



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

# バーチャル物体の大きさが Pseudo-haptics による重さ知覚に与える効果の検証

Examining the Effect of Size of a Virtual Object on Weight Perception by Pseudo-haptics

島村一輝<sup>1)</sup>, 下村祐樹<sup>1)</sup>, 伴祐樹<sup>1)</sup>, 宇治土公雄介<sup>2)</sup>, 割澤伸一<sup>1)</sup>

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

1) 東京大学 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, kshimamura@s.h.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 日本電信電話株式会社 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1, yusuke.ujitoko@gmail.com)

**概要:** Pseudo-haptics は物理的触覚提示デバイスを用いずとも疑似的な触力覚を提示可能な現象として着目されている一方で、その効果の大きさには限界がある。そこで本研究では、バーチャル物体の重さ知覚を操作する Pseudo-haptics の効果向上のため、バーチャル物体の大きさによる重さ手掛かりを提示することで視覚フィードバックの解釈を誘導する手法を提案する。しかし、本稿における実験では物体の大きさによる Pseudo-haptics 効果への有意差は見られなかった。これは、個人間や重さ知覚の操作方向の間で、物体の大きさの及ぼす効果が逆転したためであると考えられる。

**キーワード:** Pseudo-haptics, 触覚, クロスモーダル

## 1. はじめに

Virtual Reality (VR) への注目は年々高まっており、VR を用いたコンテンツも増加している。Head Mounted Display (HMD) を用いた一般的な VR 体験において、視聴覚情報の提示は様々な形で利用されているものの、触力覚は提示する際に HMD 以外のデバイスを用いる必要があることが多いために利用されることが少ない。しかし、触力覚の利用による VR 体験のリアリティ向上が期待されており [1], 複雑なデバイスを用いない触力覚提示手法が望まれている。そこで、Pseudo-haptics と呼ばれる錯覚がその手法の一つとして注目されている。

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錯覚のことである。この錯覚を利用するメリットとして、触力覚を提示する際に、物理的な力を直接提示する必要がないことが挙げられる。具体的な利用例として、VR のボウリングゲームにおいて、Pseudo-haptics を利用したボールの重さ提示により、体験者の感じる臨場感や没入感などが向上したという研究がある [2]。一方で、Pseudo-haptics を利用する上で、その効果の大きさに限界があることや、提示対象者によって効果の感じ方に差があることが課題となっている [3]。そのため、Pseudo-haptics の効果向上や、その効果を感じにくい人に対して有効な提示方法の研究は、Pseudo-haptics を実用化するために非常に重要である。

そこで、本研究では定量的評価のしやすい重さ知覚を操作する Pseudo-haptics に着目し、特に従来手法では Pseudo-

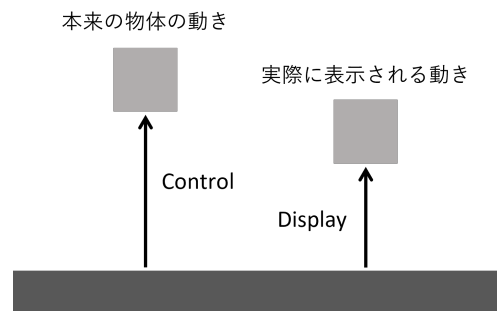


図 1: CD 比 (Display/Control) と物体の動作の関係. Ban (2021) [4] を参考に作成

haptics が生じにくい人を中心に、その効果を向上させることを目的とする。本稿ではその第一段階として、重さ手掛かりとしてバーチャル物体の大きさを変更した際の、Pseudo-haptics によるバーチャル物体の重さ知覚操作への影響を検証する。

## 2. 関連研究

### 2.1 重さ知覚を操作する Pseudo-haptics

HMD を装着した人が物体を持ち上げる際、VR 上で見える手や物体の移動量を実際よりも小さく (大きく) 表示することで、体験者はその物体を実際よりも重く (軽く) 感じることが知られている [5]。このとき、図 1 が示すように本来の移動量 (Control) に対する VR 上で表示される移動量 (Display) の比を CD 比と呼ぶ。この CD 比が 1 より小

