

バーチャルハンドを用いた選択インタラクションにおける 擬似触覚フィードバックが及ぼす影響の調査

森本 浩輔^{1,a)} 渡邊 恵太^{2,b)}

概要：ユーザの入力と視覚的なずれによって引き起こされる擬似触覚は簡易的に触覚フィードバックをユーザに与えることができる。そのため体験向上に触覚フィードバックが重要となる VR コンテンツへの応用が注目されている。本研究では、ターゲットの色変化や押し込み変化、バーチャルハンドの指先形状変化を用いた擬似触覚に着目した。実験ではハンドトラッキング操作を用いたフィッツの法則のポインティングタスクを用いて、これらの擬似触覚がパフォーマンスに与える影響を調査した。

キーワード：インタラクション, VR, 擬似触覚, パフォーマンスモデル

1. はじめに

Vitrual Reality(VR) において選択行為、選択動作は基本的なインタラクションである。VR でのインタラクションには付属のコントローラを使用することが多いが、近年ではハンドトラッキングを用いた操作が注目されている。ハンドトラッキングを用いた操作では現実の動作をもとにしたアフォーダンスによりユーザに自然で、直感的な操作を提供可能である [15]。一方でコントローラの把持やデバイスの装着を行わないことから VR でのインタラクションの User Experience(UX) やパフォーマンスを向上させる触覚フィードバックの提示 [8], [13], [34] が困難な問題がある。

この課題に対するアプローチとして、擬似触覚 (Pseudo-Haptics) がある。Pseudo-Haptics は、ユーザの動きと視覚フィードバックの差異から錯覚的に触覚を提示する技術である [3], [19]。この技術により、物理的な触覚フィードバックを使用せずに、サイズ、重さ、剛性など [9], [11], [23], [27], [33] の触覚的性質を操作することが可能となる。この擬似触覚を利用し、3D 空間の User Interface(UI) への応用が注目されている。具体的な応用例としてボタン UI の選択時の接触エフェクト [16], [25]、現実世界の物理的メタファー [29] に基づいた UI が提案されている。また、選択動作に応用が可能である擬似触覚手

法としてバーチャルハンドの指先形状の変化が挙げられ選択インタラクションへの応用が期待できる [23]。これまでの擬似触覚を UI へ応用した研究では、10 キーの配置のボタンを選択した際のパフォーマンス調査やターゲットとの接触インタラクションに対するユーザエクスペリエンスなどの調査が実施されてきた [16], [25]。しかし、これらの研究で使用した擬似触覚は単一効果のみであった。一方、物理ベースの触覚フィードバックでは、複数の種類の異なるフィードバックを組み合わせることで異なる知覚の変容を促す、フィードバックの強化が提案されている [22], [30]。また、擬似触覚を使用した UI に関するパフォーマンス調査において標準化されたターゲット選択タスクであるフィッツの法則を使用した比較はない。

そこで本研究ではバーチャルハンドの指先形状の変化、ターゲットの色の変化、ターゲットを押し込める変化の 3 種類の擬似触覚 (図 1) の単一、複合での組み合わせを用いた選択インタラクションが VR でのポインティングタスクに与える影響を調査する。実験 (N=20) では擬似触覚を使用しない条件と 3 種類の擬似触覚の単一・複合提示条件、合計 8 条件で ISO 9241-400:2007[1] によって標準化されたポインティングタスクを実施した。評価項目として操作時間、接触時間、精度を測定と各擬似触覚条件ごとに錯覚、有用性、身体性、空間知覚を測定するカスタムアンケートを実施した。我々の研究は、以下のリサーチクエスチョンに基づいている。

RQ1. 各擬似触覚条件においてパフォーマンスを向上させる条件は何か？

RQ2. 各擬似触覚条件においてフィッツの法則のモデルは

¹ 明治大学大学院先端数理科学研究科

² 明治大学総合数理学部

^{a)} cs242035@meiji.ac.jp

^{b)} watanabe@fms.meiji.ac.jp

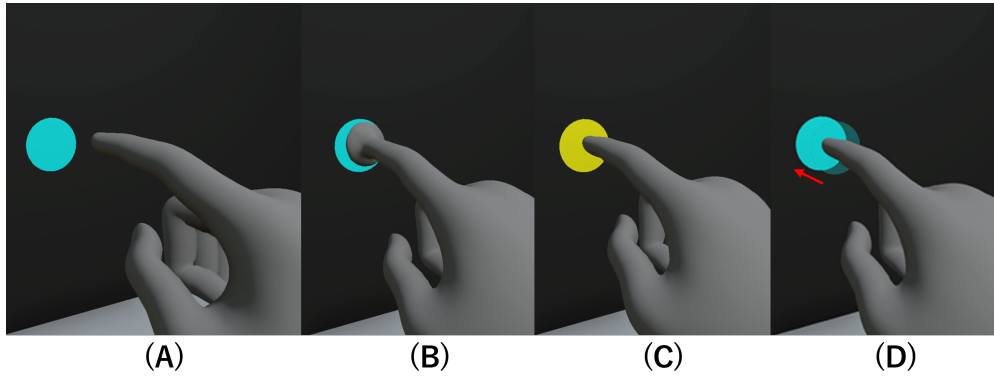


図 1 本研究で使用する 3 つの疑似触覚.(A)：ターゲットを選択前の疑似触覚が適応されていない状態.(B)：指先形状が変化する疑似触覚.(C) ターゲットの色が変化する疑似触覚.(D)：ターゲットが押し込める疑似触覚.

適合するか？

RQ3. 各疑似触覚条件におけるカスタムアンケートにてユーザに好まれやすい条件は何か？

RQ4. 複数の疑似触覚を組み合わせることでユーザを感じる錯覚的なフィードバックは強化されるか？

実験の結果、パフォーマンスではターゲットの色の変化を用いた疑似触覚がタスク速度を向上させることを示し、ターゲットを押し込むことのできる変化を用いた疑似触覚は速度を増加させ、タスク精度を向上させることを示した。カスタムアンケートでは錯覚、操作性、空間知覚の項目すべてにおいて、指先形状の変化を用いた疑似触覚条件が高いスコアを記録した。

本研究の貢献は以下の通りである。

- (1) VR 空間における選択インタラクションの際に、3 つの疑似触覚条件が与える影響を標準化されたポインティングタスクを用いて、評価と主観評価の調査を実施した。
- (2) パフォーマンス評価の速度においてターゲットの色が変化する疑似触覚が有用である一方、押し込み変化の疑似触覚は時間を増加させることを明らかにした。
- (3) カスタムアンケートを用いた心理物理評価では指先形状が変化する疑似触覚条件が錯覚、操作性、空間知覚の項目すべてにおいて高いスコアであることを明らかにした。
- (5) フィッツの法則に基づく分析を行い、各疑似触覚手法の高いモデル適合性を明らかにした。

