



## 空中触覚の作業空間の拡大

鈴木 颯<sup>1)</sup>, 藤原正浩<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1)</sup>, 篠田裕之<sup>1)</sup>

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, suzuki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp, Masahiro\_Fujiwara@ipc.i.u-tokyo.ac.jp, {yasutoshi\_makino, hiroyuki\_shinoda}@k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 従来の空中触覚提示の作業空間は、一辺 30 cm の立方体領域程度までであり、表示対象は手のひらか指先に限られてきた。本研究では、人間の上部を覆うような広い作業空間を実現するための手法を提案する。また、拡大された空間での仮想物体とのインタラクションを行い、大規模空間における空中触覚の効果を評価する。

**キーワード:** 空中触覚, AR, MR

### 1. はじめに

岩本らの開発した空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD) は、人体表面への非接触触覚フィードバックを可能にした [1]。このような空中触覚は、ウェアラブル触覚デバイスとともに、VR/AR/MR 環境において触覚フィードバックを提供するために研究されている。空気流を用いた手法 [2] を含めた空中触覚の利点は、ユーザがデバイスを装着する必要がなく、ユーザの動きが制限されないという点である。特に、AUTD では、任意のタイミングで自由な位置に精密に刺激を提示する事ができ、様々な時空間変調パターンを形成できる。

AUTD は、超音波振動子が格子状に配置されたフェーズドアレイである [3, 4]。振動子の位相を制御することにより、AUTD は空気中の任意の位置に超音波を収束させる。この収束超音波により触覚フィードバックを与えることができる。例えば、門内らによって開発された HaptoMime[5] では、空中タッチパネルに触覚フィードバックが付与された。また、牧野らによって開発された HaptoClone[6] では、現実の物体を視覚・触覚的に隣接するワークスペースにクローンし、3D 映像との視触覚インタラクションを可能にした。これらの研究は、触覚フィードバックが空中映像との相互作用における操作感および現実感を向上させるのに効果的であることを示した。これらのシステムでは、触覚提示対象は手と指に限定されており、ワークスペースも 30cm 角程度の空間に制限されていた。

ワークスペースを拡張するには、多数の超音波振動子の位置および姿勢を厳密に決定することが問題となる。広いワークスペースで理想的に超音波を収束させるには、ワークスペースを振動子で覆う必要がある。現実的な解決方法は、ワークスペースを複数のフェーズドアレイユニット (AUTD ユニット) で囲むことである。図 1 は、2 つの AUTD ユニットを用いた例である。ワークスペースは、さまざまな方向の

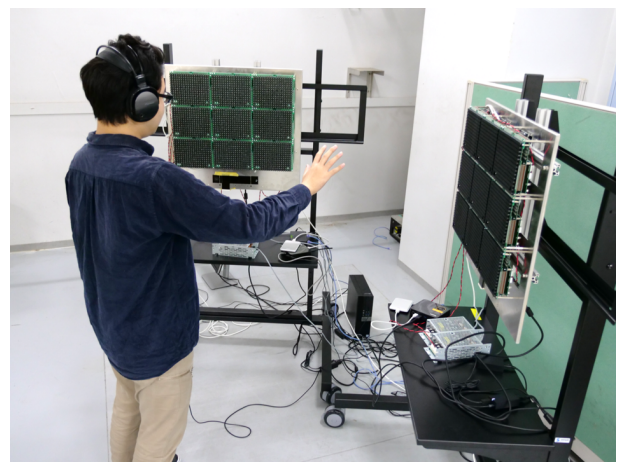


図 1: 2 台の AUTD ユニットを用いた例。

複数の AUTD ユニットでワークスペースを囲むことによって自由に設計される。ここで問題になるのは、このシステムで超音波の焦点を作成するためには、全ての AUTD ユニットの位置と角度を正確に把握しなければならないという事である。

本研究では、この超音波による空中触覚提示のワークスペースを拡大する手法を提案する。また、拡大されたワークスペースで空中立体映像とのインタラクションを行う手法を提案する。

### 2. システム構成

本研究で使用したシステム構成を図 2 に示す。各 AUTD ユニットは、3 次元計測用のデプスセンサ (Kinect v2, Microsoft Corp.) とスレーブ PC、及び 9 台の AUTD サブユニットを有する。スレーブ PC は LAN 経由でマスター PC に接続されている。すべてのユニットが同期し、各座標系で同時に 3 次元計測を行い、3 次元点群データをマスター PC に送信する。マスター PC はデプスセンサーからの情報を元に AUTD ユニットの制御する。

Shun SUZUKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

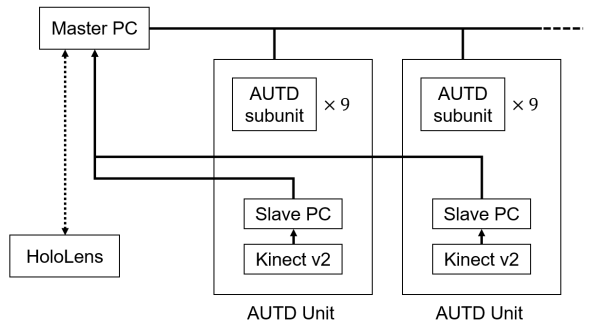


図 2: システム構成.

