

持ち上げ動作時のバーチャルハンドの色変化を用いた重量錯覚提示手法

神谷 翔* 森本 浩輔† 渡邊 恵太*

概要. VR 体験における触力覚刺激を提示する手法として, pseudo-haptics を用いたアプローチは有効である. psuedo-haptics を誘発する視覚的变化として, バーチャルハンドの色変化は有効であるが, 既存手法における色変化速度はユーザの動作にかかわらず一定であった. 本研究では, 持ち上げ動作に連動してバーチャルハンドの色が段階的に変化するシステムを構築し, 色変化速度の操作を用いた新たな重量知覚提示手法を提案した. 調査の結果, バーチャルハンドの色変化速度がユーザの重量知覚に有意な影響を与える可能性を示した. 今後, 色変化速度と重量知覚の関係における閾値の定量化, 持ち上げ動作を伴う VR 体験へのシステム導入を試み, 新たな重量知覚提示手法としての有用性を検証する.

1 はじめに

Virtual Reality (VR) 体験における触力覚提示手法の一つに, pseudo-haptics がある [3]. pseudo-haptics は, ユーザの予測と視覚フィードバックの不一致によって触力覚刺激を錯覚的に提示する技術である. この技術は物理フィードバックを用いることなく, 剛性, 重量, 距離などの触力覚刺激をユーザに錯覚させることができる.

VR 環境における pseudo-haptics を誘発する手法として, バーチャルハンドの視覚的变化が挙げられる. バーチャルハンドは 3D ポリゴンモデルで構成されており, バーチャルオブジェクトと同様に, サイズ, 形状, テクスチャなどの視覚要素を動的に変化させることが可能である.

特に, テクスチャやシェーダー機能を用いたバーチャルハンドの動的な色変化は, psuedo-haptics の誘発に有効である. たとえば, VR/AR 環境におけるユーザの手に対する段階的な色変化は, 対象オブジェクトの剛性を錯覚的に提示できる [1, 5]. しかし, これらの既存手法では, ユーザの動作にかかわらず一定の速度で色変化が作用するシステムだった. ユーザの動作に対してバーチャルハンドの動作速度を変化させることは, 現実の手の動作量と仮想手の動作量の比率 (C/D ratio) の操作を用いたアプローチから, 重量錯覚の提示に有効であることが明らかになっている [6, 4, 2]. これらの結果より, バーチャルハンドの色変化速度の動的な制御は, ユーザの重量知覚を操作できることを示唆している. しかし, 色変化速度の操作がユーザの重量知覚に与える影響は検討されていない.

そこで本研究では, ユーザの手の動作速度に伴っ

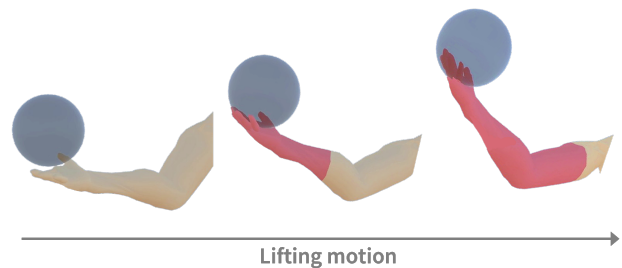


図 1. 本研究におけるバーチャルハンドの色変化システム. オブジェクト持ち上げ動作時に, バーチャルハンドの接触箇所から肩にかけて, 段階的に変色が行われる. 変数 *color ratio* の値によって, 色変化の速度を操作できる.

てバーチャルハンドの色変化速度を操作する重量錯覚提示手法を提案する. 本研究では, バーチャルハンドがオブジェクトに接触した際, バーチャルハンドの接触箇所から手首, 肘, 肩へと段階的に色が変わるシステムを開発した (図 1). 本システムは, 指に加えた圧力の強度に応じて皮膚の血色が段階的に変化する生理現象をメタファとして設計した. 本研究における仮説として, ユーザの動作速度と重量知覚の関係性に基づき [6], 色変化速度の遅い条件がより強い重量錯覚をユーザに誘発させる効果が期待される.

2 システム

本システムは, Unity 2022.3.28f1 を用いて開発した VR アプリケーションを指す. 実験には Meta Quest 3 を用い, Meta XR All-in-One SDK 71.0.0 によるハンドトラッキング機能を実装した.

本システムでは, Unity のシェーダー機能を用いてハンドモデルのマテリアルを段階的に変化させることで, バーチャルハンドの色変化を視覚的に表現した. マテリアルの変化には, Meta XR All-in-One

SDK 71.0.0に含まれる OVRHandPrefab のマテリアルを使用した。本システムでは、バーチャルハンドがオブジェクトに接触した際、ハンドモデルを構成する複数の bone から、接触点に最も近い bone を特定し、その座標を変化の基点として取得する。その後、オブジェクトを垂直方向に押し出す動作に連動し、基点から肩方向へ向かってハンドモデルのマテリアルが順次変化する。このマテリアル変化の速度は、ユーザの手の動作速度に依存して変化する。オブジェクトに対する接触が解除されると、マテリアルの変化量もリセットされる。

