



バーチャルハンドの指先形状を用いた疑似触覚と 接触物の剛性の関係性

森本浩輔¹⁾, 渡邊恵太²⁾

Daichi Hayashi, Kousuke Morimoto, and Keita Watanabe

1) 明治大学 先端数理科学研究科 (〒 164-8525 東京都中野区中野 4-21-1, cs242035@meiji.ac.jp)

2) 明治大学 先端メディアサイエンス学科 (〒 164-8525 東京都中野区中野 4-21-1,

概要: 本研究では、バーチャルハンドの指先形状変化を用いた視覚的な疑似触覚が、物理オブジェクトの剛性知覚に与える影響を調査する。VR 空間内の仮想オブジェクトに触れる際、バーチャルハンドの指先形状が変形する視覚フィードバックを提示する。これが実際の物理オブジェクトの硬さ知覚にどのような作用するかを、心理物理学的手法を用いて定量的に評価する。

キーワード: 疑似触覚, 感覚・知覚

1. はじめに

近年の VR 技術において、ハンドトラッキングを用いた自然なインタラクションが注目されている。Meta¹⁾や Apple²⁾などの主要 HMD 製造企業がハンドトラッキング機能を搭載し、自身の手の動きや形状をそのまま利用できる直感的な操作が可能となっている。しかし、コントローラーを使用しない場合、手への触覚フィードバックの提示が重要な課題となる。そこで、ハードウェアを必要としない触覚提示手法として、疑似触覚 (Pseudo-Haptics) が注目されている。

疑似触覚とは、ユーザー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 [1]。この技術により、物理的なデバイスを使用せずに触覚提示を実現できる。これまでの疑似触覚研究は、大きく 2 つのアプローチに分類される。第一に、操作対象の視覚的变化を利用する手法であり、マウス操作時のディスプレイ表示変化 [2, 3] やバーチャルオブジェクトの変形による剛性提示 [4] などが提案されている。第二に、ユーザーの身体表現の視覚的变化を利用する手法であり、実際の手の画像変更 [5] やバーチャルハンドの C/D 比操作 [6] などが検討されている。さらに、ユーザーの身体がバーチャルハンドとして表現されるため、手の位置だけではなく色や形状なども変化することが可能である。具体的に形状に着目した研究として、バーチャルハンドの指先形状を変化させることで剛性知覚を操作する手法が提案されている [7]。この手法では、バーチャルオブジェクトに触れた際にバーチャルハンドの指先が変形し、指先の変形度が小さい場合に硬さを、大きい場合に柔らかさを知覚することが示されている。しかし、この手法は主に完全な仮想環境での検証に留まっており、物理的オブジェクトとの相互作用における効果は十分に検証され

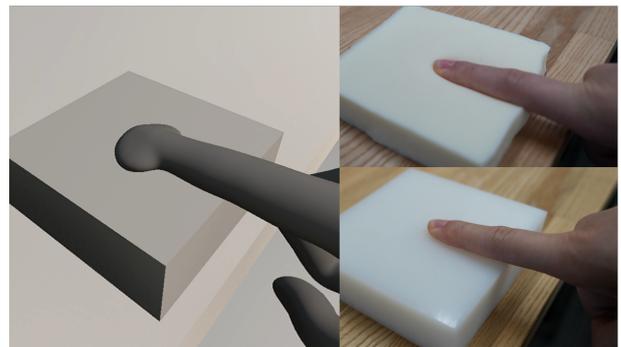


図 1: バーチャルハンドの指先形状変化の様子と剛性の異なる 2 種類の物理オブジェクトに触れている様子

ていない。物理的オブジェクトが存在する環境では、実際の触覚情報と視覚的な疑似触覚情報が競合する可能性がある。

そこで本研究では、物理的オブジェクトとのインタラクションにおいて、バーチャルハンドの指先形状変化が剛性知覚に与える影響を調査する。これにより、VR 環境で限られたパッシブオブジェクトを使用する際に、パッシブオブジェクトの硬さが単一であってもユーザーに異なる知覚を提示できる可能性を検証する。具体的には、硬さの異なる 2 種類の物理的オブジェクト (柔らかいオブジェクト: Shore 硬度 C0, 硬いオブジェクト: Shore 硬度 A50) それぞれにおいて、バーチャルハンドの指先形状が変化した場合に剛性知覚が変容するか一対比較法を用いて評価を実施する。実験の結果、両オブジェクトにおいてバーチャルハンドの指先形状が大きく変化するとユーザに柔らかさを生起させ、変形が小さいと硬さを生起させることを示した。

