

起毛素材の毛羽立ちを利用した 超音波集束装置とプロカムシステムの幾何校正

黄 士豪^{†1} 伊藤 勇太^{†1} 杉浦 裕太^{†1} 星 貴之^{†2} 杉本 麻樹^{†1}

触覚提示技術の一つに、超音波集束装置を用いた超音波触覚刺激がある。超音波集束装置と従来のプロカムシステムを組み合わせることで、同期された視覚・触覚刺激を行うことができる。システムの構成において、超音波焦点を認識するためにマイクと3Dステージを用いた研究が行われていたが、本研究では起毛素材の毛羽立ちを利用してプロカムシステムと超音波集束装置の幾何校正を簡略化した。

Spacial Calibration of Airborne Ultrasound Tactile Display and Projector-Camera System Using Fur Material

SHIGO KO^{†1} YUTA ITOH^{†1} YUTA SUGIURA^{†1}
TAKAYUKI HOSHI^{†2} MAKI SUGIMOTO^{†1}

Airborne Ultrasound Tactile Displays (AUTD) are tactile displays that can generate vibrotactile sensation on human skin. Once an AUTD and a projector-camera system are combined and properly calibrated, we can produce synchronized stimuli to user's both vision and tactile sensations simultaneously. To calibrate the system, previous works use microphones and 3D stages to recognize ultrasound focal points. On the other hand, our proposed method utilizes fluffing of fur material to recognize the focal points, which simplifies the calibration procedure.

1. はじめに

触覚提示技術の一つとして、超音波集束装置を用いた超音波の音圧刺激による触覚提示がある[1]。これはデバイスを用いた触覚提示とは異なり、ユーザーがデバイスを装着・保持することなく空間中に触覚を提示することができ、装置の重さ・大きさに阻害されることのない触覚提示が可能である。近年では、この空中触覚提示に加えて、プロジェクタ・カメラシステム（以下、プロカムシステム）を用いて映像投影を同時することで、視触覚の統合されたコンテンツを人間の皮膚表面や環境に対して非接触的に提示できるようなシステムが開発されている[2]。このようなプロカムシステムと超音波投射を一体として使うシステムを構築する場合、プロカムシステムと超音波集束装置の空間的な幾何校正をする必要がある。従来の超音波集束装置の幾何校正ではマイクロフォンと3Dステージを用いる方法があるが、この場合は専用の装置が必要であり、データの取得に時間がかかることが難点として挙げられている[3]。またプロカムシステムの校正のためには視覚的なマーカが必要となるため超音波集束装置と同時に利用する場合は手順が煩雑となる。

本研究では起毛素材を用いた簡便な幾何校正を行う。起毛素材に対して超音波を投射し、毛羽立ちの変化をカメラ

で認識することで超音波集束装置と画像座標の対応点を取得し、幾何校正に用いる。幾何校正の精度評価として、算出した幾何校正のモデルを用いて再投影誤差を求める。

2. 関連研究

超音波集束装置はスピーカーの配列を用いて空間中に超音波焦点を形成し[1]、超音波の音圧によって触覚刺激を提示することが可能である。そのため触覚提示のためにユーザーがデバイスを装着する必要がない。長谷川らは3Dステージとマイクを用いて超音波集束装置を複数用いて、人間の皮膚表面に超音波を投射した際の触覚の分解能を検証した[4]。空中に投影した映像をユーザーが触り、触覚フィードバックを超音波集束装置によって提示することで映像に触っている感覚を提示している[5]。

また、触覚提示の他に粘性流体を用いることで超音波集束装置の圧力分布を可視化した研究[3]や、超音波集束装置を用いた描画についての研究も行われている。超音波集束装置による音圧刺激を用いて起毛素材の毛羽立ちを変化させることにより絵や文字を提示する描画方法[6]や、位相の異なる音波により空間中に物体を浮遊させることにより描画を行う方法[7]が研究されている。

人間への触覚提示の技術として装着型デバイスによる触覚提示として指先に取り付けた装置による情報空間内の仮想物体の内容物提示[8]や、腰部に装着した振動提示ベルトによる触覚提示[9]などがあるが、これらのデバイスによる触覚提示は装着面のみに限定される。非接触型の触覚提示として、エアジェットを用いた触覚提示[10]がある

†1 慶應義塾大学

Keio University

†2 東京大学

Tokyo University

が、これは指先に提示することを目的としており提示範囲が狭い。これらの研究では触覚提示のためにデバイスを装着、または保持する必要がある。

3. 理論

本研究で使用するデバイスはそれぞれ固有の座標系を持つ。本研究では主にカメラから取得した画像における画像座標 $\mathbf{p} = (u, v)$ 、カメラを原点としたカメラ座標系 \mathbf{C} 、超音波集束装置を原点とした超音波集束装置座標系 \mathbf{W} を定義し (図 1)、それぞれの座標系の対応点を用いて座標系間の変換行列を算出することでデバイスの対応付けを行う。

