



# 空中超音波を用いた円盤-指腹の接触位置制御による 曲面とエッジの触覚再現

関口葵葉<sup>1)</sup>, 森崎汰雄<sup>2)</sup>, 神垣貴晶<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, sekiguchi@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

2) NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

**概要:** 指腹に対してエッジを含む様々な曲率の曲面を提示することで、球体や直方体などの平面だけでは再現できない物体形状の触覚再現が可能となる。本稿では、指腹に接触する円盤の傾きを超音波の音響放射圧で制御して曲面感を提示する手法を提案する。ユーザーは指先に軽量なデバイスを装着するだけで、負担が少ない触覚提示を体験できる。被験者実験により、曲面とエッジを撫でる感覚が再現できることを確認した。

**キーワード:** 空中超音波, パッシブ触覚デバイス, 曲面

## 1. はじめに

物体に触れた感覚を再現する触覚提示技術は、virtual reality (VR) 体験における没入感向上への応用が期待されている。すでにコンシューマ向けの VR 用コントローラには振動子が内蔵され、その振動タイミングの制御で (例えば、手とオブジェクトの衝突タイミングに合わせて駆動することで) コンテンツへの没入感や操作感が高められている。

VR 空間において触れている物体の形状 (球体や直方体など) を現実のように触覚だけで識別できれば、単純な振動だけに比べ、その没入感はさらに高まる。指先と物体の接触位置はその時点の触れ方で変化するため、物体形状の触覚再現には、提示する触覚刺激の空間分布を制御する必要がある。この空間分布制御はこれまでピンアレイ [1] や電極アレイ (アレイ状電気触覚ディスプレイ) で試みられている。また Verschoor らは円盤を指腹に接触させ、その円盤と指腹の接触角度を制御することで様々な物体に触れた感覚を再現した [2]。この円盤デバイスでは例えば、平面に触れている感覚は、指腹に平板を押し付けることで提示される。球体など曲面に触れている感覚は、その曲面と指腹の接触位置に一致するように円盤と指腹の接触位置が変化する。

しかし、これらのような空間分布を再現する触覚デバイスはその提示装置が複雑かつ肥大化する傾向にある。ピンアレイなどでは素子数だけ駆動回路との個別配線が必要になる。また、先述した円盤の接触角度を用いた手法においても、その角度制御には 3 つのサーボモータが使われている [2]。

我々は軽量かつ単純な機構で触覚形状を再現するため、Verschoor らの円盤デバイスを参考に [2]、超音波で遠隔に駆動する円盤デバイスを提案する (図 1)。提案手法では、ユーザは指腹に接触するように 1.85 g と軽量なプラスチック製の円盤を装着する。この円盤に集束超音波を遠隔に照射し、その焦点で生じる非接触な力 (音響放射力) [3] でそ

の円盤の傾きを制御することで、指-円盤との接触位置を変化させる。この手法で例えば曲面を撫でた感覚を提示する場合、指先の水平移動に合わせて円盤を連続的に傾け、指-円盤の接触位置も水平に移動させる [4]。この曲面提示の模式図を図 1 に示す。

本論文では、提案した超音波で駆動する軽量な円盤デバイスを用いて、曲面を撫でている感覚が再現できることを実験的に示す。実験では、実験参加者の指先の水平な動きに対する円盤-指腹の接触位置の移動量とその移動速度を変化させ、その際に曲面を撫でる感覚が生起するかを調査した。結果より、曲率半径が 30 mm から 75 mm の平面が知覚されることが示された。さらに、円盤-指腹の接触位置の変化を極端に大きくかつ高速にすることで、曲率半径が 0 mm である、とがった面を撫でる感覚がリアルに再現できることも示された。

これまでにも超音波の音響放射力により駆動するデバイスは提案されている [5] が、このデバイスでは放射力をテコ機構で増幅し強い力刺激として提示することを目的としている。このデバイスでは提示力の空間分布は制御できず、このため曲面・形状は提示されていない。また、超音波を皮膚へ直接照射して曲面を撫でる感覚 [6] を再現した研究もあるが、提案デバイスのようにとがった面を撫でる感覚は提示できていない。

## 2. 提案手法

本章では、実際に開発した超音波駆動の円盤状触覚デバイスとその駆動システムを紹介する。また、曲面やエッジを撫でた触覚を再現するためのデバイス駆動アルゴリズムも説明する。

