

# フレネルシェイプ：各指先接平面の傾きを操作する形状提示装置

太田 裕紀<sup>1)</sup>, 平尾 悠太郎<sup>1)</sup>, ペルスキアエルナンデス モニカ<sup>1)</sup>, 内山 英昭<sup>1)</sup>, 清川 清<sup>1)</sup>

Hiroki OTA, Yutaro HIRAO, Monica PERUSQUÍA-HERNÁNDEZ, Hideaki UCHIYAMA, and Kiyoshi

KIYOKAWA

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5, {ota.hiroki.oc6, yutaro.hirao, m.perusquia, hideaki.uchiyama, kiyo}@is.naist.jp)

**概要:** 日常生活において人々は多様な形状の物体を把持・操作する。同様に、バーチャルリアリティ環境においても、形状を提示することが臨場感向上に寄与する。既存のハンドヘルド型形状提示装置は、指先相対位置の固定やピンアレイを利用して形状を提示しているが、これらの方法では各指先接平面の傾きという重要な感覚を再現できていない。そこで本研究では、主として各指先接平面の傾きを提示する新しい形状提示装置を提案する。開発した装置の表現力を明らかにするため、ストループ課題にもとづくパイロットスタディを実施した。その結果、弁別可能な複数の形状を提示可能であることが確かめられた一方で、形状のもっともらしさについては仮説を支持する結果が得られなかった。

**キーワード:** 形状提示装置, 傾き知覚, ハンドヘルド, VR

## 1. はじめに

近年、ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) を用いたバーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) 体験の活用が盛んである。こういった VR 環境において物体を把持・操作するとき、物体形状を提示することが臨場感・操作性の向上に繋がり、有用である。そこで、形状提示機能を有する VR 用コントローラが研究・開発されてきた。しかし、こういった形状提示機能を有する VR 用コントローラが一般的に活用されるまでには未だ多くの課題が残されている。

既存の形状提示装置は主として接地型と非接地型に大別できる。非接地型の形状提示装置には接地型と比較して利用可能範囲の制限が少ない利点がある一方で、可搬性を担保するために重量や機構を配置する容積が制限される。そのため、限られた容積で複数の弁別可能なもっともらしい形状を提示可能な機構が多数提案されてきた。PoCoPo [1] や X-Rings [2] は、ピンアレイ機構を小型化し、ハンドヘルド型コントローラに内蔵することで複数形状の提示を実現した。また、Wolverine [3] や DextrES [4] は各指先の相対位置を固定する小型軽量のブレーキ機構を開発し、ウェアラブルな形状提示装置を実現した。これらの装置では、主として各指先の相対位置によって形状を提示する。

これに対して本研究では、主として指先接平面の方向を提示するハンドヘルド型形状提示装置、フレネルシェイプを提案する (図 1)。指先接平面の方向は形状を知覚する上で重要な役割を果たす。特に曲率の識別においては各指先の相対位置よりも支配的な手がかりである [5]。そこで、フレネルシェイプでは、各指先の相対位置を提示しないことで PoCoPo や X-Rings で容積の大部分を占める直動機構を

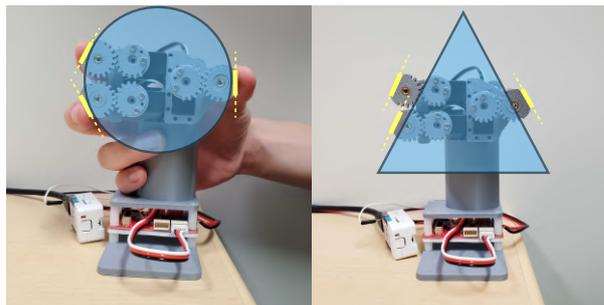


図 1: 各指先接平面の傾きを操作するハンドヘルド型形状提示装置、フレネルシェイプによる円形の提示 (左) と三角形の提示 (右)。

廃し、容積を削減した。また、フレネルシェイプが提示する形状の弁別可能性ともっともらしさを明らかにすることを目的としてパイロットスタディを実施した。

## 2. フレネルシェイプ

フレネルシェイプでは、各指先接平面の傾きを操作することで複数の形状を提示する。本研究では形状の提示を目的とし、大きさの提示については取り扱わない。ここで、形状とは物体の概形を指し、指先よりも小さい範囲における微細形状などは本研究の対象としない。また、親指・人差し指・中指を用いたピンチ動作によるオブジェクト把持を対象として装置を設計した。

