



静止状態における疑似重さ感覚の提示

Perceiving Weight in Stationary Objects: A New Approach to Pseudo-Haptic Illusion

河本舜平¹⁾, サエティア スパット¹⁾, 小池康晴¹⁾

Shumpei KAWAMOTO, Saetia SUPAT, and Yasuharu KOIKE

1) 東京科学大学 工学院情報通信系 (〒226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259,
kawamoto.s.ac@m.titech.ac.jp, saetia@bioif.iir.isct.ac.jp, koike@pi.titech.ac.jp)

概要: 本研究では、手のひらで物体を保持させた状態でも、VR 空間内で重量感を提示する手法の可能性を検討した。従来の C/D 比に基づく手法では、物体が静止している場合、C/D 比がゼロとなるため、質量感を提示できないという制約があった。これを解決するため、本研究では手首が回転バネとして機能するモデルを構築した。その結果、基準質量 500g に対し、 $\pm 132g$ の範囲で重量差を識別できることが示された。
キーワード: 疑似触覚、重さ感覚、クロス・マルチモーダル、拡張・複合現実

1. はじめに

VR において臨場感を高めるためには、使用者が感じる体験を現実近づけることが必要である。VR における視覚や聴覚に関する研究は多く行われているが、触覚といったその他の感覚に関する研究は依然として少ないのが現状である。本研究では、触覚の中でも重さ感覚に注目し、静止状態でも重さ感覚を提示できるシステムを提案する。

本研究で提案するシステムは、これまでの疑似触覚による重さ提示の研究に対して、2つの新規性を有している。1つ目は、従来の持ち上げタスクではなく、手のひらの上に仮想の物体を保持した状態で重さ感覚を提示する点である。2つ目は、力触覚刺激を受けていない点である。先行研究ではコントローラー [1, 2, 3] や物体 (キューブ [4, 5]、棒 [6])、あるいは力触覚提示デバイス [7, 8] を用いて、手に直接的な力触覚刺激を与えていたため、力触覚刺激による体性感覚を視覚刺激でスケールアップする設計が採用されていた。一方、本システムでは、実験中に手が何にも触れておらず、力触覚刺激を一切受けていない環境で重さ感覚を提示しており、視覚情報と体性感覚を用いて重さ感覚を提示する。

2. 関連研究

重さ感覚を提示する方法には、外部デバイスを用いて直接刺激を与える方法と、疑似触覚 (シュードハプティクス) と呼ばれる視覚と触覚のクロスモーダル現象を利用して触覚を疑似的に提示する方法がある。前者はリアルで自然な重さ感覚を提示できる点がメリットであるが、デバイスが高価であっ

たり、動きが制限されたりするというデメリットがある。一方、後者は様々な VR 環境に統合しやすい点がメリットであるが、ユーザーごとに感じられる感覚に個人差が生じるというデメリットがある。

2.1 疑似触覚を用いた力触覚の提示

重さ感覚を疑似触覚を用いて提示する研究の多くは、C/D 比を操作する方法に基づいている。C/D 比は、実際の手の移動距離 (Control) と仮想空間での移動距離 (Display) の比として定義される。この C/D 比を操作することで、重さ感覚を擬似的に提示できる。C/D 比が 1 より大きい場合、仮想の手は実際の手よりも速く動くため、物体が軽く感じられる。逆に、C/D 比が 1 より小さい場合、物体が重く感じられる。しかし C/D 比の操作によって重さ感覚が提示されるのは、物体が動いているときのみであり、静止している状態では重さ感覚が提示されない。

3. 実験

3.1 実験概要

VR 内で仮想の物体を手のひらに乗せて静止させている状態で疑似触覚によって重さを感じるのか、そして感じるならばどの程度の重さを識別出来るのかを実験を通じて確認する。被験者は基準となる質量と比較対象の質量を比べ、どちらが重く感じたかを回答する。タスクで比較する 2つの物体の質量は、片方は基準の質量である 500g、もう片方の比較対象の質量は 200, 400, 450, 500, 550, 600, 800g の 7つの中から 1セットの 14回でそれぞれ 2回ずつになるようにランダムに選ばれる。5セット行うので、比較対象の質量 1つあたり

