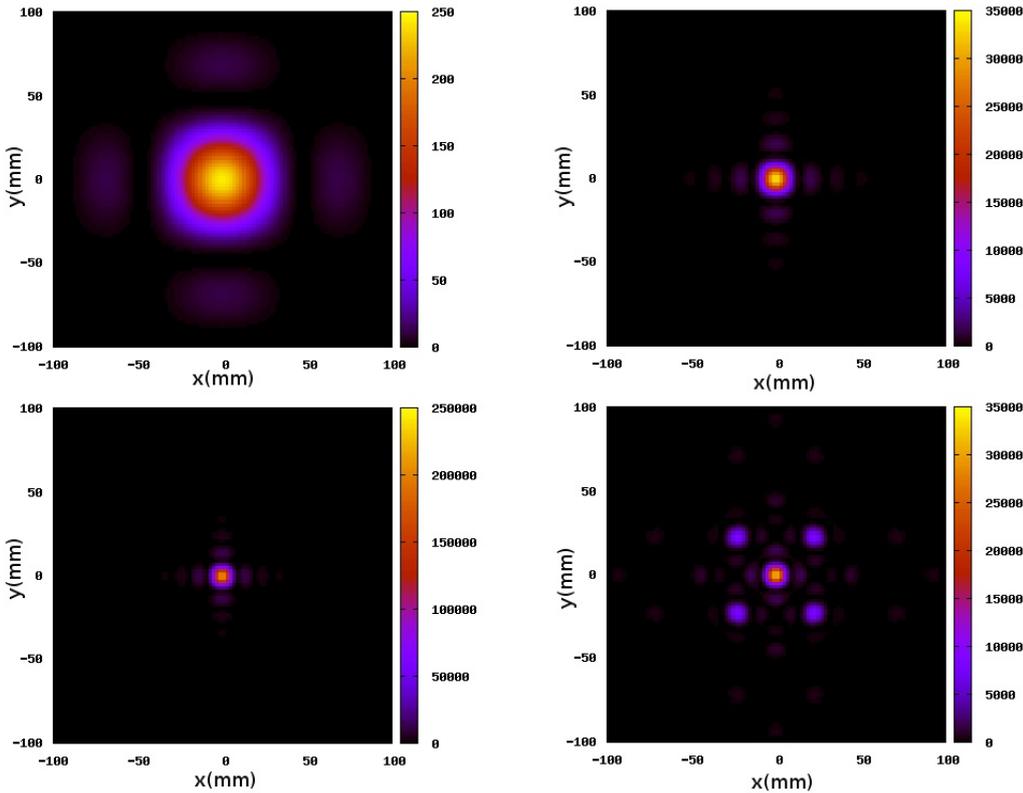


Fig.2 The upper is the result of 324ch, while the lower is of 10000ch. Transducers are arranged in the grid of spacing of 10 mm and focal point is $(x, y, z) = (0, 0, 1000)$ [mm], the center of arrays.

Fig.3 The upper is the result of close-packed array (622 = 3844ch) and the lower is of checker flag array (3888ch) in which 182 = 324ch units are arranged in checker flag pattern. Transducers of each unit are arranged in grid of spacing 10mm and focal point is $(x, y, z) = (0, 0, 1000)$ [mm], the center of arrays.

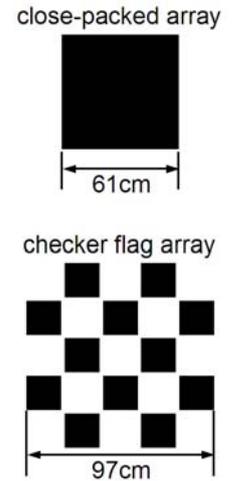


Fig.4 Illustration of close packed array (upper) and checker flag array (lower). In black area, Transducers are arranged at interval of 1cm.