本システムでは、変数 *color ratio* を導入し、この変数をマテリアル変化速度に乗算することで、ユーザの手の動作量 d_r に対するマテリアル変化速度の比率を調整可能にした。

この時、バーチャルハンドにおけるマテリアル変化速度 m は、以下の式により算出される。

$$m = d_r \cdot \text{color ratio}$$

同式より、*color ratio* の値を 0.0 に設定することで色変化が発生しない条件を構築できる。

3 ユーザスタディ

本研究では、バーチャルハンドの色変化速度の操作が、ユーザの重量知覚に与える影響を調査した。

3.1 参加者

実験参加者は 20～25 歳の男性 6 名（平均年齢 22.5 歳、左利き 1 名）であった。参加者は情報学系の大学生であり、視力は裸眼あるいは矯正済みだった。また VR の日常的な使用頻度について、5 名は月に数回、1 名はほぼ未経験だった。

3.2 実験デザイン

本研究のタスクは、first scene および second scene の二つの scene から構成される。各 scene において、参加者は前方に配置されたオブジェクトを、約 3 秒間かけて右手で指定距離まで持ち上げる動作を実行した。参加者は、自身の体感時間で 3 秒間を計測し、タスクを実行した。オブジェクトは、押し出し動作実行中のみ移動し、接触が解除されると即座に停止した。その際、一方の scene はバーチャルハンドの色変化が発生しない条件、もう一方は色変化速度が発生する条件で持ち上げ動作を実施した。各参加者は、5 種類の異なる色変化速度に対し、それぞれ 1 回ずつタスクを行う作業を 5 セット（計 25 試行）実行した。各参加者のタスク試行回数は 25 回、全参加者による総試行回数は 150 回であった。

実験における色変化速度は、独立変数 *color ratio* に基づいて設定した。設定した値は事前のパイロットスタディに基づき、1.0×、2.0×、3.0×、4.0×、5.0× の 5 条件とした。

3.3 結果と考察

本研究では、ユーザの動作速度と重量知覚の関係性より [6]、色変化速度が遅い場合ユーザがより強い重量錯覚を知覚するという仮説を設定した。

ユーザスタディの結果、「全タスクを通して、色変化が発生した sessionの方が重く感じた」という意見が得られた。特に、「色変化速度が速いほど、持ち上げたオブジェクトを軽く感じ、色変化が遅く、腕の変色範囲が小さい場合に重く感じた」という意見を得た。ここから、色変化速度の操作が重量知覚に影響を及ぼす可能性が示唆された。一方で、「色変化速度による知覚の違いをそこまで感じなかった」という意見も得られた。

色変化の適用範囲について、「指先から肩まで変色したことで、よりオブジェクトへの重量感を得やすかった」という意見があった。また、色変化の進行が視覚的に明確であったため、色変化速度が速いときに軽さを強く感じたという意見が得られた。従来の手法は、指先から手首までのハンドモデルを使用していたため、色変化の適用範囲を指先から手首までのバーチャルハンドに限定していた [1]。しかし、現実世界における持ち上げ動作において、ユーザは指先だけでなく腕や肩の筋肉を用いた動作を行う。そのため、バーチャルハンドの表示範囲を腕や肩にまで拡張するとともに、色変化の適用範囲を手首から肩にかけて広げることで、より直感的な重量錯覚を提示した可能性を示した。

一方で、色変化の適応範囲について「手先のタスクに集中していたため、肘や肩までの変化に気づきにくかった」という意見もあった。また、持ち上げ距離が短かったことで、色変化による知覚の違いを十分に感じ取れなかったという指摘もあった。本研究で用いた持ち上げ距離は、先行研究と同様 20cm に設定していた [6] が、今後色変化速度の設定に応じて、最適な持ち上げ距離を再検討する必要がある。

本研究は、バーチャルハンドの色変化速度の操作が、ユーザの重量知覚に有意な影響を与える可能性を示した。今後の研究課題として、色変化速度と重量知覚の関係における知覚閾値の定量化、肘・肩までの色変化拡張が知覚に与える影響を明らかにするための適切な評価タスクの設計がある。さらに、本手法を持ち上げ動作を伴う VR アプリケーションに組み込むことで、新たな重量錯覚提示手法としての有用性を検証する。

参考文献

- [1] W. Chen, R. Watanabe, and M. Ito. 手指の色変化と視覚的変形を用いた VR における疑似触覚提示手法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会第 30 回大会論文集 (VRSJ 2025), Tokyo, Japan, 2025. The Virtual Reality Society of Japan.
- [2] L. Dominjon, A. Lécuyer, J.-M. Burkhardt,

- P. Richard, and S. Richir. Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.*, pp. 19–25. IEEE, 2005.
- [3] A. Lécuyer, 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. IEEE, 2000.
- [4] M. S. Moosavi, P. Raimbaud, C. Guillet, J. Plouzeau, and F. Merienne. Weight perception analysis using pseudo-haptic feedback based on physical work evaluation. *Frontiers in Virtual Reality*, 4:973083, 2023.
- [5] 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.
- [6] M. Samad, E. Gatti, A. Hermes, H. Benko, and C. Parise. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2019.