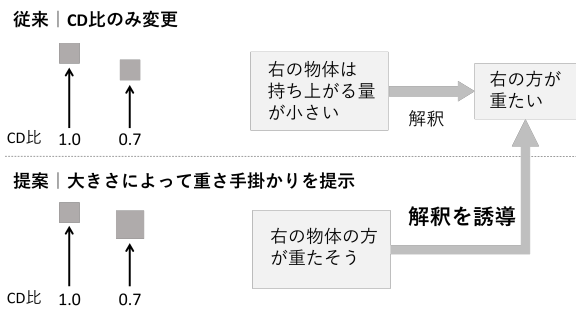


図 2: 物体の大きさにより重さ手掛かりを提示し, CD 比による運動予測と結果の不一致の解釈を誘導

さければ物体を重く, 1 より大きければ軽く感じる。また, VR 上で物体を持ち上げる際に, 同じように手や物体の位置を本来よりも下にずらして表示することで, バーチャル物体の重さ知覚を操作するといった研究も行われている [2]。本研究では, これらの研究をもとにバーチャル物体の重さ知覚を操作する Pseudo-haptics を実装する。

## 2.2 物体の見た目による重さ知覚への影響

物体を持ち上げた際に知覚される重さは, 体積や重さが同一であっても, その物体の表面属性の見え方によって変化することが知られている [6]。また, 物体の重さが同一である場合, その大きさが大きいほど軽く, 小さいほど重く感じるというシャルパンティエ効果が存在し, バーチャル物体において生じた例も存在する [7]。これらの事例から, 本研究においても物体の大きさによってバーチャル物体の重さ知覚が変化することは十分に考えられる。

## 2.3 Pseudo-haptics と他の感覚刺激の組み合わせによる錯覚の強化

Pseudo-haptics では, 身体動作を反映する映像に変化を加える。そのため, タッチパネルで物体を操作する場合など自身の動きと映像が両方見える状況では, 視覚情報の変化に違和感を覚えやすく, Pseudo-haptics の生起確率が低い。伴らは, 指と物体の間にバーチャルなひもを表示することで, 実身体の動きが視認可能な状況における Pseudo-haptics の生起確率を高めた [8]。また, 宇治土公らは, マウスのポインタでなぞった仮想物体の表面の触感を物理振動により提示する際, ポインタを視覚的に振動させることで, 体験者に表面の粗さをより強く感じさせることに成功した [9]。

しかし, これらの例は使用できる状況に制限があるため, Pseudo-haptics 効果を向上させる他の手段についての研究も必要である。

## 3. 提案手法

予備観察により, 2.1 節で述べたような従来の CD 比操作のみによるバーチャル物体の重さ提示では, CD 比操作は知覚できるが Pseudo-haptics は生起しないという人が一定数存在することを確認した。Pseudo-haptics の生起要因の 1 つとして, 「運動予測と知覚された運動結果の不一致が外力として解釈されるため」 [10] というものが知られている。

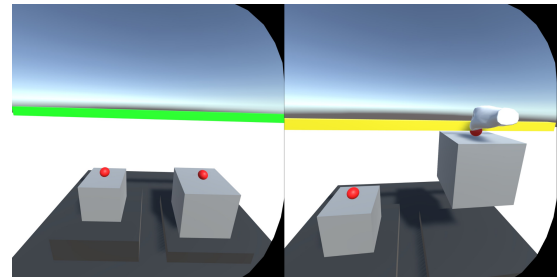


図 3: 実験参加者から見える VR 映像 (左: 持ち上げ前, 右: 持ち上げ後)

そのため, CD 比操作によりバーチャル物体の重さ知覚が変化しない人は, CD 比による運動の予測と知覚の不一致を, 物体の重さにより生じる外力によるものとして解釈できていないのではないかと考えた。そこで本研究では, バーチャル物体の大きさを変化させ, 持ち上げ前に重さを予測させることで, 予測と知覚の不一致を重さによるものとして解釈するように誘導する手法を提案する (図 2)。つまり, 大きな見た目かつ CD 比が小さい物体は重く, 小さな見た目かつ CD 比が大きい物体は軽く感じることを期待される。しかし, シャルパンティエ効果が働くことで, 期待とは逆の結果が得られる可能性も考えられる。

