

画面上の触覚フィードバックが バーチャルジョイスティックに与える影響の基礎調査

角田 陸^{1,a)} 松田 大樹¹ 白根 薫¹ 和田 優斗² 池松 香³ 志築 文太郎⁴

概要：スマートフォンにおいて、仮想的なジョイスティック（以下、バーチャルジョイスティック）を用いて画面内のオブジェクトを操作するゲームが存在する。しかし、バーチャルジョイスティックの操作においては、視認しないと中心位置および中心位置からの移動方向を認識しにくい。そのため、バーチャルジョイスティックのユーザが認識している位置と実際の位置がずれることによって、意図しない方向に入力が発生するという課題がある。我々は、この課題を解決するために、凹凸を彫刻したスクリーンプロテクタをスマートフォンに貼付することによって、バーチャルジョイスティック操作に対して触覚フィードバックを付与した。触覚フィードバックが、ユーザの知覚するバーチャルジョイスティックの中心位置および移動方向に与える影響を調査するために、バーチャルジョイスティックの中心点の触覚の有無およびバーチャルジョイスティックの外枠触覚の有無を組み合わせた4種類の触覚パターンを用いて実験を行った。12人の参加者に対し実験を行った結果、触覚がある3つの条件の方が触覚がない条件よりも中心位置および移動方向の入力が正確であった。

1. はじめに

スマートフォンにおいて、ユーザが仮想的なジョイスティック（以下、バーチャルジョイスティック）を用いて画面内のオブジェクトを操作するゲームが存在する。一般的なゲームコントローラに採用されている物理的なジョイスティックでは、スティックに触れていないとスティックは中心に存在する、かつスティックが倒れているときは中心の位置に戻る力が働くため、ユーザは視認することなくジョイスティックの中心位置を把握することができる。さらに、倒れているスティックの傾きはユーザに入力方向および入力量のフィードバックを、スティックの可動限界はユーザに入力量が最大であることのフィードバックを与える。一方、バーチャルジョイスティックは物理的なフィードバックを有さないため、視認しないとバーチャルジョイスティックの中心位置、および中心位置からの移動方向および移動量を認識しにくい。そのため、バーチャルジョイスティックのユーザが認識している位置と実際の位置がずれることによって、意図しない中心位置の入力、意図しない方向の入力、および意図しない移動量の入力が発生する

という課題がある。

我々は、バーチャルジョイスティックに触覚フィードバックを付与することによって、この課題の解決を試みた。本稿では、安価かつスマートフォンの画面に容易に取り付け・取り外し可能であるスクリーンプロテクタ、およびスクリーンプロテクタに任意の凹凸パターンを彫刻できるレーザ加工機を用いて、触覚フィードバックを与える方法を用いた。

触覚フィードバックの影響を調査するために、評価指標として、ユーザの知覚するバーチャルジョイスティックの中心位置および移動方向を採用する。加えて、どのような触覚がより影響を与えているかを調査するために、バーチャルジョイスティックの中心点の触覚（以降、中心触覚とする）の有無およびバーチャルジョイスティックの外枠に沿った円状の枠の触覚（以降、外枠触覚とする）の有無を組み合わせた4種類の触覚パターンを用いて実験を行った。12人の参加者に対し実験を行った結果、触覚がある3つの条件の方が触覚がない条件よりも中心位置および移動方向の入力が正確であった。加えて、中心位置の入力においては触覚パターン間に有意差は見られず、かつ移動方向の入力においては外枠触覚のみの条件が他の条件よりも有意に正確であった。

¹ 筑波大学 情報理工学位プログラム

² 筑波大学 情報メディア創成学類

³ LINE ヤフー株式会社

⁴ 筑波大学 システム情報系

^{a)} tsunoda@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

2. 関連研究

本研究では触覚フィードバックを用いてバーチャルジョイスティック操作の支援を行う。本節では、バーチャルジョイスティックに関する研究、およびタッチスクリーンにおける触覚フィードバックに関する研究を述べる。

2.1 バーチャルジョイスティック

バーチャルジョイスティックの操作を調査した研究が存在する。Baxter ら [1] は、バーチャルジョイスティックを用いたプレイヤの操作精度の違いによる潜在的な影響を調査した。その結果、バーチャルジョイスティックは障害物回避ゲームにおいてプレイヤの違いや物理デバイス自体の違いに強いことが示唆された。Li ら [2] は、バーチャルジョイスティックを用いたゲーム操作を制御軌跡ジェスチャレベルで可視化および分析した。

バーチャルジョイスティックと他のバーチャルコントローラを比較する研究が存在する。Baldau ら [3] は、十字キー、8方向の方向キー、バーチャルジョイスティック、および傾きの4つの入力手法を比較する実験を行った。その結果、バーチャルジョイスティックが十字キーと同程度の性能を示し、傾きよりも優れた性能を示し、8方向の方向キーよりも劣る性能を示した。

