

# バーチャルハンドの指先の細さが適応的に変化するシステムの提案

趙 勇気<sup>1,a)</sup> 渡邊 恵太<sup>2</sup>

概要：VR 環境では、ユーザの手を直接用いた直感的な物体操作手法が一般的に用いられている。一方で、高密度に配置された微小物体を選択する際には、自己遮蔽や指の太さによる選択の曖昧さが操作を困難にしている。本研究ではこの課題に対し、対象との距離および手の移動速度に応じて、指先の細さを適応的に変化させる手法を提案する。本手法により、接触判定領域を視覚的かつ物理的に局所化することで、密集したターゲットへのピンポイントな選択を可能にし、精密操作を支援することを目指す。

## 1. はじめに

VR 環境においてユーザーが操作や体験を行うための手法として、HMD に搭載されたカメラと画像処理を用いてユーザーの手そのものを認識する手法が広く用いられている。この手法では、従来必要とされていたコントローラの把持を必要とせず、ユーザー自身の手を入力デバイスとして利用できるため、Meta Quest シリーズ<sup>\*1</sup>や、Apple 社の VisionPro<sup>\*2</sup>などで、一般的な利用が進んでいる。ユーザーの手は VR 空間内においてバーチャルハンドとして提示され、仮想物体の操作や把持などの行為に直接利用されることで、現実世界に近い直感的なインタラクションを提供する。

しかしこうした入力手法は、密接配置された小さな物体を選択、保持するような精密操作が困難であるという課題が存在する [1]。特に自身の仮想手の表示は、操作対象を覆い隠してしまう「自己遮蔽」によって、正確な奥行き知覚や位置合わせが困難である。これにより、誤選択や操作時間の増大、ユーザへの認知的負荷を招く要因となる [2]。

こうした課題に対して、VR 環境での手を用いたインタラクションにおける精密な操作を支援するためにいくつかの研究がなされている。Ma ら [3] はユーザーの過去の選択傾向に基づき、選択判定エリアを自動調整する手法を提案した。また Zhu ら [4] は VR 環境で、指先の動きに合わせて対象を拡大表示し、CD 比を調整して精密な選択を可能にする手法を提案した。Periverzov ら [5] はユーザーの手

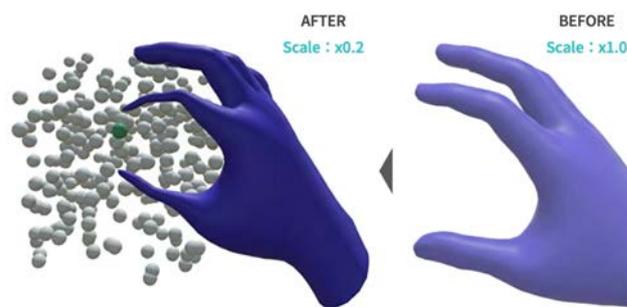


図 1 指先の細さが適応的に変化するシステム。オブジェクトとの近接距離、手の移動速度に基づき、指先が変形する。

の動きにおける行動特徴から選択意図を推測し、小さな物体を正確に選択可能にする手法を提案した。

また、バーチャルハンドの視覚的表現を変化させることで操作支援を行う手法がある。Bhowmick ら [6] は仮想手のサイズを縮小させることで、小さな物体の選択を支援する手法を提案した。こうした手全体を縮小する手法は、手のスケール変化により、奥行き知覚に不整合が生じることが示唆されている。また Turkmen ら [7] は手の透明度を調整し、視認性を確保することで精密操作を支援する手法を提案した。しかし、単に手を透明化するだけでは、接触判定の領域となる指先の太さは変わらないため、指の面積内に複数の微小物体が含まれるような状況では、ユーザはどの物体を把持しようとしているのか直感的に判別しづらく、選択対象の曖昧性が残る可能性がある。

そこで本研究では、バーチャルハンドの指先の細さを適応的に変化させる手法を提案する。本手法は、指先を細く表示することでターゲットとの接触点を明確化することで、指先による遮蔽を低減することができる。同時に手の

<sup>1</sup> 明治大学大学院 先端数理科学研究科

<sup>2</sup> 明治大学 総合数理学部

<sup>a)</sup> cs252027@meiji.ac.jp

<sup>\*1</sup> <https://www.meta.com/quest/>

<sup>\*2</sup> <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>

全体的なスケールを維持することで、奥行き知覚への悪影響を排除することができる。これにより、密集した微小物体の中から特定のターゲットをピンポイントで選択するような精密操作を支援できる可能性がある。

## 2. 提案システムの概要

本研究では、バーチャルハンドの指先の細さが状況に応じて適応的に変化するシステムを提案する。(図1)本システムは、ユーザが操作対象に接近し、かつ慎重な動作を行っている局面を検知して、指先形状を適応的に変形させるものである。

### 2.1 ハードウェアおよびソフトウェア構成

本システムでは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) として Meta Quest 3 を使用した。ソフトウェア開発環境にはゲームエンジンの Unity 2022.3.28 を採用し、VR アプリケーションの開発およびハンドトラッキング機能の実装には Meta All-in-One SDK を用いた。ユーザの手の動きの取得には、HMD に内蔵されたカメラによるハンドトラッキングを使用した。VR 空間内において、ユーザのAvatarは全身を表示せず、インタラクションの主体となるバーチャルハンドのみを表示する構成とした。

