



# 触覚を用いた曲面判別における強度に対する接触位置の優位性

The Superiority of Contact Position over Strength on Tactile Curve Discrimination

曾明然<sup>1)</sup>, 森崎汰雄<sup>1)</sup>, 鈴木颯<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1)</sup>, 篠田裕之<sup>1)</sup>

Zen SOMEI, Tao MORISAKI, Shun SUZUKI, Yasutoshi MAKINO, Hiroyuki SHINODA

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, somei@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 指でなでるように曲面を触る際, その形状知覚に特に必要な情報は「接触位置」であることが分かった. ヒトが曲面を知覚するに当たって特に重要と思われる, 「接触位置」や「強度」を抜き出したバーチャル曲面を空中超音波で再現し, 比較した. 結果, 曲面知覚において, 「接触位置」を同期した, つまり指の移動に応じて接触位置を適宜ずらすことで十分に曲面を知覚できることが分かった.

**キーワード:** 曲面, 凹凸, 感覚・知覚, 拡張・複合現実

## 1. 緒言

ヒトが数 cm 程度の曲面を認識する際に, 接触強度の情報よりも接触位置の情報の方が大事であることがわかった. 指で曲面をなでる際, ヒトは多くの情報を読み取っている. 一般的に触覚レンダリングでは, 中でも重要だと思われる情報を抽出し, その優位性を検証している. 曲面の触覚レンダリングで抽出されることが多い情報として接触位置, そして接触強度に注目した. 例えば接触位置に注目した方法として, Wijntjes 氏は指で曲面をなでる状況を想定したとき, 指の高さを変えずとも, 接触面の傾きのみを同期することで曲率が知覚されることを明らかにした [1]. 一方接触強度では, Howard らは手のひらで曲面に触れる状況を想定し, 手のひらとの接触強度を変更することで, 凸面, 凹面, 線を識別できることを明らかにした [2].

本研究では, 接触位置に注目した方法 (位置法), 接触強度に注目した方法 (強度法), そして両方に注目した方法 (ミックス法) で, 数 cm ほどの 1 凸面・1 凹面を作成したときに知覚がどのように異なるかを調査した. 実験では, 曲面と連動した映像を用意し, その映像から想定される刺激と, 各手法による触覚がどれくらい違和感なく知覚されるかを検証した.

本研究では, これらの曲面を空中超音波 [3] を用いて提示した. 空中超音波を含む空中触覚提示技術は, 空中視覚提示技術と組み合わせることで非接触インタフェースを実現できる技術として注目されている. 空中触覚提示方法の中でも超音波は空間的・時間的に高い解像度を持っている. 近年, 森崎らによって空中超音波による疑似圧覚法 [4] が提示された. 低周波の LM 刺激によって疑似的な圧覚が生じるため, 指先の細かい接触位置や接触強度のずれを知覚することができる. 本研究ではこの疑似圧覚法を用いて, 位置や強度に注目して作成した凹凸面の知覚を検証した.

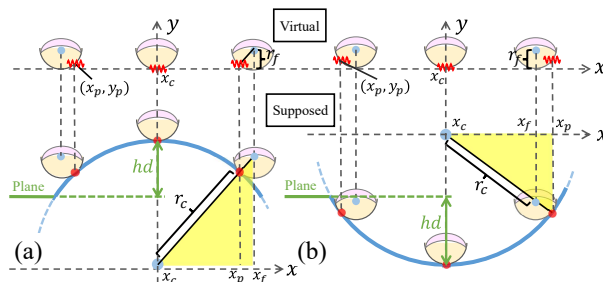


図 1: 位置法による (a): 1 凸面・(b): 1 凹面提示法.

## 2. 方法とシステム

### 2.1 システム概要

位置法, 強度法, ミックス法による 1 凸面・1 凹面提示法を示す. 現実の物体との接触においては, 接触位置や接触圧を含め, 沢山の情報が変化する. 本実験では, 中でも重要だと思われる接触位置と接触圧の情報に注目し, 各手法による凹凸の感じ方や評価を比較することで, 凹凸の識別には接触位置, 接触強度どちらの情報の方がより優位なのかを明らかにする. 本手法では, 指の軌道は指の軌道は水平面上であり, 指は一切上下には動かない. 接触位置・接触圧の情報のみを抜き出すに当たり指の上下方向の情報は省いたが, この情報が曲面の認識に不要であることは既に明らかになっている [1].

