

バーチャルハンドの指関節の変形による疑似触覚の検証

林 大智* 森本 浩輔* 橋浦 健太* 渡邊 恵太*

概要. VR空間では物理的な制約がないため、ユーザのバーチャルボディやオブジェクトの形状を自由に表現できる。物理世界では人間の手の構造上、指の第一関節に曲げる限度があるが、VR空間ではその限界を超えた曲げ表現が可能である。本研究では、VR空間内でのオブジェクト接触時に指の第一・第二関節を通常以上に曲げるシステムを提案し、その効果を検証するためのユーザスタディを行った。アンケートの結果には、ユーザは関節を逆に曲げるシステムを用いてバーチャルハンドを押し込んでいる際、オブジェクトから押し返されているような錯覚を覚えるコメントがあった。この知見から、空中に接地されたオブジェクトや半透明なオブジェクトなどの、接触しているかの認知が難しいオブジェクトに対するフィードバックとしての活用が期待される。

1 はじめに

VR空間におけるユーザ体験を向上させるために、オブジェクトに触れる体験を再現する触覚デバイス [5] や新たな空間インタラクション手法 [3] の研究が行われてきた。これらのインタラクション手法の一つとして、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 Pseudo-Haptics がある [4]。Pseudo-Haptics は触覚デバイスを用いずともユーザに触覚を想起させるため、何もデバイスを保持しないハンドトラッキングとの相性がよく、今後多くの VR コンテンツに応用が期待される。

これまでの Pseudo-Haptics を想起させる研究では、バーチャルオブジェクトを視覚的に操作する手法 [1, 2, 7] が主に取り組みられてきた。一方で森本ら [6] は、バーチャルハンドの形状変化においても同様に、ユーザの剛性知覚に影響を与えることを明らかにした。そこで本研究では、バーチャルハンドが物理世界と異なる形状に変化した場合、ユーザがどのような感覚が得られるかを調査した。本稿では物理世界で硬いオブジェクトに指を押し当てた際に、第一関節が手甲側に曲がる現象に注目した。物理世界では人間の構造上、第一関節の手甲側に曲がる角度には限界があり、第二関節に関しては手甲側には曲げることができない。しかし、VR空間ではその限界に制限されずに表現できる。

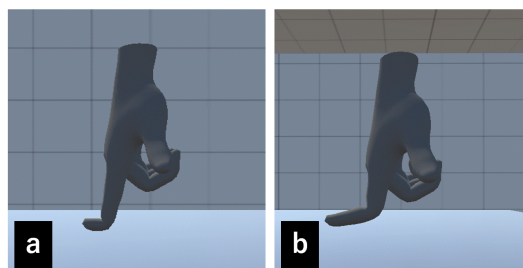


図 1. a. バーチャルハンドの第一関節の過剰変形 b. 第二関節の過剰変形

2 システム提案

2.1 概要

本稿では、VR空間で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の第一、および第二関節を手甲側に過度に曲げるシステムを作成した。ユーザの手の動きをトラッキングしたバーチャルハンドをVR空間内で投影し、ユーザがバーチャルオブジェクトに触れた際、バーチャルハンドの関節を過剰に曲げることで、物理的な接触感覚の錯覚をユーザが得られると期待する。この錯覚は、ユーザの指の動きとVR空間内のバーチャルハンドの指の動きの違い、つまり身体の動きと視覚フィードバックの不一致から生じる。

2.2 実装

本システムは、ユーザはハンドトラッキングを用いてバーチャルハンドを操作する。バーチャルハンドはバーチャルオブジェクトに指を押しこむことで、手の甲側へ指の骨格的な構造の制約を超えた、現実的には不可能な角度まで曲げることが可能である。本システムは、指の第一関節 (図 1:a)、第二関節 (図 1:b) どちらを曲げるかを選択でき、変形の角度も 0

～180°の間で調整可能である。指が設定された最大変形角度に達すると、ユーザはバーチャルハンドをそれ以上オブジェクトに押し進められない。

本システムは、VR空間での精密なハンドトラッキング機能に依存している。バーチャルハンドは実世界の手首や指の座標や動作をトラッキングし、体験者の指の角度や方向などをVR空間内で正確に描写する。そのため、コントローラを用いた疑似的なハンドコントロールよりも、ユーザは直観的にハンドモデルを動かしたり、オブジェクトをコントロールしたりできる。本システムは、Meta Quest2のハンドトラッキング機能を活用した。ハンドモデルには、Meta社がUnity AssetStoreで共有しているOculusHandを使用した。VR空間の構成にはゲームエンジンであるUnityを利用し、実際のユーザの手の位置とVR空間内のハンドモデルの位置が一致するように調整した。