### 2.1 デバイスと駆動システム

図 2 に、開発した円盤状の触覚デバイスの写真とその模式図を示す。この円盤デバイスは、皮膚に接触して触覚を提示するための直径 15 mm 円盤 (刺激用円盤)、超音波焦点を照

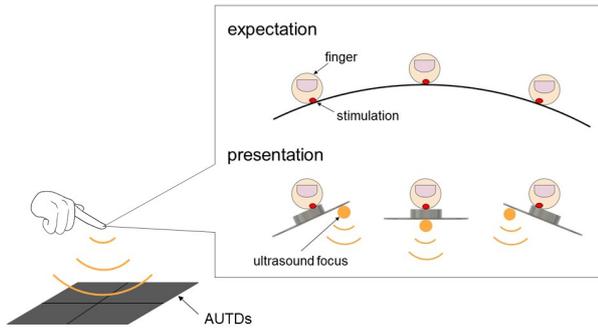


図 1: 本研究のコンセプト図

射して駆動するため直径 40 mm 円盤（駆動用円盤），指に装着するためのマウント部で構成される。この円盤らはアクリルで作られ，マウント部は光学式 3 D プリンタ (Form3+, Formlabs) でヤング率 2.77 GPa の樹脂製レジン (Formlabs グレーレジン V4) で造形した。刺激用円盤・駆動用円盤とマウント部はゴム膜で接合されており，この接合部の弾性により，駆動用円盤に加えられた力に応じてその円盤の傾きを変化できる。

図 4 に円盤状デバイスの駆動システムを示す。このシステムは，円盤デバイスの 3 次元位置をトラッキングするための深度カメラ (Intel RealSense Depth Camera D435)，超音波焦点を生成し円盤デバイスを駆動するための空中超音波フェーズドアレイで構成される [7]。円盤デバイスの中心にはあらかじめ赤いカラーマーカを貼り付けており，このカラーマーカの位置をバイナリカラーフィルタで検出することで，デバイス位置をトラッキングした。空中超音波フェーズドアレイとは，その位相を個別に制御可能な超音波振動子をアレイ状に配列したものである。この位相を適切に制御することで空間の任意の位置に超音波焦点が生成でき，この焦点を円盤デバイスに提示することで遠隔に力を加える（駆動する）。本論文では，40 kHz の超音波振動子を 996 個使用した。

## 2.2 曲面提示のための駆動アルゴリズム

図 5 に曲面を撫でている感覚を再現するための，円盤状触覚デバイスの駆動アルゴリズム（焦点位置の決定アルゴ

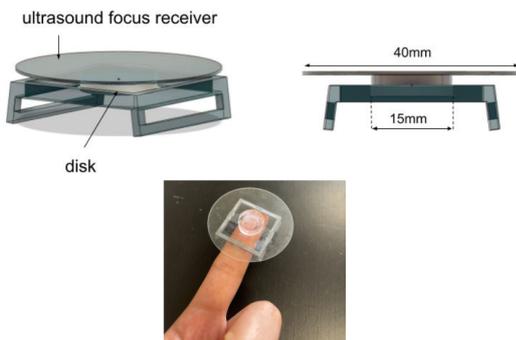
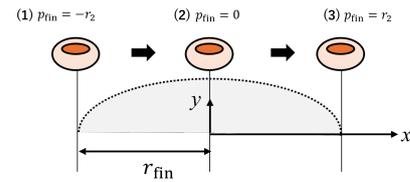


図 2: 開発した超音波で駆動する円盤状の触覚デバイス。

## 指の移動例



## 焦点の移動例

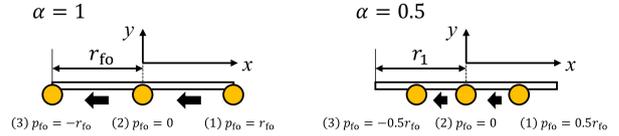


図 3: 曲面を撫でた触覚を再現するための，円盤に対する焦点の照射パターン。指先と想定した曲面の位置関係に基づき，焦点位置を水平に (x 方向に) 移動させる。

リズム) の模式図を示す。

指の動きに合わせて超音波焦点を動かし，円盤と指の接触部分を変化させることで曲面を提示する，指は 1 方向に動かす場合を想定する。円盤上での焦点最大移動距離を  $2r_{fo}$ （円盤の直径以内），円盤上での焦点の x 座標を  $x_{fo}$ ，指の最大移動距離を  $2r_{fin}$ ，指の x 座標を  $x_{fin}$  とする（図 3）。円盤上での焦点移動距離  $x_{fo}$  は