## 4. 実験

### 4.1 実験概要

本実験の目的は, バーチャル物体の重さ知覚を操作する Pseudo-haptics に対して物体の大きさが与える影響を検証することである。

重さ知覚を変化させる Pseudo-haptics の実装のため, バーチャル空間で物体を持ち上げた際に表示される手や物体の移動量 (Display) を, 本来の手の移動量 (Control) に一定のゲイン (CD 比) をかけたものとする手法を用いた。この手法は Samad らの研究でも利用されたものである [5]。ただし, 実験参加者が実際に持ち上げるものとして, 本研究では VR 用のコントローラを用いたのと異なり, Samad らの研究では, 位置をトラッキングするためのセンサを取り付けた箱を用いた。しかし, コントローラを用いた場合であっても, バーチャル物体の重さ知覚を同じく手や物体の位置をずらして表示する Pseudo-haptics により変化させられることが明らかになっている [2]。そのため, 本実験でも CD 比操作による手法を用いて問題ないと判断した。

実験は, 4.2 節で後述する 9 条件で行い, 各条件間でバーチャル物体を持ち上げた際に知覚された重さを比較した。各試行で実験参加者が行うタスクは, 台の上に置かれた図 3 のような 2 つの箱を左, 右の順に持ち上げ, 左の箱の重さを 100 としたときの右の箱の重さを答えるというものであった。また, 実験開始前に箱を持ち上げる動作の練習を行った。

### 4.2 実験条件

本実験で使用する箱は, CD 比 3 条件 (0.7, 1.0, 1.3) と大きさ 3 条件 (一辺が 10.5, 15.0, 19.5 cm の立方体。以降

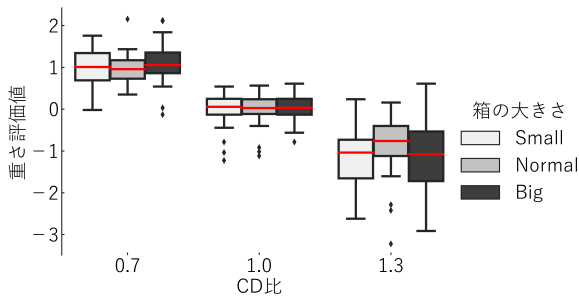


図 4: 各条件における重さ評価値の分布

表 1: CD 比と物体の大きさに関する ART-ANOVA の結果

大きさ	CD比	交互作用
$F_{1,307} = 0.473$	$F_{2,307} = 560$	$F_{4,307} = 2.70$
	■ : $p < .001$ , □ : $p < .05$ , □ :n.s.	

Small, Normal, Big とする) による全組み合わせの 9 条件である。また、箱を持ち上げ始める位置を各条件間で一致させるために、図 3 のように箱の上に持ち手をつけることで箱を持つ位置を限定するとともに、箱の大きさに依らず持ち手の高さが揃うように台の高さを変更した。加えて、物体を上部の線の色が変わるまで持ち上げるように指示することで、VR 上での箱を持ち上げる距離を一定とした。これは、箱を持ち上げる際の実際の手の動く距離の差がバーチャル物体の重さ知覚に与える影響を抑制するためである。また、箱の持ちやすさも重さ知覚に影響することが知られている [7] ため、持ち手の大きさを全条件の箱に対して同一 (半径 3.9 cm) とした。

本実験では、図 3 に示した 2 つの箱のうち左の箱を、CD 比 1.0、大きさ Normal の基準箱とした。対して、右の箱を比較箱とし、試行ごとに CD 比や大きさを変更した。実験参加者 1 人につき、比較箱 9 条件を 4 セット、計 36 試行の実験を行った。また、条件の提示順序はラテン方格法を用いて決定し、順序効果が小さくなるように提示した。

4.3 評価方法

実験参加者が知覚した比較箱の重さを、マグニチュード推定法により評価した。具体的には、実験参加者に、基準箱と比較箱をこの順に持ち上げ、基準箱の重さを 100 としたときの比較箱の重さを口頭で答えるタスクを課した。

4.4 実験参加者

本実験の参加者は、20 代の男性 9 名であった。全員右利きまたは両利きであり、視力に異常はなかった。

4.5 実験結果

今後実験結果として扱う数値は、回答された重さ評価の常用対数を取り実験参加者ごとに Z score に直すことで正規化した値であり、重さ評価値と呼ぶこととする。回答値  $x$  に対して、 $y = \log_{10} x$  と定義し、 $y$  の平均値と標準偏差  $\bar{y}, \sigma$  を用いて、重さ評価値は  $z = \frac{y - \bar{y}}{\sigma}$  で表される。各条件における重さ評価値の分布を箱ひげ図として図 4 に示す。ま

