

触覚フィードバックのある非接触タッチスクリーン

Contactless Touch Screen with Tactile Sensation

○学 吉野 数馬 (東大) 正 篠田 裕之 (東大)

Kazuma YOSHINO, The University of Tokyo, k_yoshino@alab.t.u-tokyo.ac.jp
Hiroyuki SHINODA, The University of Tokyo

This paper proposes contactless touch screen with tactile sensation. Users can interact with the screen without actual touch and feel tactile feedback. The device is composed of a screen, visual projectors, sensors for finger motion detection and airborne ultrasound phased array, which displays tactile sensation. The important component of the system is a screen that scatters projected image and transmits ultrasound. The screen has another potential for cutting off air flow, which makes tactile images unclear. We show the design of the screen and examine the effectiveness through simulations and experiments. After that, we construct the contactless touch screen systems and examine position recognition test under the support of tactile sensation.

Key Words: Contactless touch screen, tactile feedback, Airborne Ultrasound Tactile Display.

1. はじめに

本稿では、触覚フィードバックのある非接触タッチスクリーンを提案する。このシステムは、通常のタッチスクリーンのように使用するが、非接触での操作が可能であり、スクリーンに触れる直前で、操作に応じた触覚フィードバックが得られるものである。システムの利用例を Fig.1 に示す。この図は、デパートのような公共スペースでの利用を想定したものである。大面積のスクリーンに対し、複数のユーザが同時に使用し、案内図などを確認している様子を表している。このようなシステムは、ユーザの指や手の運動と連動した、非接触デバイス[1-6]の一例であるといえる。非接触での操作は、従来のタッチスクリーンの衛生的な問題を解決し、3次元でのインタラクションを可能にするという利点がある。特に病院では、衛生的な問題から非接触のインタフェースが望まれる[4]。しかし、非接触のインタフェースには、触覚フィードバックがないという問題点が存在する。そこで本稿では、このような非接触操作デバイスに触覚フィードバックを与えることを提案する。ユーザの指の動きに応じて、集束超音波による音響放射圧を利用し[7]、スクリーン越しに触覚提示を行う。非接触の動作に触覚刺激を与えることにより、ボタン映像などへの非接触な操作を、より正確でより簡単に行うことが可能になると考えられる。集束超音波を利用した非接触操作デバイスとして、星による研究が挙げられる[8]。星のデバイスでは、映像提示にPCモニターを使用し、ディスプレイとユーザの手の距離は60cmであった。提案するシステムでは、操作面はスクリーンの1cm手前であり、プロジェクタの使用により、広範囲への映像提示が可能である。

提案するシステムを実現するため、次の3つの特性を持つスクリーンが要求される。(1)リアプロジェクションによる映像投影が可能である。(2)触覚刺激のための超音波を透過させる。(3)スクリーンを通過する気流を遮断する。(3)は、集束超音波によって発生する気流を低減させるために望まれる機能である。超音波の伝播に伴って発生する気流は、生成される触覚の像を悪化させるものである[9]。今後設計を行う、このような3つの特徴を持つスクリーンを Visio-Acoustic (VA) screen と呼ぶことにする。

本稿ではまず、VA screen の設計を示し、その特性をシミュレーションと実験によって確認する。その後、スクリーン越しに触覚を与えることによる定位実験を行った結果について述べる。

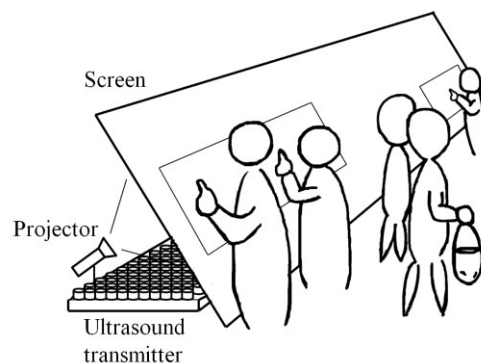


Fig. 1 The image of contactless touch screen in public places

2. VA screen の設計

VA screen の構造を Fig.2 に示す。試作では、半透明な材質として、アクリルを使用する。本システムでは非接触での触覚提示に Airborne Ultrasound Tactile Display(AUTD)[7]を使用する。AUTD は超音波振動子のアレイによって構成され、集束超音波を用いた音響放射圧によって、sinc 型の分布をもつ圧力を、非接触に提示出来るデバイスである。焦点位置はフェーズドアレイによって制御される。VA screen は、超音波を透過させるため、Fig.2 のような2つの連子状の層が互い違いになるように配置された構造を検討する。間の1層は、2枚の層の距離を一定に保つために挿入されているスペーサ層である。この構造において、シミュレーションを行い、超音波の高い透過率を保ちつつ、気流を出来る限り遮断するパラメータを最適パラメータとして選択する。