フェーズドアレイを用いた制御をおこなっている。ここでフェーズドアレイによって生じる式(1)中の音圧の実効値 p は次式のように表される。

$$p(\mathbf{r}) = p_0 \left| \sum_{n=1}^N D(\mathbf{r}'_n) A(\mathbf{r}'_n) S(\mathbf{r}'_n) \cos(\theta_n) \exp(j\Theta(\mathbf{r}'_n) - j\varphi_n) \right| \quad (2)$$

ここで \mathbf{r} は三次元位置、 N は振動子の総数、 \mathbf{r}_n と φ_n はそれぞれ n 番目の振動子の位置と位相差であり、 \mathbf{r}'_n は $\mathbf{r}'_n = \mathbf{r} - \mathbf{r}_n$ なる振動子から見た相対位置、 θ_n は物体表面と \mathbf{r}'_n の間の成す角度を表す。 $D(\mathbf{r}_n)$ は振動子の指向性を表す関数である。 $A(\mathbf{r}_n)$ は超音波の伝搬に伴う減衰を表す関数である。これは媒質に依存し周波数の二乗に比例する定数 β を用いて $A(\mathbf{r}_n) = \exp(-2\beta|\mathbf{r}_n|)$ と表す事ができ、空中超音波触覚ディスプレイで用いている空中を伝搬する 40kHz の超音波の場合、その値は 100db/100m である事が知られている[8]。 $S(\mathbf{r}_n)$ は波面の広がりによるエネルギーの拡散を表す関数である。 $\Theta(\mathbf{r}_n)$ は振動子からの距離による位相遅れであり、 $\Theta(\mathbf{r}_n) = 2\pi|\mathbf{r}_n|/\lambda$ と表す事が出来る。

3. 提案手法

式(2)より、提示力を向上させるには個々の振動子が発するエネルギーを向上させるか振動子の数を増やせばよいということが分かる。各振動子の出力を増大させることも重要な技術開発項目であるが、ここではまず振動子の数を増やす方針をとる。この手法では振動子アレイの開口面積が広がることにより提示可能領域の拡大も見込まれるのであるが、現状で 324ch の振動子

を同時に駆動しておりこれ以上の振動子を一枚の基板上に実装するのは困難である。そこで今までのものと同等あるいはより小さい超音波触覚ディスプレイユニットを多数作成し、PC との間それらユニットを取りまとめるコントローラを配置するという方式を考える。このとき各ユニット間は必ずしも密接している必要はなく、ある程度自由な配置を行うことで提示可能領域の拡大を図ることが可能であると期待される。本研究では素子の配列が空間的に一様でないことの影響を検討するために数値シミュレーションを行った。

式(2)に基づいて数値シミュレーションを行った結果を以下に示す。Fig.2 は格子間隔 1cm で 17cm 四方(324ch)の振動子アレイと、99cm 四方(10000ch)の振動子アレイについて、振動子アレイから 1m 離れた位置に焦点を形成した時の比較を示している。前者のアレイは先行研究で利用したアレイであり、1 m の距離は想定される提示可能範囲外にある。この図から現在の振動子アレイではこの距離に焦点を結ぼうとしても焦点が広がってしまうのに対し、99 cm 四方のアレイを作ることによって超音波の波長(約 8 mm)程度の大きさにまで焦点を小さくすることが出来る事が分かる。

一方 Fig.3 はほぼ同程度の数の振動子を密に配置した場合(3844ch, 61 cm 四方)と市松模様状に配置した場合(3888ch, 97 cm 四方)の比較である。市松模様状アレイは 324ch のアレイユニットを Fig.4 に示すように並べている。市松模様状アレイの方が開口径を大きくなるために提示可能範囲が大きくなる事が予想され、シミュレーション結果も中心の焦点径が小さくなっている事

Table 1 REQUIREMENT SPECIFICATION FOR NEW AUTD.

	requisite	limitation	target value
Power	-	0.6 N	0.1~0.2 N
Effective range	1.0m square, 2.0m height	-	1.0m square, 2.0m height
Focal Resolution	2mm	-	0.5mm
Focal Refresh rate	1kHz	40kHz	2kHz

からそれを支持していると言える。しかしながら比較的大きなサイドロープを生じてしまう事から、実際に使用するにはサイドロープの触覚に対する影響を十分考慮する必要がある。

また、焦点位置解像度の高精度化と更新頻度の向上を実現するため、それらが現在の値に制限される原因について考える。従来型の空中超音波触覚ディスプレイでは振動子を駆動する信号の生成に SDRAM メモリを用いたルックアップテーブル方式を採用している。これは起動時に PC から送信された全ての焦点位置に対応する各振動子の位相と強度の情報を SDRAM メモリに書き込み、焦点を出力する際には PC から送信された焦点の位置に対応する各振動子の位相と強度の情報を読み出して振動子の駆動信号を生成するというものである。この方式ではメモリの容量によって設定可能な焦点の位置が制限され、また各振動子の位相情報を逐次的に読み出すため更新頻度に制限がかかってしまっている。よってルックアップテーブルを用いず空中超音波触覚ディスプレイ上の FPGA 内で実時間で駆動信号を計算する事によって焦点制御に関する性能の向上が見込まれる。ここで位相の算出に必要な計算を以下に示す。

