



物体の持ち下げを主体とした動作における重量知覚 Pseudo-haptics 手法の提案

島村 一輝¹, 伴 祐樹¹, 割澤 伸一¹

Kazuki SHIMAMURA, and Yuki BAN, and Yusuke UJITOKO, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, shimamurakazuki@lelab.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: Pseudo-haptics と呼ばれる触覚提示技術を用いた重量提示手法が注目を集めている。一方で、そのほとんどが物体の持ち上げ時に重量提示するものであり、物体を持ち下げる動作によって重量提示可能であるかは明らかでない。我々は従来手法の持ち下げ動作における有効性を検証した後、新たに考案した持ち下げ動作時の重量提示手法の効果について検証する実験を行った。その結果、提案手法の一定の有用性が示された。

キーワード: Pseudo-haptics, 触覚, クロスモーダル

1. はじめに

Virtual Reality (VR) や Augmented Reality (AR) の分野において、触覚が利用される機会が増加している。VR や AR は、体験者が得られる没入感の高さが特徴であり、その没入感をさらに向上させる手段として触覚の利用が注目されているためである。

触覚提示の具体例として、3D Systems 社が開発した Touch X [1] や Diver-X 社が開発した Contact Glove [2] が挙げられる。このようなデバイスを用いる手法は、人体に直接力を加えるためリアリティの高い触覚を提示することができる一方で、用いるデバイスが高価であったり体験者の動きに制限が生まれてしまうといった課題を抱えている。そこで、比較的安価で簡易に触覚を提示する手法として他感覚への刺激により、触覚を疑似的に生起させる手法が注目を集めている。そのような手法の 1 つに Pseudo-haptics と呼ばれる技術がある [3]。この Pseudo-haptics を用いると、視覚情報の操作のみで生起する触覚の変容が可能である。そのため、複雑なアクチュエータを必要とせず簡便に触覚提示が可能である。

Pseudo-haptics とは、身体動作を反映する視覚情報の変調によって疑似的な触力覚を生み出す技術のことである。この技術を用いることで、テクスチャ感 [4]、硬軟感 [5]、重量感など様々な触覚を提示可能であるが、我々はこのうち重量提示を行う Pseudo-haptics に着目した。体験者に身体動作を変調して認識させるという Pseudo-haptics の性質上、体験者が物体を動かすという動作を通じて重量を提示する場合がほとんどである。先行研究では、物体を持ち上げる [6, 7] または横に押す [8] 動作を通じて重量を提示しているものが多い。一方で、物体を持ち下げる動作を通じて Pseudo-haptics により重量提示を行った事例は我々の知

る限りでは存在せず、既存の手法で提示可能であるかは明らかでない。そこで、我々は既存の Pseudo-haptics 手法による重量提示効果を持ち下げ時と持ち上げ時で比較する予備検証を行った。その結果、持ち下げ時の重量提示効果は持ち上げ時に比べて弱く不安定であることが確かめられた。そのため、持ち下げを主体とする動作を通じて重量を提示する Pseudo-haptics の新たな手法を考案し、手法の有効性と既存手法との効果の比較を実験により行った。本稿では、この予備検証と実験の結果について報告する。

2. 予備検証

2.1 概要

予備検証は、従来手法による重量提示 Pseudo-haptics 効果を、持ち下げ動作と持ち上げ動作間で比較することを目的とし、9 人の参加者 (男性 8 名, 女性 1 名, 平均年齢 23.1 ± 1.2 SE) に対して実験を実施した。

2.2 実装

重量提示 Pseudo-haptics とは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着した人が物体を持ち上げる際に、HMD 上で表示される手や物体の位置を現実のそれらの位置とずらして表示することで、体験者が感じる物体の重さを操作する技法のことである。この手や物体の位置のずらし方はこれまで数多くの方法が提案されてきたが、予備検証では一般的な方法の 1 つである C/D 比を用いた方法を採用した。C/D 比とは、現実で動かした距離 (Control) に対する VR 上で表示されている手や物体の移動距離 (Display) の比のことである (図 1)。C/D 比が 1 より小さいときは物体を重く、C/D 比が 1 より大きいときは物体を軽く感じることが確認されている [6]。この手法を物体を持ち下げる動作に適用した際の効果については未検証であり、本検証においてそれを検証する。