### 2.2 位置法

位置法における接触位置の計算方法を図 1 に示す. 指の中心の水平方向位置を  $x = x_f$  としたときに装置による触覚が指に触れる接触位置を  $(x, y) = (x_p, y_p)$  に設定する.  $(x_p, y_p)$  の算出は, Fig. 1(a)(b) のような幾何学的考察から求める. 具体的には, 指と想定曲面を円とし, 指の半径, 曲面の半径, 曲面の  $x$  軸中心をそれぞれ  $r_f$ ,  $r_c$ , および  $x_c$  とし,

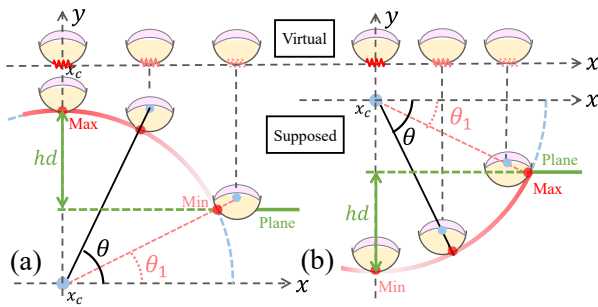


図 2: 強度法による (a): 1 凸面・(b): 1 凹面提示法.

1 凸面のとき

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{r_c}{r_c + r_f} \cdot (x_f - x_c) + x_c \\ y_p &= r_f - \sqrt{r_f^2 - (x_f - x_p)^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

1 凹面のとき

$$x_p = \frac{r_c}{r_c - r_f} \cdot (x_f - x_c) + x_c \quad (2)$$

のように接触位置を与える。凹面  $y_p$  は (1) 式と同じである。

本実験では空中超音波を用いて、この接触位置に超音波を照射した。このとき、接触位置によらず放射圧を空中超音波で出せる最大圧力とした。本実験では  $r_f = 7$  mm, 凸面の高さもしくは凹面の深さ  $h_d = 5$  mm とし,  $r_c = 15$  mm, 35 mm の 1 凸面・1 凹面を用いた。

### 2.3 強度法

強度法を図 2 に示す。強度法による凸面では、水平面に沿って移動してきた指と凸面が最初に接触した状況での提示圧力をゼロとし、図 2(a) に示される想定軌道の高さに比例して、提示圧力を増大させる制御を行う。また凸面の最上部での圧力が、提示装置の出せる最大値となるように設定する。具体的には、

$$P = \begin{cases} (2\theta'/\pi) \cdot P_M & (\theta' \leq \pi/2) \\ -(2\theta'/\pi) \cdot P_M + 2 & (\theta' > \pi/2) \end{cases} \quad (3)$$

のように放射圧  $P$  を設定した ( $P_M$ : 最大圧力)。ただし

$$\theta' = (\theta - \theta_1) \cdot \frac{\pi/2}{\pi/2 - \theta_1}$$

である。 $\theta_1$  は図 2(a) に示されるような角度である。

強度法による凹面では、水平面に沿って移動してきた指と凹面が最初に接触した状況での提示圧力を最大とし、図 2(b) に示される想定軌道の深さに比例して、提示圧力を減少させる制御を行う。また凹面の最下部での圧力がゼロとなるように設定する。具体的には、

$$P = \begin{cases} -(2\theta'/\pi) \cdot P_M + 1 & (\theta' \leq \pi/2) \\ (2\theta'/\pi) \cdot P_M - 1 & (\theta' > \pi/2) \end{cases} \quad (4)$$

のように放射圧  $P$  を設定した。ただし  $\theta'$  は (2.3) 式と同様であり、 $\theta_1$  は Fig.2(b) に示されるような角度である。

強度法では、以上のように計算された圧力を常に指腹の定位置に与える。また、位置法と同様の大きさの 1 凸面・1 凹面を用いた。

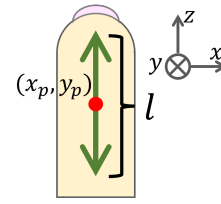


図 3: LM 線状変調法のイラスト.

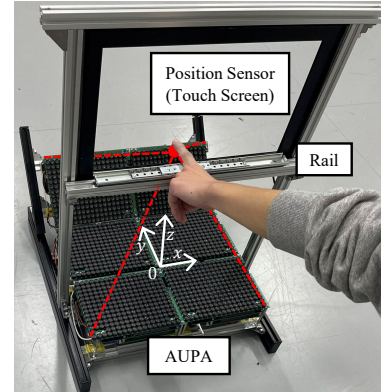


図 4: システムの写真.