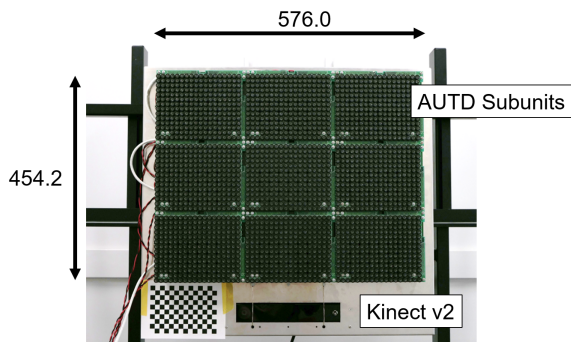


図 3: AUTD Unit 外観. 単位は mm.

AUTD ユニットの外観を図 3 に示す. 9 つの AUTD サブユニットがアルミフレームに固定されている. 一つの AUTD サブユニットには 249 個の超音波振動子があり, AUTD ユニットには合計 2241 個の振動子がある. デプスセンサも同様にフレームに固定されている. AUTD サブユニットと深度センサの位置関係はあらかじめ固定されている. AUTD ユニットの重量は 8kg であり, 利便性のためキャスター付のテレビスタンドに取り付けられている.

立体映像の描画は MR デバイス (HoloLens, Microsoft Corp.) で行う. MR デバイスと AUTD ユニットとの位置合わせは, AUTD ユニットにつけられたキャリブレーションパターンを用いて行う. HoloLens には現実空間に対する自己位置推定機能があるため, AUTD ユニットとのキャリブレーションは一回で十分である. また, 複数台の AUTD ユニットの位置合わせにもこの自己位置推定機能を用いる.

### 3. 柔仮想物体とのインタラクション

ここでは, 広い空間での空中触覚提示の一例として, 柔らかい仮想物体とのインタラクションを行う方法を述べる.

#### 3.1 視覚フィードバック

柔らかい物体として, 深度センサで取得された点群との相互作用により変形する球体を生成する方法を記す. まず, 球体にメッシュを張る. 深度センサから取得した手の点群がこの球体に接触した場合, 接触点  $\mathbf{x}_t$  からメッシュの各頂点  $\mathbf{y}_i$  に距離の二乗に反比例した力がかかる. この時, 各頂点は初期位置  $\hat{\mathbf{y}}_i$  とばねとダンパでつながっているものとする.

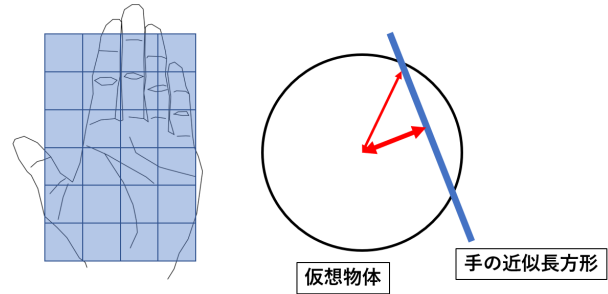


図 4: 触覚フィードバックの決定方法. 手の点群を長方形で近似し, 各格子点に焦点を出す. また, 焦点の強度を球体への侵入量に比例させる.

従って,

$$\Delta \mathbf{y}_i = \mathbf{v}_i \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{v}_i = \left( \frac{\mathbf{y}_i - \mathbf{x}_t}{1 + |\mathbf{y}_i - \mathbf{x}_t|^2} - k|\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i| \right) (1 - c\Delta t) \Delta t \quad (2)$$

として, 位置  $\mathbf{y}_i$  と速度  $\mathbf{v}_i$  を更新していく. ここで,  $k$  はばね定数,  $c$  はダンパの減衰係数である. これにより, 現実の手と仮想物体との視覚的インタラクションを行う.

#### 3.2 触覚フィードバック

次に, 空中触覚フィードバックを付与する方法を述べる. 焦点は複数点生成し, 面で触った感覚を与える. フェーズドアレーを用いて複数の焦点を生成する方法は, 井上らの方法 [7] を用いる. この時, 生成する各焦点の位置と強度を決める必要がある.