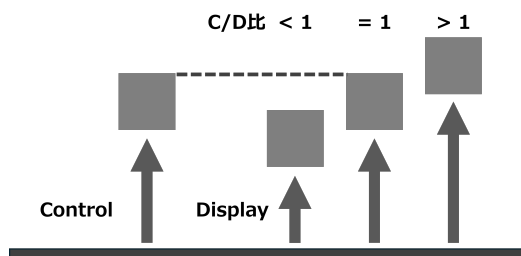


図 1: C/D 比の概念図

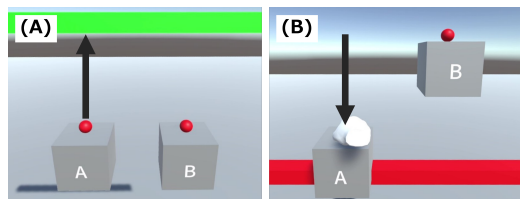


図 2: 実験中の VR 映像. 図中の矢印は動作方向を示す. (A) 動作開始前の持ち上げ条件 (B) 動作終了後の持ち下げ条件

2.3 実験条件

本検証では、タスク中の動作と C/D 比の二要因からなる参加者内計画の実験を行った。タスク中の動作は持ち上げと持ち下げの 2 条件であり、どちらも箱をスタート位置からゴールバーまで垂直に動かす点は共通しているが持ち上げ条件では箱を下から上へ動かすのに対し、持ち下げ条件では箱を上から下へ動かした (図 2)。C/D 比は、0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 の 5 条件であり、1 条件につき 2 つ提示される箱のうち片方の箱の C/D 比は常に 1.0 であった。したがって、全体としては動作と C/D 比の組み合わせからなる 10 条件が存在した。

2.4 タスク・評価指標

参加者はイスに座った状態で HMD (Meta Quest2) を装着し、右手に持ったコントローラーを用いて VR 上の箱を動かした。1 つの条件で箱は 2 つ提示されており (図 2)、左 (A) 右 (B) の順に動かした後「A の箱の重さに比べて B の箱の重さはどのように感じましたか」というアンケートに 1 (非常に軽い) から 7 (非常に重い) までの 7 段階のリッカート尺度で回答した。各条件のタスクを 1 人の参加者に対して 4 回ずつ実行させ、その 4 回のタスクで回答された値の平均を 1 人の実験結果として扱う。

タスク中の箱の動かし方は、始め上段に置いてある箱を把持したあと上部のバーに箱が触れて色が変わるまで持ち上げ (VR 上で 5cm)、少し手前に引いた後持ち下げて (VR 上で 30cm) 下段に置くように実験実施者に指示された。

2.5 結果

全参加者の実験結果の平均と標準偏差を図 3 に示す。また、実験結果の有意性について議論するため統計検定を行った。なお、本稿で報告する統計検定の有意水準はすべて 5% とした。全 10 条件について Shapiro-Wilk 検定により分布

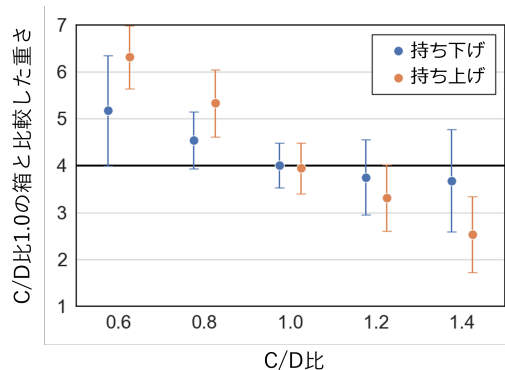


図 3: 実験結果の散布図. 横軸は片方の箱の C/D 比, 青色は持ち下げ, オレンジ色は持ち上げ条件を示す. 縦軸は C/D 比 1.0 の箱と比較した重さを 1 (非常に軽い) から 7 (非常に重い) までの 7 段階で回答した値. プロットされた点は全参加者の平均値であり, エラーバーは標準偏差を示す.

