

空中超音波振動子アレイによる触覚提示

Producing Tactile Sensation with Airborne Ultrasound Transducer Array

○星 貴之 岩本貴之* 正 篠田裕之 (東京大学) (* 現 キヤノン株式会社)

Takayuki HOSHI, Takayuki IWAMOTO, Hiroyuki SHINODA, The University of Tokyo
{star, iwa, shino}@alab.t.u-tokyo.ac.jp

This paper describes a new tactile device which produces stress fields in 3D space. Combined with mid-air and/or 3D stereoscopic displays, this device provides high-fidelity tactile feedback for interaction with visual objects. The principle is based on a nonlinear phenomenon of ultrasound; acoustic radiation pressure. The fabricated prototype device consists of 324 airborne ultrasound transducers, and the phase and intensity of each transducer are controlled individually. The total output force within the focal region is 1.6 gf. The spatial resolution is 20 mm. The prototype can produce sufficient vibrations up to 1 kHz. An interaction system including the prototype is also introduced which tracks user's hand and provides suitable touch feeling.

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

1. はじめに

近年、空中映像や三次元映像への関心が高まっており [1]、特殊な眼鏡を使う従来の方法の他にも、様々な技術の開発が進められている [2][3][4][5]。またハンドトラッキング技術も進歩しており [6][7]、それらを組み合わせることで、目の前に浮かんでいるバーチャル物体を自分の手で操作することが可能となる。さらにそこに触覚フィードバックを加えることができれば、その操作性が大きく向上することが見込まれる。

空中における触覚提示はこれまでも試みられている。手にデバイスを装着する方法 [8][9][10] が最も簡便であるが、意図しないときにも皮膚がデバイスに触れてしまう。またロボットアームで皮膚とデバイスの接触/非接触を制御する方法 [11] もあるが、装置が大掛かりになってしまう。非接触で触覚を提示する方法も提案されている。文献 [12] ではエアジェットが用いられているが、細かい圧力分布を提示する用途には不向きである。

非接触で、空中に、自由度の高い触覚を提示するため、我々は空中超音波を用いた方法を提案している [13]。超音波の空間分布を制御することにより、様々な圧力パターンを空中に描くことができる。文献 [13] では 91 個の超音波振動子を用いた同心円アレイ試作機が報告されている。それは中心軸上に圧力焦点を形成するものであった。本稿では、超音波振動子 324 個を用いた新しい試作機について述べる。各振動子の強度・位相の独立制御によって焦点を任意の位置に形成することができる。またハンドトラッキングと組み合わせたインタラクションシステムについても報告する。

2. 空中超音波触覚ディスプレイ

2.1 原理

我々の方法では超音波の非線形現象のひとつ音響放射圧 [14] を利用している。音響放射圧 P [Pa] は次式で表される。

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

ここで E [J/m³] は超音波のエネルギー密度、 I [W/m²] は音響インテンシティ、 c [m/s] は音速、 p [Pa] は音圧の実効値、 ρ [kg/m³] は媒質の密度である。 α [-] は反射係数 R [-] によ

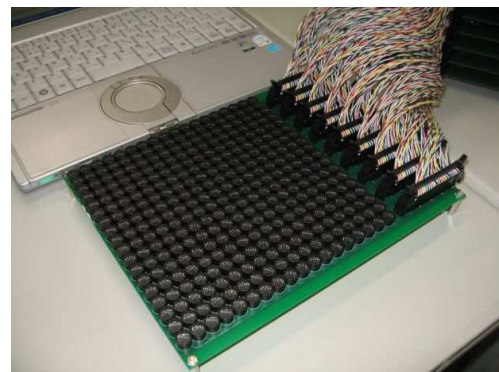


Fig. 1 18×18 array of ultrasound transducers

て決まる、1~2 の値をとる定数である ($\alpha \equiv 1+R^2$)。音響放射圧は超音波の進行方向に働く。式(1)によると、波面合成によって超音波の空間分布を制御することにより、任意の圧力分布を得ることができる。