焦点の位置決定は以下の様にした. まず, 深度センサから得られた手の 3 次元座標点群を長方形で近似する. 即ち, 手を表す点群  $X = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1,2,\dots,n}$  に対し, これとの二乗距離の和を最小にするような長方形を生成する. 次に, この長方形を適当に正方形で分割し, この正方形の頂点を焦点の生成位置とした (図 4 左).

また, 焦点の強度は, 対象球体に対する侵入量に比例するようにした (図 4 右). 即ち, 球体の中心を  $\mathbf{x}_c$ , 半径を  $R$ , そして上述した  $i$  番目の焦点位置を  $\mathbf{f}_i$  としたとき,  $i$  番目の焦点強度  $a_i$  は

$$a_i = \begin{cases} 0 & (R < |\mathbf{x}_c - \mathbf{f}_i|) \\ R - |\mathbf{x}_c - \mathbf{f}_i| & (|\mathbf{x}_c - \mathbf{f}_i| < R) \end{cases} \quad (3)$$

で決定した.

#### 3.3 視触覚インタラクション

図 5 は実際に視触覚インタラクションを行った様子を示す. 直径 20 cm の球体をフェーズドアレーから約 1 m 離れた地点に表示した. 図 5 に示すように, 変形に伴い触覚フィードバックが与えられている様子がわかる.

本論文で提案した手法では, 視覚・触覚ともに違和感があり, 柔らかい物体を十分に表現できてはいない. これは, 提案手法が現実の柔らかい物体とは異なる変形を行うことや焦点位置がフェーズドアレーから遠いことによる焦点径の広がり等が原因であると考えられる. また, 井上らによる複

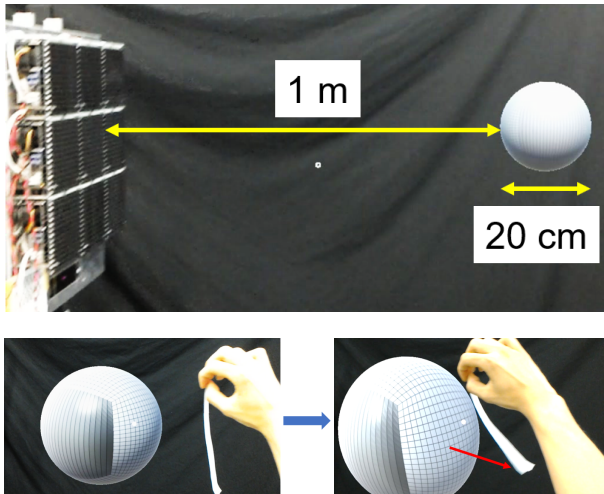


図 5: 球状物体との視触覚インタラクション。視覚的な変形とともに、触覚フィードバックが与えられる。

数焦点の生成手法 [7] は、非凸最適化問題であり収束が保障されていない。そのため、生成された焦点の強度が安定しない。リアルタイムインタラクションのための安定した複数焦点の生成方法の確立を行う必要がある。

#### 4. おわりに

本論文では、空中触覚のワークスペースを拡大する方法を提案した。複数の AUTD ユニートを配置することで自由にワークスペースを設計することができる。

また、本論文では柔らかい仮想物体とのインタラクションを行う手法を示した。拡大されたワークスペースにおいて、フェーズドアレーから 1 m ほど離れた地点における仮想物体とのインタラクションを行った。本論文で提案した方法は、視覚・触覚フィードバックの両者に違和感があり、柔らかさを表現するにはまだ十分ではない。

今後は視覚及び触覚のフィードバック手法の改善及び評価実験を行い、大規模空間における空中触覚の効果を調べる。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H06303 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] T. Iwamoto, M. Tatzono, and H. Shinoda, “Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound,” *Proc. Eurohaptics 2008*, pp.504–513, 2008.
- [2] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, A. Israr, “AIREAL: interactive tactile experiences in free air,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 32, No. 4, Article No.134, 2013.
- [3] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp.155–165, 2010.

- [4] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, S. Subramanian, “UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces,” *Proc. of the 26th ACM symposium on user interface software and technology (UIST '13)*, pp.505–514, 2013.
- [5] Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda, “HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen,” *Proc. 27th Annu. ACM Symp. User interface Softw. Technol.*, pp.663–667, 2014.
- [6] Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue, and H. Shinoda, “HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback,” *Proc. 2016 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst.*, pp.1980–1990, 2016.
- [7] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, “Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram,” *Proc. World Haptics Conference (WHC) 2015 IEEE*, pp.362–367, 2015.