2. バーチャルハンドの指先が変形するシステム

本システムは Unity (バージョン 2021.3.41f) で開発した。VR 空間のバーチャルハンドは、HMD 付属カメラのハ

¹⁾<https://www.meta.com/jp/quest/quest-3s>

²⁾<https://www.apple.com/jp/apple-vision-pro/>

ンドトラッキングにより現実の手の動きと同期する。本手法は現実空間と VR 空間での接触インタラクションに注目しており、バーチャルハンドとバーチャルオブジェクトのすり抜け防止には物理演算の Fixed Joint と RigidBody を使用し、接触を検出した。VR 空間では参加者のアバターは表示せず、仮想身体としてバーチャルハンドのみを表示した。

バーチャルハンドは Blender³ を用いて自作した。指先形状の変形デザインは、森本ら [7] の研究を参考に硬いオブジェクトに指を押し当てた際の指腹部の微細な潰れに着目した。指先の変形は Blender のシェイプキー機能で実装し、元の形状からアニメーションを伴って任意形状に変化可能である。変形範囲は 0~100 のパラメータで設定し、任意の最大変形量（例：4 倍）を設定できるため、2 倍や 3 倍など小さな変化率での形状変形も可能だ。パラメータ値は DCC ツールで変形形状を測定しながら決定した。指先形状の拡大率はパラメータ調整で操作できる。現実世界に配置したオブジェクトと VR 空間のオブジェクトの位置合わせは、VR 空間と現実世界のスケール・位置関係を同期させ、HMD を固定した状態で方向キャリブレーションを行うことで実装した。

3. 実験

本実験では、バーチャルハンドの指先変形により生じられる疑似触覚が現実世界のオブジェクトとのインタラクション時におけるユーザの剛性知覚に与える影響を系統的に調査する。

3.1 参加者

実験参加者は 16 名（男性 11 名、女性 5 名、平均年齢 = 21.9、標準偏差 ±1.24）で、19 歳から 25 歳であった。参加者は実験 1 の参加者とは別に大学の所属からアンケートフォームを用いて募集をした。参加者は全員右利き 12 であった。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、感覚障害などはなかった。3 名の参加者は VR の経験が数か月に 1~2 回、2 名の参加者は VR の経験が 1 か月に 1~2 回、6 名の参加者は週に 1~2 回、5 名が VR に精通していた。

3.2 装置

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。触覚オブジェクトとして、Shore 硬度 C0（極軟質、ヤング率約 0.1MPa）および A50（中硬質、ヤング率約 2.5MPa）のシリコーンゴム製直方体（縦 10mm 横 50mm、高さ 30mm）を使用した。複数の硬度のオブジェクトを採用した理由は、知覚統合理論に基づく仮説に依拠している。バーチャル視覚情報と現実触覚情報の統合プロセスは、ベースライン刺激の物理的特性に強く依存すると考えられる。Weber-Fechner の法則によれば、知覚の変化量は刺激の絶対値に比例するため、硬

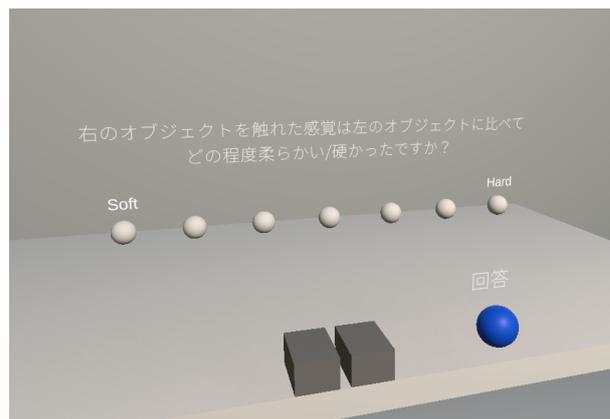


図 2: 実験環境の様子。触れる対象となるオブジェクトは直方体であり（縦 10mm 横 50mm、高さ 30mm）オブジェクト間の距離は 1cm とした。アンケートへの回答はオブジェクトの上側に表示させた 7 つのオブジェクトから選択を実施した。

