

視覚幅と判定幅の不一致がタッチポインティング における判定幅利用に及ぼす影響

金子翔平¹ 笠原暢仁¹ 山中祥太² 宮下芳明¹

概要：GUIには視覚的に提示される幅（視覚幅）と、実際にタッチと判定される幅（判定幅）が一致しないターゲットが存在する。タッチインタフェースでは、ユーザは経験を通じて判定幅を学習するまで、視覚幅のみを目標と仮定し、不必要に慎重な操作を強いられる。一方で、判定幅が拡大されていることを認識すると、ユーザは判定幅に依存したポインティングを行うことが報告されている。しかし、タッチ操作において、ユーザが判定幅を知覚していく過程はこれまで十分に検証されておらず、判定幅拡大の効果は視覚幅や拡大量に依存する可能性がある。本研究では、視覚幅と判定幅を制御し、それらがユーザのポインティング基準および操作性能に与える影響を実験的に調査した。その結果、全体としては判定幅依存の傾向が確認された一方で、特定の条件では判定幅のみではパフォーマンスを十分に説明できないことが示された。

1. はじめに

タッチインタフェースはスマートフォンやタブレット等の普及により、日常的な情報アクセスの手段として広く用いられている。しかし、指を用いたタッチ操作では、指先によるターゲットのオクルージョンや、タッチ検出の仕様により、ユーザの意図するタッチ位置とシステムが認識するタッチ位置にずれが生じる問題がある [1]。これらの問題は、ユーザの意図したターゲット以外が選択されてしまう、fat-finger 問題を引き起こす。

この問題に対し、タッチインタフェースにおけるターゲット選択精度の向上のために、様々な手法が検討されている。意図したタッチ入力位置と実際のタッチ座標との差分を学習するオフセットモデリング [2] や、ターゲットおよびその周辺領域をユーザの操作に応じて動的に拡大する手法 [3, 4]、ターゲットサイズとユーザのタッチ座標からユーザの意図を確率的に推論するなどの手法が存在する [5]。また、ターゲットのタッチ判定領域を視覚的な大きさよりも拡大する手法 [6-8] についても検討されており、UI 要素の表示サイズや要素間隔を変更せず、既存のレイアウトを保ったまま、低コストかつ頑健にタッチ精度を向上できることが期待されている。本研究では、ユーザが視覚的に認識するターゲットの幅を「視覚幅」、システムがタッチ入力として受理する幅を「判定幅」と定義する。

タッチインタフェースにおける視覚幅と判定幅の影響について、Im らはユーザが視覚的なターゲットに対してポインティングを行った際に、事後的にどのように判定領域を設計すべきかを調査した [7, 8]。また、Usuba らはユーザが経験を通じて判定領域を認識することを前提として、実験内で判定領域を探索するフェーズを導入し、その後のフェーズにおけるユーザの操作は判定領域に基づいて行われることを明らかにした [6]。デスクトップ環境においてカーソルが判定領域に入ったときにターゲットをハイライトするのは異なり、タッチインタフェースにおける判定領域は、ホバーによる領域提示ができないことや、オクルージョンによりユーザが自身のタップ位置を正確に把握できないこと [9] などから、常に十分に知覚されるとは限らない。このため、判定幅拡大の効果は視覚幅や拡大量に依存し、特に微小な拡大では、ユーザがその拡大に気づかないまま操作を継続する可能性がある。この場合、ユーザが判定幅を知覚できることを前提とした既存の知見が適用できるかは不明であり、判定幅だけでは操作時間やタップ分布の変化を十分に捉えられないことが考えられる。

本研究では、特に視覚幅に対する拡大量が小さい条件に着目し、視覚幅に対して判定幅を段階的に拡大した条件を設定することで、判定幅拡大がユーザの操作に与える影響を調査する。また、視覚幅についても制御し、視覚幅の違いによって判定幅拡大の効果がどう変化するかを検証する。さらに、結果に基づき、ユーザによる判定幅の知覚およびそれに伴う操作基準の変化の可能性について議論する。

¹ 明治大学

² LINE ヤフー株式会社

2. 関連研究

2.1 ポインティングのモデル化

Fitts の法則 (式 1) [10] はターゲットまでの距離 D , ターゲット幅 W , 2つの線形回帰定数 (a , b) を用いて, 操作時間 MT を予測するモデルである. モデル式の対数項は index of difficulty (ID) と呼ばれ, そのタスクの難易度を示す. ID 項が高くなるとユーザはポインティングタスクを達成する際により長い時間を要することが予測される.