10 回の回答、合計で 70 回の回答をする。基準の質量と比較対象の質量の順番はランダムであり、被験者は提示されているオブジェクトの質量は知らされなかった。

3.2 被験者

被験者は健康な 19 歳から 24 歳の 15 名で、男性は 13 名、女性は 2 名であった。実験装置の位置関係により、左利きの被験者 2 名も右手で実験を行った。実験の開始前に、実験の目的、手順、期待されるリスクや利益を説明し、文書による同意を得た。

3.3 実験装置

3.3.1 現実の実験装置

実験ではヘッドマウントディスプレイ VALVE INDEX(1440 × 1600 pixels, 視野角 130°, フレームレート 120 fps) を装着し、ヘッドトラッキングを行うために VALVE INDEX ベースステーションを 2 台 (視野角 160° × 115°) 設置した。また、ハンドトラッキングを行うため、Leap Motion Controller 2(視野角 160° × 160°, フレームレート 115fps) を三脚と金属の棒を使って胸の位置に正面を向いた位置で固定した。

机の上には、肘、手首、手のひらの位置を固定するため、高さ 5cm のスポンジ製の土台を 3 つ設置した。この土台は、被験者が肘をついた状態で自然な姿勢をとれるよう、手前奥方向に調整を行った。ただし、左右方向は統一性を保つため、体の中央から右手側に 15cm 離れた位置に固定した。これにより、被験者の姿勢や腕の位置を統一した。

3.3.2 VR の環境

VR 環境は Unity を用いて構築し、物理エンジンも Unity 標準のものを使用した。環境は、机、実験説明用のスクリーン、直方体としてモデル化された手のひらオブジェクト、手首オブジェクト、手のひらに乗せるための立方体オブジェクトで構成されている。手のひらオブジェクトと手首オブジェクトは、回転 1 自由度のバネダンパー関節で接続されており、バネの角度はハンドトラッキングデバイスによって計測された手首と中指の位置から算出された現実の手首角度に基づいている。この角度は、フレームごとに更新される設計とした。また、机オブジェクト、手のひらオブジェクト、立方体オブジェクトはすべて接触判定を持つように設定した。

実験開始前には、VR 内の手のひらの位置を現実の手のひらの位置と一致させるためのキャリブレーションを実施した。実験中、現実の手首はスポンジの土台から動かさないため、キャリブレーション後に VR 内の手首位置の更新は行わなかった。机オブジェクトの位置は、VR の手のひらを水平



図 1 実験における 1 回の試行の流れ

にした際に机オブジェクトより 1cm 高くなるように設定した。タスク中に手のひらの上に乗せられる仮想オブジェクトは、一辺 5cm の黒い立方体で、大きさ、色、材質は一定に保ったまま、質量のみが変化する仕様とした。

3.4 実験手順

実験は 14 回のタスクを 1 セットとし、これを 5 セット繰り返した。セット間には十分な休憩を取り、被験者の疲労を軽減するよう配慮した。

被験者は正面のスクリーンの指示に従ってタスクを進める。タスクの全体の流れは図 1 で示している。非表示のオブジェクトは白、表示されているオブジェクトは黒く描かれている。

4. 結果

4.1 分析方法

サイコメトリック関数のフィッティングを、Treutwein ら [9] が使用していた関数 1 を用いてベイズ推定を行った。

$$p(x) = \gamma + \frac{1 - \gamma - \lambda}{1 + \exp(-\beta(x - \alpha))} \quad (1)$$

使用した事前分布と尤度は以下のとおりである。ただし、以下では質量 M を刺激強度 $x = (M - 500)/100$ として変換している。 $\gamma \sim \text{Beta}(\alpha = 2, \beta = 2)$, $\lambda \sim \text{Beta}(\alpha = 2, \beta = 2)$, $\alpha \sim \mathcal{N}(\mu = 0, \sigma = 5)$, $\beta \sim \text{LogNormal}(\mu = 0, \sigma = 1)$ 。