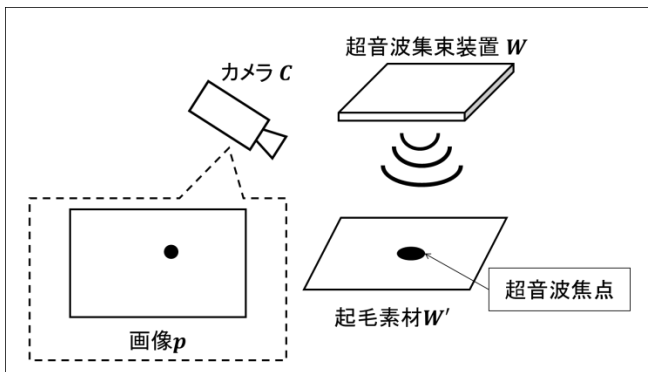


図 1 本研究で使用するデバイスと固有座標系

3.1 平面射影変換

カメラと超音波集束装置の平面を対応付けするために、平面射影変換行列を算出する。平面射影変換とは、一つの座標系上にある任意の四角形を、別の座標系での任意の四角形に移すための変換である。本研究では実世界座標系で示される超音波集束装置の座標系と、カメラの投影平面の変換を行う。画像座標 $\mathbf{p} = (u, v)$ から、ある超音波集束装置座標系の平面 $\mathbf{W}' = (X_w', Y_w')$ への射影変換は、斉次座標と平面射影変換行列 \mathbf{H} を用いて以下の式のように表せる。

$$\tilde{\mathbf{p}} \approx \mathbf{H}\tilde{\mathbf{W}}' \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w' \\ Y_w' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

このとき、対応点の組が 4 組あれば平面射影変換行列の係数を決定することができるが、本研究では超音波集束装置に対して指示した投射点と、カメラが起毛素材を通じて認識した投射点の組を 4 組以上取得することで誤差の減少を図る。

3.2 透視投影変換

カメラの三次元座標と超音波集束装置の三次元座標、を対応付けるために、透視投影変換行列を算出する。超音波集束装置座標系の点 $\mathbf{W} = (X_w, Y_w, Z_w)$ と画像座標上の点 $\mathbf{p} = (u, v)$ の間の座標系変換は、斉次座標と透視投影変換行

列 \mathbf{P} 、カメラから \mathbf{W} の距離 d を用いて以下の式のように表せる。

$$\tilde{\mathbf{p}} \approx \mathbf{P}\tilde{\mathbf{W}} \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{p}} \approx \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]\tilde{\mathbf{W}} \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow d \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R}|\mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \approx \mathbf{R}^{-1} \left(\mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} - \mathbf{t} \right) \quad (6)$$

\mathbf{K}	カメラの内部パラメータ行列
\mathbf{R}	回転行列
\mathbf{t}	並進ベクトル
f_x, f_y	焦点距離
c_x, c_y	画像中心

このとき、対応点の組が 6 組あれば透視投影変換行列の係数を決定することができる。算出した透視投影変換行列から、回転行列 \mathbf{R} 、並進ベクトル \mathbf{t} を用いることで、画像座標の点から超音波集束装置座標系への変換の行うことができる(6)。

4. 実装

システムの外観を図 2 に示す。超音波集束装置、カメラ、プロジェクタ、起毛素材から構成されており、超音波集束装置の下に起毛素材を置き超音波を投射した際の起毛素材の毛羽立ちの変化をカメラで認識し、超音波投射点の認識を行う。

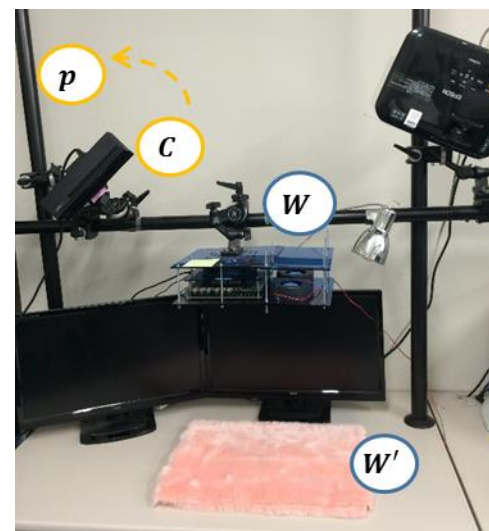


図 2 システムの外観

次に、超音波投射点認識のフローを図 3 に示す。まず、起毛素材に対して超音波を投射する。カメラから得られた画像と、直前フレームとの差分を取得する。以降の処理のため、取得した差分画像の画素値を定数倍する(図 4a)。差