2.1. シミュレーション条件

視認性と耐久性の観点から、連子状の2枚の層は、1mm厚のアクリル板を使用する。VA screen には、Slot Width と Bar Width, Layer Gap の3つのパラメータがある (Fig.2) が、開口率を50%に保つため、Bar Width と Slot Width は常に等しい値であるとする。Slot Width と Layer Gap の値を変化させ、数値解析により、透過する音圧と気流を評価する。シミュレーションには ANSYS を使用する。以下では、シミュレーションの条件と、その結果について述べる。

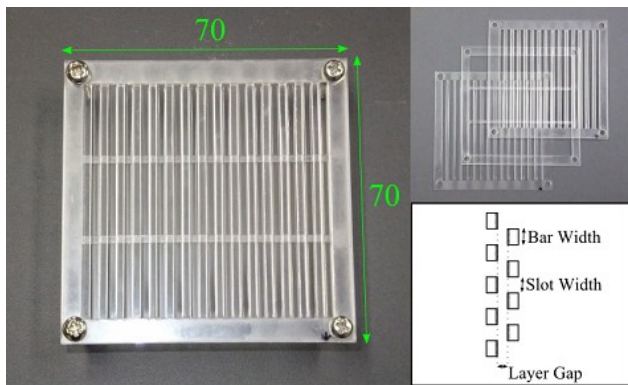


Fig. 2 Left: Photo of VA screen, Right-upper: Each layer of VA screen, Right-lower: Definition of parameters

2.1.1. 超音波の透過

音響放射圧 P [Pa] は音圧の二乗に比例し、式(1)のように表せる[7]。

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

ここで、 p [Pa] は音圧の実効値、 ρ [kg/m³] は空気密度、 c [m/s] は空気中の音速、 α [-] は超音波の反射条件によって決定される定数である。この式に基づき、音の伝播シミュレーションにより、音響放射圧の大きさを見積もる。

Fig.3 は、超音波の圧力分布の一例をコンター図で示したものである。シミュレーションの領域は 100mm x 150mm であり、80mm の VA screen が置かれている。解析は音響解析で行い、fluid29 と呼ばれる、2次元音響解析用の要素を使用する。この解析では、伝播に伴う減衰は考慮されていない。解析領域の左側と右側の縦方向の境界線は吸収壁であり、上側と下側の横方向の境界は反射壁である。Fig.3 において、VA screen は 2列の小さな黒いブロックで表されている。黒いブロックは VA screen の Bar に相当し、空気と固体のインピーダンスは大きく異なるため、境界は反射壁と設定されている。左側の境界から 40kHz の正弦波を入力し、0s から 440us までの時刻歴応答解析を行う。Fig.3 は、100Pa の超音波を左側から連続的に入射し、440us 経過した時点での音圧分布を示したものである。Slot Width は 2mm であり、Layer Gap は 0.5mm である。カラーバーは音圧 [Pa] を示す。VA screen の左側には入射波と反射波があり、右側には透過波があることが確認できる。

透過率は、VA screen から 1cm 右側（後方）にある点における、定常状態後の音圧の最大値によって評価する。シミュレーションは入射音圧 (input pressure)、Slot Width、Layer Gap の 3つのパラメータを変化させて行う。

2.1.2. 気流の遮断

気流についての解析結果の一例を Fig.4 に示す。Fig.4 は、2mm の Slot Width、0.5mm の Layer Gap を持つ VA screen に対し、5m/s のガウシアン状の分布をもつ気流を左辺から入力した際における風速分布を、カラーベクトルで表した図である。カラーバーは風速の大きさを示している。

シミュレーション領域は、100mm x 80mm であり、VA screen のサイズは 80mm である。気流の解析では反射波を考慮する必要のないため、領域のサイズは音響解析のときより小さい。解析には流体解析を使用し、2次元流体解析において一般的に用いられる fluid 141 を要素タイプとして使用する。領域の左辺から定常的な風速を入力し、定常解析によってシミュレ