### 2.1 ハードウェア構成

図 2 にフレネルシェイプの外観・構成部品・主要寸法を示す。まず、構成部品について述べる。フレネルシェイプは、3つのサーボモータ・モータドライバ・フィンガーパッ

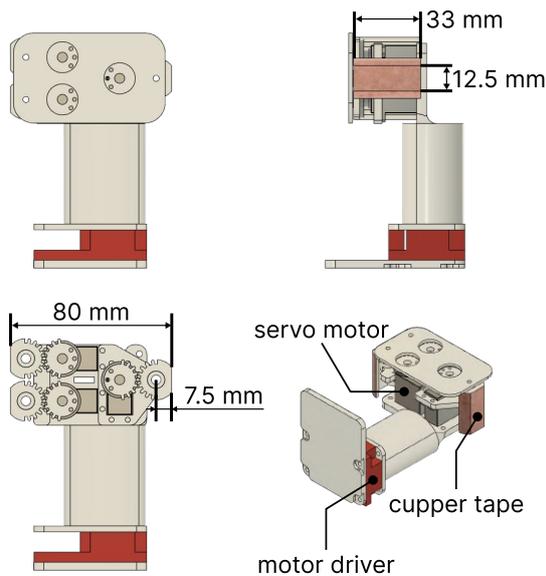


図 2: フレネルシェイプの外観・構成部品・主要寸法。

ド・プラスチック製の外殻から構成されている。フィンガーパッドの表面には接触検出のために銅テープを貼付している。サーボモータは出力軸に 12bit 磁気式エンコーダを備える Feetech サーボ STS3032 を電源電圧 6V で使用している。また、モータドライバは Feetech サーボ用インターフェイスボード FE-URT-1 を使用している。フィンガーパッドと外殻部品は PLA 樹脂を使用した 3D プリント部品である。

次に、主要寸法について述べる。各フィンガーパッドの平面部は幅 12mm、長さ 33mm、回転軸との距離は 7.5mm である。また、中立時における親指用フィンガーパッドと人差し指・中指用フィンガーパッド間の距離は 80mm である。把持部は楕円柱形状であり、長軸方向 40mm、短軸方向 30mm、高さ 50mm とした。

各サーボモータとフィンガーパッドはギア比 1:1 のギアによって接続され、サーボモータの回転角度と等しい角度でフィンガーパッドが回転する。現在の設計において、フィンガーパッドの稼働範囲は中立時を基準として  $\pm 45^\circ$  である。

## 2.2 ソフトウェア構成

図 3 にフレネルシェイプのシステム構成図を示す。モータドライバは外部のマイクロコントローラである M5Cupsule に接続されている。ここで、M5Cupsule は 3つの機能を実行している。それぞれ、PC との通信、モータドライバを通じたサーボモータへの位置制御指令、タッチセンシングである。

マイクロコントローラと PC は USB ケーブルを使用した有線通信と、Wi-Fi を使用した無線通信によって接続されている。有線通信は USB HID 機能を用いて実装し、主にタッチセンシングの結果を送信するために使用している。ユーザがデバイスに触れたとき「g」キーが入力され、デバイスを離れたときには「r」キーが入力される。無線通信は OSC (Open Sound Control) プロトコルを用いて実装し、

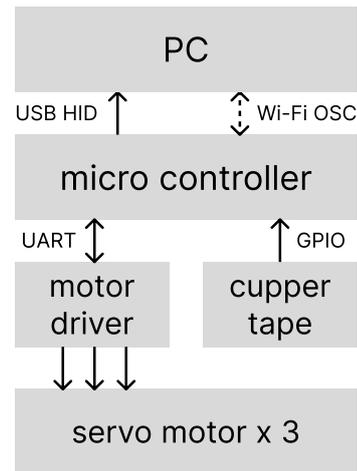


図 3: フレネルシェイプのシステム構成。

主にサーボモータの制御指令とデバイスの状態を送受信するために使用している。OSC 通信は UDP に基づく通信プロトコルであり、LAN 内で高速な通信を実現するために用いられる。送信するデータに対して入れ子構造のアドレスを付加できる点が特徴である。フレネルシェイプでは /shape/ アドレスに対して 5 種類の形状を意図した 0 から 4 の整数値データを受信し、 /step/thumb/, /step/index/, /step/middle/ アドレスに対して 4096 段階の整数値を受信している。これにより、LAN 内に存在する多様なデバイスからフレネルシェイプをリアルタイムに操作することが可能となっている。