バーチャルジョイスティックと物理的なコントローラを比較する研究も存在する。スマートフォンゲームに関する先行研究 [4], [5] は、触覚フィードバックの欠如がプレイヤのパフォーマンスに強く影響することを示している。Zaman らの研究 [5] では、iPhone 上のバーチャルジョイスティックを使用した場合、プレイヤは Nintendo DS の物理コントローラを使用した場合よりも有意により頻繁にゲームオーバーになり、かつタスクを完了するためにより多くの時間を要求した。また、12人の参加者全員が、物理的な操作性から DS の物理コントローラ操作を好んだ。後続する研究 [4] においても、バーチャル十字キーと物理的なコントローラを比較した。その結果、バーチャルコントローラが最も悪い入力手法であった。しかし、多くのゲームにおいてユーザはバーチャルジョイスティックコントロールを好み [6]、かつタッチコントロールの方が没入感が高いと感じる [7] という研究もある。

バーチャルジョイスティックに触覚フィードバックを付与することによる操作性の向上を狙う研究も存在する。Alves ら [8] は、スクリーンのタッチする部分以外を覆うスマートフォン用ケースを用いて、バーチャルジョイスティックに触覚フィードバックを与えることによって、ユーザの操作性が向上することを示唆した。Wührl ら [9] も同様に、バーチャルジョイスティックに触覚フィードバックを与えるスマートフォン用ケースを作成した。加えて、標準

レイアウト、カスタマイズ可能なレイアウト、および触覚フィードバック付きの3種類のバーチャルジョイスティックを物理的なジョイスティックと比較する実験を行った。その結果、物理的なジョイスティックが3種類のバーチャルジョイスティックよりも、効率性において優れているが、有用性には有意な差がないことが示された。

また、バーチャルジョイスティック操作を補正することによって操作性を向上させる研究も存在する。Torok ら [10] は、ユーザの入力データを基に仮想的な方向キーの位置およびサイズを調整することによって、エラーの減少およびパフォーマンスの向上を達成した。Torok ら [11] は、時系列分析を用いてユーザの入力を修正することによって、ユーザビリティおよび作業負荷を軽減した。Kurabayashi [12] は、タッチイベントに対する数学的なモデルを用いて、指の位置を維持したまま指の角度だけを変えることによって方向と速度の両方を入力できるバーチャルジョイスティックを作成した。

我々の研究もこれらの研究と同様にバーチャルジョイスティックを用いる。しかし、これらの研究とは異なり、スクリーンプロテクタに凹凸を彫刻することによって触覚フィードバックを付与した際の操作性を調査する。

2.2 タッチスクリーンにおける触覚フィードバック

振動を用いてタッチスクリーンにおける触覚フィードバックを提供する研究が存在する。ソフトウェアキーボードにおける振動を用いた触覚フィードバックは、テキスト入力速度の向上およびエラー率を低減させる [13], [14]。Lee および Zhai [15] は、聴覚および振動を用いたフィードバックが触覚フィードバックの欠如を補うことができることを示唆した。SemFeel [16] は、スマートフォンの背面に取り付けた振動モータを用いて、右から左、および下から上などの振動を提供した。Gordon および Zhai [17] は、スマートフォンにおける、タッチ、経路追跡、およびドラッグ&ドロップタスクにおける触覚フィードバックの効果を調査した。

振動以外の方法を用いて触覚フィードバックを提供した研究がある。Levesque ら [18] は、大面積触覚パターンディスプレイ (LATPaD) において、プログラム可能な摩擦を用いて触覚フィードバックを提供した。Eyes-Off Your Fingers [19] は、超音波摩擦変調を用いたタッチスクリーンにおける段階的な触覚フィードバックが、直感的かつ正確なアイズフリー操作を可能にすることを示している。

タッチスクリーンにおいて、物理的な触覚フィードバックを提供する研究が存在する。FlatPanelHaptics [20] は、組み込み型電気浸透圧ポンプ (EEOP) を用いた、小型化可能な形状変化ディスプレイである。Harrison および Hudson [21] は、ディスプレイ上において動的に変化可能な物理的なボタンを提案した。



図 1: 凹凸を彫刻したスクリーンプロテクタを貼付したスマートフォン。

また、タッチスクリーン上に穴が空いた透明なシート（オーバーレイ）を載せることによって、触覚フィードバックを提供した研究 [22], [23], [24] がある。

我々は、スマートフォンのスクリーンプロテクタに凹凸を彫刻することによって、バーチャルジョイスティック操作に対して触覚フィードバックを提供する。

3. 触覚フィードバック

凹凸を彫刻したスクリーンプロテクタをスマートフォンに貼付することによって（図 1）、バーチャルジョイスティック操作に対して触覚フィードバックを付与した。凹凸の彫刻にはレーザ加工機（G-WEIKE LG500 *1）を用いた。スマートフォンには iPhone 12、スクリーンプロテクタには DAISO の画面保護フィルム（iPhone 12 および 12 Pro 用）*2を用いた。また、著者らのうち 4 名による予備調査を行い、彫刻パターンを次のように決定した。