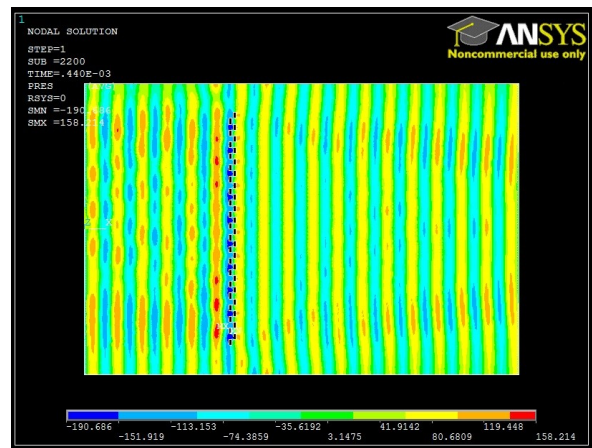


Fig. 3 Graphical result of acoustic wave propagation

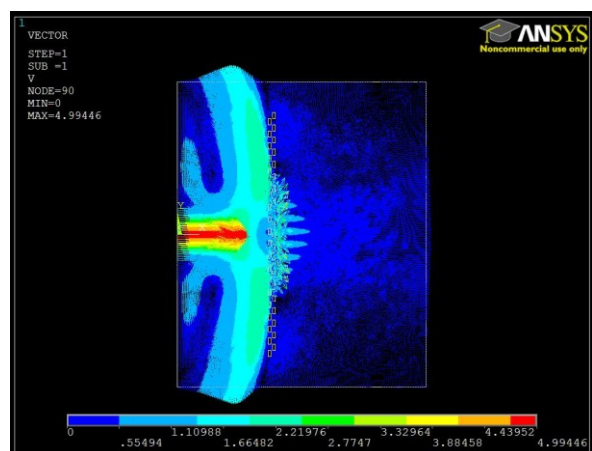


Fig. 4 Vector plot of air flow simulation result

ーションを行う。入力する風速は AUTD の焦点の半値幅の大きさと等しく、1cm の半値幅をもつガウシアン形状で分布させる。領域の上側、右側、左側の境界線は大気圧と等しく 0Pa に設定する。VA screen の表面のノードは滑りなしであり、全方位に対して 0m/s である。VA screen から 1cm 右側に離れた辺上において x 軸方向の速度が最大の点を求め、その点の x 軸方向への風速を、透過した気流の風速と定めて評価する。

2.2. シミュレーション結果と実機計測の比較

数値シミュレーションに加え、実機による計測も行う。Fig.2 に示される VA screen を使用し、いくつかのパラメータについて、実環境における音圧と風速の測定を行った。AUTD の 240mm 上部に焦点を作り、VA screen の挿入に伴う、音圧と風速の変化を測定する。使用する AUTD は 249 個の振動子を有しており、半値幅 1cm の焦点を作り、最大 1.6gf の圧力を提示可能である。超音波センサおよび風速計を焦点付近の最大値を示す点に配置し、センサの 1cm 下方に VA screen を挿入し、測定値の変化を求める。音響放射圧の測定には、超音波センサの出力の peak-to-peak voltage を使用する。気流の測定には熱線風速計 (VT100S、KIMO) を使用する。この風速計は風速を 0.15m/s から 30m/s まで測定できるものである。

2.2.1. 超音波の透過

Fig.5 は、入力音圧に対する、透過音圧である。このシミュレーションにおいて、Slot Width は 2mm、Layer Gap は 0.5mm で固定されている。このグラフから、VA screen を透過する音

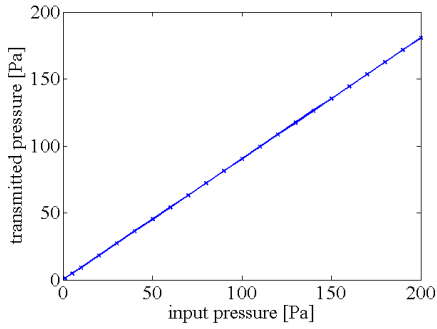


Fig. 5 The simulation results of relationships between transmitted acoustic pressure and input pressure