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (1)$$

Fitts の法則を実験データへ適用する際には, その背景にある速度と精度のトレードオフを考慮する必要がある. 参加者は一般に, 可能な限り速くかつ正確に操作を行うよう指示されるが, この2つの要求は相反する関係にある [11]. このトレードオフが均衡している場合, エラー率は約 4% に収束することが知られている [12, 13]. しかし, 参加者の主観的な判断や実験条件によって操作戦略が変化し, エラー率がこの基準から著しく逸脱することがある. このような場合, 式 1 で用いられる名目上のターゲット幅 W は, 参加者が遂行したタスクの実際の困難さを正確に反映していない可能性がある.

この名目上の難易度と実際のパフォーマンスの不一致を補正するため, 実効幅 (Effective Width, W_e) が用いられることが多い. W_e はポインティング終点の標準偏差 σ から算出され, $W_e = \sqrt{2\pi e} \sigma$ と定義される [13, 14]. この W_e を式 1 の W に代入することで, 移動時間は以下の式 2 によってモデル化される.

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{D}{\sqrt{2\pi e} \sigma} + 1 \right) \quad (2)$$

本研究では判定幅拡大に伴うタップ分布のばらつきの変化自体を戦略差の表れとして捉える. このとき W_e を用いると, そのばらつきが難易度側に吸収され, 視覚幅基準か判定幅基準かという差が見えにくくなる. そこで本研究では, W_e による補正ではなく, 名目上の視覚幅または判定幅を用いた Fitts モデルとの適合度をポインティング基準を表す指標として比較し, 検討した. 具体的には式 1 における W として視覚幅ではなく判定幅を適用したほうが R^2 が高くなれば, 先行研究の結果である「ユーザが判定幅を基準にポインティングしている」を支持することになる.

2.2 視覚幅と判定幅の効果

ユーザがインタフェース上のターゲットを選択する際, GUI 要素が示す視覚的な大きさと, システムが入力を受理する実際の領域が一致しない場合がある (図 1). この不一致がユーザの操作に与える影響は様々な入力デバイスにおいて調査されており, これらの研究は, 視覚幅と判定幅の



図 1: 視覚的な大きさと, システムが入力を受理する実際の領域が一致しないユーザインタフェース. デザイン維持のためにアイコンを小さくする (図左), 精度向上のために判定幅を拡大する (図右) などがある.

不一致がユーザのポインティング行動に影響を与えることを示唆している. この視覚幅と判定幅の不一致が与える効果の理解は, より効率的で快適なインタフェース設計において重要である.

Usaba らは, マウス入力を用いたポインティング課題において, 視覚幅と判定幅の差が操作パフォーマンスに及ぼす影響を体系的に調査した [15]. その結果, 移動時間は主として判定幅に依存し, 視覚幅の影響は限定的であることが示された. また, クリック位置の分布も判定幅に応じて変化し, 視覚幅と判定幅の差が大きいほど反応時間が増加する傾向がみられた. さらに, 視線入力を対象とした研究では, 不可視の判定領域拡大が選択速度および正確性を改善し, その効果はマウス入力よりも大きいことに加え, 視覚幅が判定幅拡大の効果を調整し得ることが示されている [16]. これらの知見は, 入力手法が異なる場合でも, ポインティング行動が視覚幅よりも判定幅の影響を強く受けることを示している.

同様の効果は, カーソル入力を用いないタッチインタフェースにおいても報告されている. タッチ入力を対象とした研究では, 事前にターゲットの判定幅を探索させることによって, メインの 1 次元ポインティングタスクにおいてはユーザが判定幅拡大を認識している状況が設定された. その結果, 移動時間およびタップ位置分布は主として判定幅に依存し, 参加者が記憶した判定幅を基準として操作していることが示された [6]. また, 過度に難易度が低い条件を除き, すべての条件で判定幅を用いた Fitts モデルによって操作時間が良好に予測できることが報告されている. すなわち, 判定幅が知覚されている状況においては, タッチ入力においても他の入力手法と同様に, 判定幅を重視したポインティングが行われる.

一方で, タッチインタフェースでは判定領域は不可視であり, ユーザは成功・失敗の経験を通じてその広がり把握する必要がある. このため, 先行研究のような判定幅探索フェーズが設けられていない現実的状况においては, 判定幅が常に十分に利用されるとは限らず, 判定幅拡大の効果は条件によって変化する可能性がある. そこで本研究では, 視覚幅に対する判定幅の拡大率を複数段階に設定し,

判定幅拡大がユーザのポインティング基準および操作性にどのような影響を及ぼすか、またその影響が視覚幅によってどのように異なるかを検証する。

3. 実験

3.1 実験参加者

参加者は12名（男性9名、女性3名）の大学生で、（年齢:20-21歳、平均年齢:20.4歳）いずれの参加者も日常的にスマートフォンを使用している。参加者のうち11名は右利きで、実験でも右手人差し指で操作した。左利きの参加者については、左手人差し指で操作をした。参加者のプライバシーを最大限に尊重し、すべての個人情報は匿名化して保管した。