凹凸を彫刻する位置は、スマートフォンゲームの原神 *3にて表示されるバーチャルジョイスティックの中心の位置および外枠の位置とした。外枠の外径の直径は 20.2 mm、内径の直径は 18.1 mm であった。中心位置の触覚のサイズは、より精密な位置をフィードバックするために、原神のものと比べて 40% のサイズ（直径 1.65 mm）になるようにした。これは、著者らが触知可能であった一番小さいサイズである。また、レーザカッタの加工モードを彫刻に、速度を 250.00 mm/s に、出力は 10.4 W にした。加えて、外枠触覚は 1 回の彫刻、中心触覚は 2 回の彫刻を重ねて行った。これは、著者らが最も触知しやすいと感じた設定である。

4. 実験

触覚フィードバックがバーチャルジョイスティックを用いた操作に与える影響を調査するための実験を行った。

4.1 デザイン

触覚フィードバックがバーチャルジョイスティックを用

*1 <https://www.gwklaser.com/co2/LG500.html>

*2 <https://jpbulk.daisonet.com/products/4979909968215>

*3 <https://apps.apple.com/jp/app/genshin-impact/id1517783697?l=en-US>

表 1: 実験に用いた 4 種類の触覚パターンの条件。

	通常条件	中心条件	外枠条件	中心・外枠条件
中心触覚	無	有	無	有
外枠触覚	無	無	有	有
触覚パターン		●	○	○●
彫刻された触覚パターン				

いた操作に与える影響を調査するための調査指標として、今回はユーザの知覚するバーチャルジョイスティックの中心位置および移動方向を採用した。また、基礎調査として、どのような触覚がより影響を与えているかを調査するために、バーチャルジョイスティックの中心触覚の有無およびバーチャルジョイスティックの外枠触覚の有無を組み合わせた表 1 に示す 4 種類の触覚パターンを用いて実験を行った。

バーチャルジョイスティックの中心位置および移動方向の知覚を調査するために、提示された方向の入力および中心位置の入力のタスクを行う。

実験は参加者内計画とする。実験参加者はすべての触覚パターンに対してそれぞれタスクを行う。触覚パターンの順番はランダムとした。

4.2 実験参加者

12 人の大学生および大学院生（男性 9 人、女性 3 人、22-25 歳（平均 23.3 歳、標準偏差 1.07 歳））が参加した。すべての参加者はインフォームドコンセントへの同意をもって実験への参加を同意した。実験参加者は謝礼として 1120 円を受け取った。また、本実験は、筑波大学システム情報系倫理委員会によって承認されている（筑大シス研 第 23-471 号）。

4.3 実験環境

4 つの触覚パターンをそれぞれ 1 枚のスクリーンプロテクタに彫刻した後、各スクリーンプロテクタを iPhone 12 に貼付した。これにより、異なる触覚パターンを持つ 4 台の iPhone 12 を用意した。実験参加者は、座位の姿勢において、触覚パターンに対応する iPhone 12 を用いて実験を行う。実験参加者がスマートフォンを直接視認することによって自身の指の位置を確認することを不可能にするために、実験参加者は机の下においてスマートフォンを把持する。また、実験指示のためのディスプレイ（FlexScan EV2495）を実験参加者の前の机に設置した。

4.4 タスクおよび指示

実験参加者はそれぞれの触覚パターンに対し以下のタ

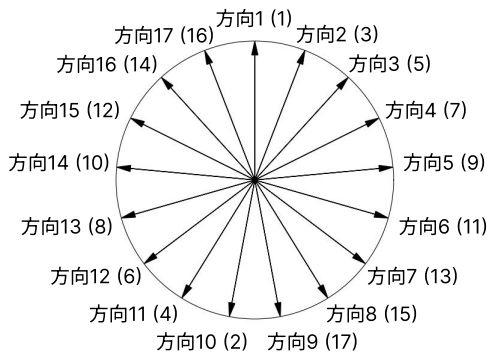


図 2: 試行 1 に用いた 17 個の方向. 括弧内は提示順序を示す.

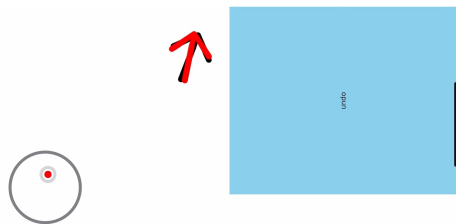


図 3: 練習セッションにおいて、机の上のディスプレイに表示された画面. 左下の赤い円がタッチ点を、中央上の赤い矢印が入力している方向を示す. 中央上の黒い矢印は、入力すべき方向を示す.

スクを行う. タスクは 1 回の練習セッション, 2 回の本番セッション, および主観評価にて構成され, かつそれぞれのセッションは 17 個のステップから構成される. 1 つのステップは, 提示された方向の入力 (試行 1), および中心位置の入力 (試行 2) から構成される. 主観評価調査では, 用いた触覚パターンについての 5 段階のリッカート尺度アンケートおよび半構造化インタビューを行う.

試行 1 では, 実験参加者は, バーチャルジョイスティックの任意の場所へのタッチダウン, 提示された方向の入力, およびタッチアップを行う. 入力方向は中心位置からタッチアップ位置の方向とする. 方向の入力では, 360 度を 17 等分した方向 (図 2) を用いる. 方向 1 は画面上向き (0 度) である. 提示する方向の順番は, 図 2 に示す. 方向の提示には, 机の上のディスプレイを用いた.