モータドライバを通じたサーボモータへの制御指令には UART 通信を使用している。サーボモータの制御モードは PID 制御ループを用いた位置制御であり、 $360^\circ$  の範囲で 4096 段階の目標位置を設定可能である。角速度は約 0.75 rps、角加速度は約  $1.5 \text{ rad/s}^2$  に設定している。現在の設定条件下において、フィンガーパッドを  $90^\circ$  回転させるために必要な時間は 0.5sec 未満である。ただし、角速度については最大 1.8 rps に設定可能である。また、デバイスの破損を防ぐため、最大トルクを 1.0kgf·cm に制限している。

M5Cupsule には汎用入出力ピンに接続されたキャパシタの充放電回数からタッチセンシングを行う機能が搭載されているため、この機能を用いて銅テープと指先の接触を検出する。検出結果は USB HID 機能によって USB キーボード入力として PC に送信する。接触の検出からキー入力の完了までは約 8ms を要する。

## 3. ストループ課題を用いた形状提示性能の評価

本実験の目的は、フレネルシェイプが複数の弁別可能なもっともらしい形状を提示可能か検証することである。本実験では、石川らが触覚刺激のもっともらしさの評価手法として提案した実験系 [6] を参考として、ストループ課題による評価を行った。この手法では、視覚的認知課題としてよく知られるストループ課題を視触覚刺激に対して適用する。視触覚刺激を同時に提示し、触覚刺激のラベルを回答するとき、視触覚刺激が一致すれば反応時間が短くなり、不

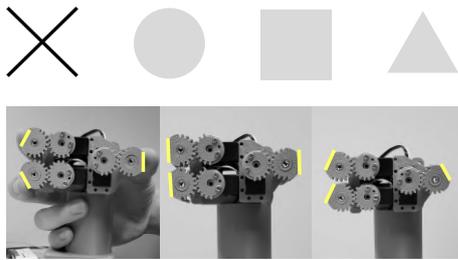


図 4: 使用した視触覚刺激.

表 1: 各触覚刺激におけるフィンガーパッドの回転角度.

condition	thumb	index	middle
circle	0°	30°	-30°
rectangle	0°	0°	0°
triangle	30°	-30°	-30°

一致であれば反応時間が長くなる. この手法の優れた点は, 主観評価によるバイアスを低減できることである. 本実験の仮説は以下のとおりである.

[H1] フレネルシェイプは複数の弁別可能な形状が提示可能である.

[H2] フレネルシェイプが提示する刺激はもっともらしいものであり, 視覚刺激と干渉する.

### 3.1 実験条件

実験は参加者内実験計画で行われた. 実験条件として, 視覚刺激 4 水準と触覚刺激 3 水準を設定した. 使用した刺激を図 4 に示す. 視覚刺激について, 形状とは無関係な刺激である線分の組み合わせ (X) と, 3 種類の異なる 2 次元形状を用いた. それぞれの条件を neutral 条件, circle 条件, rectangle 条件, triangle 条件とする. また, 触覚刺激について, フィンガーパッドの回転角度が異なる 3 つの条件, circle 条件, rectangle 条件, triangle 条件を用いた. それぞれの条件におけるフィンガーパッドの回転角度を表 1 に示す.

### 3.2 実験環境

実験環境を図 5 に示す. 実験は座位にて行われた. 参加者は右手にフレネルシェイプを把持し, 左手側に設置された USB キーボードの矢印キーを用いて回答を行った. 実験中, フレネルシェイプは障壁によって隠され, 参加者が直視することは出来なかった. 触覚刺激はフレネルシェイプによって提示され, 視覚刺激は参加者の正面に配置された 24 インチモニタの中央に表示された. 刺激の提示は PsychoPy [7] によって制御された.