4.2 全体の結果

サイコメトリック関数のフィッティングは、図 2 に示される通りである。この図から、サイコメトリック関数が右下がりの形状を示しており、全体として被験者が重さの違いを知覚できていることが確認された。また、サイコメトリック関数が 50% となる比較質量を基準質量と等しいと認識した PSE (主観的等位点、Point of Subjective Equality) とすると、その値は 492g であることが分かった。本実験では基準刺激と比較刺激が同一の刺激であったため、PSE が 500g に近い値となったのは予想通りの結果である。

5. おわりに

本研究では、仮想空間内で手のひらの上に物体を乗せて動かさずに保持した状態でも、疑似触覚によって重さ感覚を誘発出来ることを確認した。さらに、重さの識別も行うことが可能であることが分かり、本研究の実験環境では、500g の

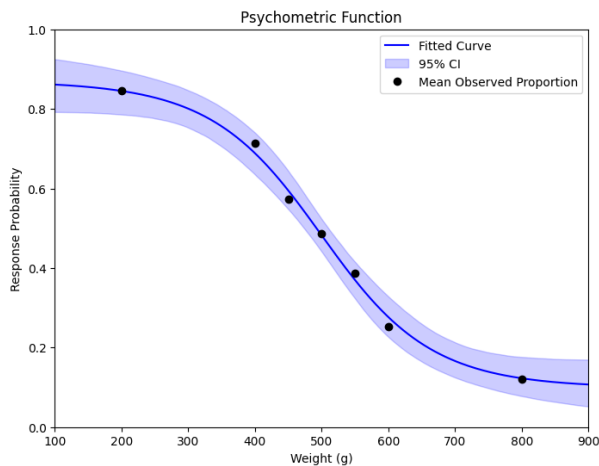


図 2 被験者全体の結果。比較質量に対して、500g の基準質量の方が重いと回答した割合である。

基準質量に対して 132g の差を識別することが出来た。この 132g の差を手首の角度の差に変換すると、6.7 度となった。この結果は、手のひらの上で動かさずに保持するシチュエーションでも重さ感覚が提示出来ることを確認した点と、C/D 比に替わる制御方法を提案した点で VR システムの開発に貢献出来ると考えている。

参考文献

- [1] Maehigashi, A., Sasada, A., Matsumuro, M., Shibata, F., Kimura, A., & Niida, S. (2021). Virtual Weight Illusion: Weight Perception of Virtual Objects Using Weight Illusions. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI EA '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 344, 1–6.
- [2] Hirao, Y., Takala, T. M., & Lécuyer, A. (2020). Comparing Motion-based Versus Controller-based Pseudo-haptic Weight Sensations in VR. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. IEEE, Atlanta, GA, USA, 305–310.
- [3] Rietzler, M., Geiselhart, F., Gugenheimer, J., & Rukzio, E. (2018). Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception using Perceivable Tracking Offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 128, 1–12.
- [4] Taima, Y., Ban, Y., Narumi, T., Tanikawa, T., & Hirose, M. (2014). Controlling fatigue while lifting objects using Pseudo-haptics in a mixed reality space. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*. IEEE, Houston, TX, USA, 175–180.
- [5] Samad, M., Gatti, E., Hermes, A., Benko, H., & Parise, C. (2019). 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* (CHI '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 320, 1–13.
- [6] Jauregui, D. A. G., Argelaguet, F., Olivier, A.-H., Marchal, M., Multon, F., & Lécuyer, A. (2014). Toward "Pseudo-Haptic Avatars": Modifying the Visual Animation of Self-Avatar Can Simulate the Perception of Weight Lifting. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(4), 654–661.
- [7] Dominjon, L., Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M., Richard, P., & Richir, S. (2005). Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005*. IEEE, Bonn, Germany, 19–25.
- [8] Giachritsis, C., Barrio, J., Ferre, M., Wing, A., & Ortego, J. (2009). Evaluation of weight perception during unimanual and bimanual manipulation of virtual objects. In *World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 629–634.
- [9] Treutwein B, Strasburger H.(1999). Fitting the psychometric function. *Percept Psychophys.* Jan;61(1):87-106.