分画像にメディアンフィルタを用いて処理を施し、処理を施した画像のネガ・ポジ反転画像を加算した後、二値化を行う。ここまでの処理を繰り返し、出力を蓄積する(図 4b)。これを数回繰り返す。また、環境ノイズを削減するために超音波を投射せずに同じ処理を加えた画像も作成し、それぞれの画像を以下の式で畳み込む。

$$P = \sum_i^{n_t} \frac{P_{ti}}{n_t + n_f} - \sum_j^{n_f} \frac{P_{fj}}{n_t + n_f} \quad (7)$$

P	畳み込み画像
P_t	超音波を投射した時の画像
P_f	超音波を投射しない時の画像
n_t	P_t の枚数
n_f	P_f の枚数

畳み込んだ結果画像から重み付け重心を算出し、超音波投射点とする(図 4c)。超音波を投射した後、二値画像中の白領域が少ない画像を廃棄し、残りの対応点の組を使用して座標変換モデルを導出する。

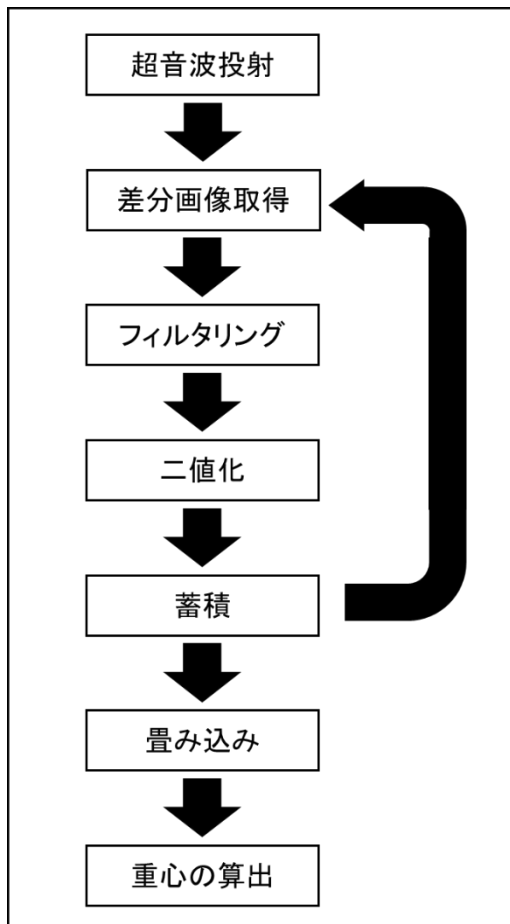


図 3 超音波投射点認識のフロー

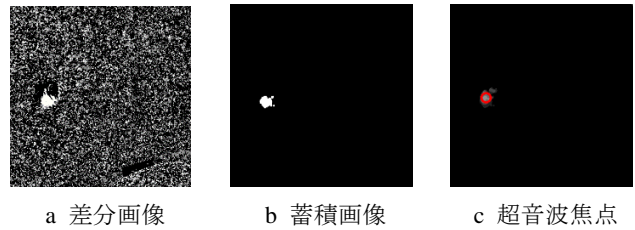


図 4 超音波投射点算出

5. 実験

超音波投射点認識の精度を評価するため、超音波の再投影誤差を測定した。超音波集束装置と起毛素材の距離は450mmとし、平行であると仮定した。平面射影変換行列を導出した後、再度同じ点に超音波を投射し、その際認識した画像座標と平面射影変換行列を用いて超音波集束装置の座標系に変換し、その時の誤差を求める。1回の平面射影変換行列算出に対して9点の測定を行い、これを4セット行った。実験の結果を表1に示す。また、投射を行ったそれぞれの点のズレの様子を図5に示す。また、それぞれの点での誤差と標準偏差を図6に示す。

