

# ハンドトラッキング機能を搭載した空中超音波触覚ディスプレイ

星 貴之<sup>†</sup>

<sup>†</sup>名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

E-mail: <sup>†</sup> star@nitech.ac.jp

**あらまし** 非接触触覚提示装置に小型深度カメラを搭載したシステムについて報告する。触覚刺激は超音波を集束させることによって装置から 15-40 cm 程度の範囲内に提示される。超音波を集束させるためには装置から皮膚表面までの距離を取得することが必要である。本稿ではそのために深度カメラ DepthSense325 を採用する。小型かつ近距離 (15 cm) から測定可能であるため、触覚提示装置に搭載して一体型システムとして使用することができる。

**キーワード** 触覚ディスプレイ, 空中超音波, 音響放射圧, フェーズドアレイ, 深度カメラ

## Airborne Ultrasound Tactile Display with Hand-Tracking Function

Takayuki HOSHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Center for Fostering Young and Innovative Researchers, Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Aichi-ken, 466-8555 Japan

E-mail: <sup>†</sup> star@nitech.ac.jp

**Abstract** A noncontact tactile display on which a small-sized depth camera is attached is reported. Tactile stimulation is provided by focusing ultrasound in the range from 15 cm to 35 cm. The distance between the display and skin surface is needed to focus ultrasound adequately. A depth camera DepthSense325 is employed for that purpose, which is small and is able to measure the distance from 15 cm. It can be mounted on the tactile display to be an all-in-one device.

**Keyword** Tactile Display, Airborne Ultrasound, Acoustic Radiation Pressure, Phased Array, Depth Camera

### 1. はじめに

筆者は 2008 年から、手のひらに非接触で触覚を提示する装置・空中超音波触覚ディスプレイの開発に携わってきた[1]。これは、超音波を皮膚表面に集束させたとき音響放射圧によって皮膚が押される現象を利用したものである。本手法を用いた触覚提示においては、焦点を適切に設定するためユーザの手の位置を知る必要がある。触覚刺激が非装着・非拘束で提示される利点を活かすため、位置計測法もできるだけ手を拘束しないものが望ましい。

本手法の開発当初はウェブカメラを用いて背景差分により手を検出していた[2]。装着物は必要ないが、ユーザの移動などによる環境光の変化に弱い計測法であった。その後、再帰性反射マーカをユーザの指先に装着させ、それを赤外線 LED で照明し、2 台の赤外カメラで撮影した画像から三次元位置を算出する方法を採用した[3]。マーカは 1 cm 角程度の大きさでよく、またバッテリーなども不要で軽量であるため、装着を許容するものとした。また外部の研究者からは反射超音波による物体検出との併用も提案された[4][5]。2010 年 11 月に比較的安価な深度カメラ Kinect [6] が発売され、これを採用することでマーカレスかつ安定した位置計測が可能となった[7]。ところで Kinect の計測可能



Fig.1 Noncontact tactile display with depth camera.

距離は 50 cm から 10 m である。一方、触覚提示可能な距離は 15 cm から 40 cm 程度である。このため Kinect と触覚提示装置は離して配置する必要があり、設置の際に位置合わせをする手間もかかっていた。

本稿では 2012 年 10 月に発売された小型深度カメラ DepthSense325[8]を採用する。計測可能距離は 15 cm から 1 m であり、触覚提示装置に直接搭載した際にも手の位置を計測することができる。また触覚提示装置としては、従来ものから省配線化・小型化を行った小型超音波集束装置[9]を採用する。これら二つを組み合わせたシステムは、USB ケーブル計 2 本と電源ケーブル 1 対を接続するだけで使用可能である。以下、それ

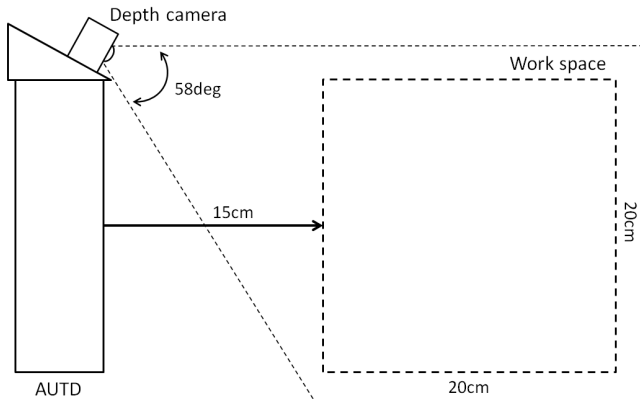


Fig.2 Side view of developed device and work space.