いオブジェクトと柔らかいオブジェクトでは同一の視覚的変形に対する知覚的影響が本質的に異なる可能性がある。

4. 結果

4.1 実験手順

実験手順として、まず参加者から書面によるインフォームドコンセントを取得した。参加者は椅子に着座し、ヘッドマウントディスプレイとハプティックデバイスを装着した。実験で使用した仮想空間は図 2 である。各試行では、左右に配置されたバーチャルオブジェクトに順次接触し、その硬さを一対比較法により評価した。現実世界と仮想空間のオブジェクトの大きさ、位置関係は同期しており、オブジェクト間の距離は 1cm とした。質問文は「右のオブジェクトに触れた感覚は左のオブジェクトに触れた感覚と比較して柔らかかった/硬かったですか」とした。評価には 7 段階リッカートスケール（1：左が非常に柔らかい、4：同程度、7：右が非常に硬い）を使用し、参加者の主観的剛性知覚を測定した。測定も VR 空間内で行い、左右のオブジェクトに触れるとアンケートに進めるボタンが出現し、選択するとオブジェクトの上部に 7 つの選択肢を表示した。どれが一つを選択すると次の試行に移行できる「回答」というボタンが出現した。各試行間には 30 秒の休憩時間を設け、疲労効果の蓄積を防止した。実験の終了後、各参加者に口頭でのアンケートを実施した。全体を通じて、参加者は平均で 30 分で実験を終えた。

4.2 実験デザイン

実験デザインには $2 \times 7 \times 2$ の要因計画を採用し、オブジェクトの硬さ（柔らかいオブジェクト：Shore 硬度 C0、硬いオブジェクト：Shore 硬度 A50 の 2 水準）、指先変形パラメータ（1.0 から 2.2 まで 0.2 刻みの 7 水準）、基準刺激の変形率（1.0 または 2.2 の 2 水準）を独立変数とした。指先変形パラメータは [7] らの研究を参考にし、身体所有感の保たれる最大の変形率に近づけた。各参加者は全 28 条件（2

³<https://www.blender.org/>

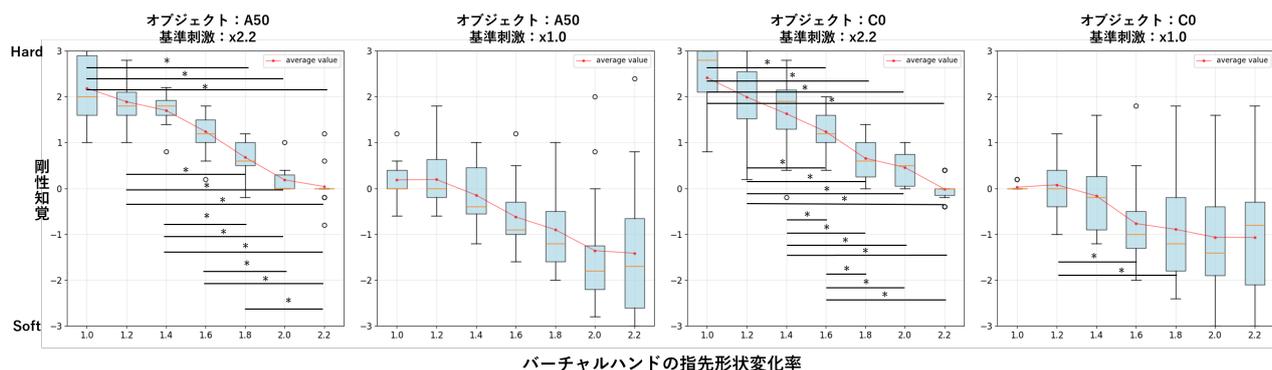


図 3: 物理オブジェクトの硬度（硬い：Shore A50, 柔らかい：Shore C0）と基準刺激の変形度（変形なし：× 1.0, 最大変形：× 2.0）による 4 条件での剛性知覚評価結果．X 軸はバーチャルハンドの指先形状変化率（1.0～2.2）, Y 軸は 7 段階リッカートスケールによる剛性知覚評価値（-3：非常に柔らかい, +3：非常に硬い）．ボックスプロットの中央線は中央値, 箱は第 1・第 3 四分位数, ひげは最小値・最大値, ○は外れ値を示す．赤線は各条件における平均値の推移である．各条件間の有意差は * > 0.01 とする．