3.2 実験機材

タスク提示には6.1インチのディスプレイ（2400 × 1080 px, 429 ppi）を備えたAndroid端末を用いた。タッチ検出は静電容量方式で、得られたタッチダウン座標を記録した。実験システムはJavaScriptを使用して作成した。

3.3 実験条件

本実験では、ターゲット間距離 (D)、ターゲットの視覚幅 (W_v)、視覚幅に対する判定幅の拡大率 (R) の三因子を操作し、視覚幅と判定幅の影響を検証した。各因子の条件は以下のとおりである。視覚幅 W_v は [15, 25 px] (約 2.31, 3.85mm) の2条件を設定し、判定幅 W_m は視覚幅に対して拡大率 R [1.0, 1.2, 1.4, 1.6 倍] の4条件を用意した。また、ターゲット間距離 D は 400 px, 600 px (約 61.6, 92.4mm) の2条件とした。これは、距離を変化させることで Fitts 指標のばらつきを確保することを目的とした。この $2 \times 4 \times 2$ の計 16 種をターゲット条件として設定した。

3.4 実験課題

実験の様子および使用した実験システムを図2に示す。本実験では、画面上に提示された赤色のボタンと青色のターゲットを交互にタップする1次元のタップ課題を実施した。青色のターゲットは、各条件で設定された視覚幅および判定幅を有しており、ターゲット間の距離については所定の条件が25試行ごとにランダムに提示された。ここで、ターゲットの見かけ上の高さは視覚幅 W_v に対応し、実験参加者が視覚的に確認できるターゲットの大きさを表す。一方、緑色の点線で示した幅は判定幅 W_m であり、画面上には表示されないがシステムがタッチ入力を受理する範囲である。試行を繰り返す中で、参加者はターゲットの視覚幅から離れた位置を偶然タップしても、判定幅内であったために成功のフィードバックを受ける経験を積み、徐々に判定幅を認識していくことが期待される。

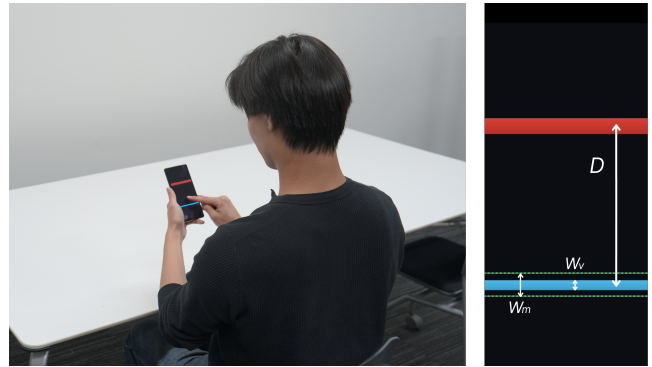


図 2: 実験の様子。実験参加者は利き手人差し指でポインティングタスクを行った。タスクでは、図右の画面が表示され、赤色のボタンと青色のターゲットを往復するタスクを実施した。ただし、緑色の点線は説明のために図示しており、実験環境では表示されない。

実験参加者は、まず赤色のボタンをタップし、続いて青色のターゲットをタップした。この、赤色のボタンがタップされてから次のタッチ入力が行われるまでの時間を MT とした。青色のターゲットは、直前に赤色のボタンがタップされた場合にのみ反応するように設定した。これにより、各試行における開始位置を統一した。赤色のボタンがタップされると、開始操作が受理されたことを示す音を提示した。また、青色のターゲットについては、判定幅内へのタップが行われた場合に成功音を、判定幅外へのタップが行われた場合に失敗音を提示した。この成功音は、実際の UI において画面遷移などによって与えられるフィードバックを、実験環境において音として代替したものである。なお、青色ターゲットのタップ後は、成功・失敗にかかわらず次の試行へ進行するようにした。

3.5 実験手順

実験は、実験説明、タップ課題の実施、および実験後アンケートの順に進めた。実験開始前には、課題の内容、進行方法、およびフィードバック音の意味について説明した。また、教示では、ターゲットによっては判定幅が視覚的な印象と一致しない可能性があることのみを伝え、具体的な条件内容は知らせなかった。その後、実験参加者は各条件についてタップ課題を実施した。