2. 関連研究

2.1 疑似触覚と選択インタラクション

ハードウェアを使用せずにユーザに触覚を提示するアプローチとして pseudo-haptics がある [3], [19]。これは、ユーザ自身の動作とそれに対応する視覚フィードバックの差異から触覚を錯覚的に知覚する現象である。これまでの研究では、形状 [6], [7], 重量 [26], [27], 摩擦 [20], [24], 剛性 [4], [23] などの多様な触覚が模倣されてきた。疑似触覚

は Lecuyer らの受動的なばねとは別の動作をする仮想ばねをディスプレイに表示することで、ユーザを感じる剛性が変化する提案が起源である [19]。

VR でのインタラクションでも pseudo-haptics が応用されている。Smad らは現実世界の手とバーチャルハンドのコントロールディスプレイ比 (C/D 比) を変化させることで把持物体の重さの知覚に影響を与えることを調査し、VR における重みのシミュレーションに使用できる C/D 比の範囲の定量化を提供した [27]。バーチャルハンドの C/D を使用した研究として Weiss らは固定剛性の物体を加圧しながら C/D 比を制御することで、物体の剛性を変化させた [32]。視覚情報がユーザが知覚する大部分を占める HMD を使用する VR においてこのアプローチは非常に親和性が高く、知覚の変容を用いたフィードバックを 3D 空間の UI に応用することも注目されている。

3D 空間でのメニューの UI に関連する研究では Speicher らは従来の 2D 型の UI とアフォーダンスをもとにした pseudo-haptics を取り入れた 3D の特徴を持った UI で比較を行ったところ、3D 型の UI のほうが主観評価が高いことを示した [29]。Kim と Xiong は [17] テキスト入力の際にバーチャルハンドの指先がキーを貫通しないようにする pseudo-haptics とキーの選択にピンチを用いて行うインタラクションを用いた際のユーザへの影響を調査し、ユーザ体験が向上することを明らかにした。また Kim と Xiong は [16] VR 空間におけるボタン選択において複数の疑似触覚を用いたインタラクション同士の比較を UX の観点からの比較を実施した。パフォーマンスの評価においては Park らが 2 種類の疑似触覚を比較を行い、2D ベースの疑似触覚のほうがパフォーマンスが高いことを示した。しかし、10 キーを用いたボタン入力に絞ったタスクを実施していることから 3D 空間の選択インタラクションのデザインすべてに当てはまるとは言い切れない。

2.2 VRにおけるフィッツの法則

フィッツの法則は、HCIや人間工学で広く使われている人間による運動の予測モデルである[21]。MacKenzieは情報伝達のシャノン・ハートレー定理に基づき、ポインティングタスクにおけるターゲットの幅(W)とターゲット間の距離(A)が、タスクの難易度指数(ID)に相当する方程式(式1)を提案した[14], [21]。

$$MT = a + bID, ID = \log 2\left(\frac{A}{W} + 1\right), \quad (1)$$

また、フィッツの法則は国際標準化機構のISO 9241-400:2007により採用されていることから様々な入出力デバイスやインタラクション手法でのパフォーマンスを測定する標準的な手法である[1]。

VRでフィッツの法則を使用して評価をした研究としてSchwindらはアバターの手の外見がユーザの入力パフォーマンスに与える影響を調査した[28]。触覚デバイスの評価としてKourtesisらは振動刺激と電気刺激が選択パフォーマンスにどのような影響を与えるか調査を実施した[18]。ほかにも視覚と触覚の不一致による影響を調査するためにBricklerらは接地型の触覚デバイスを用いてリングをペグからペグに移動させるタスクにおいてフィッツの法則を用いて解析を実施した[12]。これらの研究よりフィッツの法則がVRのパフォーマンス測定に対して有用であることが示されているため、本研究の疑似触覚のパフォーマンス測定にもフィッツの法則を使用して解析を実施する。

3. 疑似触覚システム

本研究で扱うシステムのインタラクションの要となる3つの疑似触覚の様子を図1に示す。

3.1 ハンドトラッキングシステムと接触

本研究で使用したバーチャルハンドの指先が変化するシステムはハンドトラッキングを用いて操作を行う。ハンドトラッキングにはUnity AssetのOculus (Oculus Integration)*¹を用いた。本実験で使用したバーチャルハンドのサイズはユーザの手のサイズに依存はしていない。実験で使用したバーチャルハンドとバーチャルオブジェクトとの接触において貫通は起こらないようにOculus IntegrationのPokeable Itemを使用して実装した。

3.2 疑似触覚ごとの視覚フィードバックの表示方法

finger のデザインについては指先形状のを円形に拡大変形することで剛性知覚に影響を与えることを明らかにしたMorimotoらの提案を参考にした[23]。バーチャルハンドの指先形状の変化アニメーションは同Assetの内部に梱包されている3Dハンドモデルを改変することで実装し

た。実装の手順としてまず、バーチャルハンドの3Dモデルの人差し指の第一関節より外側の最も太い箇所を測定した(1.3cm)。DCツールであるBlender*²の機能の一つである”シェイプキー”を使用し、オブジェクトと接触した際の変形アニメーションを作成した。シェイプキーのパラメータが最高値である100の場合に計測をした人差し指の指先と第一関節の中間部分の長さの2.25倍が直径(3.25cm)となる円形に指先をモデリングした。変形アニメーションは指先形状の最大サイズをシェイプキーの持つ0-100のパラメータで調整が可能である。0-100のスケールと指先形状の変化の関係性についてはスケールが0の場合が指先の変化がない(等倍)、100の場合は2.25倍の変化であり間の指先形状は線形に変化した。0-100のパラメータの使用方法はUnityのシステムからバーチャルハンドの指先とオブジェクトの接触を検出した瞬間から時間を軸にアニメーションが発生する。

color のデザインはバーチャルハンドの指先がターゲットに接触した瞬間にターゲットの色が青色から黄色に変化する。ターゲットに指先が接触し続けている間はターゲットの色は黄色の状態で維持する。ターゲットから指先が離れると黄色から元のターゲットの色に変化する。

depth のデザインはターゲットを指先で奥側に動かすことができる。ターゲットの移動範囲は表示されている位置から奥側のみに2cm動かすことができた。指先と接触している状態で押し込み距離が2cm未満の場合は指先の位置によって変化する。

4. 実験

本実験では、VR空間でのハンドトラッキングを用いたUI操作に対して、3つの疑似触覚の単一効果と相互作用効果が与える影響を、パフォーマンスと錯触覚、操作性、身体性、空間知覚に関するカスタムアンケートから調査した。タスクには、HCIのパフォーマンス評価でよく用いられるフィッツの法則のポインティングタスクを、ISO 9241-400:20072のガイドラインに沿って設計した。本実験では、ターゲットに触れた際の疑似触覚の種類による影響を調査することで、3D空間のUI設計における貢献を目的としている。