× 7 × 2) を各 5 回ずつ実施し, 総試行数は 140 回とした．試行順序の統制として, 実験をオブジェクトの硬さと基準刺激の変形率の組み合わせによる 4 つのセクション（柔らかい × 変形なし, 柔らかい × 最大変形, 硬い × 変形なし, 硬い × 最大変形）に分割し, セクション間の順序は参加者間でラテン方格法により割り当て, 各セクション内では比較刺激の 7 条件を完全ランダム化した．

5. 結果

本実験では, バーチャルハンドの指先形状変化が物理オブジェクトの剛性知覚に与える影響を, 物理オブジェクトの硬度（硬い vs. 柔らかい）と基準刺激の変形度（変形なし vs. 最大変形）の 2 要因で検証した．その結果, 指先形状の変化が大きいと柔らかさを知覚し, 変化が小さいほど硬さを知覚することが示された．さらに, 基準刺激の変形度に強く依存することが明らかになった．

全ての実験条件においてフリードマン検定により統計的に有意な主効果が確認された（硬い-変形なし: $X^2=31.54$, $p < 0.001$; 硬い-最大変形: $X^2=70.49$, $p < 0.001$; 柔らかい-変形なし: $X^2=36.77$, $p < 0.001$; 柔らかい-最大変形: $X^2=76.73$, $p < 0.001$)．Bonferroni 補正による事後検定の結果, 条件間で疑似触覚効果の発現パターンに差異が観察された．硬い物理オブジェクトにおいて, 変形なし条件では事後検定において有意差のあるペアが検出されなかった一方, 最大変形条件では 13 組のペア比較で有意差が確認された（図 3）．柔らかい物理オブジェクトにおいても同様の傾向が確認されたが, その効果パターンは硬い物理オブジェクトと異なる特徴を示した．変形なし条件では限定的な効果（2 組のペアでのみ有意差）に留まったが, 最大変形条件では 15 組のペア比較で有意差が確認された（図 3）．これらの結果はバーチャルハンドの指先形状の変化が剛性に特徴を持った物理的なオブジェクトに触れた際の知覚にも影響を与えることを示している．さらに, 森本ら [7] の結果と同様に, 指先の変形が大きいほど柔らかさを知覚し, 変形

が少ないほど硬さを知覚することが明らかとなった．一方で, 物理オブジェクトの剛性が硬い/柔らかい両条件において, 視覚的な指先変形が柔らかさよりも硬さ知覚に大きな影響を与えることが示された．

6. 議論

6.1 疑似触覚による剛性知覚の感覚統合メカニズム

本研究では, バーチャルハンドの指先形状変化が物理オブジェクトの剛性知覚に与える影響を定量的に検証した結果, 視覚的な疑似触覚が実際の触覚情報を上回る強い影響力を持つことが明らかになった．これは現実において柔らかい物理オブジェクトに触れると指は変形せず, 硬い物理オブジェクトに触れると圧力により指の腹が微弱に広がる現象と矛盾している．この現象は, 人間の感覚統合における視覚優位性理論 [8] によって説明できる．Ernst と Banks [9] が提唱した最適統合理論によれば, 複数の感覚モダリティから得られる情報は, 各感覚の信頼性に基づいて重み付けされて統合される．本研究の結果は, VR 環境において視覚情報の信頼性が触覚情報を上回り, 結果として視覚的な指先変形が剛性知覚を主導したことを示唆している．

硬さがユーザに強く生じた要因として, 剛体と剛体が衝突するイメージの想起が関係している可能性がある．実験後の口頭インタビューにて 4 名の参加者が「コツコツと音がしている感じがある」, 「ぶつかった衝撃が指の変形するものより強い」などと回答した．物理オブジェクトが柔らかい場合においても VR 空間内で表示される仮想オブジェクトは変形せず剛体のままであったため, 指先の変形度合いだけでなく, 仮想オブジェクトの視覚的影響も評価に影響した可能性がある．仮想オブジェクトの形状を変化させる疑似触覚として, Bouzbib ら [4] は把持の状態によってオブジェクトの形状を変化させることで仮想オブジェクトに対する剛性知覚に影響を与え, 強い変化ほど軟性をユーザに生起させることを報告している．これは本実験における柔らかい物理オブジェクトと仮想オブジェクトを同期させて