それぞれの装置について詳細を述べたあと、それらを組み合わせた一体型システム（図1）について報告する。

## 2. 要素技術

### 2.1. 深度カメラ

本稿で採用する DepthSense325 の仕様は以下の通りである。深度画像は赤外光を用いた Time of Flight 方式で取得される。測定可能距離 15 cm～1 m。深度分解能 1.4 cm 以下。画角 74 deg × 58 deg (H×V)。画素数 320×240。筐体サイズ 10.5×3.0×2.3 cm<sup>3</sup>。PC との通信および給電は USB ケーブルを介して行われる。

### 2.2. 触覚提示装置

物体が超音波の進行を遮るとき、物体表面に超音波の進行方向の応力が発生することが知られている（音響放射圧）。この現象を利用して非接触で触覚刺激を提示する。超音波の平面波が垂直に入射するとき、物体表面に生じる音響放射圧  $P$  [Pa] は次式で表される。

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

ここで  $\alpha$  は物体表面の反射特性に依存する係数（全反射の場合  $\alpha = 2$ ）、 $c$  [m/s] は音速、 $p$  [Pa] は超音波の音圧（実効値）、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] は媒質の密度である。

単独の超音波振動子が生じる音響放射圧は微弱である。数 10 mN 程度の発生力を得るため、数 100 個の超音波振動子を使用する。各振動子の位相を適切に制御し、空中に単一の焦点を結ぶ。また、位相を操作することで焦点の位置を変えることもできる。すなわち、離れた場所から空間中の任意の位置に力を発生させることができる。

本稿では、文献[9]において製作した小型超音波集束装置を使用する。超音波振動子は一辺 17 cm の矩形領域内に 285 個配列されている。装置に内蔵された FPGA が焦点位置にもとづいて振動子間の適切な位相差を算出し、各振動子に応じた駆動信号を生成する。装置全体のサイズは 19×19×5 cm<sup>3</sup>。焦点距離 20 cm のときの

焦点径は 2 cm。焦点における発生力の最大値は 16 mN。焦点位置は 0.5 mm 刻みで指定可能であり、また超音波の ON / OFF によりインパルスや振動刺激を提示することができる。PC との通信は USB 経由で行う。電源電圧 24V、消費電力 100 W（超音波出力時）である。

## 3. 一体型システム

深度カメラを触覚提示装置に搭載し、ハンドトラッキングが可能な一体型触覚提示システムを構成した（図1）。対象領域は装置前方の 20×20×20 cm<sup>3</sup> とした。その領域を視野に収めるため、深度カメラは 29 deg 傾けて設置するものとした（図2）。対象領域がシステムに近く比較的狭いため、使用時は壁などに取り付けるのではなくテーブルなどへの設置が想定される。

提示可能な触覚情報としては、接触したことの通知や振幅変調による触感、手のひらに対して文字・記号・手描き図形などを焦点の軌跡として提示する、などがある。また深度カメラのデータにもとづいて各指を個別に認識することにより、それぞれに異なる周波数の振動刺激を提示することも考えられる。

## 4. おわりに

本稿では、ハンドトラッキングが可能な非接触触覚ディスプレイについて報告した。深度カメラによってマーカレスで位置計測を行い、空中超音波によって非接触で触覚提示を行う。一体型システムであるため運搬が容易であり、設置時の位置合わせも不要である。

## 文 献

- [1] 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, Jul.-Sep., 2010.
- [2] 立藪真理, 岩本貴之, 篠田裕之: "空中超音波振動子アニュラアレイによる触覚提示," JSME ROBOMECH 2008 講演論文集, 1P1-I06(1-4), Jun., 2008.
- [3] 星貴之, 高橋将文, 岩本貴之, 篠田裕之: "324 チャンネル超音波振動子アレイによる触覚提示," SICE SI 2008 論文集, pp. 959-960, Dec., 2008.
- [4] M. Ciglar: "An ultrasound based instrument generating audible and tactile sound," Proc. NIME 2010, pp. 19-22, Jun., 2010.
- [5] 株式会社デンソー: 触覚提示装置, 特開 2012-48378, Mar., 2012.
- [6] Kinect, <http://www.xbox.com/kinect>.
- [7] 星貴之: "触覚フィードバックのある空中インタフェース," JSME ROBOMECH 2011 論文集, pp. 182-183, May, 2011.
- [8] DepthSense, <http://www.softkinetic.com/enus/solutions/depthsens/ecameras.aspx>.
- [9] 星貴之: "空中超音波触覚ディスプレイの可搬性の向上," JSME ROBOMECH 2012 講演論文集, 1A1-A03(1-2), May, 2012.