

ハンドモデルの指先変形を用いて硬さを表現する 疑似触覚の提案

森本 浩輔^{1,a)} 渡邊 恵太¹

概要：本研究では、Pseudo-Haptics（疑似触覚）の一つとして VR 空間内で仮想物体に触れた際にハンドモデルの指先変形により仮想物体への硬さを疑似的に知覚すること目的とする。本実験では、実験参加者が指先の変形度合いが異なる 3 種類のハンドモデルを用いて仮想物体に触れ、硬さの知覚に影響があるかどうかを調査した。実験の結果、指先が変形するハンドモデルが硬さを明確に知覚させることはできなかったが、硬さの疑似触覚を知覚させる可能性を示した。

1. はじめに

実際には力学的な刺激を与えていなくても視覚情報からあたかも触覚を知覚させることを Pseudo-Haptics（疑似触覚）[1] と呼ぶ。渡邊らは、ユーザが操作するマウスカーソルの動きや形の変化で疑似触覚を生み出す「Visual Haptics」を提案した [2]。橋口らは実物体を把持する際に、実物体の内部に液体が揺れている CG を表示させることで把持している実物体の中に液体が入っていると知覚することを示した [3]。伴らは把持している物体と物体を把持している手の様子を撮影し、画像処理により変形させることで把持物体の硬さの知覚に影響を与えることを示した [4]。岡田らは、VR 空間内で衝突する仮想物体に応じてハンドモデルの変形量を変化させることで重さの知覚に影響を与える可能性があることを示した [5]。これらの研究から、ハンドモデルの変形が引き起こす疑似触覚は人間の知覚に影響を与えることが考えられる。しかし、VR 空間内でハンドモデルの変形が仮想物体の硬さの知覚に与える影響は調査されていない。

そこで本研究では、VR 空間で視覚刺激のみで硬さを表現する方法として指先が変形するハンドモデルを提案する（図 1）。さらに、VR 空間で指先が変形するハンドモデルを用いて仮想物体に触れる実験を行い、本システムに対する実験から得た課題について議論する。

2. 提案システム

2.1 変形するハンドモデル

本システムではハンドモデルが仮想物体に触れたときに

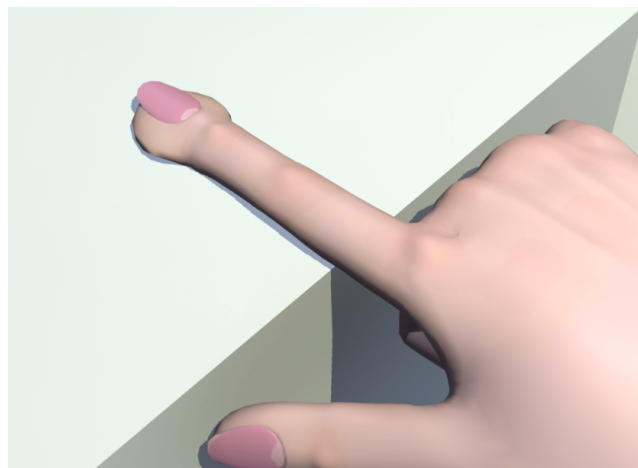


図 1 指先が変形する視覚刺激

指先が変形するシステムを提案する。人差し指の指先が仮想物体に振れたとき、ハンドモデルの指先が変形する。指先の変形は固い物体を押したときに指の腹が小さく広がる様子とゴムボールのように指先が大きく広がる様子の 2 種類を用意した（図 2）。また、ハンドモデルのポーズは人差し指を立てたポーズで固定した（図 2）。

2.2 提案システムの実装

本システムは VR 空間内で体験するアプリケーションである。HMD 及びハンドコントローラーは Meta Quest2 を用いた。ハンドモデルの製作には Blender を用いた。

VR 環境はゲームエンジンである Unity を利用し、実際にユーザがコントローラーを把持している位置と VR 空間内のハンドモデルの位置がトラッキングするように環境を構築した。