タップ課題では、2種類の W_v と 4種類の R の合計 8 条件について、25 試行 × 5 回の 125 試行を行い、125 試行 × 8 条件 × 12 人の計 12000 試行を収集した。125 試行のうち、初めの 25 試行は判定幅の学習用として扱い、残り 100 試行が本試行である。本番 100 試行のうち、2 種類の距離 D 条件は 50 回ずつランダムな順に選出されるようにした。よって 1 名あたりの本番データは、2 種類の W_v 、4 種類の R 、2 種類の D の合計 16 条件それぞれについて 50 試行であり、12 名で合計 9,600 試行である。

タップ課題では、25 試行ごとに 10 秒以上の休憩を設けた。また、条件間では 1 分以上の休憩を設け、疲労の蓄積や連続試行による影響を軽減した。条件の提示順はランダム化し、条件順序による系統的な影響を抑制した。

4. 結果

4.1 分析対象データ

分析に際してまず、各参加者の平均エラー率に対して四分位範囲 (IQR) に基づく外れ値判定を行い、 $Q3+1.5IQR$ を超える参加者を除外した。その結果、1 名の参加者のデータが、この基準を逸脱していたため、以降の分析から除外した ($Q3: 0.2342$, $IQR: 0.0911$, 上限値: 0.3708 , 該当参加者: 0.4274)。また、条件開始直後の判定幅の学習過程の影響を除くため、各ターゲット条件における最初の 25 試行を分析対象から除外した。これにより、11 名の参加者について、各ターゲット条件ごとに 50 試行を分析対象とした。

さらに、11 名分の 8800 試行のデータに対して、タップ位置の y 座標分布に基づく外れ値除外を行った。具体的には、各参加者におけるタップ位置の y 座標について平均 $\pm 3\sigma$ を除外基準として採用し、40 試行を外れ値として除外した。その結果、最終的に 8,760 試行を分析対象とした。

4.2 全体分析

統計分析には反復測定 ANOVA を用い、事後比較には Holm 法による多重比較補正を適用した対応のある t 検定を用いた。ただし、本実験では判定幅 W_m が $W_v \times R$ によって定義されるため、 W_v の主効果を視覚幅単独の効果として解釈することはできない。

4.2.1 タスク完了時間

操作時間 MT については、距離 D 、視覚幅 W_v 、および拡大率 R の主効果が有意であった。具体的には、距離 D で $F(1, 10) = 64.72, p < .001, \eta_p^2 = .87$ 、視覚幅 W_v で $F(1, 10) = 26.87, p < .001, \eta_p^2 = .73$ 、拡大率 R で $F(3, 30) = 7.81, p < .001, \eta_p^2 = .44$ であった。また、距離 D と視覚幅 W_v の交互作用も有意であった ($F(1, 10) = 6.52, p < .05, \eta_p^2 = .39$)。一方で、その他の交互作用はいずれも有意ではなかった。

4.2.2 タッチ標準偏差

タッチ標準偏差 SD_y については、視覚幅 W_v および拡大率 R の主効果が有意であった。具体的には、視覚幅 W_v で $F(1, 10) = 79.17, p < .001, \eta_p^2 = .89$ 、拡大率 R で $F(3, 30) = 5.77, p < .05, \eta_p^2 = .37$ であった。一方で、距離 D の主効果および各交互作用はいずれも有意ではなかった。

4.2.3 エラー率

エラー率 ER については、視覚幅 W_v および拡大率 R の主効果が有意であった。具体的には、視覚幅 W_v で $F(1, 10) = 85.70, p < .001, \eta_p^2 = .90$ 、拡大率 R で $F(3, 30) = 28.44, p < .001, \eta_p^2 = .74$ であった。一方で、

距離 D の主効果および各交互作用はいずれも有意ではなかった。

4.2.4 Fitts モデルフィッティング

全条件を対象として、Fitts モデルのフィッティングを行った (図 4)。難易度指標 ID については、ターゲット幅 W として視覚幅を用いる ID_v (式 3) と、判定幅を用いる ID_m (式 4) を比較した。その結果、 ID_v では決定係数が 0.783 であったのに対し、判定幅を用いた ID_m では 0.945 であり、判定幅基準の Fitts モデルのほうが高い適合度を示した。

$$ID_v = \log_2 \left(\frac{D}{W_v} + 1 \right) \quad (3)$$

$$ID_m = \log_2 \left(\frac{D}{W_m} + 1 \right) \quad (4)$$

以上の結果は、先行研究と同様に、ユーザが基本的には視覚幅よりも判定幅を利用してポインティングを行っていることを示唆している。

4.3 視覚幅ごとの MT

視覚幅ごとの判定幅拡大の影響を確認するため、視覚幅条件 15 px および 25 px ごとにデータを分割して分析を行った (図 5)。その結果、いずれの視覚幅条件においても、判定幅の拡大に伴って MT は全体として減少する傾向がみられた。一方で、その低下の様相には条件間で差が観察された。15 px 条件では、拡大率の上昇に伴って MT が段階的に低下したのに対し、25 px 条件では、1.0 倍から 1.2 倍