表 1 平面射影変換を用いた際の超音波再投影誤差

誤差の平均	2.63 mm
誤差の標準偏差	1.39 mm

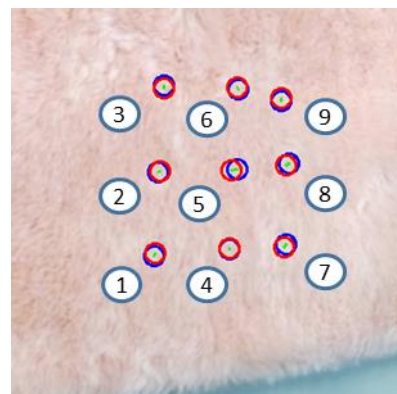


図 5 超音波投射点のズレ

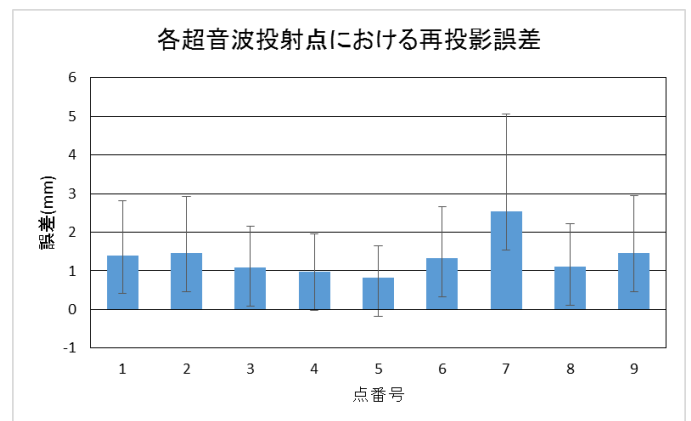


図 6 各超音波投射点における再投影誤差

6. 超音波集束装置とプロカムシステムの統合

超音波集束装置とカメラの幾何校正モデル，カメラとプロジェクタの幾何校正モデルを用いることで，超音波集束装置座標系とプロジェクタの幾何校正を行うことができる(図7)．超音波集束装置座標系とプロジェクタの幾何校正モデルを用いることで，同期した超音波投射と映像の投影を行うことができる．起毛素材へ超音波投射を行うことで起毛素材に絵を描画し(図8)，その絵に対して映像を重畳することで両者の幾何校正(図9)ができていることを確認した．

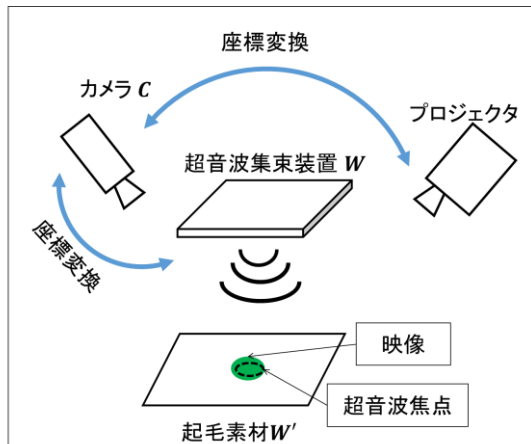


図7 超音波集束装置とプロカムシステムの幾何校正



図8 超音波投射を用いた起毛素材への描画



図9 起毛素材上の絵への映像重畳

7. 結論

本研究では超音波集束装置とプロカムシステムの幾何校正を簡便化した．超音波を投射した際の起毛素材の毛羽立ちの変化をカメラで取得することで超音波の投射点認識を行った．平面射影変換を用いた超音波集束装置とカメラ間の幾何校正の誤差は平均で2.63 mmであった．超音波集束装置とカメラ，カメラとプロジェクタの幾何校正を用いることで超音波集束装置とプロカムシステムを統合した．

謝辞

本研究はJSPS 科学研究費補助金15H01701の助成を受けたものである．

参考文献

- 1) 星貴之, 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発. 計測自動制御学会論文集, Vol.50, No.7, pp.543-552, 2014.
- 2) Kazuma Yoshino, et al., Measuring Visio-Tactile threshold for Visio-Tactile Projector, SICE Annual Conference 2012 pp.1996-2000, 2012.
- 3) 星貴之, 粘性流体を用いた空中超音波触覚ディスプレイの圧力分布の可視化, ロボティクス・メカトロニクス講演会2013(ROBOMECH2013)講演論文集, 2A2-B04(1-3), 2013.
- 4) Keisuke Hasegawa, et al., Aerial display of vibrotactile sensation with high spatial-temporal resolution using large-aperture airborne ultrasound phased array, In IEEE World Haptics Conference 2013, pp. 31-36, 2013.
- 5) Yasuaki Monnai, et al., Haptomime: Mid-air haptic interaction with a floating virtual screen, UIST'14, pp.663-667, 2014.
- 6) Yuta Sugiura, et al., Graffiti fur: Turning your carpet into a computer display, UIST'14, pp.149-156, 2014.
- 7) Yoichi Ochiai, et al., Pixie dust: graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field, SIGGRAPH 2014, Article No. 83, 2014
- 8) Kouta Minamizawa, et al., Gravity grabber: Wearable haptic display to present virtual mass sensation, ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, Article No. 8, 2007.
- 9) Robert W. Lindeman, et al., Wearable vibrotactile systems for virtual contact and information display, VirtualReality, pp.203-213, 2006.
- 10) James C. Gwilliam, et al., Design and control of an air-jet lump display, IEEE haptics Symposium 2012, pp.45-49, 2012.