の正規性を確認したところ、持ち下げ - C/D 比: 1.0 の条件において正規分布との差が有意 ($p = 0.001$) であったため、検定手法としてノンパラメトリックなデータに適用可能なものを選択した。

C/D 比が物体の重さ知覚に与える影響について確かめるため、持ち上げと持ち下げそれぞれの条件下において C/D 比について Friedman 検定を行った。その結果、両条件において有意差が認められた (持ち上げ: $p < 0.001$, 持ち下げ: $p = 0.002$)。したがって、持ち上げ動作はもちろんのこと持ち下げ動作においても C/D 比による重量知覚操作は一定程度可能であることが示唆されたといえる。

さらに、動作条件が物体の重さ知覚に与える影響について確かめるため、各 C/D 比条件下において動作条件について Wilcoxon の符号付き順位検定を行った。その結果 C/D 比 1.0 を除く 4 条件について有意差が認められた (C/D 比 0.6: $p = 0.012$, C/D 比 0.8: $p = 0.017$, C/D 比 1.0: $p = 0.683$, C/D 比: 1.2: $p = 0.025$, C/D 比: 1.4: $p = 0.028$)。図 3 に示したそれぞれの値の平均値とあわせて考えると、持ち下げ動作では持ち上げ動作に比べて Pseudo-haptics による重量操作の効果が小さくなっていったといえる。

また、C/D 比が 1 より大きく持ち下げ動作の条件では物体を軽く感じる人と重く感じる人がどちらも存在した。これは持ち上げ条件では見られていない結果であり、従来の C/D 比操作による重量操作が持ち下げ動作では安定して行えないことを示唆している。

3. 提案手法

予備検証により、従来の C/D 比を用いた重量知覚 Pseudo-haptics が持ち下げ動作時は持ち上げ動作時に比べて弱く不安定であることが確かめられた。そこで、我々は持ち下げ動作の前に発生する持ち上げ動作時に Pseudo-haptics により重量提示を行うことで、持ち下げを主体とする動作にお

いて Pseudo-haptics により重量を提示するという手法を提案する。

実際に物体を動かす状況を考えて、持ち下げが主体となる動作であったとしても物体を把持した後の始めの動作は、置いてある物体を持ち上げる動作であることが多いと考えられる。そのため、始めの持ち上げ動作時に先行研究により効果が確かめられている手法を用いて重量提示することで、その後の持ち下げが動作の主体であったとしても体験全体を通して感じる物体の重さ感を Pseudo-haptics により操作できるのではないかと考えた。

4. 実験

4.1 概要

本実験の主な目的は提案手法の有効性を検証することであり、12 人（男性 11 名、女性 1 名、平均年齢 24.2 ± 1.1 SE）の参加者を募って実施した。また、提案手法は予備検証で用いた持ち下げ時の重量提示手法と組み合わせることも可能であり、この組み合わせによってより強い重量操作が可能であるかも副次的に検証した。

4.2 実装

提案手法で想定している持ち上げ動作は、置いてある物体を少し浮かせる程度の短い距離であるため予備検証と同じ手法を用いて重量提示を行う場合、C/D 比を極端に小さく（または大きく）する必要がある。また、VR 上の手を動かす距離は実験条件間でそろえる必要があり、C/D 比が極端に小さい条件で C/D 比が 1 の条件と等距離を持ち上げることが物理的に不可能になりうる。そこで、VR 上の手や物体の位置を現実のものよりも遅延させることによる重量提示手法に着目し、本実験では持ち上げ時にこの手法により重量提示することを試みた。具体的な実装は Kim らの研究 [9] を参考に行った。VR 上の手や物体の位置を操作しているのは高さ方向のみであり、横方向や奥行方向の位置は現実と一致している。毎フレーム VR 上の手や物体の高さ ($y_t^{virtual}$) を式 1 に従って更新していく。現実の高さ (y_t^{real}) と 1 フレーム前の VR 上の高さ ($y_{t-1}^{virtual}$) のズレに係数 d をかけたものを 1 フレーム前の VR 上の高さ ($y_{t-1}^{virtual}$) に足した高さとしている。

$$y_t^{virtual} = y_{t-1}^{virtual} + (y_t^{real} - y_{t-1}^{virtual}) * d \quad (1)$$