$$x_{fo} = -\alpha \frac{r_{fo}}{r_{fin}} x_{fin} \quad (1)$$

に従うように動かす。ここで  $\alpha$  は指の動きに対するの焦点の移動速度を決定する係数であり，その範囲は  $0 < \alpha \leq 1$  である。 $\alpha = 1$  の場合は焦点の移動速度は最も高速になり，ユーザが指を  $-r_{fin}$  から  $r_{fin}$  まで動かすまでの間，焦点は円盤の端から端 ( $r_{fo}$  から  $-r_{fo}$ ) まで移動する。

式 1 と異なり，エッジを撫でた感覚の提示は，指の位置に応じて焦点位置を 2 段階で変化させ提示した。この場合の  $x_{fo}$  は以下であった。

$$x_{fo} = \begin{cases} r_{fo} & \text{if } x_{fin} \leq 0, \\ -r_{fo} & \text{if } x_{fin} > 0. \end{cases} \quad (2)$$

## 3. 実験

本実験では，開発した円盤状デバイスを用いて曲面やエッジを撫でる感覚を提示できるか評価した。

### 3.0.1 刺激

本実験では，曲率半径の異なる 4 つの面の触覚再現を想定し，4 種類の焦点移動パターンを用いていた。この 4 パターンについて，実際のデバイス駆動と想定した再現する面の模式図を図 5 に示す。以下，曲率半径の小さい順に，この焦点パターンをそれぞれパターン 1, 2, 3, 4 と呼称する。まず，最も曲率半径が小さいエッジを撫でる感覚を提示するために，式 2 に基づいた 2 段階の変化を用いた。次に，曲面を撫でる感覚を提示するためには式 1 による連続的な変

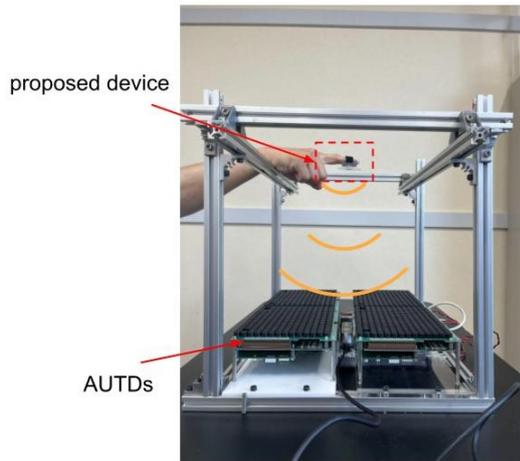


図 4: 実験の様子

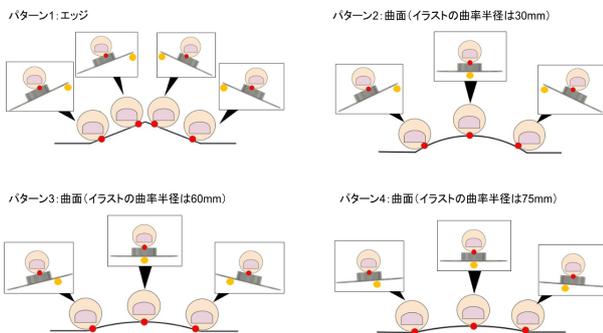


図 5: 4 種の曲面・エッジパターンのイラスト

化を用いた。この式 1 による曲面提示においては、その焦点の最大移動幅に相当する  $\alpha$  を  $\alpha = 1, 0.5, 0.25$  と変化させた。より小さい  $\alpha$  はより大きい曲率半径の曲面に対応している。