試行 2 では, 実験参加者は, バーチャルジョイスティックの中心点付近へのタッチダウン, 中心点の探索, および中心点だと思ふ箇所におけるタッチアップを行う.

実験参加者には, 机の下においてスマートフォンを両手を用いて把持すること, 左手の親指を用いてジョイスティックを操作すること, スマートフォンを見ないこと, および机の上のディスプレイを見ることを指示した. 実験参加者は, 誤った入力を行った際に, スマートフォンの右端に表示されたボタンを用いて, 直前の試行の取り消し, および再試行ができた. このボタンは, スマートフォンを

表 2: 触覚条件ごとの, 5 段階のリッカート尺度アンケートにおいて尋ねた項目. $\times$ はその条件において尋ねていないこと, $\checkmark$ はその条件において尋ねたことを示す.

	通常	中心	外枠	中心・外枠
中心触覚を触知できましたか?	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$
中心触覚は指の位置を認識すること役立ちましたか?	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$
中心触覚は指の移動方向を認識すること役立ちましたか?	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$
外枠触覚を触知できましたか?	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$
外枠触覚は指の位置を認識すること役立ちましたか?	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$
外枠触覚は指の移動方向を認識すること役立ちましたか?	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$
中心触覚と外枠触覚のどちらの方がより触知できましたか?	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$
中心触覚と外枠触覚のどちらの触知の方がより指の“位置”の認識に役立ちましたか?	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$
中心触覚と外枠触覚のどちらの触知の方がより指の“移動方向”の認識に役立ちましたか?	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$

見ることなく押せるように, 画面の大きさの約 1/3 の大きさにした.

練習セッションでは, 机の上のディスプレイに, 入力している方向およびタッチ点を表示した (図 3). 入力している方向は, 入力すべき方向の矢印に重なる矢印として表示した. 本番セッションではこれは表示しなかった. 練習セッションと本番セッションの間, および本番セッション間に最低 2 分の休憩を設けた. 休憩中は, 実験に用いているスマートフォンを把持しないことを指示した. 5 段階のリッカート尺度アンケートでは, 表 2 に示す項目を尋ねた.

実験の所要時間は説明, 練習, インタビュー, および休憩を含めて約 60 分であった.

5. 結果

我々は実験を通して, 試行 1 および試行 2 のそれぞれ

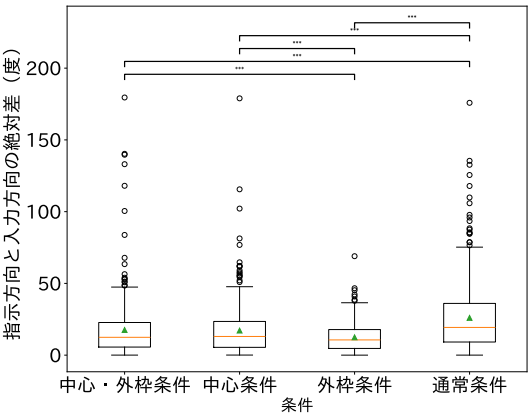


図 4: 触覚パターンごとの提示方向と入力方向の絶対差の箱ひげ図。***は p 値が 0.001 以下であることを意味する。

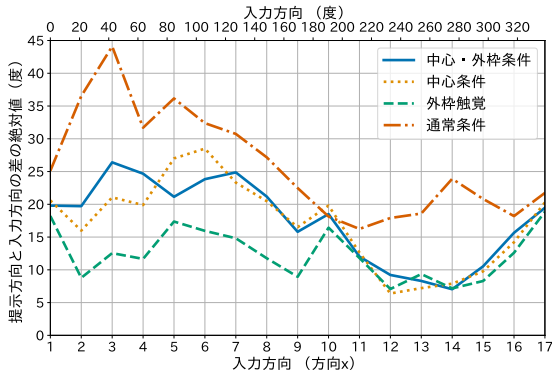


図 5: 提示方向と入力方向の差の絶対値の折れ線グラフ。

に対して、12 人 $\times$ 4 つの触覚パターン $\times$ 2 回の本番セッション $\times$ 17 ステップ = 1632 個のデータを得た。

5.1 移動方向

提示方向と入力方向の角度の差を分析した。提示方向と入力方向の正負の差が打ち消し合うことを防ぐために、提示方向と入力方向の差の絶対値を用いた。

まず、全方向をまとめたデータに対して分析を行った。触覚パターンごとの提示方向と入力方向の差の絶対値の箱ひげ図を図 4 に示す。Shapiro-Wilk 検定がすべての触覚パターンの提示方向と入力方向の差の絶対値に正規性がないと示したので、有意差を検定するために Friedman 検定を用いた。その結果、 p 値は $5.33 \times 10^{-17} < 0.05$ ($\chi^2 = 78.9$) であった。触覚パターン間に有意差が見られたため、Wilcoxon の符号順位検定を用いてペアワイズ比較を行った。その結果、中心・外枠条件および中心条件間以外に有意差が見られた。(通常条件と中心条件間の p 値 5.34×10^{-10} 、統計量は 8.91×10^{-11} 、通常条件と外枠条件間の p 値は 7.44×10^{-22} 、統計量は 1.24×10^{-22} 、通常条件と中心・外枠条件間の p 値は 4.65×10^{-9} 、統計量は 7.75×10^{-10} 、中心条件と外枠条件間の p 値は 8.65×10^{-6} 、統計量は 1.44×10^{-6} 、外枠