### 2.4 ミックス法

想定上の接触位置を指の水平移動位置に同期しつつ、また接触圧も接触点の高さに比例して増大させる方法をミックス法と呼ぶことにする。具体的には、凸面では、(1) 式を用いて推定した接触位置に (3) 式で計算した接触圧を提示した。凹面では、(2) 式を用いて推定した接触位置に (4) 式で計算した接触圧を提示した。ミックス法でも同様の大きさの 1 凸面・1 凹面を用いた。

### 2.5 超音波による接触点提示法

本実験では指を固定しても刺激が感じられるように低周波 LM 変調をおこなった [4]。10 Hz 以下の低周波で LM 変調 [5] を行った場合、疑似的な圧覚が生じることが分かっている。高周波の AM 法を適用した場合は異なり、空間的な局在性が明瞭な圧覚刺激となる。本研究では、LM 法の内、線状提示を行った。図 3 のように、指に沿った方向の区間  $l$  内に、焦点を  $f$  [Hz] で正弦振動させる。指の方向を  $z$  として、 $z = l \sin(2\pi ft)$  のように焦点を変動させるとともに、左右方向については振動が生じないように焦点位置を設定する。図 3 は指が右方向に一定速度で移動する際の、絶対空間内での焦点移動の例を図示している。

本研究では、 $l = 1$  cm,  $f = 15$  Hz とした。また、余計な振動を発生させないため、LM 振動における 1 周期あたりの設定点数は 50 点とした。

### 2.6 システム

提案システムを図 4 に示す。このシステムは、Infrared Touch Screen (GreenTouch, GT-IR-TK156-1, 15.6 inch, 以下 ITS) と AUPA (Airborne Ultrasound Phased Array, [6]) を中心に構成されている。

ITS は画面の 4 方に密に配置された赤外線送受信機により、指などの 2 次元位置座標を特定することができる位置

センサーである。本システムでは、指の移動方向（図4のx軸方向）の位置座標を得るために使用した。

AUPAは、アレイ状に配置された超音波振動子の振幅と位相を制御することで、任意の3次元位置に超音波焦点を形成する装置である。本システムでは、AUPA 6台を用いて焦点を形成した。Unityを用いてAUPAとITSを同期させ、ITSで取得した指の座標に応じて超音波の焦点を指に沿って照射した。また、指が水平移動できるように、指の高さを固定する必要があったため、リニアレールを設置し、指を滑らす台として使用した。

### 3. 実験

#### 3.1 手順

凹凸の触覚と映像を用意し、各触覚が映像から想像される感覚とどの程度マッチしているのかを調べた。触覚では位置法、強度法、ミックス法の1凸面・凹面 ( $h_d = 5\text{ mm}$ ,  $r = 15\text{ mm}$ ,  $35\text{ mm}$ ) の刺激を用意し、映像では図5のような触覚に応じた1凸面・凹面と、実際の指の動きと連動するバーチャル指を用意した。このとき、映像と触覚の凹凸が同じな状況だけでなく、逆転している状況も用意した。つまり、試行の中には映像は凹面であるものの、触覚が凸面である場合と、その逆も含まれている。これにより、位置法と強度法の比較に加えて、各手法による凹凸がそれぞれ映像の凹凸に引っ張られて知覚しているものなのか、または映像によらず触覚刺激のみで凹凸を知覚できているのかといった、その触覚刺激の強さを推測することができる。

参加者には、映像から想像される感覚と、提示された触覚がどの程度違和感がないかをリッカート尺度 (1-7) で答えてもらった。1は、映像と凹凸が逆転している、またはそもそも提示された感覚から凹凸を知覚できないとき、7は映像から想像される感覚と提示された刺激が、凹凸や曲率を含め完全にマッチしているとき、2-6は映像と凹凸が一致していないときに段階をつけて答えてもらった。

試行回数は32回あった。16のパターンを2回ずつ行い、ランダムに参加者に提示した。16パターンのうち、映像と触覚の凹凸が同じ状況が12、逆転している状況が4あった。映像と触覚の凹凸が同じ12パターンは、凹凸の2つ、提示凹凸の半径が15 mm、35 mmの2つ、提示法が位置法、強度法、ミックス法の3つで、 $2 \times 2 \times 3 = 12$ であった。映像と触覚の凹凸が逆転している4パターンは、凹凸の2つ、提示法が位置法、強度法の2つで $2 \times 2 = 4$ であった。このとき、一応指がスライドする距離を数cmに揃えるため、触覚凸面映像凹面のときは半径15 mm、触覚凹面映像凸面のときは半径35 mmとした。