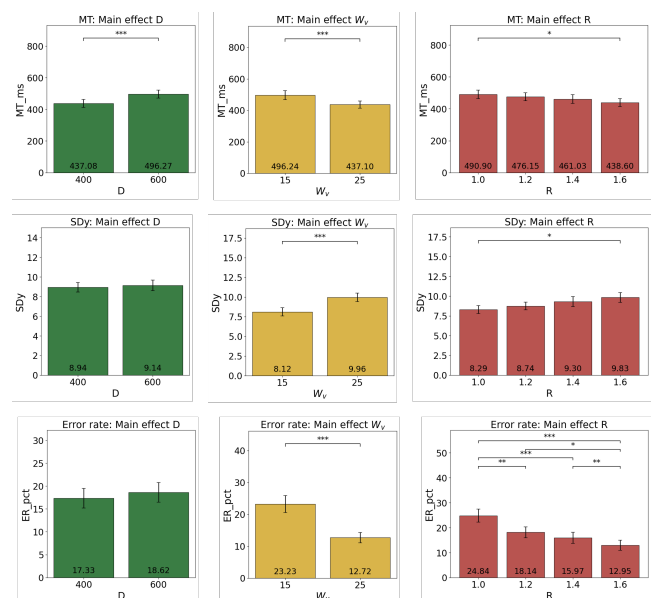


図 3: 各要因水準における条件平均と主効果。*は $p < .05$, **は $p < .01$, ***は $p < .001$ を示す。1 段目が MT , 2 段目が SD_y , 3 段目が ER を示す。 MT では D , W_v , R , SD_y では W_v , R , ER では W_v , R で主効果が見られた。

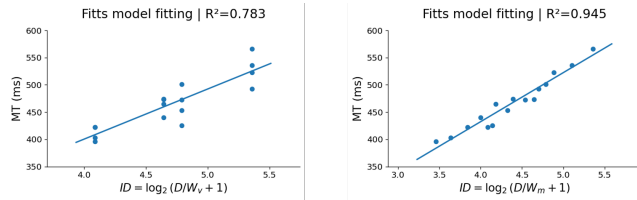


図 4: Fitts モデルフィッティング. 左図は難易度指標 ID におけるターゲット幅 W について視覚幅 W_v を設定しており (式 3), 右図は判定幅 W_m を設定している (式 4).

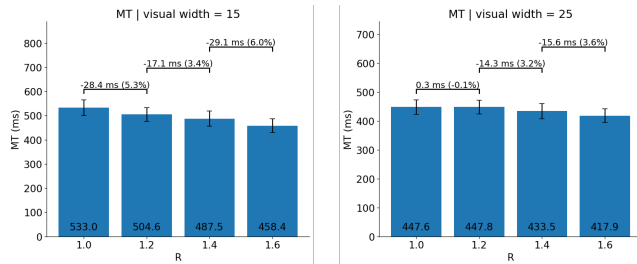


図 5: 視覚幅ごとに分割したデータにおける拡大率ごとの MT の推移. 上部のバーは隣接拡大条件ごとの MT の変化量と変化割合を示す. どの隣接条件間でも常に視覚幅 15 px のほうが MT の変化が大きかった.

の区間で大きな変化はみられず, その後の条件で MT が低下する傾向がみられた. また, 隣接条件間の平均 MT 差については, 各隣接区間において 15 px 条件のほうが 25 px 条件よりも低減量, 低減率ともに大きい傾向がみられた.

さらに, 視覚幅ごとに Fitts モデルによるフィッティングを行った. 難易度指標 ID については, ターゲット幅 W として判定幅を用いる ID_m (式 4) を設定した. その結果, 視覚幅 15 px 条件では高い決定係数 ($R^2 = 0.992$) が得られ, 判定幅に基づくモデルが MT を良好に説明できることが確認された. 一方で, 視覚幅 25 px 条件では決定係数が低下 ($R^2 = 0.873$) し, 視覚幅によって, 判定幅に基づくモデル適合度が異なった.

以上より, 判定幅拡大に伴う MT の変化は一様ではなく, 特に小さな拡大率 (1.0 倍から 1.2 倍) においては視覚幅条件によって異なる応答を示す可能性が示唆された. また, モデル適合の観点からも, 視覚幅によっては判定幅のみではパフォーマンスを十分に記述できない条件が存在することが示唆される.