4.1 参加者

実験参加者は20名(男性12名、女性8名、平均年齢=21.0)で、18歳から24歳であった。参加者は所属大学内のSNSを用いて募集をした。参加者はいずれも実験の目的を知らず、視力は正常または矯正済みで、感覚障害などはなく利き手を使用した。VRが未経験の参加者はおらず、8名の参加者は1, 2回のVRの経験が何度かあり、9名の参

*¹ <https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/oculus-integration-deprecated-82022?locale=ja-JP>

*² <https://www.blender.org/>

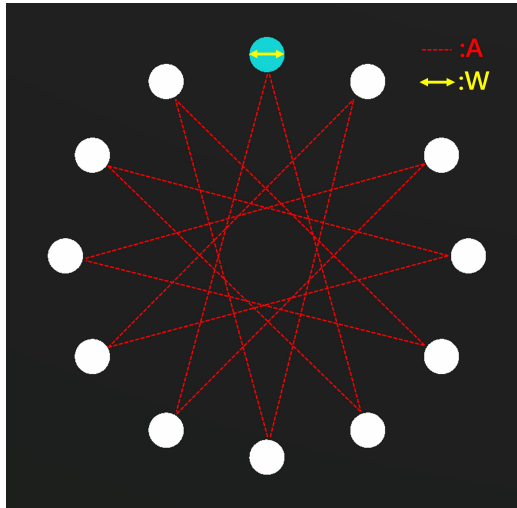


図 2 実験で使ったポインティングタスク。黄色の矢印 (W) はターゲットのサイズを表す。赤色の点線 (A) はターゲット間の距離であり、すべてのターゲット間の距離は一定である。

加者が月に 1 度など定期的に VR を経験する機会があり、3 名の参加者が VR を日常的に触れている経験者が専門家であった。

4.2 実験装置

本実験で利用する疑似触覚体験が可能な VR システムは Unity (バージョン 2021.3.41f) 上に作成した。実験の構成物はラップトップ型コンピュータ (intel Core i7-12400, memory 32GB, NVIDIA GeForce RTX 3070Ti) と Meta Quest 3 ヘッドマウントディスプレイ (HMD) からなり、参加者は VR 空間に没入した。VR 空間には参加者のアバターは表示せず、仮想身体となるバーチャルハンドのみを表示した。実験中、参加者は椅子に座ったままであった。アンケートへの回答は実験を行ううえで邪魔にならない位置に配置した PC を用いて回答した。

4.3 タスク

本実験では、ISO 9241400:2007[1] のガイドラインに従って設計した円形に配置された 12 個のターゲットを選択するタスクを実施した。タスクの選択は空中で行い、参加者がターゲットに触れる際の物理的フィードバックは発生しない。図 2 のように円形に配置されたターゲットは垂直面に設置し、参加者は座ってターゲットの選択をおこなうことができた。選択方法は利き手の人差し指を使用して行い、図 2 のようにすべての試行でターゲット間の距離が一定になるようにあらかじめ選択順番を決定した。選択の完了はターゲットに指先で触れて離すことによって自動で完了となる。これによりポインティングと動作確認を同時に行うことで選択の精度に影響を与えるハイゼンベルク効果を回避することができる [5]。参加者が選択すべきターゲットは混乱を避けるため青色のハイライトを使用し、その他の

ターゲットは白色に設定した。ターゲットの色が変わる場面は参加者が選択すべきターゲットから指を離したときである。

タスクの各試行は異なるターゲットのサイズ、ターゲット間の距離で実施した。ターゲットのサイズは 3 種類で実施した。1) small (直径=1.5cm), 2) medium (直径=2.5cm), 3) large (直径=3.5cm)。またターゲット間の距離は 2 種類で実施した。1) short = 20cm, 2) long = 40cm。

本タスクではターゲットを選択した際に 3 つの視覚刺激を用いた疑似触覚を導入した (図 1)。

4.4 実験手順

参加者は実験の目的の説明を受け、実験に参加するための同意書に署名した。この実験は HMD に表示される視覚刺激に焦点を当てており、聴覚や温度の影響を排除するために雑音のない静かな教室で行った。周囲に障害物のない位置に椅子を配置し、参加者に着席するように指示した。その後、使用する HMD の装着方法、ピントの調整方法、ハンドトラッキングの操作方法について説明した。次に、参加者には VR 空間内での本タスクについて説明し、ハンドトラッキングを用いて操作感の練習を 12 分程度実施した。参加者はタスクの内容についての説明を受けタスクをこなした。タスクについてはターゲットの選択を「なるべく素早くかつ正確に行ってください」と参加者に伝えた。

8 つの各ブロックがあり、それぞれが視覚フィードバック (*none, color, depth, finger, color × depth, color × finger, depth × finger, color × depth × finger*) に対応していた。各ブロックは各参加者ごとにランダムな順番で実施し、順序効果を排除した。各ブロック内では 3 つのターゲットサイズ × 2 つのターゲット間の距離 × 2 の合計 12 試行で構成した。各試行はランダムな順序で参加者に提示した。12 個のターゲットを選択する 1 試行が終了するごとに無制限の休憩時間を設け、参加者が好きなタイミングで次のタスクに進むように指示した。実験時間は一人当たり約 60 分であった。

各ブロックの終了後に錯触覚、操作性、身体性、空間知覚の項目からなるカスタムアンケートを用いた調査を実施した。1. アンケート項目は 10 項目であり、7 段階のリッカートスケール (1=「強く反対」 7=「強く賛成」) に基づき、測定した。

4.5 実験デザイン

2x2x2x3x2 の参加者内デザインを使用した。独立変数は、ターゲットの色が変化する疑似触覚の有無 (*color*)、ターゲットを押し込むことができる疑似触覚の有無 (*depth*)、バーチャルハンドの指先形状が変化する疑似触覚の有無 (*finger*)、ボタンのサイズ (W) (1.5cm, 2.5cm, 3.5cm)、ターゲット間の平面距離 (A) (20cm, 40cm)、の 5 つであっ

表 1 カタムアンケートの内容

Aspect	No.	Item
錯触覚	Q1	ターゲットに触れているような感覚があった
	Q2	ターゲットが表示されている場所で触れている感があった
操作性	Q3	ターゲットを選択したときの心地よさ
	Q4	ターゲットを選択する際の有用性-全般
	Q5	I ターゲットを選択する際の有用性-精度
	Q6	I ターゲットを選択する際の有用性-速度
身体性	Q7	ターゲットに触れている間バーチャルハンドは自分の手であるように感じられた
	Q8	I ターゲットに触れている間バーチャルハンドをまるで自分の手のようにコントロールすることができた
空間知覚	Q9	ターゲットと手の距離感が分かりやすかった
	Q10	ターゲットに接触するタイミングがよく分かった