¹ 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

^{a)} ev200525@meiji.ac.jp

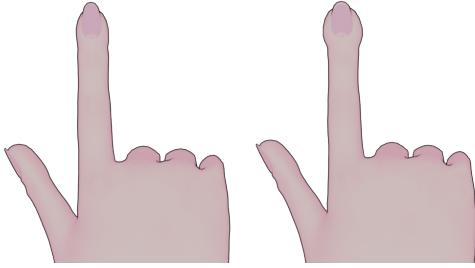


図 2 指の変形度が異なる 2 つのハンドモデル

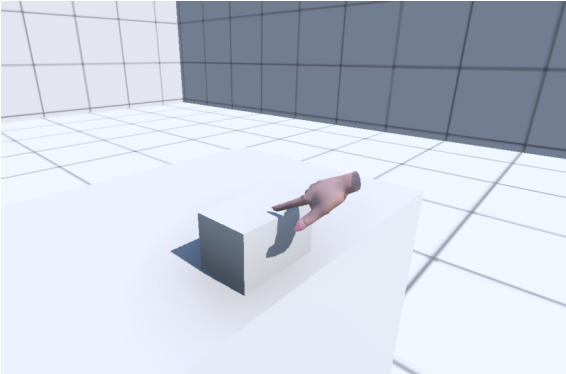


図 3 変形度の異なる 3 種類のハンドモデルを使用するアプリケーション



図 4 共通サンプルを改良したアプリケーション

2.3 アプリケーション

実験では 2 つのアプリケーションを使用した。1 つ目のアプリケーションでは指先の変形度の異なる 3 種類のハンドモデルの内 1 つを選択する。次に VR 空間内に設置したキューブ型の仮想物体に触れるとハンドモデルが変形する (図 3)。

2 つ目のアプリケーションは岡らが提案した触覚ディスプレイ間を比較するためのアプリケーションをまとめた共通体験サンプルのボタンを押すアプリケーションを使用した (図 4)。^[6] ハンドモデルは変形量が一番大きいハンドモデルを使用した。

3. 実験

3.1 実験目的

本研究では、仮想物体に触れた場合ハンドモデルの指先

の変形が硬さの知覚へ与える影響を調査する実験を行った。変形度の異なる 3 種類のハンドモデルを使用し仮想物体に触れるアプリケーションでは、3 種類のハンドモデル間で硬さの知覚に変化が生じるかを調査した。共通体験サンプルを用いたアプリケーションでは本研究の提案システムが VR 空間でのユーザ体験にどのように影響するか調査した。今後、本システムを改良したものと比較することも目的とした。

3.2 実験手順

実験参加者には HMD を装着させ VR 空間での操作に慣れるための練習フェーズを行うように指示した。実験参加者は操作方法に慣れたら前述している変形度の異なる 3 種類のハンドモデルを使用する 1 つ目のアプリケーションを体験した。3 種類のハンドモデルはランダムな順番でそれぞれ 1 分程度仮想物体に触れることを指示した。1 つ目のアプリケーション終了後に数分休憩をはさみ、実験参加者は共通サンプルを改良した 2 つ目のアプリケーションを体験した。実験終了後、実験参加者には HMD を外しアンケートの回答を指示した。

実施したアンケートは体験するアプリケーションごとに別々に作成した。1 つ目のアプリケーションのアンケートは 3 種類のハンドモデル使用した際にオブジェクトが硬いと思った順に順位付けする内容である。

2 つ目のアプリケーションに対してのアンケートは触覚ディスプレイの評価に適した質問項目として、Witmer らの Presence Questionnaire に基づき、以下の 7 つの質問を選定した^[7]。

- (1) 環境との関わりは、どの程度自然に感じられましたか？
- (2) 仮想環境での体験は、現実世界での体験とどの程度一致していたと思いますか？
- (3) 物体に触れる、表面を歩く、壁や物にぶつかるなど、物理的なインタラクションによって、どの程度簡単に物体を識別できましたか？
- (4) 仮想環境の体験には、どのくらいで慣れましたか？
- (5) 仮想環境体験中、タスクや環境に完全に集中できた瞬間はありましたか？
- (6) 仮想環境におけるさまざまな感覚（視覚、聴覚、触覚など）を通じて提供される情報に一貫性はありましたか？
- (7) 自分の行動と期待される結果との間に、どの程度の遅れがありましたか？