4.4 拡大領域に含まれるタップ

各条件におけるタップ位置の分布および, 視覚幅外かつ判定幅内に含まれるタップ数について分析を行った. 本実験では, 判定幅を視覚幅に対する拡大倍率として定義しているため, 判定幅の拡大量は視覚幅条件によって異なる. 具体的には, 視覚幅 15 px 条件では拡大領域はターゲット全体で 3 px, 6 px, 9 px の増加, 視覚幅 25 px 条件では 5 px, 10 px, 15 px の増加となる.

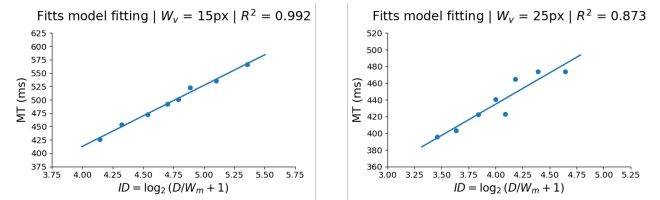


図 6: 視覚幅ごとに分割したデータに対する Fitts モデルフィッティング. 両図とも ID における W には判定幅を使用している. 視覚幅 15 px では高い適合度を示す一方, 視覚幅 25 px 条件では決定係数が低下した.

視覚幅外かつ判定幅内に含まれるタップ数を集計した結果, 拡大率 1.2, 1.4, 1.6 のすべての条件において, 視覚幅 15 px 条件のほうが 25 px 条件よりも拡大領域内タップ率が高かった. 具体的には, 15 px 条件ではそれぞれ 10.512%, 17.260%, 23.428% であり, 25 px 条件では 9.689%, 13.151%, 18.961% であった.

また, タップ位置分布に基づく補助的な解析として, 拡大領域内タップ率の推定を行った. これは, 視覚幅を基準としたタップ分布を仮定した場合に, 本来は視覚幅外となるタップが, 判定幅拡大によってどの程度追加的に成功として受理されるかを推定するものである. また, この割合は, ユーザが視覚幅と判定幅の不一致を経験する機会の多さを表す指標としても解釈できる. 本研究では, この指標を, 判定幅拡大がユーザに知覚される可能性を議論するための補助的な指標として用いる.

各視覚幅条件における拡大率 1.0 倍時のタップ位置誤差 Y がターゲット中心を平均とする正規分布に従うと仮定し, 式 5 のように表した. ここで, σ は各視覚幅条件における拡大率 1.0 倍時のタップ位置分布の標準偏差である. このとき, 視覚幅外かつ判定幅内に含まれるタップ確率 P_{exp} は, 式 6 で与えられる.

$$Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (5)$$

$$P_{\text{exp}} = P\left(\frac{W_v}{2} < |Y| \leq \frac{W_m}{2}\right) = 2 \left[\Phi\left(\frac{W_m}{2\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{W_v}{2\sigma}\right) \right] \quad (6)$$

また, 各条件の総タップ数を N とすると, 拡大領域内タップ数の期待値 E_{exp} は以下の式 7 のように表される.

$$E_{\text{exp}} = NP_{\text{exp}} \quad (7)$$

この式 7 に基づいて各条件の拡大領域内タップ率を算出した結果, 視覚幅 15 px 条件では拡大率 1.2, 1.4, 1.6 に対してそれぞれ 8.76%, 15.76%, 21.15%, 視覚幅 25 px 条件ではそれぞれ 7.58%, 12.70%, 15.93% となった. 実測値では, 判定幅拡大の知覚に伴うタッチ分散の増加等の理由から, 推定値との間に差がみられるが, データの傾向は概ね一致していた.

5. 議論

5.1 視覚幅が判定幅拡大の効果に与える影響

全体分析の結果、難易度指標として判定幅を用いた Fitts モデルによる適合が良好であり、MT は判定幅に依存するという点で、先行研究と整合的な結果が得られた。また、先行研究では「意図的にエラーをしてよいので、判定幅を積極的に探索する」というフェーズが設けられていた [6, 15]。それに対して我々の実験では、そのようなフェーズを設けない現実的な操作状況であっても、参加者の MT が判定幅に依存した傾向を示すことを明らかにした。

一方で、視覚幅ごとに結果を確認すると、判定幅拡大に対する MT の変化パターンやモデル適合には条件間で差が見られた。具体的には、視覚幅 15 px 条件では、拡大率の増加に伴い MT が段階的に低下し、 ID_m によるフィッティングも高い適合度を示した。これに対し、視覚幅 25 px 条件では、特に 1.0 倍から 1.2 倍の区間において MT の明瞭な低下はみられず、全体として拡大率に対する応答が鈍い傾向が観察された。また、視覚幅 W_v と拡大率 R の交互作用は有意ではなかったものの、 η_p^2 は 0.134 であり中程度の効果量を示した。この結果は、本研究のサンプルサイズでは統計的有意性には至らなかったものの、視覚幅によって判定幅拡大の影響の現れ方が異なる可能性を支持する。さらに、Fitts モデルの適合においても、15 px 条件と比較して決定係数が低下し、判定幅のみでは MT の変化を十分に説明できない可能性が示された。