た．従属変数は、選択のエラー、移動時間 (seconds, s), 反応時間 (seconds, s) とした．選択のエラーは、選択すべきターゲット (青色) 以外のターゲットに触れた場合にエラーとして記録した．移動時間は、ターゲットが選択された瞬間から次のターゲットが選択されるまでに必要な時間である．反応時間は、選択されたターゲットとの接触している時間である．各ブロックにおいて、移動時間は 11 回、反応時間は 12 回の試行を記録した．参加者 1 人あたりの総試行回数は 1152 回 (2x2x2x3x2x2x12) であり、すべての参加者を合わせると、合計 23040 回の試行を記録した．

5. 結果と議論

本実験で測定したタスクにおけるパフォーマンスとカスタムアンケートの結果を示す．統計分析では独立変数の主効果と各疑似触覚ごとの差を検証するために RM-ANOVA を使用した．手順として Shapiro-Wilk 検定を使用し、正規性を検討したのち Mauchly の球面性検定にて等分散性の確認を実施した．球面性を満たさない場合は、Greenhouse-Geisser を使用して p 値を補正し、事後検定では Bonferroni の多重比較を使用した．カスタムアンケートのデータは非パラメトリックデータであるが RM-ANOVA を使用した．理由として、RM-ANOVA は非パラメトリック検定と比較して統計的検出力が高く、正規性の違反に対しても堅牢であるためである [10]．

以下分析の結果を記載するが、 $W, A, W \times A$ はポインティングタスクにおいてすべての項目で有意な効果が見られた．

5.1 エラー率

実験から得た 23040 試行のうち 2521 試行分のエラーを記録した ($ER = 10.9\%$)．各疑似触覚において $depth(F_{1,19} = 15.228, p = .001, \eta_p^2 = .432)$ において有意な主効果を示した．交互効果は $finger \times W(F_{2,38} = 6.257, p = .005, \eta_p^2 = .238)$, $finger \times A(F_{1,19} = 4.395, p = .004, \eta_p^2 = .180)$, $depth \times A(F_{1,19} = 7.012, p = .015, \eta_p^2 = .260)$, $depth \times W(F_{2,38} = 14.061, p < .001, \eta_p^2 = .413)$,

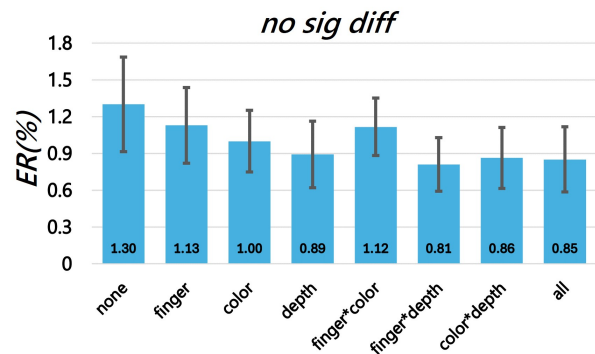


図 3 各疑似触覚別のポインティングタスクにおける ER の結果．棒グラフのラベルは平均値を示す．

$finger \times color \times A(F_{1,19} = 12.719, p = .002, \eta_p^2 = .389)$, $depth \times W \times A(F_{2,38} = 3.790, p = .036, \eta_p^2 = .166)$, $finger \times color \times depth \times W(F_{2,38} = 6.756, p = .004, \eta_p^2 = .252)$ に有意な効果を示した．各疑似触覚別のエラー率 (ER) の結果を図 3 に示す．各条件間での有意な差はなかった．この結果は $depth$ が ER を減少させることを示す． $depth$ が ER を減少させる理由として、押し込み動作があることによりターゲットに接触した後の現実の手とバーチャルハンドの手の位置のずれが減少することによる操作性が向上が可能性としてある．一方で各疑似触覚間の有意な差はないことと W と A にも主効果があることからタスクの難易度による影響が大きい可能性がある．

5.2 移動時間

実験から得た 23040 試行のうち 2521 試行分のエラーを除いた 20519 試行をもとにターゲットの移動時間 (MT) の分析を実施した．分析の結果、 $color(F_{1,19} = 5.579, p = .029, \eta_p^2 = .227)$, $depth(F_{1,19} = 19.785, p < .001, \eta_p^2 = .510)$ において有意な主効果を示した．有意な交互作用が見られたのは $color \times depth(F_{1,19} = 8.390, p = .009, \eta_p^2 = .306)$, $depth \times W(F_{2,38} = 44.587, p < .001, \eta_p^2 = .701)$, $depth \times A(F_{1,19} = 29.034, p < .001, \eta_p^2 = .604)$, $color \times depth \times W(F_{2,38} = 4.584, p = .027, \eta_p^2 = .194)$,

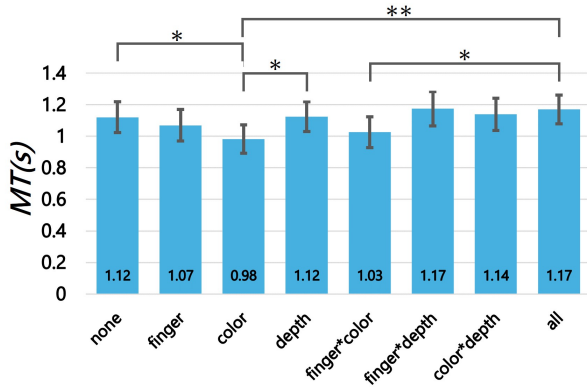


図 4 各疑似触覚別のポインティングタスクにおける MT の結果. 棒グラフのラベルは平均値を示す. 統計的に有意な差は ($p < .05$) (*), ($p < .01$) (**), ($p < .001$) (***) で示す.

$color \times depth \times A(F_{1,19} = 17.309, p = .001, \eta_p^2 = .477)$ であった. 各疑似触覚別の MT の結果を図 4 に示す. 各疑似触覚条件間では $none - color(p = .044)$, $color - depth(p = .033)$, $color - finger \times depth(p < .001)$, $color - color \times depth(p = .034)$, $color - all(p = .005)$ に有意な差を示した. この結果は各疑似触覚効果に関しては $color$ が MT を有意に短くする一方 $depth$ が MT を有意に長くすることを示している. $color \times depth$ は両者逆の効果を示した条件の組み合わせだが, ほかの条件と比べて平均時間が長いことを考えると疑似触覚の複合条件において各視覚フィードバックごとの影響度に差がある可能性がある. これは Park らの 10 キーベースでの疑似触覚を用いたパフォーマンス評価を肯定するものである [25]. さらに詳しい分析を行うために選択動作内のターゲットとの接触時間の分析を実施した.