4.3 実験条件

本実験は、持ち上げ時の遅延の有無と持ち下げ時の C/D 比の二要因からなる参加者内計画の実験を行った。

持ち上げ時の遅延条件は提案手法の効果を検証するためのものである。遅延がある際は式 1 の $d = 0.05$ であり、遅延が無い場合は $d = 1.0$ であった。遅延がある場合の d の値は、Kim ら [9] の研究において十分に重量操作効果が認められているため 0.05 とした。

持ち下げ時の C/D 比条件は、提案手法と従来手法の組み合わせによってより強い重量操作が可能であるかを検証す

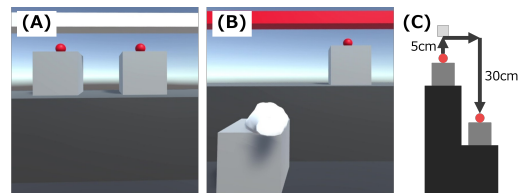


図 4: (A) タスク開始前の VR 映像 (B) タスク中の VR 映像 (C) タスクの動作を横からの視点で示す模式図

るためのものであり、0.7, 1.0, 1.3 の 3 つを設けた。全体としては、遅延条件との組み合わせで 6 条件が存在した。

4.4 タスク・評価指標

参加者はイスに座った状態で HMD (Meta Quest3) を装着し、右手に持ったコントローラーを用いて VR 上の箱を動かした。1 つの条件で箱は 2 つ提示されており（図 4）、参加者は左右の順に動かした後左の箱の重さを 100 としたときの右の箱の重さを回答した。各条件のタスクを 1 人の参加者に対して 3 回ずつ実行させ、その 3 回のタスクで回答された値の平均値を 1 人の実験結果として扱う。

4.5 結果・考察

実験結果を箱ひげ図として図 5 に示す。実験結果の有意性について議論するため統計検定を行ったため、その結果について報告する。なお、有意水準は 5% とした。全 6 条件について Shapiro-Wilk 検定により分布の正規性を確認したところ、遅延なし - C/D 比 : 1.0 の条件で正規分布との差が有意 ($p = 0.015$) であったため、検定手法としてノンパラメトリックなデータに適用可能なものを選択した。

整列ランク変換 (Aligned Rank Transform: ART [10]) を用いた二元配置反復測定分散分析を行った結果、主効果は持ち上げ時の遅延と持ち下げ時の C/D 比についてどちらも有意であり、交互作用は有意ではなかった (遅延 : $F_{1,55} = 46.7, p < 0.001$, C/D 比 : $F_{2,55} = 3.8, p = 0.029$, 交互作用 : $F_{2,55} = 1.6, p = 0.220$)。遅延による主効果が有意であったことから、提案手法により一定の重量知覚を操作が可能であることが示された。

全 6 条件間で ART-C [11] による多重比較を行った結果、既存手法により最も重く感じられていた群である遅延あり - C/D 比 0.7 と提案手法の群である遅延あり - C/D 比 0.7, 1.0, 1.3 の 3 群との差はいずれも有意ではなかった。そのため、既存手法に提案手法を組み合わせることでより強い重量知覚操作が実現できたとはいえない。

ここまでは参加者全体の結果について議論してきたが、個人ごとの結果についても議論していきたい。まず、Pseudo-haptics により重量操作ができていないという状態を定義する。比較する二つの箱が同一である遅延なし-C/D 比 1.0 の回答値を基準とし、その値から 10% 以上回答値が高くなっている条件では重量操作ができていたとする。この定義に基づくと、全 12 人中 4 人の参加者が既存手法である遅延なし-C/D 比 0.7 条件では重量操作ができていなかったが、提案手法である遅延あり-C/D 比 1.0 条件では重量操作ができて