これらの結果は、視覚幅と判定幅が異なるターゲットにおけるポインティングが常に判定幅に基づいて決定されるわけではなく、その依存性が条件によって変化する可能性を示唆している。すなわち、判定幅に基づく既存の説明は全条件で一様に成立するものではなく、特定の条件においては、判定幅のみではパフォーマンスを十分に説明できない可能性がある。

5.2 微小拡大と判定幅の非知覚の可能性

視覚幅 25 px 条件では、特に拡大率 1.0 倍から 1.2 倍への変化において、MT の明瞭な低下は観察されなかった。判定幅依存のポインティングが成立するならば、1.2 倍条件ではユーザは拡大後の判定幅 30 px に基づいて操作を行い、それに応じて MT も低下すると考えられる。しかし実際にはそのような変化は確認されず、少なくともこの条件では、拡大された判定幅が十分には利用されていなかった可能性がある。

この要因として、判定幅の拡大を認識することが困難であった可能性が考えられる。タッチインタフェースでは、PC 環境におけるカーソル操作とは異なり、ホバーによって判定領域を事前に提示することができない。そのため、ユーザは成功・失敗の経験を通じて判定幅を学習する必要

がある。一方で、タッチ操作では指によるオクルージョンが生じることに加え、静電容量式タッチパネルでは接触領域の重心が入力座標として取得されるため、ユーザが自身のタップ位置を正確に把握することは容易ではない。したがって、判定幅拡大を知覚するためには、視覚幅の外側をタップしたにもかかわらず成功したという経験が一定程度蓄積される必要があると考えられる。

本研究の結果は、この解釈と整合的である。視覚幅外かつ判定幅内に含まれるタップは、全体として視覚幅 15 px 条件のほうが 25 px 条件よりも多かった。これは、15 px 条件のほうが視覚提示と実際の判定幅との不一致を経験しやすく、判定幅拡大に気づくための手がかりを得やすかったことを示している。一方で、25 px 条件では 1.2 倍拡大条件における拡大領域内タップが相対的に少なく、判定幅拡大が十分に知覚されなかった可能性がある。

さらに、実験後アンケートにおいて、各ターゲット条件に対する操作のしやすさについて質問したところ、視覚幅 15 px 条件では拡大なし（1.0 倍）における操作のしにくさを指摘する参加者が多く、1.2 倍拡大において操作のしやすさを感じたとする回答がみられた。一方で、視覚幅 25 px 条件では、1.0 倍および 1.2 倍条件に関する顕著な指摘は少なく、主として 1.4 倍および 1.6 倍条件において操作のしやすさを指摘する参加者が多かった。

これらの結果は、25 px 条件で、参加者は判定幅の拡大を知覚できず、拡大された判定幅がポインティングに利用されない可能性を示唆している。

5.3 UI 設計における判定幅拡大の示唆

本研究の結果は、判定幅拡大の効果が一様ではなく、ユーザが拡大後の判定幅に基づいて操作するかどうかによって、現れ方が異なる可能性を示した。視覚幅条件によっては、判定幅拡大が行われていても、ユーザのポインティング挙動には大きな変化が見られず、主にエラー率の低減として効果が現れる場合があった。このような条件では、ユーザの操作基準を大きく変えずに、見かけ上のターゲットサイズを維持したまま選択精度を向上できる可能性がある。

一方で、判定幅拡大がポインティング基準の変化として現れる条件では、ユーザは拡大された判定幅を前提として操作し、操作時間の短縮が生じる。その反面、タップ分布の広がりも大きくなるため、判定幅拡大によるエラー率低減の効果は、挙動が変化しない条件と比較して低下する可能性がある。すなわち、判定幅拡大は、ある条件では主としてエラー率改善として機能し、別の条件では速度向上を伴う形で機能すると考えられる。

したがって、UI 設計においては、判定幅拡大を単なる精度向上手法として捉えるのではなく、ユーザの操作基準に与える影響も含めて設計する必要がある。例えば、操作感を大きく変えずにエラー率のみを抑えたい場合には、ユー