これらの質問を 0 (そう思わない) から 6 (そう思う) の 7 段階のリッカートスケールで実施し、(1)(2)(3) の Involvement、(4)(5)(6) の Adaptation/Immersion、(7) の Interface Quality の 3 種類に分類し分析を行った。

最後に全体の VR 体験を通して感想や意見などの収集を行った。

表 1 比較実験結果

実験参加者	1 位	2 位	3 位
A	変形小	変形なし	変形大
B	変形大	変形小	変形なし
C	変形小	変形大	変形なし
D	変形なし	変形小	変形大
E	変形小	変形なし	変形大
F	変形小	変形大	変形なし
G	変形大	変形小	変形なし
H	変形なし	変形大	変形小

3.3 実験参加者

実験参加者は 21~23 歳の 8 名（男性 8 名）で全員コンピュータサイエンスを専門とする大学生である。すべての参加者は正常な視力あるいは矯正視力を有し、右利きであった。

4. 結果と考察

4.1 3 種類のハンドモデルを使用するアプリケーションの結果と考察

実験参加者が変形度合いが異なる 3 種類のハンドモデルを使用し、仮想物体が硬いと感じた順に比較した結果を表 1 に示す。また、それぞれの平均順位は昇順で変形度が小さいハンドモデル (1.625)、変形度が大きいハンドモデル (2.0) 変形しないハンドモデル (2.375) であった。8 名中 6 名が変形するハンドモデルで触れた仮想物体を最も硬いと知覚したハンドモデルに選んだことと平均順位の数値からハンドモデルの変形は個人差はあるが疑似触覚を起こしていることを示唆した。一方で、変形しないハンドモデルを選んだ参加者 D は「指が仮想物体にめり込んでいるように見えた」と回答した。これはシステムの物理演算に問題があると考えた。同じく変形しないハンドモデルを選んだ参加者 H は「変形しない指に硬さを知覚し、それと同じように仮想物体にも硬さを感じた」と回答した。

参加者 A, D, E は変形度が大きいハンドモデルは硬さよりも粘着感を強く感じた」と回答した。この粘着感を知覚させている原因として変形度の大きさ以外にも変形のアニメーション速度が関係する可能性がある。そのため、変形度が小さいハンドモデルのほうが変形度が大きいハンドモデルより硬さの知覚へ大きな影響を与えたと考えた。

4.2 共通体験サンプルを用いたアプリケーションの結果と考察

触覚ディスプレイの評価に適した 7 つの質問を 3 つの項目に分類した Presence Questionnaire の結果を図 5 に示す。Adaptation/Immersion のスコアが高い理由としてタスクがボタンを押すだけの単純であったことと、ボタンを押したときの音声のフィードバックと相性が良いためである」と考える。Interface Quality のスコアにばらつきがある理由は実験参加者によってハンドモデルの変形アニメー

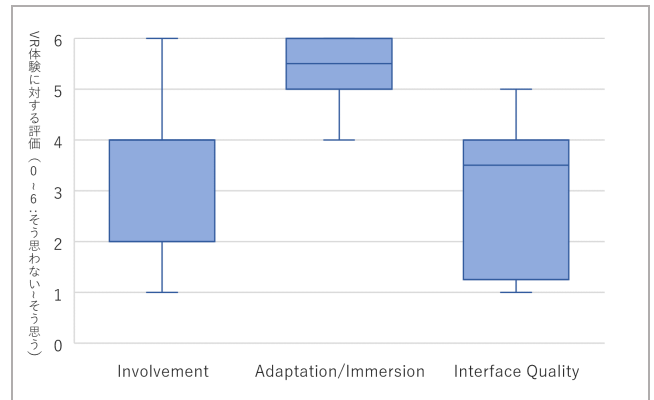


図 5 Presence Questionnaire の結果

ションスピードの感じ方の個人差が影響している可能性がある。

5. 議論

5.1 変形するハンドモデル

今回、使用したハンドモデルの変形度ではユーザに十分硬さの知覚への影響を与えられなかったと考えた。原因としてハンドモデルの変形度合いが関係している可能性がある。前述しているように実験参加者数名は「変形度が大きいと粘着感を感じた」と回答した。今後は変形度合いのパラメーターを増やして実験を行い、最も硬さの知覚に影響を与える変形度合いを調査する。