表 3: 方向ごとのペアワイズ比較において有意差があったペアおよび p 値。

提示方向	比較したペア	p 値
方向 3	(外枠条件, 通常条件)	0.0151
方向 4	(外枠条件, 通常条件)	0.00144
方向 5	(外枠条件, 通常条件)	0.000148
方向 6	(中心条件, 外枠条件)	0.0135
方向 6	(外枠条件, 通常条件)	0.00224
方向 7	(外枠条件, 通常条件)	0.00840
方向 8	(外枠条件, 通常条件)	0.0289
方向 9	(中心条件, 外枠条件)	0.0107
方向 9	(外枠条件, 通常条件)	0.0320
方向 12	(中心条件, 通常条件)	0.0320
方向 13	(中心・外枠条件, 通常条件)	0.000148
方向 13	(中心条件, 通常条件)	0.00224
方向 13	(外枠条件, 通常条件)	0.00656
方向 14	(中心・外枠条件, 通常条件)	0.00508
方向 14	(中心条件, 通常条件)	0.00193
方向 14	(外枠条件, 通常条件)	0.00445

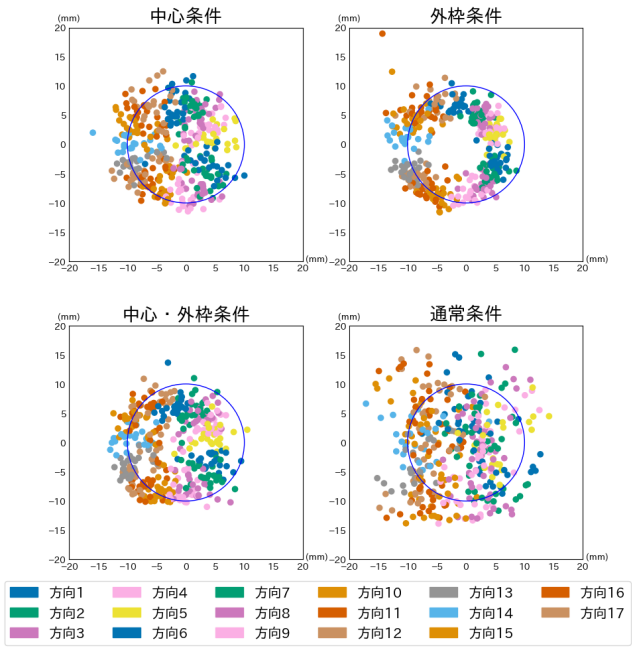


図 6: 条件ごとの試行 1 のタッチアップ点の分布。図中の円はジョイスティックの大きさ(外枠)である。

条件と中心・外枠条件間の p 値は 2.77×10^{-4} 、統計量は 4.62×10^{-5} であった。)

次に、それぞれの方向に対して分析を行った。方向ごとの触覚パターンごとの提示方向と入力方向の差の絶対値の折れ線グラフを図 5 に示す。すべての触覚パターンの全方向をまとめた提示方向と入力方向の絶対差に正規性がなかったため、方向ごとの有意差の検定に Friedman 検定を用いた。続けて有意差が見られた方向について、Wilcoxon の符号順位検定を用いてペアワイズ比較を行った。有意差が見られた方向および触覚パターンのペアを表 3 に示す。

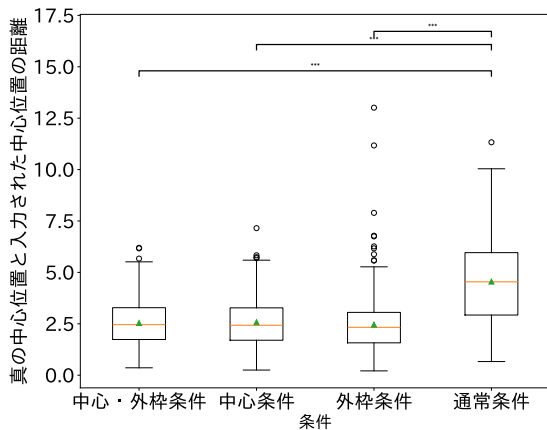


図 7: 触覚パターンごとの真の中心位置と入力された中心位置の距離の箱ひげ図. y 軸の単位は mm. ***は p 値が 0.001 以下であることを意味する.