3.1 実験 1: 選択問題

3.1.1 手順

被験者は平均年齢 26.6 歳の男性 5 名であった。

本実験では、2.1 章で説明したデバイスと駆動システムを用いた。図 4 に実験のセットアップを示す。被験者は右手の人差し指に円盤状デバイスを装着した。また、参加者は外部ノイズを遮断するため、実験中はヘッドホンでホワイトノイズを聞いていた。実験参加者はまず、固定されたアルミフレームの棒に自身の手首を置く。その後、参加者には速度 3.3 cm/s(撫でる範囲を 3 秒で 1 往復する速度)で左右に動く円状マークが PC ディスプレイで提示される。参加者はそのマークと同様の速度になるように、繰り返し指先を(手首ごと)左右に水平移動させた。水平この参加者の指の動き(デバイスの動き)に応じて超音波焦点が提示された。この超音波の照射パターンは、図 5 に示した 4 つが 5 回ずつランダムな順番で(計 20 回)提示された。参加者には 4 種類の曲率が異なる面のイラスト(図 6)が提示され、各刺激条件に対し一つずつ、知覚している形状に最も近いイラストを選択した。この時提示された面の曲率半径はそれぞれ 0, 30, 60, 75 mm であった。

知覚した形状に最も近いものを選択してください

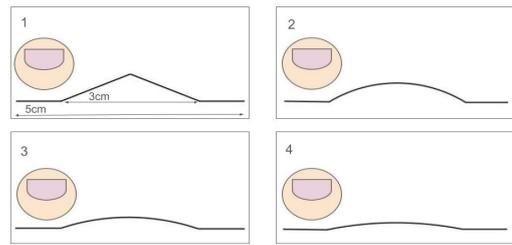


図 6: 実験 1 で被験者へ提示したイラスト

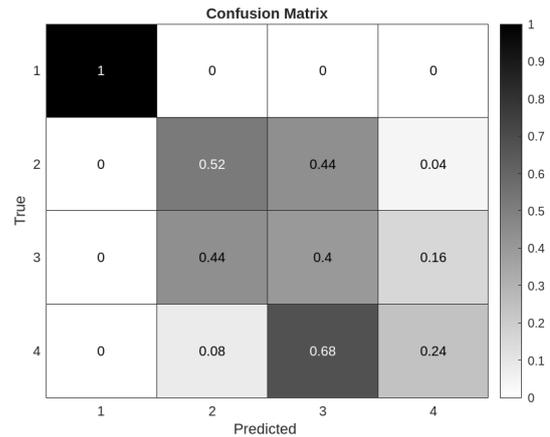


図 7: 実験 1 の実験結果

3.1.2 結果

提示した触覚刺激(図 6)に対し、実際に実験参加者が選択した視覚刺激(図 6)を混合行列にまとめた。この混合行列を図 7 に示す。この結果より、焦点位置を 2 段階で変化させた場合(図 5 の 1)に、対応するイラストとしてエッジが選択された回数は 100%であった。図 5 の 2, 3, 4 パターン( $\alpha = 1, 0.5, 0.25$ )に対し、曲率半径 30, 60, 75 mm がそれぞれ選ばれた確率は 52%, 40%, 24%であった。

混合行列の対角線部分についてチャンスレート(25%)と比較するため、各参加者ごとに選択率を個別に計算したうえで t 検定を行った。本稿では、p 値の有意水準を 0.05 とした。t 検定で得られた p 値を表 1 に示す。この結果より、パターン 1(エッジ)とパターン 2(曲率半径 30mm)はチャンスレートと間に有意差があり、パターン 3(60 mm)とパターン 4(75 mm)では有意差がなかった。

3.2 実験 2: リアリティ評価

3.2.1 手順

実験参加者は実験 1 と同様であった。

本実験では図 4 に示した実験セットアップを用いた。実験者にはまず、図 6 に示した 4 つの曲面のイラストの中からランダムに一種類が提示された。この提示されたイラストに対し、実験者は実験 1 と同様の手順でパターン 1, 2, 3, 4 の刺激をランダムな順番で体験した。参加者はこの 4 つの触覚刺激と提示されたイラストの状況を比較し、それがどの程度一致しているか 7 段階で評価した。この評価においては、1 を「全く一致していない」、4 を「どちらともい