実験には13名 (年齢:  $24.9 \pm 1.8$ , 男性11名) が参加した。内11名は空中超音波を触った経験があるものの、空中超音波による凹凸は今まで触ったことが無く、残り2名は空中超音波を触ったのはじめてであった。参加者には、実験中ホワイトノイズの流れたヘッドフォンを装着しても

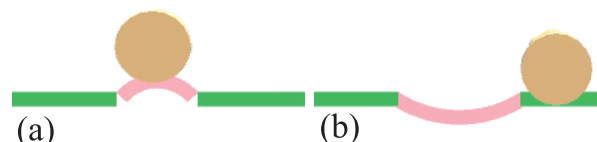


図5: 実験で被験者に提示した映像のスクリーンショット。(a): 凸面, (b): 凹面。

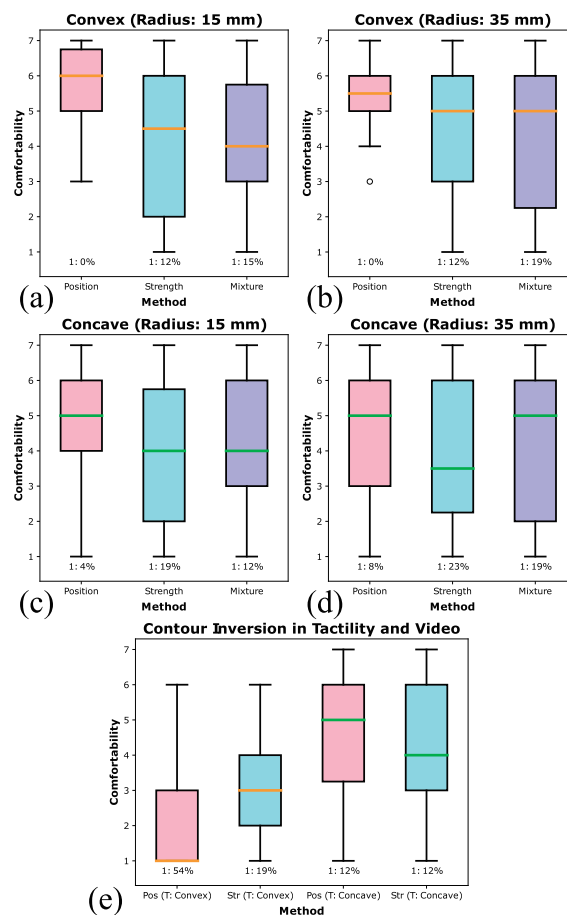


図6: 実験結果。(a)(b): 凸面, (c)(d): 凹面, (e): 映像と触覚の凹凸が逆転したとき (T: Tactile)。各箱の中央線のうち、オレンジは凸面、緑は凹面を示している。

らい、指を動かす速度は指定せず自由に探索してもらった。

#### 3.2 結果

図6のようになった。ひげは四分位範囲の1.5倍まで伸びており、外れ値は個々の点として表示した。リッカート尺度の1には、触覚が映像とは凹凸が逆転に感じるとき、そもそも刺激が凹凸に感じないときどちらも含まれているため、各箱の下部には1を選択した割合を示した。

まず(e)の触覚と映像で凹凸が逆転しているときをみると、位置法、強度法どちらも触覚凸面では映像が凹面のときほとんどの参加者が違和感を感じている一方で、触覚凹面では映像が凸面のときでは触覚も凸面に感じてしまう人が多かった。よって、位置法・強度法どちらも、凹面は、その刺激自体で凹面に感じることはできなく映像の凹凸に引っ張られる一方、凸面はその刺激自体で凸面に感じる事ができ、たとえ映像では凹面が表示されていても、特に位置

法は凸面に感じるができることがわかった。

また、(a)-(d)をみても、凹凸どちらも、そしてどちらも半径でも、位置法の方が強度法・ミックス法に比べて高い尺度を答える割合が大きかった。ミックス法と強度法を比較すると、凹面ではミックス法の方が違和感なく感じる割合が大きかったものの、凸面では大きな差がなかった。

参加者のコメントとしては、「触覚だけより、映像がついている方がより曲面に感じた」、「凹面より凸面の方が分かりやすい」、「凸面と凹面でそれぞれ2種類触覚があるように感じた」、「触覚のうち、ふちに近い刺激から凹凸やその曲率を判断することが多かった」、「半径の大きい凸面は、どの触覚も違和感がなかった」、「凹面触覚のうち、吸引感を感じるものがあつた」、「凸面を触るとき、右から触るときは感じなかったが、左から触るときに凸に感じた」、などがあつた。