### 3.3 実験課題

参加者はモニタを注視しながら, モニタに表示される画像を無視して手に感じる触覚刺激を円, 四角形, 三角形の強制 3 択で回答した. 回答には USB キーボードの矢印キーを用いた. ここで, 図形と矢印キーの対応は LEFT: 円, DOWN: 四角形, RIGHT: 三角形とした. 参加者は視覚刺激 4 種類

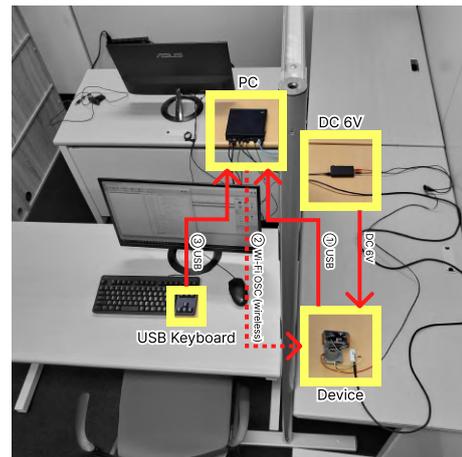


図 5: 実験環境の概観.

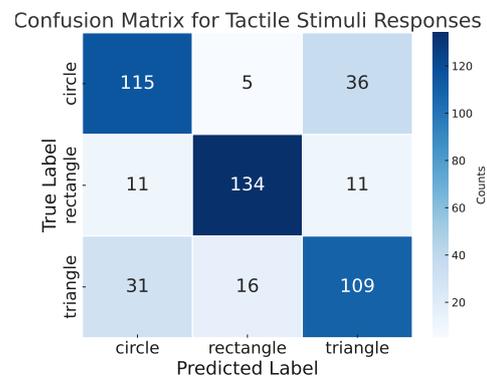


図 6: 提示した触覚刺激に対する回答ラベルを表す混同行列.

と触覚刺激 3 種類の組み合わせ 12 種類をランダムな順番で 3 周回答したので, 合計 36 回の試行が実施された. 触覚刺激の切り替えはユーザがデバイスから指先を離れた状態で行われ, 視覚刺激の提示はタッチセンサによるデバイスの接触検出から 10 ms 以内に行われた.

### 3.4 手続き

実験には研究室内の学生計 13 名 (男性 10 名, 女性 3 名) が参加し, 平均年齢は 23.08 歳 (SD = 0.62) であった. 参加者は実験前に実験の目的や方法, 手続きなどの説明を受けた. その後, 簡単な操作確認を行い, 実験課題に移行した.

### 3.5 評価指標

形状の弁別可能性 (H1) ともっともらしさ (H2) を正答率と反応時間によって評価した. 反応時間については視覚刺激が neutral 条件のときにおける平均反応時間を用いて各参加者, 各触覚刺激ごとに正規化した.

### 3.6 結果

図 6 に触覚刺激の混同行列を示す. また, 図 7 に各参加者ごとの正答率を示す. 平均正答率は circle 条件: 73.7%, rectangle 条件: 85.9%, triangle 条件: 69.87% であった.

また, 図 8 に正規化された平均反応時間の結果を示す. 視覚要因と触覚要因における 2 要因分散分析の結果, 効果は見られなかった. また, 視触覚刺激について, 対応あり t 検定を適用したところ, 一致条件と不一致条件間に有意差は

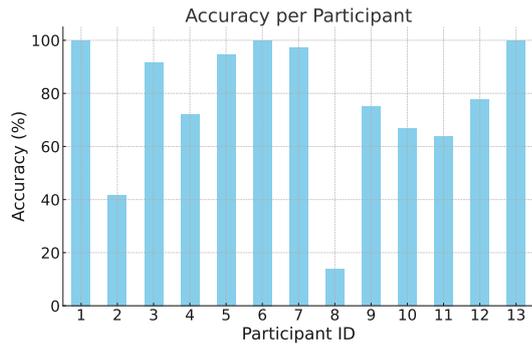


図 7: 各参加者ごとの正答率.