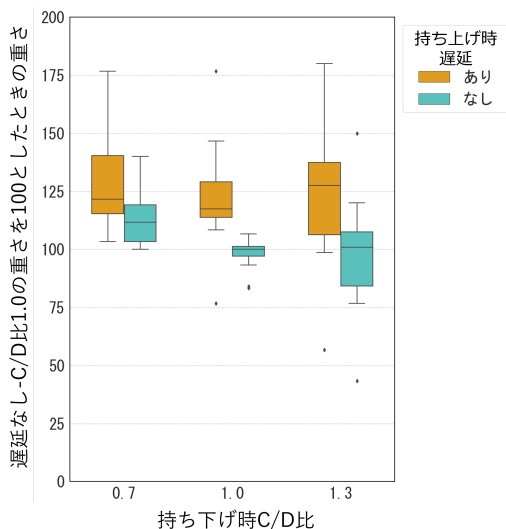


図 5: 実験結果の箱ひげ図。横軸は比較対象の箱の持ち下げ時 C/D 比, オレンジ色は持ち上げ時の遅延が有りの条件, 緑色は遅延がなしの条件を示す。縦軸は基準である遅延なし-C/D 比 1.0 の箱の重さを 100 としたときの各条件の箱の重さを示す。

いた。この結果は、既存手法では知覚重量を操作できなくても提案手法であれば操作できる人の存在を示唆している。また、遅延あり-C/D 比 0.7 条件で重量操作ができていた人は 12 人中 11 人であり、既存手法と提案手法を組み合わせることでより安定して持ち下げを主体とする動作を通じて Pseudo-haptics により重量提示が可能となることが示唆された。

5. おわりに

本稿では、未検証であった持ち下げ動作時の Pseudo-haptics による重量提示に着目し、まず初めに既存の手法が持ち下げ時にも適用可能であるかを確かめるための予備検証を行った。その結果、既存手法を適用しただけでは持ち上げ時に比べて重量提示効果が弱く不安定であることが確かめられた。そのため、持ち下げ時でも重量提示が安定して行える新たな手法が必要であると考え、持ち下げ動作の前に発生する持ち上げ動作時に Pseudo-haptics により重量提示を行うことで、持ち下げを主体とする動作において Pseudo-haptics により重量を提示するという手法を考案した。実験により、本手法が有効であるか、既存手法と比較して優れているか、既存手法との組み合わせでより強い重量提示が可能であるかを検証した。その結果、本手法によは一定の重量提示効果があることが確かめられた。しかし、既存手法に対して一概に優れているとはいえず、既存手法と組み合わせることの効果を裏付ける結果は得られなかった。一方で、既存手法の効果は小さいが提案手法で 10%以上の重量操作が可能であった参加者が 12 人中 4 人確認され、本手法の有用性を示唆する結果も得られた。そのため、既存手法と提案手法を組み合わせることでより多くの人に対して持ち下げを

主体とする動作を通じて Pseudo-haptics により重量提示が可能となると考えられる。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤 B) 「課題番号 21H03478」と「課題番号 23H04333」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 3d systems. touch x ハプティクスデバイス. <https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x>.
- [2] Diver-x. "contact glove our kickstarter project". <https://diver-x.jp/ContactGlove/>.
- [3] Anatole Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39–53, 02 2009.
- [4] Anatole Lécuyer and et al. Feeling bumps and holes without a haptic interface: The perception of pseudo-haptic textures. *CHI '04*, p. 239–246, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.
- [5] A Lecuyer and et al. Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, pp. 83–90, 2000.
- [6] Majed Samad and et al. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proc. of the 2019 CHI*, pp. 1–13, 2019.
- [7] Veronica Weser and Dennis Proffitt. Making the visual tangible: Substituting lifting speed limits for object weight in vr. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 27, pp. 68–79, 03 2019.
- [8] Paul Issartel and al. et. Perceiving mass in mixed reality through pseudo-haptic rendering of newton's third law. In *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 41–46, 2015.
- [9] Jinwook Kim and et al. The effect of multisensory pseudo-haptic feedback on perception of virtual weight. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 5129–5140, 2022.
- [10] Jacob Wobbrock and et al. The Aligned Rank Transform for Nonparametric Factorial Analyses Using Only Anova Procedures. In *Proc. of the SIGCHI*, pp. 143–146, Vancouver, BC, CA, 2011. ACM.
- [11] Lisa A Elkin and et al. An aligned rank transform procedure for multifactor contrast tests. In *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, p. 754–768, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.