以前の研究 [15] では媒質として水を使用していたのに対し、本稿では空気を使用する。工学的に見ると、空気のほうが好ましい特性を有している。その1つ目は音速に起因する。音響放射圧 P は音響インテンシティ I が同じとき音速 c に反比例する。空気中と水中における音速はそれぞれ 340 m/s、1500 m/s であるので、空気中では 4.4 倍の放射圧が得られる。もう1つは反射係数に起因する。水中から皮膚に超音波が入射するときにはほぼ全て吸収される ($R \approx 0$) ため、安全のために反射膜が必要である。一方、空気中から皮膚へ入射するときにはほぼ全て反射される ($R \approx 1$) ため、ユーザは素手で超音波に触れることができる。

提案する触覚ディスプレイが提示可能な範囲と空間分解能はトレードオフの関係にある。超音波の周波数が高ければ高いほど焦点径が小さい (分解能が高い)。一方、平面波が距離 z [m] だけ伝搬したときの減衰は減衰係数 β [Np/m] を用いて次式のように表される。

$$E = E_0 e^{-2\beta z} \quad (2)$$

ここで E_0 [J/m³] は振動子表面 ($z=0$) におけるエネルギー密度である。 β は 40 kHz の超音波に対して 1.15×10^{-1} Np/m (100 dB/100m) であり、また周波数 f [Hz] の自乗にほぼ比例する

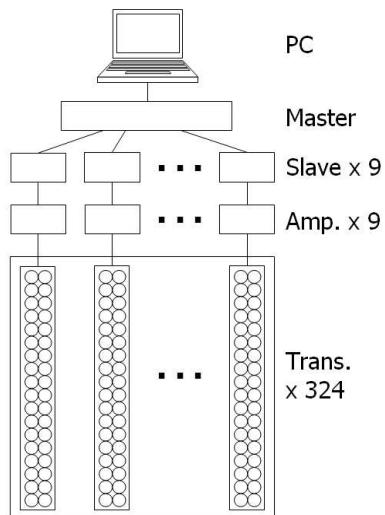


Fig. 2 Block diagram of prototype device

ことが知られている [16]。超音波が距離 $z = 200$ mm に到達したときの減衰率と比較すると、40 kHz は 4 % しか減衰しないが、周波数を 4 倍にすると 50 % も失われてしまう。共振周波数 40 kHz の振動子が市販されていて入手が容易であることも考慮し、試作機では 40 kHz を採用する。

超音波振動子アレイの提示力を見積もる。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。1 つの振動子から放射される超音波の音圧 p' は距離 $z = 300$ mm において 20 Pa である。 N 個の振動子から放射される超音波の位相が全て焦点の位置で揃っていると音圧の総和は $p = Np'$ である。室温における空気密度を $\rho = 1.2$ kg/m³、音速を $c = 340$ m/s とする。焦点の直径が波長 λ [m] 程度 (40 kHz で 8 mm) であり、その内部で放射圧 P は均一であると仮定する。 $N = 324$ 、 $\alpha = 2$ のとき、焦点における提示力は 3.0 gf である。これは振動覚を生成するには十分な力である。

2.2 試作機

図 1 に空中超音波振動子 (T4010A1, Nippon Ceramic Co., Ltd.) を 324 個並べたアレイを示す。各振動子は共振周波数 40 kHz、直径 10 cm、半減全角 100 deg である。距離 300 mm における超音波の音圧は 20 Pa である。

図 2 にシステムの概要を示す。ノート PC、デジタル I/O (CBI-2701, Interface Corp.)、マスタ回路、スレーブ回路 9 枚、アンプ回路 9 枚、振動子アレイによって構成されている。マスタは FPGA と 25.6 MHz クロックを、また各スレーブは FPGA 2 つと 4Mbit メモリ 2 つをそれぞれ搭載している。PC からの指令をデジタル I/O を介して受け取ると、マスタはそれをスレーブにブロードキャストする。各スレーブはそれぞれが受け持つ 36 個の振動子への制御信号を生成し、それらはアンプで増幅されて、振動子アレイから超音波が放射される。増幅後の信号は 24 Vp-p、40 kHz の矩形波である。DC 成分はハイパスフィルタによって除去されている。

具体的には以下のように動作する。最初に電源が投入されると、あらかじめ計算しておいた焦点座標と位相・振幅の対応表がスレーブにダウンロードされる。その後、PC からの指令と対応表を照らし合わせ、適切な位相・振幅で振動子を駆動する。対応表は、所望の圧力分布から逆問題を解くことによって得られる。