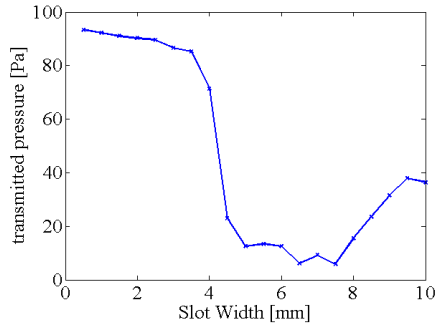


Fig. 6 Simulated acoustic transmittance vs. Slot Width

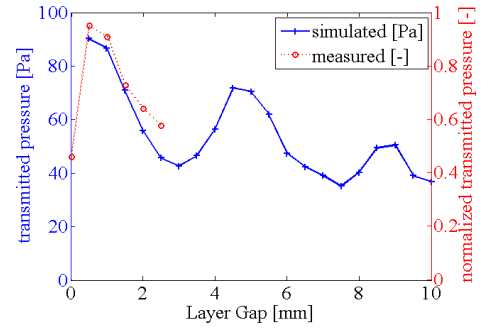


Fig. 7 Simulated and measured acoustic transmittance vs. Layer Gap

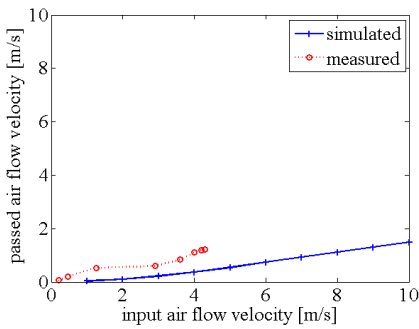


Fig. 8 The simulated and measured results of relationships between passed air flow velocity and input air flow velocity

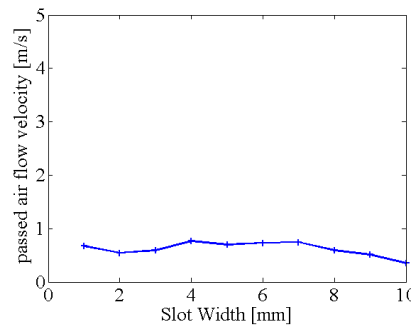


Fig. 9 Simulated air flow passing rate vs. Slot Width

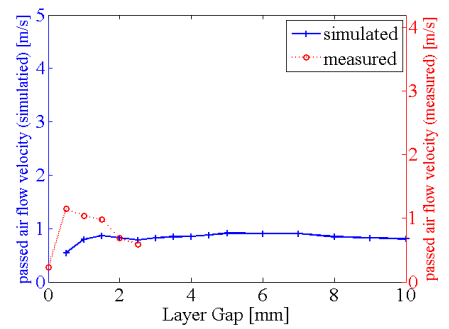


Fig. 10 Simulated and measured air flow pass vs. Layer Gap

圧は、入力音圧に対して線形に変化することが読み取れる。Fig.6 は Slot Width の変化に対する、透過音圧の変化である。入力音圧は 100Pa、Layer Gap は 0.5mm である。このグラフにより、透過音圧は、Slot Width が半波長よりも小さい時に、大きくなるといえる。Fig.7 は、Layer Gap に対する透過音圧である。左側の軸はシミュレーションによる音圧であり、右側の軸は、実測値による規格化音圧である。両者とも Slot Width は 2mm である。シミュレーションは 100Pa の音圧を入力として行い、透過音圧を”+”のマークでプロットしている。実測値は、VA screen が挿入される前の測定値によって規格化されており、”o”のマークでプロットされている。シミュレーション結果からは、Layer Gap が変化するに従って、透過音圧が周期的に変化することが読み取れる。また、各周期の最大値は、Layer Gap が大きくなるに従い、小さくなっていくといえる。実測値の結果は、シミュレーション結果と同様の傾向を示している。いずれのグラフにおいても、透過率を最も大きくするのは 0.5mm であるといえる。