ザに知覚されにくい拡大が有効である可能性がある。一方で、より高速な操作を促したい場合には、ユーザの挙動変化が生じるような拡大を設計することが有効である。

5.4 限界と今後の課題

本研究にはいくつかの限界が存在する。第一に、本研究では判定幅拡大の効果の違いを判定幅知覚の違いによって説明したが、知覚が唯一の要因であることを直接的に検証したわけではない。例えば、条件間のエラー率の改善量の差に応じて参加者が速度と精度のバランスを調整していた可能性や、視覚幅の違いに伴う運動精度および操作基準の差が結果に影響していた可能性も考えられる。

第二に、本研究では判定幅の知覚そのものを直接測定していない。本稿では拡大領域内のタップ数や主観評価を手がかりとして知覚の可能性を議論したが、ユーザが実際にどの程度判定幅を把握していたかについては明確に評価していない。今後は、知覚の有無や程度を直接的に測定する手法を導入する必要がある。

第三に、本研究の実験課題は1次元の往復タップ課題に限定されている。実際のインタフェースでは、二次元的な配置や周囲のターゲットとの干渉など、より複雑な条件が存在するため、本研究の結果がそのまま適用できるとは限らない。今後は、より複雑なレイアウトや実環境に近い条件において検証を行う必要がある。

6. 結論

本研究では、視覚幅と判定幅を制御し、それらがユーザのポインティング基準および操作性に与える影響を実験的に調査した。その結果、全体としては先行研究と同様に、ポインティング操作が判定幅に依存する傾向が確認された一方で、視覚幅条件によっては判定幅拡大に対する応答が異なり、判定幅のみではパフォーマンスを十分に説明できない条件が存在することが示された。さらに、特に拡大率が小さい条件においては、判定幅拡大が十分に利用されず、ユーザのポインティング挙動に反映されない場合があることが確認された。これらの結果は、判定幅に基づく既存のポインティングモデルが常に成立するわけではなく、その成立が条件に依存する可能性を示している。また、判定幅拡大の効果は単一ではなく、条件によってユーザの操作基準に異なる影響を与えることが示唆された。

参考文献

- [1] Holz, C. and Baudisch, P.: Understanding touch, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2501–2510 (2011).
- [2] Mott, M. E. and Wobbrock, J. O.: Cluster Touch: Improving touch accuracy on smartphones for people with motor and situational impairments, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14 (2019).
- [3] Yang, X.-D., Grossman, T., Irani, P. and Fitzmaurice, G.: TouchCuts and TouchZoom: enhanced target selection for touch displays using finger proximity sensing, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2585–2594 (2011).
- [4] Baudisch, P., Zotov, A., Cutrell, E. and Hinckley, K.: Starburst: a target expansion algorithm for non-uniform target distributions, *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pp. 129–137 (2008).
- [5] Bi, X. and Zhai, S.: Bayesian touch: a statistical criterion of target selection with finger touch, *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 51–60 (2013).
- [6] Usuba, H., Yamanaka, S. and Miyashita, H.: Touch pointing performance for uncertain touchable sizes of 1D targets, *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, pp. 1–8 (2019).
- [7] Im, Y., Kim, T. and Jung, E. S.: Investigation of icon design and touchable area for effective smart phone controls, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, Vol. 25, No. 2, pp. 251–267 (2015).
- [8] Jung, E. S. and Im, Y.: Touchable area: an empirical study on design approach considering perception size and touch input behavior, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 49, pp. 21–30 (2015).
- [9] Vogel, D. and Baudisch, P.: Shift: a technique for operating pen-based interfaces using touch, *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 657–666 (2007).
- [10] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement., *Journal of experimental psychology*, Vol. 47, No. 6, p. 381 (1954).
- [11] Zhai, S., Kong, J. and Ren, X.: Speed–accuracy trade-off in Fitts’ law tasks—on the equivalency of actual and nominal pointing precision, *International journal of human-computer studies*, Vol. 61, No. 6, pp. 823–856 (2004).
- [12] Soukoreff, R. W. and MacKenzie, I. S.: Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts’ law research in HCI, *International journal of human-computer studies*, Vol. 61, No. 6, pp. 751–789 (2004).
- [13] MacKenzie, I. S.: Fitts’ law as a research and design tool in human-computer interaction, *Human-computer interaction*, Vol. 7, No. 1, pp. 91–139 (1992).
- [14] Crossman, E. R. F. and Goodeve, P.: Feedback control of hand-movement and Fitts’ Law, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 35, No. 2, pp. 251–278 (1983).
- [15] Usuba, H., Yamanaka, S. and Miyashita, H.: Pointing to targets with difference between motor and visual widths, *Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction*, pp. 374–383 (2018).
- [16] Wang, Q.-J., Ma, X.-X., Lu, Y.-N., Wang, D.-M. and Sun, Y.-H.: The impact of visual and motor space size on gaze-based target selection, *Australian Journal of Psychology*, Vol. 76, No. 1, p. 2309384 (2024).