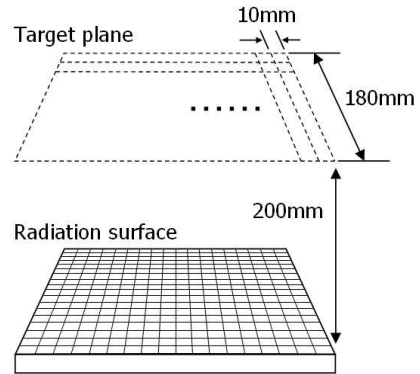
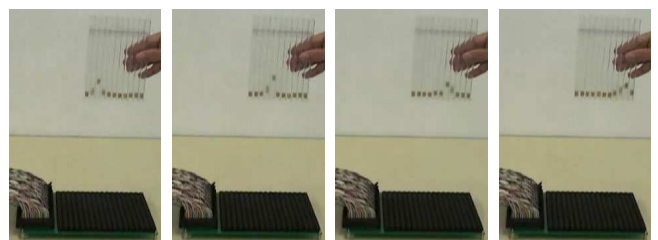


Fig. 3 Description of target plane



(a) 0.0 s (b) 0.1 s (c) 0.2 s (d) 0.3 s
Fig. 4 Left-to-right scanning movement of focal point

現状では提示力が弱いため、圧力焦点を 1 点のみ形成する。またデータ量を少なく抑えるため、振動子から $z = 200$ mm の高さの 180×180 mm² の領域を 10 mm 刻みに区切り、それら正方形領域の中心に焦点を形成するものとする (図 3)。対応表の位相は、焦点位置と各振動子の距離から計算される。振幅は最大 (PWM デューティ比 50 %) のみとする。図 4 に焦点を動かしたときの様子を示す。直径 10 mm の透明アクリルパイプの中に小さな木製の粒が入れられており、焦点に発生した放射圧によって順に持ち上げられていく様子がわかる。

音響放射圧は時間的にも制御することができる。1~1000 Hz、デューティ比 50 % の矩形波による変調と、変調なし (DC) の出力モードが実装されている。変調周波数は周波数軸上で等間隔になるように 5 bit に離散化されている。

システム全体の消費電力は 70 W (マスタ・スレーブで 35 W、アンプ・振動子で 35 W) である。また放射される音響エネルギーは、振動子の仕様書から計算すると 13.3 W である。

3. 評価実験

3.1 提示力

超音波を下向きに放射するよう振動子アレイを設置し、電子秤によって提示力を計測した。焦点を $z = 200$ mm に形成し、その位置に電子秤を設置した。DC モードで出力したところ、提示力は 1.6 gf であった。これは 2.1 章で試算した値の半分程度である。原因としてはサイドローブ・グレーティングローブにエネルギーが分配されていることや、各振動子の指向性や対象面への入射角の影響などが考えられる。

3.2 空間的性能

音響放射圧の空間分布を調べるため、図 5 のような実験系を組んだ。コンデンサマイク (口径 2 mm) を XYZ ステージに取り付けた。コンデンサマイクは 40 kHz にほとんど感度を持たないため、音響放射圧のみを計測される。XYZ ステージの