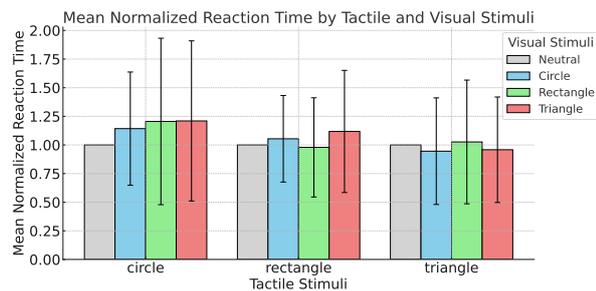


図 8: 各参加者ごとに正規化された反応時間の平均値.

見られなかった。

#### 4. 考察

形状の弁別可能性について, [H1] は部分的に支持された。一部の参加者はフレネルシェイプを繰り返し把持・開放するなかで, 実験者の意図と異なる部分である, フィンガーパッド側面に触れた状態で回答を行った。その結果 circle 条件や triangle 条件における触覚刺激は正常に提示されず, 正答率が悪化した。意図しない触れ方の例を図 9 に示す。ブラインドタッチ時にフィンガーパッドの側面を把持してしまう問題は設計上の課題であるため, 今後改善を行う。

形状のもっともらしさについて, [H2] は支持されなかつ

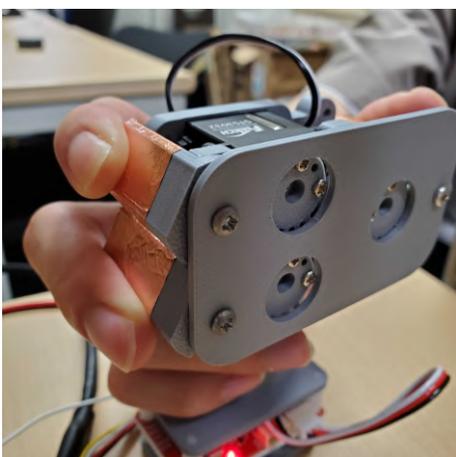


図 9: 中指がフィンガーパッド側面に触れており, 平面部に触れていない例.

た。原因として, 前述したデバイス把持位置の問題や試行回数の不足が考えられる。

#### 5. おわりに

非接地型形状提示装置における機構容積の問題と, 形状提示のもっともらしさを向上する目的で, 主として指先接平面の傾きを操作するハンドヘルド型形状提示装置であるフレネルシェイプを開発し, 提示形状の弁別可能性ともっともらしさを評価するためのパイロットスタディを実施した。パイロットスタディからは仮説を支持する結果が得られなかったが, デバイス本体と実験設計における改善点が明らかとなった。今後は, 意図しない把持を防止するために, フィンガーパッドの設計を改善するとともに, 本実験に向けて実験プロトコルを改善する。

#### 参考文献

- [1] S. Yoshida, Yuqian Sun, and H. Kuzuoka. Pocopo: Handheld pin-based shape display for haptic rendering in virtual reality. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020.
- [2] Eric J. Gonzalez, E. Ofek, Mar González-Franco, and M. Sinclair. X-rings: A hand-mounted 360° shape display for grasping in virtual reality. *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2021.
- [3] Inrak Choi, E. Hawkes, D. Christensen, Christopher J. Ploch, and S. Follmer. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 986–993, 2016.
- [4] R. Hinchet, Velko Vechev, H. Shea, and Otmar Hilliges. Dextres: Wearable haptic feedback for grasping in vr via a thin form-factor electrostatic brake. *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2018.
- [5] Maarten WA Wijntjes, Akihiro Sato, Vincent Hayward, and Astrid ML Kappers. Local surface orientation dominates haptic curvature discrimination. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 2, No. 2, pp. 94–102, 2009.
- [6] 石川遼太郎, 亀岡嵩幸, 蜂須拓. ストループ課題に基づいたタッピングによる硬さ知覚における視触覚間の干渉効果の評価. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 28, No. 4, pp. 283–290, 2023.
- [7] Jonathan Peirce, Jeremy R Gray, Sol Simpson, Michael MacAskill, Richard Höchenberger, Hiroyuki Sogo, Erik Kastman, and Jonas Kristoffer Lindeløv. Psychopy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior research methods*, Vol. 51, pp. 195–203, 2019.