本研究の疑似触覚は HMD に映し出される映像に依存する。そのためハンドモデルの変形がユーザの意図していた変形スピードとずれてしまうことで疑似触覚を感じずらくなると考えた。改善案として変形アニメーションを一定スピード再生からユーザのコントローラ操作によってハンドモデルの変形度合いが変化するシステムを構築し、改善するか調査する。

ユーザ体験の向上にはトラッキングの精度の向上と表現する変形の幅を増やすことが必要である可能性がある。今回の実験で使用したハンドモデルは人差し指を立てた状態でのポーズで固定したものである (図 2)。今後はハンドモデルの位置をトラッキングするだけでなく指の動きのトラッキングも行う。変形箇所も指先だけではなくモノを押し込んだ時に関節が外側に曲がる現象や手のひらが押されて凹む現象も取り入れ、実装する。

5.2 アプリケーションの設計

今回の実験環境は真上から仮想物体に触れたときのみ、ハンドモデルが変形する。今後は仮想物体のどの面に触れてもハンドモデルがめり込むことなく正しい変形を表現ができるシステムを再構築する。また、ユーザが触れる物体をキューブ型の仮想物体だけではなく球体などの様々な形状を追加し、ユーザ体験の向上につなげる。

本実験で使用した共通体験サンプルのボタンを押すアプ

リケーションのように仮想物体に触れるだけではなく、押す、つまむ、支えるなどのハンドモデルの変形につながるインタラクティブな動作を行えるアプリケーションの開発も行い、疑似触覚の表現の幅を調査する。

本システムは、架空の生物であるスライムのような生物とのインタラクションを行うアプリケーションに応用できる可能性がある。触れることでスライムの表面が一定までは凹み柔らかさを感じることができ、表面のある一定を超えると指先が変形し、知覚を柔らかさから硬さへ変化することが期待できる。

6. 終わりに

本研究では、VR空間で仮想物体に触れた際にハンドモデルの指先が変形する視覚刺激が硬さの知覚に影響を与えるのか調査した。ハンドモデルの変形は変形度によって感じられる触覚が変化するが硬さの知覚に影響を与えることができる可能性を示した。今後は更なるシステムの改良と最も硬さの知覚に影響を与えるハンドモデルの変形度合いを調査する。

参考文献

- [1] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pp. 83–90, 2000.
- [2] Keita Watanabe and Michiaki Yasumura. Visualhaptics: Generating haptic sensation using only visual cues. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '08*, p. 405, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [3] Satoshi Hashiguchi, Yohei Sano, Fumihisa Shibata, and Asako Kimura. R-v dynamics illusion: Psychophysical influence on sense of weight by mixed-reality visual stimulation of moving objects. In Randall Shumaker and Stephanie Lackey, editors, *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Virtual and Augmented Environments*, pp. 55–64, Cham, 2014. Springer International Publishing.
- [4] 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 手形状変形フィールドバックを利用した把持動作における硬さ知覚操作 (It; 特集gt; ハプティックコンテンツ). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 4, pp. 523–532, 2014.
- [5] 岡田一志, 橋本渉. 手モデルの変形がバーチャル物体の重さ知覚に与える影響. *インタラクション 2021 論文集*, 第 2021 巻, pp. 646–648, march 2021.
- [6] Takuya Oka, Kosuke Morimoto, Yohei Yanase, and Keita Watanabe. Common experience sample 1.0: Developing a sample for comparing the characteristics of haptic displays. In *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '22*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [7] Bob G. Witmer and Michael J. Singer. Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environ-*