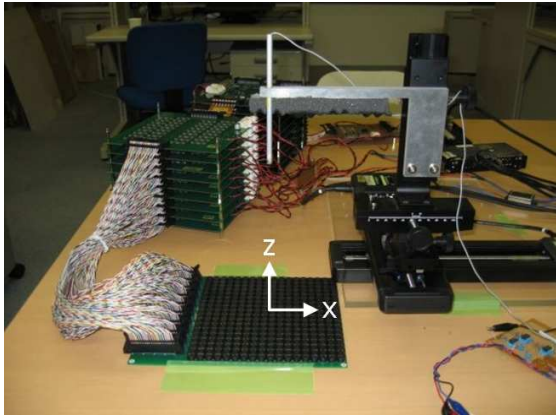
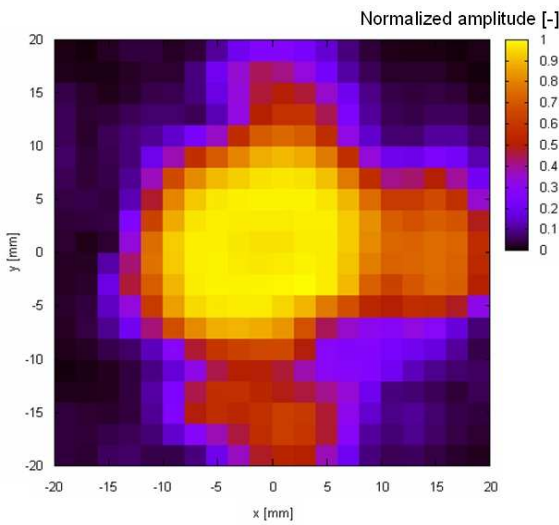
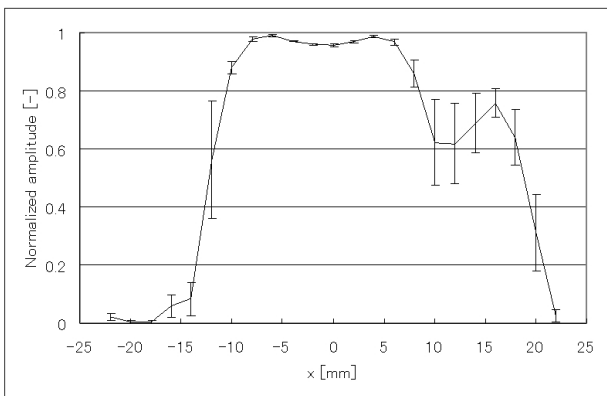


Fig. 5 Experimental setup



(a) Scanning along XY axes

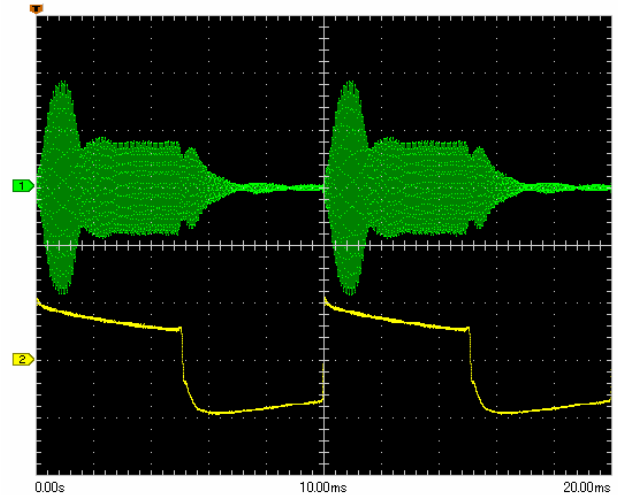


(b) Scanning along X axis ($y = 0$ mm)

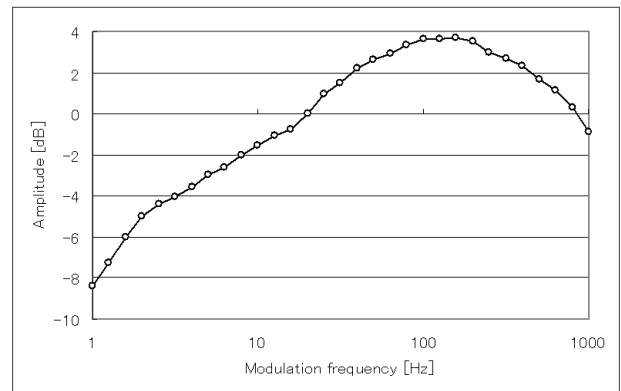
Fig. 6 Spatial distribution of measured radiation pressure

位置分解能は 0.1 mm である。焦点を振動子アレイの中心、高さ 200 mm の位置に形成し、その周辺で 2 mm 刻みでデータを得た。変調周波数を 100 Hz とし、計測データから FFT によって 100 Hz 成分の振幅を計算した。FFT はデジタルオシロスコープ (PCS-3200, Kenwood Corp.) によって逐次実行した。振幅が時間的に変動する様子が見られたので、1 分間観測したときの最大値と最小値を記録した。

図 6 に計測結果を示す。(a)、(b) はそれぞれ XY 方向スキャ



(a) 100 Hz modulated waveforms measured at focal point; ultrasound (CH1) and radiation pressure (CH2)