表 1: 各パターンにおける p 値

パターン	1	2	3	4
p 値	<b>0.000</b>	<b>0.028</b>	0.169	0.815

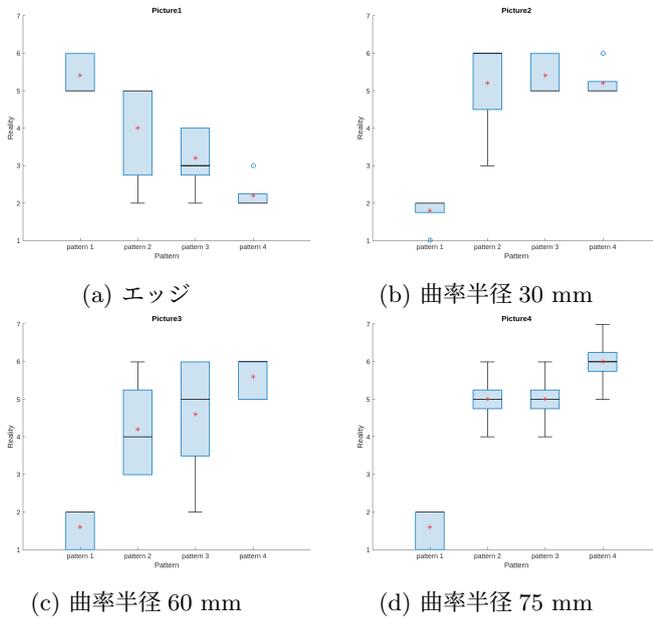


図 8: リアリティの評価結果 (実験 2)。

えない」, 7を「完全に一致している」とした。参加者は合計で 4 イラスト  $\times$  4 刺激 = 16 回その一致度を回答した。

### 3.2.2 結果

図 8 に参加者が評価したリアリティを示す。パターン 1 の触覚刺激に対しては、エッジへのリアリティが最も高かった (中央値 5)。パターン 2 に対しては、曲率半径 30 mm へのリアリティが最も高かった (中央値 6)。パターン 3 に対しては、曲率半径 30, 60, 75 mm へのリアリティが最も高かった (中央値 5)。パターン 4 に対しては、曲率半径 60, 75 mm へのリアリティが最も高かった (中央値 6)。

## 4. 考察

実験結果より、曲率半径が 30–75 mm の曲面とエッジが高いリアリティ (7 段階中 5 以上) で知覚されることが明らかになった。実験 2 におけるリアリティの評価において、図 6 に示したすべての形状 (エッジ, 曲率半径 30–75 mm の曲面) について、5 以上と高いリアリティをもって感じられていることがわかった。

一方で、エッジ以外の曲面については、それらを触覚だけで判別することは困難であることも同時に明らかになった。まず、エッジは触覚刺激のみで明確に判別ができたものと思われる。実験 1 の結果より、触覚パターン 1 に一致する刺激としてすべての参加者がエッジを選択していた。また、実験 2 においても、触覚パターン 1 はエッジのイラストに対してのみ高いリアリティ (5) を記録しており、残りのイラ

ストに対してはそのスコアは 2 以下であった。しかし、実験 1 において、触覚パターン 2, 3, 4 に対して選ばれたイラストは分散しており、このうち触覚パターン 3, 4 については想定したイラスト (曲率半径 60, 75 mm) の選択率はチャンスレートを有意に下回った。

今後は、この曲面における識別率をより詳細に評価するため、本デバイスで提示できる曲面における曲率の知覚閾値や丁度可知差異を調査する。

## 5. 結論

本稿では、円盤と指の接触位置を超音波の放射力で遠隔制御することで、曲面やエッジなどを撫でている感覚が表現できるか調査した。結果より、その角度変化により、曲率半径が 30–75 mm の曲面とエッジが高いリアリティ (7 段階中 5 以上) で知覚されることが明らかになった。今後は、この手法で提示可能な曲率の閾値や丁度可知差異を調査する。

## 参考文献

- [1] M. Shimojo, M. Shinohara, and Y. Fukui, “Human shape recognition performance for 3d tactile display,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, vol. 29, no. 6, pp. 637–644, 1999.
- [2] M. Verschoor, D. Casas, and M. A. Otaduy, “Tactile rendering based on skin stress optimization,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 39, no. 4, pp. 90–1, 2020.
- [3] 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.
- [4] M. W. Wijntjes, A. Sato, V. Hayward, and A. M. Kappers, “Local surface orientation dominates haptic curvature discrimination,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 2, no. 2, pp. 94–102, 2009.
- [5] T. Morisaki, T. Kamigaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Ultralever: Ultrasound-driven passive haptic actuator based on amplifying radiation force using a simple lever mechanism,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2024.
- [6] Z. Somei, T. Morisaki, Y. Toide, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Spatial resolution of mesoscopic shapes presented by airborne ultrasound,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2022, pp. 243–251.
- [7] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 4, pp. 740–749, 2021.