## 4. 考察と結言

### 4.1 1 凸面

実験ではどの手法でも基本的には盛り上がりを感じたが、位置法による触覚の方がより映像から想定される刺激、つまり現実の触感と近く、その触感は凹面映像提示に明確な違和感を覚えるほどであった。また、位置も強度も変化しているミックス法は、位置法よりも現実の触感に近いはずであるが、実験結果では位置法に及ばず強度法と近い結果になったことから、凸面を提示するときは強い強度に固定したまま位置のみを同期させる方が良いと推測できる。

凸面において位置のみを同期して提示したほうが良い理由として、ふちの感覚が明確になるから、と筆者は考える。参加者のコメントによると、実験1にて曲面の凹凸を判断するとき、ふち、つまり曲面の始まりと終わり付近の感覚が大事であった。強度法やミックス法では凸面中央の強度が強い一方、両端の接触圧はゼロであり、ふちの感覚は分かりづらかつた。一方、位置法では強度を固定したまま接触位置が変化することからふちの感覚が明確になり、より曲率を感じたと考えられる。

今回は小さいマクロ形状、つまり半径数 cm ほどの形状に注目した。もし、半径が大きく、また凸面の高さが小さい形状を提示する場合、位置法では焦点の移動が少なくなり、曲率を感じにくくなるため、強度法の方がより凸を感じる可能性がある。実験では半径 15 mm、35 mm の2凸面を比較したが、強度法で比較すると半径 35 mm の方が分散は大きいものの若干現実の触感に近づいた。

### 4.2 1 凹面

凹面映像提示時を比較すると、凹面でも位置法の方がより現実の感覚に近いことが分かったが、凸面映像提示時では位置法、強度法共に映像に引っ張られ凸面に感じるということがわかつた。

凸面と比較して凹面の触覚がそれ自体では凹面と感じにくい理由として、平面側のふちの感覚が無いからであると考えられる。現実の凸面と凹面の触覚を比較すると、凸面接触時は指が凸面と平面の境界地点を通過しないが、凹面

接触時は指が必ずその境界地点を通過することから、凹面の方がより境界地点の感覚が重要になることが推測できる。本手法では、曲面側のふちの触覚は提示しているが、平面側は提示していない。よって、より平面側のふちの感覚が重要な凹面の方が本手法による触覚自体では凹面に感じにくいと考えた。

それでも、位置法は凹面映像提示の基では、比較的現実の触覚に近かつた。事前の予想では、筆者は半径 15 mm の位置法凹面はほとんど知覚できないと予想していた。それは指の移動距離がほとんどなく、焦点のずれを認識しにくいからである。しかし結果は予想と異なり、半径 15 mm の小さい凹面でも映像を提示すればその凹部を知覚することができた。よって、指がほとんど動かなくても焦点のずれを認識できると推測できる。

強度法の凹凸を比較すると、強度法凹面の方が、ふちの感覚が強く、より凹部がわかりやすくなるはずであるが、結果は現実の触覚と遠かつた。その理由の1つとして、提示形状の問題が考えられる。今回提示した形状は円であり、触覚が始まったとたん、急激に接触圧が低くなる。例えば逆三角形など、徐々に強度が落ちるような形状を提示したら、より現実の触覚に近づく可能性がある。

同様の理由で、ミックス法の凹面もふち付近の感覚は強いものの、接触圧が急激に落ちたため、分かりにくい触覚になったと考えられる。一方、半径 35 mm では指の移動距離が大きい分接触圧が急激に落ちにくくなったためか、位置法と同様の違和感の無さを得た。

## 参考文献

- [1] M.W.A. Wijntjes, A. Sato, et al., "Local Surface Orientation Dominates Haptic Curvature Discrimination," IEEE Trans. Haptics, vol. 2, no. 2, pp.94 - 102, 2009.
- [2] T. Howard, G. Gallagher, et al., "Investigating the recognition of local shapes using mid-air ultrasound haptics," 2019 IEEE WHC, pp. 503-508.
- [3] T. Iwamoto, M. Tatezono, et al., "Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound," in Proc. Int. Conf. Human Haptic Sens. Touch Enabled Comput. Appl., 2008, pp. 504-513.
- [4] T. Morisaki, M. Fujiwara, et al., "Non-vibratory Pressure Sensation Produced by Ultrasound Focus Moving Laterally and Repetitively with Fine Spatial Step Width," IEEE Trans. Haptics, 2021.
- [5] R. Takahashi, K. Hasegawa, et al., "Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus," IEEE Trans. Haptics, vol. 13, no. 2, pp.334 - 342, 2020.
- [6] S. Suzuki, S. Inoue, et al., "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display," IEEE Trans. Haptics 2021.