(b) Frequency characteristics

Fig. 7 Temporal properties of measured radiation pressure

ンと $y = 0$ mm における X 方向スキャンである。振幅は正規化されている。図 6 (a) は 1 分間観測したときの最大値を表示しており、図 6 (b) は平均値のプロットに最大値・最小値をエラーバーとして重ねて表示している。これらから、焦点の直径が 20 mm (波長 $\lambda = 8$ mm の 2 倍程度) であることがわかる。また焦点の外側にはサイドローブがあり、そこでは圧力が不安定である。これは気流が発生しているためと考えられる。

3.3 時間的性能

3.2 と同様の実験系を用いて音響放射圧の時間的性能を調べた。コンデンサマイクは焦点の位置に固定した。また超音波受信器 (口径 13 mm, R4016A1, Nippon Ceramic Co., Ltd.) をコンデンサマイクのすぐ隣に配置し、超音波の波形も観測した。変調周波数を変えていき、FFT によってそれぞれの変調周波数成分の振幅を記録した。

図 7 (a) に超音波 (CH1) と放射圧 (CH2) の波形を示す。このときの変調周波数は 100 Hz である。縦軸はコンデンサマイク及び超音波受信器の出力電圧である。校正していないためその絶対値に意味はなく、波形のみを見るものとする。CH1 から超音波出力の始まりと終わりが不安定である様子が見受けられる。また音響放射圧は矩形波に近い波形であるが、やや歪んでいることがわかる。

図 7 (b) に放射圧の周波数特性を示す。縦軸は放射圧の振幅

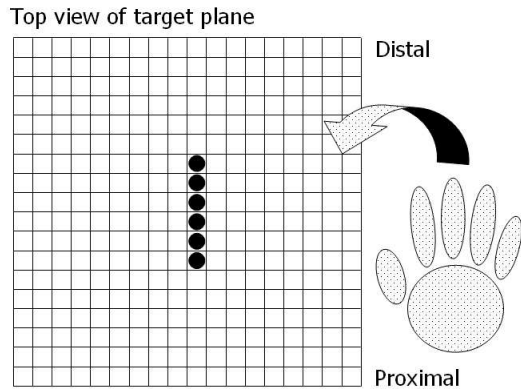


Fig. 8 Trajectory of focal point in direction discrimination test (represented by black dots)

であり、20 Hz 変調での振幅を 0 dB として表示している。158 Hz と 1000 Hz のときの振幅はそれぞれ 3.7 dB と -0.9 dB であり、その差は 4.6 dB、すなわち 1.7 倍である。このことから、少なくとも 20 Hz 以上の変調周波数ではほぼフラットな周波数特性を持つと言える。また 20 Hz 以下は可聴域から外れていてコンデンサマイクの特徴が保証されていないため、その範囲の周波数特性についてははっきりしたことは言えない。

3.4 方向弁別実験

触覚が十分な強さで感じられることを確かめるため、以下のような実験を行なった。被験者は 6 名 (23~29 歳、男性、右利き) であった。振動子アレイから高さ $z = 200$ mm の位置に右の手のひらをかざし、前後どちらの動きだったかを回答させた。各方向に 20 試行、計 40 試行を 1 人に対して行なった。焦点は 50 mm の距離を 50 mm/s の速さで移動させた。変調周波数は 100 Hz を用い、その音が聞こえないよう被験者にはヘッドフォンでホワイトノイズを聞かせた。

実験の結果、正答率は 100 % であった。これは、方向判別に十分な強さの触覚が感じられていることを示している。

また実験中に感じた触感の聞き取りも行なった。その中で、風のような感じがするという意見が得られた。そのような気流が発生する原因としては、音響流や圧力勾配の影響が考えられる。数 Hz の変調に関して、放射圧の立ち上がりが主に感じられるという意見も得られている。このことから推測すると、変調矩形波のデューティ比を減らすことで触覚の強さを保ちつつ気流を抑制できる可能性がある。

4. インタラクショシステム

開発した触覚ディスプレイとハンドトラッキングを組み合わせ、簡易なインタラクショシステムを構築した。ハンドトラッキングには、コストや入手の容易性、性能などを考慮し、赤外線カメラを搭載している Wii リモコン (Nintendo) を採用した。ユーザの中指に装着した再帰性反射マーカを赤外線 LED で照らし、2 台の Wii リモコンでその三次元位置を計測する (図 9)。簡単のため、1 点のみの計測とした。