### 2.2 提案手法の実装

提案手法である指先の細さが変形するバーチャルハンドは、DCC ツールである Blender<sup>\*3</sup>を用いて独自に作成した。指先の形状変化は、Blender の機能であるシェイプキーを用いて実装した。シェイプキーを用いることで、基本形状からターゲット形状へと、アニメーションを伴って滑らかにメッシュを変形させることが可能である。変形の度合いは0から100の正規化されたパラメータによって制御され、これにより0.5倍や0.1倍といった任意の縮小率に設定可能である。各パラメータにおける具体的な変形形状については、DCC ツール上での測定に基づき決定した。本システムでは、このパラメータを調整することにより、指先の縮小率を操作することができる。

### 2.3 適応的変形の制御

本システムでは、ターゲット物体との近接距離および手の移動速度をリアルタイムで監視し、これらの2つの値が一定の閾値を下回った時点を変形開始のトリガーとする。一般に、微小なターゲットを選択する際、ユーザの手は対象に接近するにつれて減速する傾向があるため、この2つの条件が揃った局面こそが、指先変形による支援が必要とされるタイミングであると判断したためである。

本システムでは、手の移動速度が0.075m/s以下、かつ

ターゲットとの距離が4.44cm以内となる条件を満たした場合に、変形アニメーションを開始するよう設定した。移動速度の閾値は、直感的なインタラクションに最適な速度を見つけるため Turkmen[7] らが行った予備調査により決定されたものである。近接距離の閾値は Voisard ら [8] が行った実験に基づいたものである。変形プロセスにおいては、急激な形状変化による視覚的な違和感を防ぐため、時間ベースの補間法を採用した。これにより、条件成立から0.5秒かけて指先の縮小率を徐々に変化させ、滑らかな形状遷移を実現している。

## 3. 今後の展望

本研究では、密接に配置された微小な仮想物体の精密操作を支援するため、物体との近接距離、手の移動速度に基づき指先の細さを適応的に変化させるインタラクション手法を提案し、システムの実装を行った。しかし、本稿ではシステム的设计および実装にとどまっており、提案手法の有効性やユーザに与える心理的影響については未検証である。今後は、以下の二点について詳細な検証を行う必要がある。

第一に、指先形状の変形パラメータにおける許容範囲の特定である。指先を過度に鋭利化させた場合、ユーザに視覚的な不快感を与えたり、バーチャルハンドに対する身体所有感の低下を招く懸念がある。Kilteni ら [9] の研究では、バーチャルボディの構造に対する過度な変形や不整合が、身体所有感を著しく低下させることが示されている。したがって、ユーザが「自分の手」としての感覚を維持したまま受容できる指先の細さがどの程度であるか、先行研究の知見に基づきつつ、心理物理学的な実験を通じて厳密に調査する必要がある。

第二に、提案システムが実際のインタラクションにおけるパフォーマンスやユーザ体験に及ぼす影響の検証である。具体的には、VR空間における基本的な操作タスクである「微小物体の把持」や「ボタン選択」といった場面において評価実験を行う。これらのタスクを通じ、従来手法と比較した際の操作時間や正確性を定量的に計測するとともに、操作の快適性や負荷といった主観評価を行うことで、提案手法の有効性を明らかにする。

## 参考文献

- [1] Lode Vanackén, Tovi Grossman, and Karin Coninx. Exploring the effects of environment density and target visibility on object selection in 3D virtual environments. In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*. IEEE, 2007.
- [2] F Argelaguet and C Andujar. Efficient 3D pointing selection in cluttered virtual environments. *IEEE*

\*3 <https://www.blender.org/>

*Comput. Graph. Appl.*, Vol. 29, No. 6, pp. 34–43, November 2009.

- [3] Jiaju Ma, Jing Qian, Tongyu Zhou, and Jeff Huang. FocalPoint: Adaptive direct manipulation for selecting small 3D virtual objects. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 7, No. 1, pp. 1–26, March 2023.
- [4] Fengyuan Zhu, Ludwig Sidenmark, Mauricio Sousa, and Tovi Grossman. Pinchlens: Applying spatial magnification and adaptive control-display gain for precise selection in virtual reality. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 1221–1230. IEEE, 2023.
- [5] Frol Periverzov and Horea Ilieş. Ids: The intent driven selection method for natural user interfaces. In *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 121–128, 2015.
- [6] Shimmila Bhowmick, Nilotpal Biswas, Pratul Chandra Kalita, and Keyur Sorathia. Wow! I have tiny hands: Design and evaluation of adaptive virtual hands for small object selection within arms length in dense virtual environment. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, April 2023. ACM.
- [7] Rumeysa Turkmen, Laurent Voisard, Marta Kersten-Oertel, and Anil Ufuk Batmaz. Adaptive hand visibility for accurate 3d user interactions in virtual environments. In *2025 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 12–22, 2025.
- [8] Laurent Voisard, Amal Hatira, Mine Sarac, Marta Kersten-Oertel, and Anil Ufuk Batmaz. Effects of opaque, transparent and invisible hand visualization styles on motor dexterity in a virtual reality based purdue pegboard test. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 723–731. IEEE, October 2023.
- [9] Konstantina Kilteni, Jean-Marie Normand, Maria V Sanchez-Vives, and Mel Slater. Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion. *PLoS One*, Vol. 7, No. 7, p. e40867, July 2012.