5.3 接触時間

実験から得た 21120 試行のうち 2521 試行分のエラーを除いた 18599 試行をもとにターゲットと指先の接触時間 (RT) の分析を実施した. 分析の結果, $finger(F_{1,19} = 6.844, p = .017, \eta_p^2 = .265)$, $depth(F_{1,19} = 33.830, p < .001, \eta_p^2 = .640)$ において有意な主効果が示した. 有意な交互作用が見られたのは $depth \times W(F_{2,38} = 19.461, p < .001, \eta_p^2 = .506)$, $depth \times A(F_{1,19} = 6.923, p = .016, \eta_p^2 = .267)$ であった. 各疑似触覚別の RT の結果を図 5 に示す. 各条件ごとの有意な差が多いため, ($p < .01$) よりも p 値の値が大きい場合は図に記載していない. 条件間の有意差は分析の結果以下のように示された. $none$ との比較において $depth(p = .01)$, $finger \times color(p < .001)$, $color \times depth(p = .017)$ が有意な差を示した. $finger$ との比較においては $depth(p = .018)$, $finger \times depth(p < .001)$, $all(p = .016)$ が有意な差を示した. $color$ との比較においては $depth(p = .007)$, $finger \times depth(p = .001)$,

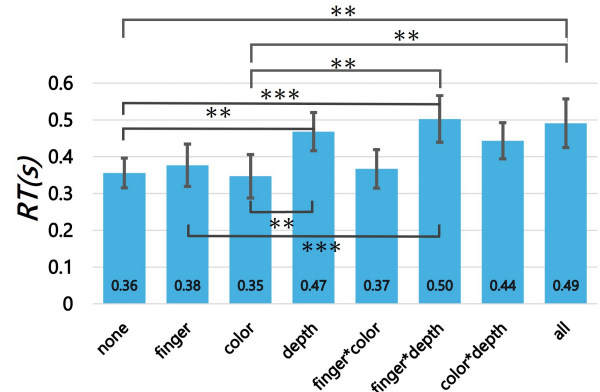


図 5 各疑似触覚別のポインティングタスクにおける RT の結果. 棒グラフのラベルは平均値を示す. 統計的に有意な差は ($p < .01$) よりも p 値が小さい場合のみプロットした.

$color \times depth(p = .039)$, $all(p = .003)$ が有意な差を示した. その他の有意な差を示した条件として $depth - finger \times color(p = .018)$, $finger \times color - finger \times depth(p = .002)$, $finger \times color - all(p = .017)$ があつた. $color$ には, 有意な主効果が見られなかったものの, 各疑似触覚条件内で最も RT が短く, 各条件の比較において一部有意な差があることから, $color$ が含まれる疑似触覚条件の MT を減少させた要因がターゲットとの接触時間であることを示唆している. MT を増加させた $depth$ では RT においても有意な主効果と各条件の比較において有意な差があることからターゲットとの接触時間の増加が MT に影響していることが示された. $depth$ が MT , RT にかかる時間を増加させる理由として奥側方向にターゲットを押し込めることで運動量が増えていることが推測できる. そのため, ターゲットの選択自体は触れた瞬間に離すことでも接触判定になるが多くの参加者が押し込める最大値 (2cm) まで移動していた可能性がある.

5.4 フィッツの法則

移動時間 (MT) の各疑似触覚別傾向を総合的に分析するため Fitts の法則のモデルの適合性を検証した (式 1). ここでは a が切片, b が傾き, MT が移動時間, ID が難易度指数である. このモデルが適用できれば, MT をタスクの難易度 ID と関連付けて議論することができる. 実験の結果, Fitts の法則モデルは各疑似触覚において, 高いモデル適合度を持つことを示された (図 6, 表 2). タスク難易度が低いと各疑似触覚での MT の差が少ない. 一方で難易度が上がるにつれ $finger$, $color$, $finger \times color$ では MT が短縮された. また, b も $finger$, $color$, $finger \times color$ の条件が小さく, 指先形状の変化と色の変化がタスクの難易度による MT の増加を抑制していることが示された. つまり, Fitts の法則のモデルからは本実験で使用した疑似触覚条件の中で指先形状の変化と色の変化の効果がタスクの難

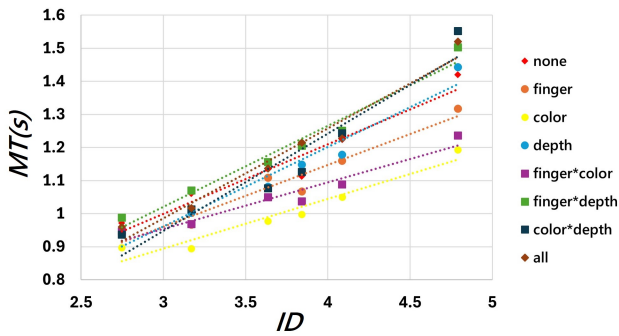


図 6 各疑似触覚別の ID 対移動時間の線形回帰. 各条件において高い水準で線形回帰し, ID が高くなるにつれ MT が大きくなる傾向を示した.

表 2 各疑似触覚ごとの Fitts モデル適合の際の切片 (a), 傾き (b) と決定係数 (R^2).

疑似触覚	a	b	R^2
none	.368	.211	.934
finger	.400	.187	.942
color	.442	.151	.936
depth	.239	.241	.951
finger \times color	.514	.141	.937
finger \times depth	.286	.245	.969
color \times depth	.064	.295	.921
all	.169	.272	.960

易度が高いほど顕著であると考えられる.

5.5 カスタムアンケート

各質問ごとに分析を実施した. 正規性検定の結果, データセットが正規分布でないことが示された ($p < .05$). 10 項目の測定結果を図 7 に示す. 類似の効果を示す項目をまとめて記載する.