2.2.2. 気流の遮断

Fig.8 は、入力風速と透過風速の関係を示したものである。シミュレーション結果は”+”、実測値は”o”のマークでプロットされている。このグラフにおける Slot Width は 2mm、Layer Gap は 0.5mm である。いずれのグラフも、入力風速が大きくなると、透過風速も大きくなるという傾向が読み取れる。しかし、風速のグラフでは、音圧のグラフのような明らかな線形性は見られない。Fig.9 は Slot Width の変化に対する透過風速の変化である。入力風速は 5m/s であり、Layer Gap は 0.5mm である。今回のシミュレーション条件下では、Slot Width

の変化に対する透過風速の変化はほとんど見られない。Fig.10 は、Layer Gap の変化に対する透過風速の変化である。左側の軸はシミュレーションの値であり、”+”でプロットされている。右側の軸は実測値であり、”o”でプロットされている。軸の最大値 (4.2m/s) は、VA screen が挿入される前の風速である。いずれのグラフにおいても Slot Width は 2mm である。実測値のグラフは一見、シミュレーションのグラフに一致してないように見える。しかし、Layer Gap の変化に気流の遮断効果がほとんど変わらないという傾向については同一である。

2.2.3. 最適パラメータ

以上の結果により、Slot Width と Layer Gap は、超音波の透過率のみに影響を与え、気流の遮断効率にはほとんど影響しないといえる。従って、最適なパラメータは超音波の透過率により決定した。VA screen は映像を投影するものであるため、視認性の観点から、Slot Width や Layer Gap は小さいほうが望ましい。この要求は、超音波の高い透過率というシミュレーション結果からの要求と矛盾しない。しかし、細すぎる連子状の棒は耐久性に乏しく、製作が困難である。従って、2mm の Slot Width と 0.5mm の Layer Gap を VA screen に適したパラメータとして決定した。この条件下で作製された VA screen は 27%の気流を通過させ、60Pa の超音波出力下において 95%の超音波の音圧 (90%の音響放射圧) を透過させることが実測により確認された。この時の音圧分布を Fig.11 に示す。Fig.11 は、VA screen 越しに焦点を作り、VA screen の 1cm 上空の音圧分布を実測したものである。測定音圧が最大となる中心部の音圧で規格化されている。Fig.11 により、VA screen 透過後においても、焦点が崩れることなく、形成できていることがわ

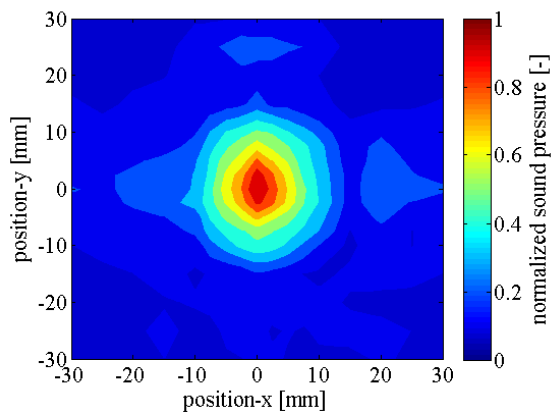


Fig. 11 Distribution of normalized sound pressure 1cm above the VA screen

かる。焦点が縦長になっているのは、振動子が 14 x 18 個で並んでおり、縦横方向で解像度が異なるためであると考えられる。

3. 非接触タッチスクリーン

3.1. システム構築

先のパラメータで設計された VA screen を用いて、Fig.12 のような非接触タッチスクリーンを構築した。VA screen の中心から AUTD までの距離は 230mm であり、焦点は VA screen の 10mm 上空に作られる。AUTD は、2.2 節で用いたものと同じのものであり、プロジェクタは、市販のピコプロジェクタ (Optoma PK320) を使用した。触覚が存在することによって、ユーザは触覚により投影された映像のボタンの位置を把握することが出来る。このことを実証するため、6 人の被験者に触覚による位置の認識実験を行った。

3.2. 実験概要

被験者は右利き男性 6 名である。Fig.12 のように、番号の映像が投影されているスクリーンに対して、ある番号の場所 1 点に AUTD で焦点を生成し、触覚刺激によりその番号を提示する。被験者は各番号の上を指で走査し、触覚刺激の感じられる位置の番号を回答する。実験は、各番号に対して 5 回ずつ提示し、計 45 回の正答率を求めた。

3.3. 実験結果

実験結果を Table1 に示す。表の結果により、多くの被験者が高い確率で焦点位置を判断できていることが読み取れる。被験者 C においては正答率が低いが、誤回答の 95.8% が正解に対して 1 つ上の段を答えてしまうというものであった。これは、指に当たった刺激を、指先に当たったものとして捉えてしまっていたのではないかと考えられる。