「三次元ブロック崩し」ゲーム (図 9) を実装した。ユーザの手の位置によってバーチャル空間のカーソルを操作し、ボールを跳ね返すことで床面に敷き詰められたブロックを破壊していく。ボールがカーソルに当たった瞬間、ユーザの手に触覚がフィードバックされる。変調周波数は 100 Hz、刺激の持続時間は 150 ms としてある。

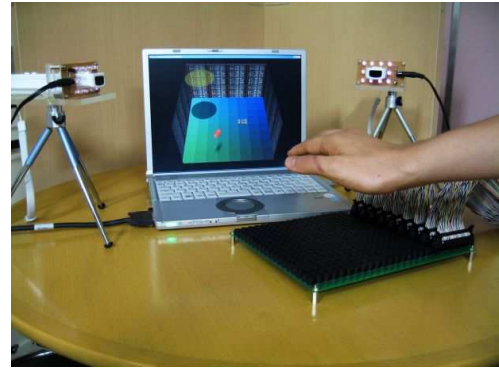


Fig. 9 Interaction system consisting of airborne ultrasound tactile display and Wiimote-based hand tracking setup

5. おわりに

本稿では、空中超音波を用いた触覚ディスプレイについて報告した。試作機は圧力焦点において 1.6 gf の力を提示することができる。空間分解能は 20 mm であり、1 kHz までの振動刺激を生成する。定常出力では弱すぎて感じられないが、振動覚は十分な強さで感じられる。したがって、バーチャル物体との接触についてのフィードバックや、テクスチャ感の提示などが可能と考えられる。

今後、開発した触覚ディスプレイと空中映像ディスプレイを組み合わせることを計画している。また、超音波の時空間パターンを制御することで様々なテクスチャを再現することも試みる。

文 献

- [1] I. Rakkolainen: How feasible are Star Wars mid-air displays?, Proc. IV'07, pp. 935-942, 2007.
- [2] FogScreen, <http://www.fogscreen.com/>.
- [3] Heliodyisplay, <http://www.io2technology.com/>.
- [4] Holo, <http://www.provision3dmedia.com/>.
- [5] Real-time holography, <http://www.seereal.com/>.
- [6] T. Rodriguez, A. C. de Leon, B. Uzzan, N. Livet, E. Boyer, F. Geffray, T. Balogh, Z. Megyesi, and A. Barsi: Holographic and action capture techniques, Proc. ACM SIGGRAPH 2007, Emerging Technologies, article no. 11, 2007.
- [7] J. Allard, C. Menier, B. Raffin, E. Boyer, F. Faure: Grimage: Markerless 3D interactions, Proc. ACM SIGGRAPH 2007, Emerging Technologies, article no. 9, 2007.
- [8] CyberTouch, <http://www.immersion.com/>.
- [9] 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.
- [10] S.-C. Kim, C.-H. Kim, T.-H. Yang, G.-H. Yang, S.-C. Kang, D.-S. Kwon: SaLT: Small and lightweight tactile display using ultrasonic actuators, Proc. RO-MAN 2008, pp. 430-435, 2008.
- [11] K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami, S. Tachi: Haptic Telexistence, Proc. ACM SIGGRAPH 2007, Emerging Technologies, article no. 10, 2007.
- [12] Y. Suzuki and M. Kobayashi: Air jet driven force feedback in virtual reality, IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 25, pp. 44-47, 2005.
- [13] T. Iwamoto, M. Tatzono, and H. Shinoda: Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound, Proc. EuroHaptics 2008, pp. 504-513, 2008.
- [14] 長谷川高陽: ランジュバン放射圧に関する統一理論, 日本音響学会誌, vol. 52, no. 3, pp. 187-194, 1996.
- [15] T. Iwamoto and H. Shinoda: Two-dimensional scanning tactile display using ultrasound radiation pressure, Proc. IEEE Haptics Symposium 2006, pp. 57-61, 2006.
- [16] H. E. Bass, L. C. Sutherland, A. J. Zuckerwar, D. T. Blackstock, and D. M. Hester: Atmospheric absorption of sound: Further developments, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, pp. 680-683, 1995.