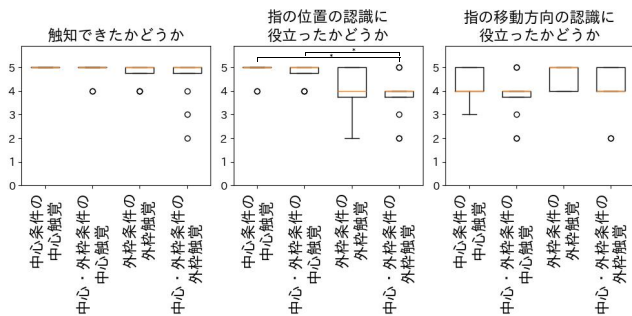


図 8: 条件ごとの主観評価の箱ひげ図. *は p 値が 0.05 以下であることを意味する.

また、タッチアップ位置の分布を図 6 に示す.

5.2 中心位置

試行 2 において入力された位置を実験参加者が知覚する中心位置とする. 触覚パターンごとの真の中心位置と入力された中心位置の距離を分析した. 触覚パターンごとの真の中心位置と入力された中心位置の距離の箱ひげ図を図 7 に示す. Shapiro-Wilk 検定が触覚パターンごとの距離に正規性がないと示したので, 有意差の検定に Friedman 検定を用いた. その結果, p 値は $1.07 \times 10^{-66} < 0.05$ ($\chi^2 = 309$) 触覚パターン間に有意差が見られたので, Wilcoxon の符号順位検定を用いてペアワイズ比較を行った. その結果, 通常条件とその他の条件間に有意差が見られた. (通常条件と中心条件間の p 値は 5.05×10^{-47} , 統計量は 7099, 通常条件と外枠条件間の p 値は 8.38×10^{-46} , 統計量は 7561, 通常条件と中心・外枠条件間の p 値は 4.83×10^{-45} , 統計量は 7852 であった.)

5.3 主観評価

触知, 指の位置の認識, および指の移動方向の認識に関

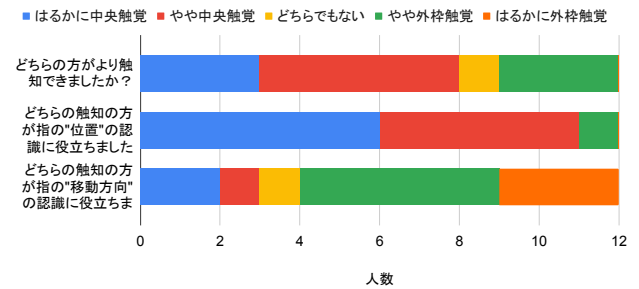


図 9: 中心・外枠条件における触覚の比較.

する結果を図 8 に示す. Shapiro-Wilk 検定がそれぞれの評価指標におけるそれぞれの触覚パターンの主観評価に正規性がないと示したので, 有意差の検定に Friedman 検定を用いた. Friedman 検定において有意差が見られた場合に Wilcoxon の符号順位検定を用いてペアワイズ比較を行った. その結果, 指の位置の認識に役立ったかどうかにおいて, 中心・外枠条件の外枠触覚と中心・外枠条件の中心触覚, および中心・外枠条件の外枠触覚と中心条件の中心触覚に有意差があった. (p 値はそれぞれ 0.0498, 0.0486. 統計量はそれぞれ 0.0, 4.5 であった.)

中心・外枠条件における中心触覚と外枠触覚の比較の評価を図 9 に示す. この結果, 中心触覚のほうが触知されやすく, 中心触覚のほうが指の位置の認識に役立ち, 外枠触覚のほうが指の移動方向の認識に役立つことが示された.

6. 考察

6.1 移動方向

初めに, 全方向をまとめたデータについて考察する. 触覚があるすべての条件は通常条件より有意に入力が正確, かつ外枠条件が最も正確であった. これは, 外枠触覚が指の移動方向の認識に有効であったというコメント, および外枠触覚が指の移動方向の認識に役立つという主観評価とも一致する. また, 外枠条件は中心条件よりも有意に正確であったことから, 外枠触覚が移動方向の入力に対して最も有効であることが示唆される. 一方, 中心・外枠条件も外枠触覚を有するが, 外枠条件よりも有意に不正確であった. タッチアップ点の分布 (図 6) において, 外枠条件は中心付近におけるタッチアップがないのに対し, 中心・外枠条件では中心付近におけるタッチアップが見られる. そのため, 中心・外枠条件では中心触覚のみを頼りにすることによって, 外枠触覚を利用しなかったためであると考えられる. ゆえに, 中心・外枠条件は中心条件と同様の結果が得られたと考えられる. 中心・外枠条件および中心条件の間に有意差が見られなかったこともこれを支持する.