4. まとめ

本稿では、非接触デバイスに対し、触覚フィードバックを与えることを提案した。触覚フィードバックの追加は衛生面の向上や 3 次元入力を可能とする非接触デバイスにおける使いやすさを向上するものである。このシステムを実現するため、本稿では、プロジェクタの映像を発散させ、触覚提示のための超音波を透過させるという VA screen を提案した。VA screen は、連子状構造をもつ 2 層によって構成される。VA screen のパラメータを決定するため数値解析を行い、加工限界や耐久性も考慮し、連子の棒の幅 2mm、層間の距離 0.5mm が適していると結論づけた。これらパラメータにおいて試作し

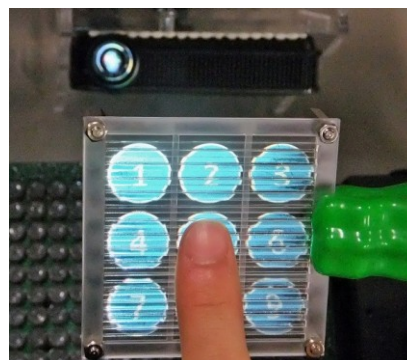


Fig. 12 Photo of position recognition experiment

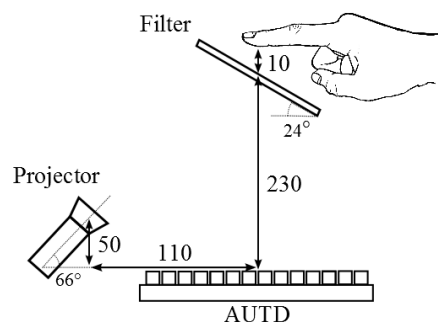


Fig. 13 Set up of position recognition experiment

Table 1 The results of position recognition test

subjects	A	B	C	D	E	F
validity[%]	100	95.6	44.4	100	100	100

た VA screen では、実測により、95%の超音波の振幅を保ち、27%の気流が残留するという結果が得られた。この VA screen を用いて触覚刺激による定位実験を行った結果、6 人中 5 人において、高確率で触覚提示位置を定位できていることが確認できた。今後、指先位置の検出機能などを組み合わせ、映像とのインタラクションを可能にする予定である。

文 献

- [1] A.D.Wilson, "TouchLight: an imaging touch screen and display for gesture-based interaction", ICMI'04 Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces, pp.69 - 76, 2004
- [2] T.Chiu, H.Deng, S.Chang and S.Luo, "Implementation of ultrasonic touchless interactive panel using the polymer-based CMUT array", IEEE SENSORS 2009 Conference, pp.625 - 630, 2009.
- [3] 鷲野浩之, 岡野祐一, 川又武典, "3 次元タッチパネルインタフェース", 情報処理学会 インタラクション 2009, 2009.
- [4] R.Johnson, K.O'Hara, A.Sellen, C.Cousins and A.Criminisi, "Exploring the Potential for Touchless Interaction in Image-Guided Interventional Radiology", Proceedings of the SIGCHI Conference on Human factors in Computing Systems, CHI'11, pp.3323 - 3332, 2011.
- [5] J.Moeller, A.Kerne, "Zero Touch: An Optical Multi-Touch and Free-Air Interaction Architecture", CHI'12, pp.2165 - 2174, 2012.
- [6] R.Kjeldsen, "Toward the Use of Gesture in Traditional User Interfaces", Automatic Face and Gesture Recognition, Proceedings of the Second International Conference, pp.151 - 156, 1996.
- [7] T.Hoshi, M.Takahashi, T.Iwamoto and H.Shinoda, "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound", IEEE Transactions on Haptics, Vol.3, No.3, pp.155-165, 2010.
- [8] T.Hoshi, "Development of Aerial-Input and Aerial-Tactile-Feedback System", IEEE World Haptics Conference 2011, pp.569 - 573, 2011.
- [9] T.Hoshi, Y.Nishiyama and I.Torigoe, "Observations of Airflow Arising from Airborne Ultrasound Tactile Display", SICE Annual Conference 2010, pp.384 - 385, 2010.