1. 次式のように表される焦点位置 r_f と振動子の位置 r_i の間の距離 d^2 を計算する。この計算は FPGA 内の加算機と乗算機を用いると 1 クロックで完了する。

$$d^2 = |r_f - r_i|^2 \quad (3)$$

2. 開平法により距離 d を計算する。開平法による計算では所要時間は桁数に等しくなるため d が 16bit の整数値である場合 16 クロックで計算が完了する。
3. 振動子の位相 ϕ_n は距離 d を超音波の波長 λ で除算した余りによって得られる。ここで $\lambda/2^n$ を距離の単位とする事により、距離 d の下位 n bit を取り出す事により計算することなく位相を得る事が出来る。

この計算には振動子 1 つ当たり 20 クロックが必要となる。ここで現在使用している FPGA の動作周波数は 25.6MHz に設定してあるため、20 クロックはおおよそ 0.8 μ s 以下となり、324 個の振動子全てについて逐次的に計算しても 25ms 以下となる。この事から焦点位置の更新頻度は秒間 4000 回程度となり、また計算を並列的に行う事で更なる向上が可能である。焦点位置の解像度は距離の単位 $\lambda/2^n$ によって定まり、現在使用している 40kHz の超音波の場合 $n=4$ とするとその値はおおよそ $\lambda/2^4 \approx 0.5$ mm となる。

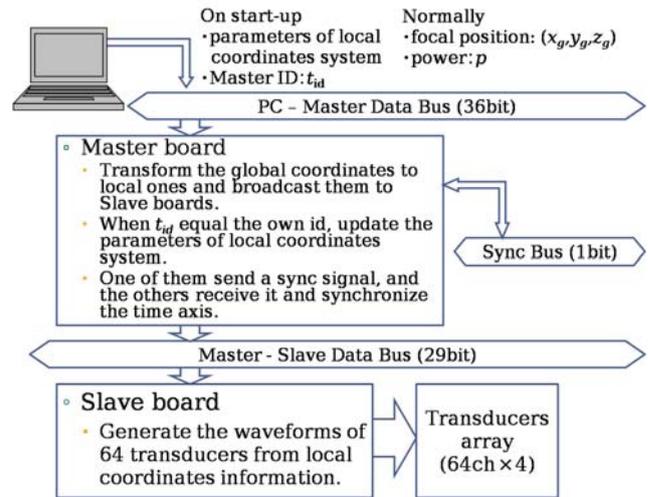


Fig.5 Architecture of new AUTD unit. Each unit contains a Master board, 4 Slave boards and 256 transducers.

4. 要求性能

ここでは提案手法によって実現される空中超音波触覚ディスプレイが目指す出力・有効範囲・ならびに焦点位置の解像度と更新頻度について Tab.1 述べる。

まず出力に関しては安全性の観点から制限が加えられる。皮膚中に浸透させてよい超音波のエネルギーは 100mW/cm² [7] 乃至 240mW/cm² [8] と言われており、これは音響放射圧に換算して 0.6 N から 1.4 N となる。これは現在の空中超音波触覚ディスプレイの出力の 40~90 倍であり、一先ず現在の 10 倍程度である 0.1~0.2 N を目指し、その結果から適宜増減するものとする。効果範囲については一人の人間が拘束を感じることなく作業が出来る空間をカバーするものとし、水平方向に 1 m 四方、高さ方向に 2 m 程度を目指す。焦点位置の解像度はヒトの指先の二点弁別閾である 2 mm 以下であることが必要とされ、0.5 mm を目指すものとする。またヒトの触覚の周波数帯域がおおよそ 0~500 Hz であることから焦点位置の更新頻度は 1 kHz 以上であることが求められ、2 kHz を目指すものとする。