変形させることで、また異なる結果が得られる可能性を示唆している。より詳細な調査を行うためには、オブジェクトの変形も合わせた評価が必要である。

6.2 研究の限界と展望

指先形状が変化しない条件を基準刺激とした場合、柔らかさをユーザに生起させる効果において柔らかさに有意な影響を与えることが示されたが、変形率が大きいと分散も大きくなることが示されている(図3)。これは知覚における個人差を示しており、Banら[5]の調査ではマウスカーソルを用いた疑似触覚において男性の方が女性より強く知覚することが報告されている。本実験においては男女間のサンプル数に偏りがあることから詳細な分析が困難であり、より詳細な実験デザインが必要である。

本研究の成果は、VR/AR技術の発展において重要な実用的意義を持つ。特に、限られた数のパッシブハプティックデバイスを用いて多様な触覚体験を提供する「ハプティックリターゲットング」技術[10]への応用可能性が高い。この概念を発展させ、単一の物理オブジェクトから複数の異なる剛性感覚を生成することで、VRシステムのコストと複雑性を大幅に削減できる可能性がある。一方で、具体的な剛性の数値とバーチャルハンドの指先形状の変化の関係は明らかになっていない。さらなる汎用性を高めるためにも、剛性数値に近い物理オブジェクトを用意した実験デザインを実施し、調査を進めることが期待される。

本研究で触れる対象であるオブジェクトは直方体であり、指と比較してサイズが大きいものを使用した。これは最もプリミティブな形状の一つであることから触れる面を平面として実験を実施したが、現実と仮想環境のどちらにおいても様々な形状のオブジェクトが存在する。例えば、針のような指の面積よりも小さいサイズのオブジェクトの場合、圧力が一点に集中したように見えることから、指先が大きく変形しても硬さの知覚の方が優先される可能性がある。このように、触れる対象となるオブジェクトの形状やサイズなども、より詳細な疑似触覚の性質を探るために必要である。

7. 終わりに

本研究は、VR空間で表示されるバーチャルハンドの指先形状の変化を用いた疑似触覚が、現実に存在する物理オブジェクトの硬さ知覚に与える影響を検証した。実験の結果、オブジェクトの物理的な硬さに関わらず、視覚的な指先の変形量が多いほど柔らかく、小さいほど硬く知覚されることが示された。これは、実際の触覚情報よりも視覚情報が人の知覚判断を支配する「視覚優位性」を強く示す結果である。この知見は、単一の物理デバイスを用い、視覚情報の操作のみで多様な硬さの感覚を創出できる可能性を示唆する。

参考文献

- [1] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?, in *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pp. 83–90 (2000).
- [2] Kumar, A., Gourishetti, R. and Manivannan, M.: Mechanics of pseudo-haptics with computer mouse, in *2017 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, pp. 1–6 (2017).
- [3] 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 (2013).
- [4] Bouzbib, E., Pacchierotti, C. and Lécuyer, A.: When Tangibles Become Deformable: Studying Pseudo-Stiffness Perceptual Thresholds in a VR Grasping Task, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2743–2752 (2023).
- [5] Ban, Y., Kajinami, T., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect, in *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 211–216 (2012).
- [6] Weiss, Y., Villa, S., Schmidt, A., Mayer, S. and Müller, F.: Using Pseudo-Stiffness to Enrich the Haptic Experience in Virtual Reality, in *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA (2023), Association for Computing Machinery.
- [7] 森本浩輔, 橋浦健太, 渡邊恵太, Kosuke, M., Kenta, H., Keita, W.: 仮想物体の剛性知覚に影響を与える仮想手の指先形状の変化を用いた疑似触覚手法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 66, No. 2, pp. 286–296 (2025).
- [8] Rock, I. and Victor, J.: Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses, *Science*, Vol. 143, No. 3606, pp. 594–596 (1964).
- [9] Ban, Y. and Ujitoko, Y.: Age and Gender Differences in the Pseudo-Haptic Effect on Computer Mouse Operation in a Desktop Environment, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 8, pp. 5566–5580 (2024).
- [10] Azmandian, M., Hancock, M., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A. D.: Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences, in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 1968–1979, New York, NY, USA (2016), Association for Computing Machinery.