次に, 方向ごとのデータに対して考察する. 左上方向から上方向 (方向 15, 方向 16, 方向 17, 方向 1, 方向 2), および下方向から左下方向 (方向 10, 方向 11) では, 条件間に有意差が見られなかった. これらの方向では, 触覚の

効果が現れないことが示唆される。また、外枠条件は、右方向（方向3から方向9）および左方向（方向13および方向14）において、通常条件よりも有意に正確であった。特に、右方向（方向3から方向9）では、外枠条件のみが通常条件よりも有意に正確であった。これは、外枠条件が移動方向の入力に対して有効であり、特に右方向において有効であることが示唆される。また、左方向（方向13および方向14）では、すべての触覚パターンが通常条件よりも有意に正確であった。これは、左方向においては、中心触覚および外枠触覚の両方が移動方向の入力に対して有効であることを示唆する。

6.2 中心位置

触覚があるすべての条件は通常条件よりも有意に中心位置の入力が正確であった。一方で、触覚パターン間に有意差は見られなかった。指の位置の認識に関する主観評価では中心触覚のほうが役に立つと回答した参加者が多かったが、外枠触覚も中心位置の入力に対して有効であることが示唆される。実際に、参加者から、外枠触覚を頼りに中心位置を入力したというコメントがあった。

7. 今後の課題

7.1 触覚を感じる点とタッチ点のずれ

図6の外枠条件において、タッチアップ点は触覚の位置より左側にずれている。外枠条件では外枠触覚を感じる場所においてタッチアップしたとコメントした参加者がいた。同様に、多くの参加者が同じく触覚を感じる場所においてタッチアップしたと考えられる。これは、触覚を感じる位置とその時のタッチ点にずれがあることを示唆する。これは先行研究[25]においても報告されている。この、触覚を感じる点とタッチ点の関係をより調査することが考えられる。また、実際のタッチ点が意図した通りになるように、触覚のパターンを調整することが考えられる。

7.2 触覚パターン

今回は、中心点の触覚の有無および外枠触覚の有無を組み合わせた4つの触覚パターンのみを用いた。他の触覚パターンとして、中心点と外枠の間に位置する円形の触覚パターン、中心から外側に向かって触覚の触知が変わるジョイスティック全体に存在する触覚パターン、および同心円状に複数の円形の触覚が存在する触覚パターンなどが考えられる。今後はこれらの触覚パターンを用いたユーザテストを行うことが考えられる。また、触覚の触知を変化させる際は、ユーザがどの程度の触覚の細かさを弁別可能かを調査する必要がある。

7.3 ユーザテスト

今回は基礎調査として、ユーザの知覚する中心位置およ

び移動方向のみを調査した。今後は、触覚フィードバックがユーザの知覚する移動量へ与える影響の調査、およびより実践的な環境を模したユーザテストとして、触覚フィードバックがゲーム内のキャラクタ移動に与える影響の調査を行う必要がある。

8. おわりに

バーチャルジョイスティックにおける意図しない入力を防ぐために、凹凸を彫刻したスクリーンプロテクタをスマートフォンに貼付することによって、バーチャルジョイスティック操作に対して触覚フィードバックを付与した。この触覚フィードバックが、ユーザの知覚するバーチャルジョイスティックの中心位置および移動方向に与える影響を調査するために、バーチャルジョイスティックの中心点の触覚の有無およびバーチャルジョイスティックの外枠触覚の有無を組み合わせた4種類の触覚パターンを用いて実験を行った。12人の参加者に対し実験を行った結果、触覚がある3つの条件の方が触覚がない条件よりも中心位置および移動方向の入力が正確であった。加えて、移動方向の入力においては外枠触覚のみの条件が他の条件よりも有意に正確であり、中心位置の入力においては触覚パターン間に有意差があるとは言えなかった。今後は、今回採用しなかった触覚パターンを用いること、およびキャラクタ移動のタスクなどのより実践的な環境におけるユーザテストを行う。

参考文献

- [1] Baxter, J., Adamson, T., Hasan, Y., Yousefi, M., Obregon, L., Carter, E. and Tapia, L.: Virtual Joystick Control Sensitivity and Usage Patterns in a Large-Scale Touchscreen-Based Mobile Game Study, *Proceedings of the 16th ACM SIGGRAPH Conference on Motion, Interaction and Games*, MIG '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 10:1–10:6 (online), DOI: 10.1145/3623264.3624461 (2023).
- [2] Li, Q., Zeng, H., Peng, Z. and Ma, X.: Understanding Players' Interaction Patterns with Mobile Game App UI via Visualizations, *Proceedings of the Ninth International Symposium of Chinese CHI*, Chinese CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 9–21 (online), DOI: 10.1145/3490355.3490357 (2022).
- [3] Baldauf, M., Fröhlich, P., Adegeye, F. and Suetter, S.: Investigating On-Screen Gamepad Designs for Smartphone-Controlled Video Games, *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, Vol. 12, No. 1s, pp. 22:1–22:21 (online), DOI: 10.1145/2808202 (2015).
- [4] Zaman, L. and MacKenzie, I. S.: Evaluation of Nano-stick, Foam Buttons, and Other Input Methods for Gameplay on Touchscreen Phones, *International Conference on Multimedia and Human-Computer Interaction-MHCI*, Vol. 1, pp. 1–8 (2013).
- [5] Zaman, L., Natapov, D. and Teather, R. J.: Touchscreens vs. Traditional Controllers in Handheld Gaming, *Proceedings of the International Academic Con-*