Q1, 2 ではターゲットとの接触時の錯覚に関する質問を実施した. 結果として $finger(Q1=F_{1,19} = 1.400, p = .004, \eta_p^2 = .354, Q2=F_{1,19} = 5.847, p = .043, \eta_p^2 = .183)$, $depth(Q1=F_{1,19} = 755.033, p < .001, \eta_p^2 = .743, Q2=F_{1,19} = 22.994, p < .001, \eta_p^2 = .548)$ に有意な主効果を示した. 交互効果では $finger \times depth(Q1=F_{1,19} = 6.742, p = .018, \eta_p^2 = .262, Q2=F_{1,19} = 7.216, p = .015, \eta_p^2 = .275)$, $color \times depth(Q1=F_{1,19} = 6.742, p = .018, \eta_p^2 = .262, Q2=F_{1,19} = 7.437, p = .013, \eta_p^2 = .281)$ に両質問で有意な効果を示し, Q2 のみ $finger \times color \times depth$ でも有意な交互作用を示した. Q1 の各疑似触覚間の比較では $none$ との比較において $finger(p = .23)$, $depth(p = .02)$, $finger \times color(p = .009)$, $all(p = .009)$, また $color$ との比較において $finger \times depth(p = .009)$, $color \times depth(p = .007)$ に有意な差を示した. Q2 の各疑似触覚間の比較では $none$ との比較において $finger(p = .0047)$, $depth(p < .001)$, $finger \times color(p = .021)$, $finger \times depth(p = .004)$, $color \times depth(p = .006)$,

$all(p = .011)$ に有意な差を示した. この結果より $finger$ と $dform$ の単一・複合提示を用いることで強力な疑似触覚フィードバックをユーザに提示できることが示された. また, 疑似触覚の複合提示においては all は Q2 のみであるがその他の条件では有意な主効果を示し, Q1 では $color$ との比較において $color \times depth$ が有意な差を示していることから疑似触覚を組み合わせることでユーザが感じる錯覚的なフィードバックの強化は $color$ に関しては示すことができ, その他の条件でも強化される傾向を示すことができた. しかし, all とその他の複合提示条件に差があまりないため, ある一定の視覚情報を超えるとフィードバックの強化が発生しない可能性がある.

Q3 ではターゲットとの接触時の心地よさに関する質問を実施した. 結果として $finger(F_{1,19} = 6.731, p = .018, \eta_p^2 = .262)$, $depth(F_{1,19} = 5.847, p < .001, \eta_p^2 = .750)$ に有意な主効果を示した. 交互作用では $finger \times depth(F_{1,19} = 8.264, p = .01, \eta_p^2 = .303)$, $color \times depth(F_{1,19} = 33.129, p < .001, \eta_p^2 = .636)$ に有意な効果を示した. 各疑似触覚間の比較では $none$ との比較においては全ての条件で有意な差を示した ($finger(p = .029)$, $color(p = .018)$, $depth(p < .001)$, $finger \times color(p = .001)$, $finger \times depth(p = .0018)$, $color \times depth(p < .001)$, $all(p < .001)$). また, 以下の組み合わせでも有意な差を示した ($finger - finger \times depth(p < .001)$, $color - depth(p = .002)$, $color - finger \times depth(p = .0012)$). この結果により, $color \times depth$ を除く $depth$ が関係する疑似触覚提示手法が選択動作における操作感を向上させることが示された. これは Kim らの調査を増強するものであり, パフォーマンスが重要視されない 3DUI デザインを行うにあたって有益な知見となりうる [16].

Q4, 5, 6 ではターゲット選択の有用性に関する質問を実施した. 結果として 3 つの項目とも有意な主効果が確認できたのは $finger(Q4=(F_{1,19} = 13.038, p = .002, \eta_p^2 = .407)$, $Q5=(F_{1,19} = 9.708, p = .006, \eta_p^2 = .338)$, $Q6=(F_{1,19} = 9.622, p = .006, \eta_p^2 = .336))$ であった. 項目ごとの有意な主効果は Q4 では $depth(F_{1,19} = 19.991, p < .001, \eta_p^2 = .513)$, Q5 では $color(F_{1,19} = 15.832, p = .001, \eta_p^2 = .455)$, $depth(F_{1,19} = 9.515, p = .006, \eta_p^2 = .334)$ の条件に確認できた. 交互作用は $color \times depth(Q4=(F_{1,19} = 14.363, p = .001, \eta_p^2 = .431)$, $Q5=(F_{1,19} = 11.826, p = .003, \eta_p^2 = .384)$, $Q6=(F_{1,19} = 16.139, p = .001, \eta_p^2 = .459))$ において 3 つの質問項目全てに有意な主効果が確認できた. 質問項目ごとの疑似触覚間の比較として Q4 は $none$ との比較で $color$ 以外の項目は有意な差を示した ($finger, depth, finger \times color, finger \times depth(p < .001)$, $color \times depth(p = .016)$, $all(p = .002)$). Q5 では $none$ との比較で全ての疑似触覚間で有意な差を示した ($p < .001$). Q6 では $none - finger \times color(p = .024)$,