5. 試作

これらの指針に基づき、新たな空中超音波触覚ディスプレイの試作を行った。Fig.5 に新型試作機の設計を示す。各ユニットは PC との通信と他のユニットとの通信を担当する 1 枚の Master board と、振動子の駆動信号の生成・増幅を担当する 4 枚の Slave board からなっている。各ユニットは独自の ID とローカル座標系を持ち、PC から ID と共に通達される原点と x,z 軸の方向を元にローカル座標系を修正する。出力時には Master が PC から通達されるグローバル座標系での焦点位置を自らのローカル座標系での位置に修正し、同じく PC から送られた強度情報とともに Slave に通達する。Slave は各振動子の位置と通達された焦点位置の間の距離から振動子の位相情報を計算し、PWM によって強度を表現した駆動信号を生成する。駆動信号は Slave board 内のアンプによって 24V にまで引き上げられ、各振動子を駆動する。ここで各ユニットが担当する振動子の数は

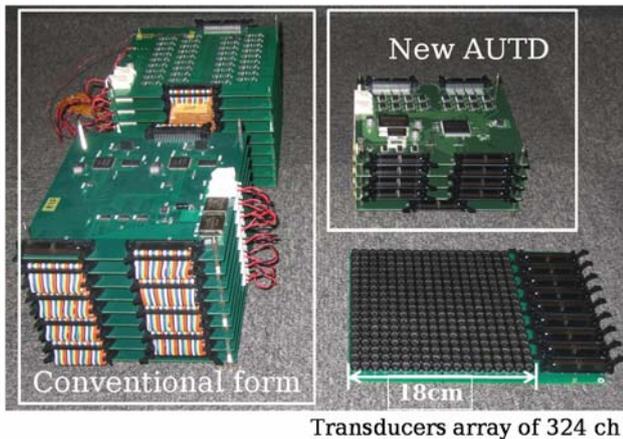


Fig.6 Comparison of new AUTD and conventional form.
The size of the new AUTD unit is so smaller than conventional forms that the new unit almost can hide under the transducers array board.

256個であり現在のプロトタイプの振動子数324個よりも少ないが、これはユニットの数を増やすことによる出力向上が可能のため、計算が簡便となる2の累乗個に設定した事による。

Fig.6 は新型試作機の外観と従来型の試作機の比較を示している。新型試作機は SDRAM メモリを使わなくなったことやアンプ IC の見直しにより従来型の 1/4 程度の大きさに収まっており、現在その性能に関する検証を行っている。

6. 結論

本稿では、空中超音波触覚ディスプレイにおける出力・有効範囲・焦点位置の解像度と更新頻度の向上のための取り組みについて説明し、それら提案手法の有効性を数値シミュレーションによって検証した。また、安全性や想定されるアプリケーション、ならびにヒトの触覚の特性に基づいて提案手法を実現する新しい空中超音波触覚ディスプレイが満たすべき性能を示し、その要求性能を満たす試作機の製作について述べた。

今後の展望として、向上した出力や焦点位置の解像度と更新頻度を用いて複数の触覚受容器を刺激することによる多彩な触覚の生成や、広い有効範囲を利用した新たなアプリケーションの実証について取り組む予定である。

参考文献

- [1] Allard Jérémie, Ménier Clément, Raffin Bruno, Boyer Edmond, Faure François, “Grlmage: markerless 3d interactions”, Siggraph 2007 - Emerging Technologies. San Diego, CA, États-Unis, 2007.
- [2] CyberTouch, <http://www.est-kl.com/products/data-gloves/cyberglove-systems/cybertouch.html>.
- [3] K. Minamizawa, S. Kamuro, S. Fukamachi, N. Kawakami, and S. Tachi: “GhostGlove: Haptic existence of the virtual world,” Proc. ACM SIGGRAPH 2008, New Tech Demos, article no. 18, 2008.
- [4] K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami, and S. Tachi: Haptic Telexistence, International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM

SIGGRAPH 2007), Emerging Technologies, article no. 10, 2007.

- [5] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Non-contact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” IEEE Trans. on Haptics, in press 2010.
- [6] T. Hoshi, M. Takahashi, K. Nakatsuma, H. Shinoda, “Touchable Holography”, International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2009), Emerging Technologies, 2009.
- [7] Robert K. Creasy, Robert Resnik, Jay D. Iams, “Maternal-fetal medicine: principles and practice”, 2004.
- [8] 辻本文雄, “超音波医学辞典,” 秀潤社, 2000.
- [9] Weinstein S, “Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality”, The Skin Senses, pp195-202, Thomas, Springfield IL, 1968.