- ference on the Future of Game Design and Technology, Futureplay '10, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 183–190 (online), DOI: 10.1145/1920778.1920804 (2010).
- [6] Halloran, J. and Minaeva, A.: Touch and Play? Investigating The Value of Touchscreens for Gamer Experience, *Entertainment Computing*, Vol. 32, p. 100312 (2019).
- [7] Thompson, M., Nordin, A. I. and Cairns, P.: Effect of Touch-Screen Size on Game Immersion, *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers*, BCS-HCI '12, Swindon, GBR, BCS Learning & Development Ltd., pp. 280–285 (2012).
- [8] Alves, G. F., Souza, E. V., Trevisan, D. G., Montenegro, A. A., de Castro Salgado, L. C. and Clua, E. W. G.: Applying Design Thinking for Prototyping a Game Controller, *Entertainment Computing – ICEC 2018* (Clua, E., Roque, L., Lugmayr, A. and Tuomi, P., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 16–27 (2018).
- [9] Wühl, C., Schmid, A., Höbl, S. and Wimmer, R.: Comparing the Effectiveness and Ergonomics of Smartphone-Based Gamepads, *Proceedings of Mensch Und Computer 2024*, MuC '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 207–218 (online), DOI: 10.1145/3670653.3670676 (2024).
- [10] Torok, L., Pelegriño, M., Lessa, J., Trevisan, D. G., Vasconcelos, C. N., Clua, E. and Montenegro, A.: Evaluating and Customizing User Interaction in an Adaptive Game Controller, *Design, User Experience, and Usability: Interactive Experience Design: 4th International Conference, DUXU 2015, Held as Part of HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings, Part III 4*, Springer, pp. 315–326 (2015).
- [11] Torok, L., Eisemann, E., Trevisan, D., Montenegro, A. and Clua, E.: PadCorrect: Correcting User Input on a Virtual Gamepad, *Proceedings of the 44th Graphics Interface Conference*, GI '18, Waterloo, CAN, Canadian Human-Computer Communications Society, pp. 58–65 (online), DOI: 10.20380/GI2018.09 (2018).
- [12] Kurabayashi, S.: Kinetics: A Mathematical Model for an On-Screen Gamepad Controllable by Finger-Tilting, *Extended Abstracts of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play Companion Extended Abstracts*, CHI PLAY '19 Extended Abstracts, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 467–474 (online), DOI: 10.1145/3341215.3356289 (2019).
- [13] Brewster, S., Chohan, F. and Brown, L.: Tactile Feedback for Mobile Interactions, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 159–162 (online), DOI: 10.1145/1240624.1240649 (2007).
- [14] Hoggan, E., Brewster, S. A. and Johnston, J.: Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1573–1582 (online), DOI: 10.1145/1357054.1357300 (2008).
- [15] Lee, S. and Zhai, S.: The Performance of Touch Screen Soft Buttons, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 309–318 (online), DOI: 10.1145/1518701.1518750 (2009).
- [16] Yatani, K. and Truong, K. N.: SemFeel: A User Interface with Semantic Tactile Feedback for Mobile Touch-screen Devices, *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 111–120 (online), DOI: 10.1145/1622176.1622198 (2009).
- [17] Gordon, M. L. and Zhai, S.: Touchscreen Haptic Augmentation Effects on Tapping, Drag and Drop, and Path Following, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 373:1–373:12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300603 (2019).
- [18] Levesque, V., Oram, L., MacLean, K., Cockburn, A., Marchuk, N. D., Johnson, D., Colgate, J. E. and Peshkin, M. A.: Enhancing Physicality in Touch Interaction with Programmable Friction, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2481–2490 (online), DOI: 10.1145/1978942.1979306 (2011).
- [19] Bernard, C., Monnoyer, J., Ystad, S. and Wiertlewski, M.: Eyes-Off Your Fingers: Gradual Surface Haptic Feedback Improves Eyes-Free Touchscreen Interaction, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 427:1–427:10 (online), DOI: 10.1145/3491102.3501872 (2022).
- [20] Shultz, C. and Harrison, C.: Flat Panel Haptics: Embedded Electroosmotic Pumps for Scalable Shape Displays, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 745:1–745:16 (online), DOI: 10.1145/3544548.3581547 (2023).
- [21] Harrison, C. and Hudson, S. E.: Providing Dynamically Changeable Physical Buttons on a Visual Display, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 299–308 (online), DOI: 10.1145/1518701.1518749 (2009).
- [22] Kincaid, R.: Tactile Guides for Touch Screen Controls, *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers*, BCS-HCI '12, Swindon, GBR, BCS Learning & Development Ltd., pp. 339–344 (2012).
- [23] Kane, S. K., Morris, M. R. and Wobbrock, J. O.: Touchplates: low-cost tactile overlays for visually impaired touch screen users, *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 22:1–22:8 (online), DOI: 10.1145/2513383.2513442 (2013).
- [24] Tory, M. and Kincaid, R.: Comparing physical, overlay, and touch screen parameter controls, *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 91–100 (online), DOI: 10.1145/2512349.2512812 (2013).
- [25] Holz, C. and Baudisch, P.: Understanding touch, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 2501–2510 (online), DOI: 10.1145/1978942.1979308 (2011).