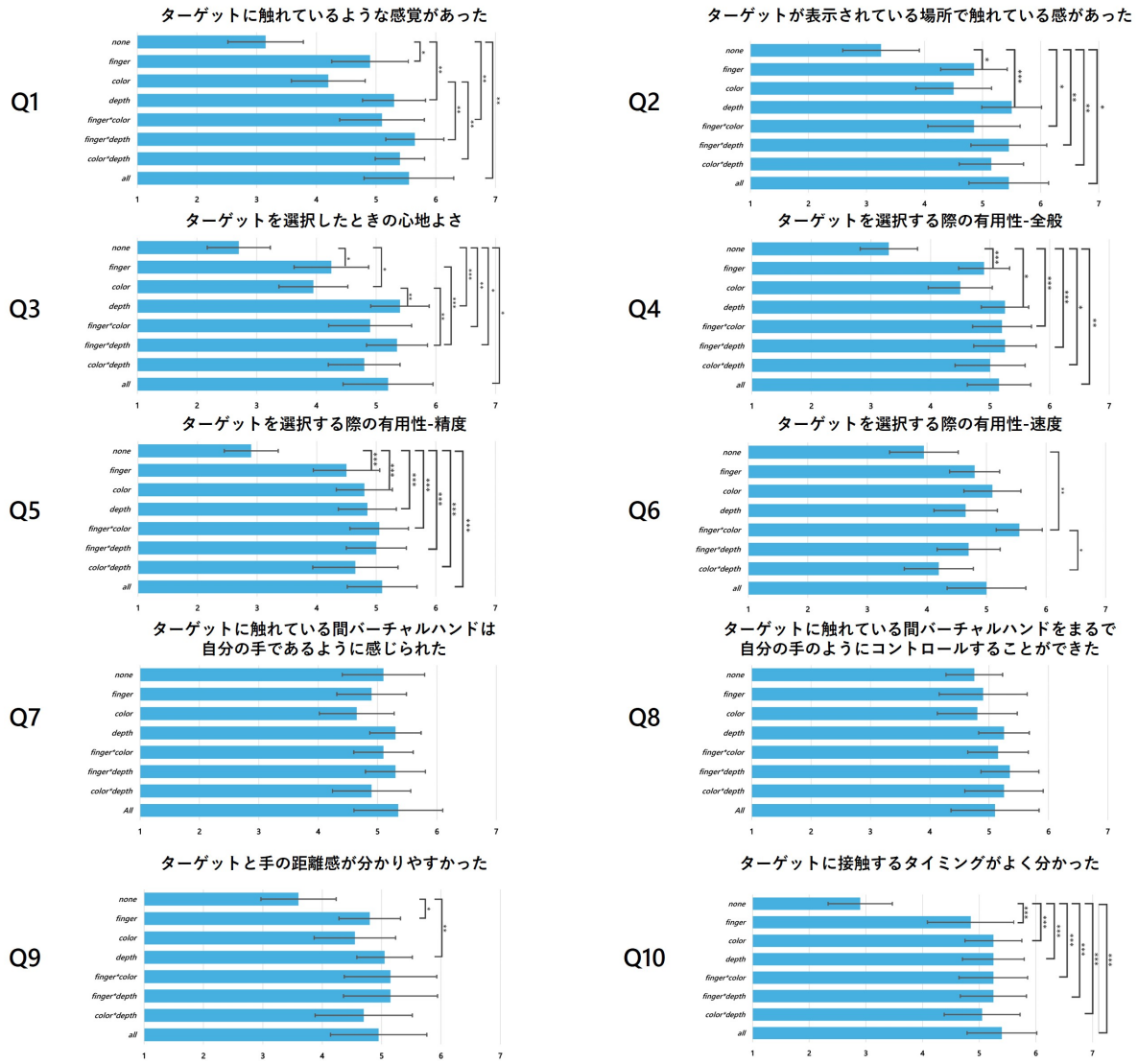


図 7 カスタムアンケートの項目別の結果.

$finger \times color - color \times depth (p = .002)$ の疑似触覚間で有意さを示した. 全ての質問項目で $finger$ と $color \times depth$ に有意な主効果があり, 各疑似触覚間の比較からも相互作用の条件も含めると高いスコアを記録した.

Q7, 8 では身体所有感に関する質問を実施した. 結果として有意な主効果は確認できず, 各疑似触覚間の有意な差もないことを示した. これは, $finger$ による指先形状の変化やターゲットに接触した際の現実の手の位置とバーチャルハンドの手の位置のずれから身体所有感が低下する可能性があったが, 上記の結果により棄却された.

Q9, 10 では空間知覚に関する質問を実施した. 結果として $finger (Q9 = (F_{1,19} = 4.897, p = .042, \eta_p^2 = .187), Q10 = (F_{1,19} = 13.225, p = .024, \eta_p^2 = .242))$ に有意な主効果を示し, Q10 のみ $color (F_{1,19} = 2.339, p < .001, \eta_p^2 = .517), depth (F_{1,19} = 13.837, p = .001, \eta_p^2 = .421)$ にも有意な趣向化を示した. 交互効果においては Q9, 10 両方において $color \times depth (Q9 = (F_{1,19} = 6.825, p = .017, \eta_p^2 = .264),$

$Q10 = (F_{1,19} = 14.519, p = .001, \eta_p^2 = .433))$ に有意な効果を示した. また, Q10 にのみ $color (F_{1,19} = 2.339, p < .001, \eta_p^2 = .517), depth (F_{1,19} = 13.837, p = .001, \eta_p^2 = .421), finger \times depth (F_{1,19} = 6.284, p = .021, \eta_p^2 = .249), all (F_{1,19} = 12.242, p = .002, \eta_p^2 = .392)$ に有意な交互作用を示した. 各疑似触覚間の比較では Q9 は $none$ との比較で $finger (p = .039), depth (p = .004)$ に有意な差を示し, Q10 では $none$ との比較で全ての条件で有意な差 ($p < .001$) を示した. $finger$ が両方の項目に有意な影響を与えていることから空間知覚においてはユーザの仮想身体の変化が重要な役割を果たしている可能性がある.

5.6 結果全体を通した議論

本研究の結果として, パフォーマンスの面では $color$ が移動時間を向上させることを示し, 一方で $depth$ は移動時間の低下を引き起こすが精度を向上させることが示された. これは RQ1 に対応する知見である. フィッツの法則を用

いた分析ではすべての疑似触覚条件において高いモデル適合を示した。分析結果の内容として、タスクの難易度が低いと各条件の移動時間の差が少ないが、難易度が上がるにつれて *finger*, *color*, *finger* × *color* の条件が移動時間の増加を抑制する傾向を示した。これは RQ2 に対する明確な回答を提供している。カスタムアンケートを用いた主観的評価では錯触覚、操作性、空間知覚の項目すべてにおいて *finger* の条件がて高いスコアを示した。また、錯触覚の項目では *finger* × *depth*, *color* × *depth* の条件で有意な交互効果と各条件間の比較から複数の種類の異なる視覚フィードバックを組み合わせたは疑似触覚を強化する可能性があることを示唆した。これは RQ3 と RQ4 に対する包括的な回答を提供している。これらの結果を統合すると、本実験で使用した各疑似触覚条件は独自の特性を持つことが明らかとなった。この知見は 3D 空間の UI デザインにおいて重要である。特に、パフォーマンスや UX など、コンテンツによって要求される要素が異なる場合に、適切な疑似触覚フィードバックを選択・組み合わせることで、より効果的で没入感のあるインタラクションを設計できる可能性を示唆している。

5.7 展望

指先形状が変化する条件と色の変化と押し込みの変化を組み合わせた条件はターゲットとの距離知覚を向上させた。これは VR における奥行き知覚が困難な問題 [2] を軽減することができる可能性がある。そのため、ユーザからみて各ターゲットごとの奥行き距離が異なるポインティングタスクにおける調査は意味がある。

また、各疑似触覚ごとに評価が高い項目にズレがあったことから親和性の高い VR コンテンツにも差がある可能性がある。この仮説を検証するために、VR コンテンツによく使用されるエンタメ、医療、産業分野などのコンテンツ [31] を用いてケーススタディなどを実施することが必要となる。

6. おわりに

本研究では、フィッツの法則のポインティングタスクにおける 3 種類の視覚的フィードバック (指先の変形、色変化、押し込み) を組み合わせた疑似触覚フィードバックの効果を検証した。実験の結果、色変化を用いた疑似触覚が操作時間の低減に効果的であり、押し込みフィードバックは操作時間を増加させることに効果的な一方、エラー率の低減に効果的であることを明らかにした。またパフォーマンスにおいてフィッツの法則を用いた分析を行い、すべての疑似触覚条件で高いモデル適合率を示した。錯触覚、有用性、身体性、空間知覚における主観評価では身体性を除くすべての項目で指先の変形がポジティブな効果を発揮した。これらの知見は、3D 空間における UI デザインにおいて、適切な視覚的フィードバックの組み合わせが重要であ

ることを示唆している。最後に疑似触覚は、システム面からの介入のため様々な VR アプリケーションの UI に簡単に展開が可能であることと、ハンドトラッキングでのインタラクションへの汎用性が高いことからこれからのコンテンツに左右れずに 3D 空間の UI デザインに幅広く活用されることが期待できる。