3 ユーザスタディ

バーチャルハンドの関節が逆に曲がることによって、ユーザはどのような疑似触覚を引き起こすのか調査した。今回はバーチャルオブジェクトに触れた場合に得られる感覚を中心にユーザスタディをした。

VR空間に触れると指関節が逆に曲がるオブジェクトと触れても指関節が曲がらないオブジェクトの2つを配置し、実験参加者には5分程度自由に仮想物体に触れることを指示した。実験参加者に本システムを体験させながらインタビューを行い、仮想物体やハンドモデルに触れてどう感じたかの聞き取りをした。

3.1 仮説

森本ら[6]は、ハンドモデルの変形は一般的にユーザのオブジェクトに対する剛性知覚に影響を与えることを明らかにした。そのため我々は、ハンドモデルの変形を引き起こす本システムでも同様に、ユーザのオブジェクトに対する剛性知覚が変わるのではないかという仮説を立てた。

3.2 実験参加者

実験参加者は21～24歳の学生8名(平均年齢22.9歳、左利き2名)である。すべての参加者は男性であり、正常な視力あるいは矯正視力を有していた。また、3名の参加者は日常的にVRコンテンツに触れており、コントローラを用いた操作に習熟していた。

3.3 結果

ユーザスタディの結果、一部の参加者(VRの操作に習熟した参加者3名を含む)から、変形の角度が小さい場合、オブジェクトからの指が跳ね返る感

覚や、オブジェクトを押し込んだときの反作用を感じるというコメントを得られた。

また、指の変形角度が大きいとき、バーチャルハンドを自分の身体ではなく、おもちゃやゴム手袋のようだと表現するコメントや、VR空間に存在する自分自身とは異なるアバターを操作しているようだというコメントがあった。

また、指の変形が起こらないオブジェクトを硬く感じたという意見があった。一方、指の変形が起こるオブジェクトを柔らかく感じたという意見はなかった。

4 議論：アプリケーション例

本システムにより生じたと推測される疑似触覚の特性は、ユーザがオブジェクトに触れたことに対するフィードバックとしての活用が期待できる。

4.1 空中ディスプレイ

VR空間で空中に提示されるメニューUIがある。これはUIを物理的な制約なしに配置できる利点がある。一方、空中には距離の目安となる物体がないためディスプレイの位置が認識しにくい。そのため、ユーザはディスプレイ内のUIに触れたか否かの確信が持てず、入力可否がわかりづらい。本手法を用いることで、ユーザは空中ディスプレイに触れたときの接触感を得ることができる。これにより、ユーザは入力したかどうかを直感的に認知することができ、入力精度やUXが向上する可能性がある。

4.2 半透明な物質のプレゼンスの強調

VR空間でガラスなどの半透明物体は、リソース最適化のため反射の計算を排除していることが多く、その実在感が軽視されやすい。本手法を用いることで、ユーザが半透明オブジェクトに触れた際のフィードバックを強化し、不透明な物体の存在感をより際立たせることが可能になる。これにより、ユーザがより鮮明な空間の認識が可能になり、VR空間でのナビゲーションやインタラクションの質が高まることが期待できる。

5 おわりに

ユーザスタディの結果、バーチャルハンドでオブジェクトを押し込んだ際、バーチャルハンドの指を逆向きに折り曲げる角度とユーザの身体所有感には負の相関関係がある可能性が示唆された。今後は、リッカート尺度を用いた定量評価を行い、指の変形角度によってユーザの知覚に他にどんな影響を与えるかを調査する。

参考文献

- [1] Y. Ban, T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. In *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 211–216. IEEE, Mar. 2012.
- [2] T. Kawabe. Mid-Air Action Contributes to Pseudo-Haptic Stiffness Effects. *IEEE Trans. Haptics*, 13(1):18–24, 2020.
- [3] W. Kim and S. Xiong. Pseudo-haptic button for improving user experience of mid-air interaction in VR. *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, 168:102907, Dec. 2022.
- [4] 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.
- [5] J. Lee, M. Sinclair, M. Gonzalez-Franco, E. Ofek, and C. Holz. TORC: A Virtual Reality Controller for In-Hand High-Dexterity Finger Interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, No. Paper 71 in CHI '19, pp. 1–13, New York, NY, USA, May 2019. Association for Computing Machinery.
- [6] K. Morimoto, K. Hashiura, and K. Watanabe. Effect of Virtual Hand's Fingertip Deformation on the Stiffness Perceived Using Pseudo-Haptics. In *Proceedings of the 29th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [7] P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato. SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(11):1279–1288, 2015.