参考文献

- [1] : ISO Central Secretary. Ergonomics of human—system interaction – Part 400: Principles and requirements for physical input devices., *Standard ISO*, Vol. 9241, p. 400 (2007).
- [2] Altenhoff, B. M., Napieralski, P. E., Long, L. O., Bertrand, J. W., Pagano, C. C., Babu, S. V. and Davis, T. A.: Effects of calibration to visual and haptic feedback on near-field depth perception in an immersive virtual environment, *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, SAP '12, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 71–78 (2012).
- [3] Arafsha, F., Zhang, L., Dong, H. and El Saddik, A.: Contactless haptic feedback: state of the art, *2015 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, IEEE, pp. 1–6 (2015).
- [4] Argelaguet, F., Jáuregui, D. A. G., Marchal, M. and Lécuyer, A.: Elastic Images: Perceiving Local Elasticity of Images through a Novel Pseudo-Haptic Deformation Effect, *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 10, No. 3 (online), DOI: 10.1145/2501599 (2013).
- [5] Argelaguet, F., Jáuregui, D. A. G., Marchal, M. and Lécuyer, A.: Elastic images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect, *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 10, No. 3, pp. 1–14 (2013).
- [6] Ban, Y., Kajinami, T., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect, *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 211–216 (online), DOI: 10.1109/HAPTIC.2012.6183793 (2012).
- [7] Ban, Y., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Displaying Shapes with Various Types of Surfaces Using Visuo-Haptic Interaction, *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 191–196 (online), DOI: 10.1145/2671015.2671028 (2014).
- [8] Benko, H., Wilson, A. D. and Baudisch, P.: Precise selection techniques for multi-touch screens, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1263–1272 (2006).
- [9] Bergström, J., Mottelson, A. and Knibbe, J.: Resized grasping in VR: Estimating thresholds for object discrimination, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, ACM (2019).
- [10] Blanca Mena, M. J., Alarcón Postigo, R. and others: Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?
- [11] Bouzbib, Pacchierotti and Lécuyer: When Tangibles Become Deformable: Studying Pseudo-Stiffness Per-

- ceptual Thresholds in a VR Grasping Task, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 29, pp. 2743–2752 (2023).
- [12] Brickler, D., Teather, R. J., Duchowski, A. T. and Babu, S. V.: A Fitts' Law Evaluation of Visuo-haptic Fidelity and Sensory Mismatch on User Performance in a Near-field Disc Transfer Task in Virtual Reality, *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 17, No. 4, pp. 1–20 (2020).
- [13] Dudley, J., Benko, H., Wigdor, D. and Kristensson, P. O.: Performance Envelopes of Virtual Keyboard Text Input Strategies in Virtual Reality, *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, IEEE, pp. 289–300 (2019).
- [14] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *J. Exp. Psychol.*, Vol. 47, No. 6, pp. 381–391 (1954).
- [15] Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. and Kassell, N. F.: A survey of design issues in spatial input, *Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '94, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 213–222 (1994).
- [16] Kim, W. and Xiong, S.: Pseudo-haptic button for improving user experience of mid-air interaction in VR, *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, Vol. 168, p. 102907 (2022).
- [17] Kim, W. and Xiong, S.: Pseudo-haptics and self-haptics for freehand mid-air text entry in VR, *Appl. Ergon.*, Vol. 104, p. 103819 (2022).
- [18] Kourtesis, P., Vizcay, S., Marchal, M., Pacchierotti, C. and Argelaguet, F.: Action-Specific Perception & Performance on a Fitts's Law Task in Virtual Reality: The Role of Haptic Feedback, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 28, No. 11, pp. 3715–3726 (2022).
- [19] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?, *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, IEEE, pp. 83–90 (2000).
- [20] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?, *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pp. 83–90 (online), DOI: 10.1109/VR.2000.840369 (2000).
- [21] MacKenzie, I. S.: Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction, *Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 7, No. 1, pp. 91–139 (1992).
- [22] Mizuhara, R., Takahashi, A. and Kajimoto, H.: Combination of Mechanical and Electrical Stimulation for an Intense and Realistic Tactile Sensation, *Proceedings of the 17th International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, VRCAI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3359997.3365714 (2019).
- [23] Morimoto, K., Hashiura, K. and Watanabe, K.: Effect of Virtual Hand's Fingertip Deformation on the Stiffness Perceived Using Pseudo-Haptics, *Proceedings of the 29th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '23, No. Article 32, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–10 (2023).
- [24] Narumi, T., Ujitoko, Y., Ban, Y., Tanikawa, T., Hirota, K. and Hirose, M.: Resistive swipe: Visuo-haptic interaction during swipe gestures to scroll background images on touch interfaces, *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 334–339 (online), DOI: 10.1109/WHC.2017.7989924 (2017).
- [25] Park, K., Kim, D. and Han, S. H.: Usability of the size, spacing, and operation method of virtual buttons with virtual hand on head-mounted displays, *Int. J. Ind. Ergon.*, Vol. 76, No. 102939, p. 102939 (2020).
- [26] Rietzler, M., Geiselhart, F., Gugenheimer, J. and Rukzio, E.: Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception Using Perceivable Tracking Offsets, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173702 (2018).
- [27] Samad, M., Gatti, E., Hermes, A., Benko, H. and Parise, C.: Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300550 (2019).
- [28] Schwind, V., Leusmann, J. and Henze, N.: Understanding Visual-Haptic Integration of Avatar Hands Using a Fitts' Law Task in Virtual Reality, *Proceedings of Mensch und Computer 2019*, MuC '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 211–222 (2019).
- [29] Speicher, M., Ehrlich, J., Gentile, V., Degraen, D., Sorce, S. and Krüger, A.: Pseudo-haptic Controls for Mid-air Finger-based Menu Interaction, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, No. Paper LBW0285, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–6 (2019).
- [30] Teng, S.-Y., Li, P., Nith, R., Fonseca, J. and Lopes, P.: TouchFold: A Foldable Haptic Actuator for Rendering Touch in Mixed Reality, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411764.3445099 (2021).
- [31] Ujitoko, Y. and Ban, Y.: Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals, *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711 (2021).
- [32] Weiss, Y., Villa, S., Schmidt, A., Mayer, S. and Müller, F.: Using Pseudo-Stiffness to Enrich the Haptic Experience in Virtual Reality, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3544548.3581223 (2023).
- [33] Yabe, S.-I., Kishino, H., Kimura, T. and Nojima, T.: Pseudo-haptic feedback on softness induced by squeezing action, *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, ieeexplore.ieee.org, pp. 557–562 (2017).
- [34] Zhao, X., Niikura, T. and Komuro, T.: Evaluation of Visuo-haptic Feedback in a 3D Touch Panel Interface, *Proceedings of the Ninth ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 299–304 (2014).