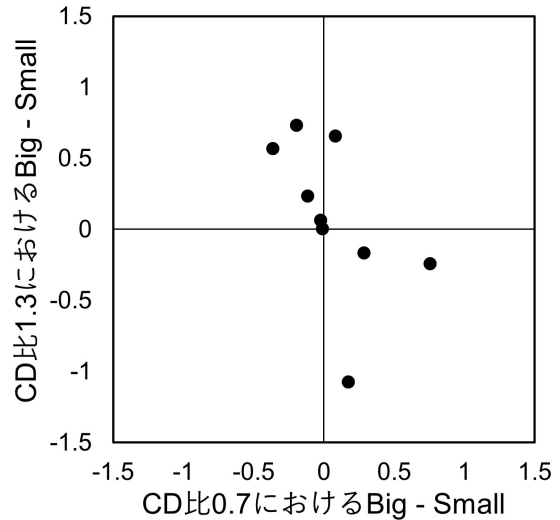


図 5: 箱の大きさによる重さ評価値の変化

た、CD 比および物体の大きさの 2 要因が評価に及ぼす影響を確認するため、重さ評価値に関する統計検定を実施した。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。

実験条件ごとの 9 群のデータについて、Shapiro-Wilk 検定にて正規性を確認したところ、4 群について正規分布との差が有意であった。そのため、ノンパラメトリックなデータにも適用可能な整列ランク変換 (Aligned Rank Transform; ART [11]) を用いた統計検定を行った。ART による二元配置反復測定分散分析の結果を表 1 に示す。分散分析の結果、主効果が CD 比について有意であり ( $p = 0.00$ )、物体の大きさには有意差が認められなかった ( $p = 0.62$ )。また、CD 比と大きさ要因間の交互作用に有意差が見られた ( $p = 0.03$ )。

有意差の見られた CD 比の主効果に関して、Benjamini-Hochberg 補正により多重性を回避した Wilcoxon の符号順位和検定による多重比較を行った。その結果、各群間に有意差が認められ、重さ評価値が最も大きい条件は CD 比 0.7 であり、残りは 1.0, 1.3 の順であった。したがって、CD 比が小さい (大きい) ほどバーチャル物体を重く (軽く) 感じることが確認された。

CD 比と物体の大きさ間に交互作用が認められたため、各要因の単純主効果についても検定を行った。その結果、全大きさ条件下において CD 比による有意な単純主効果が認められた。なお、物体の大きさによる単純主効果はどの大きさ条件でも認められなかった。

また、各実験参加者が、大きさ Big の物体を Small の物体に比べてどの程度重く評価したのかをまとめたグラフを図 5 に示す。このグラフの横軸は、CD 比 0.7 の条件において、重さ評価値を実験参加者ごとに平均し、大きさ Big での平均値から Small での平均値を引いた値であり、縦軸は CD 比 1.3 における同様の値である。つまり、横 (縦) 軸の値が正であることは CD 比 0.7 (1.3) において、大きさ Big の物体が Small の物体に比べて重く評価されたことを示し、

値が負であることは、軽く評価されたことを示す。

#### 4.6 考察

図4や表1が示すように、バーチャル物体の大きさによってその重さ知覚に有意な差が見られなかった理由について考察する。本実験の手法は、物体の大きさによって重さ手掛かりを提示することで、CD比による運動予測と知覚された運動結果の差が重さとして解釈されやすくなるというものである。そのため、重さ手掛かりが無い場合であってもCD比操作によりバーチャル物体の重さを錯覚させられる人には本手法が有効に働きにくいと考えられる。本実験の参加者は、全員CD比操作のみでバーチャル物体の重さを錯覚させられていたため、その大きさによる有意差が見られなかった可能性がある。

また、図5のグラフにおいて、分布している象限により、大きさが重さ知覚に与える影響の傾向が異なる。第1(3)象限に分布している人は、CD比0.7, 1.3の両条件において大きい物体は重く(軽く)感じている。対して、第2(4)象限に分布している人は、CD比1.3のときは大きい物体を重く(軽く)、CD比0.7のときは大きい物体を軽く(重く)感じている。本実験の結果では、2人を除いて第2または第4象限に分布している。このことから、個人内において、物体の大きさが重さ知覚へ与える影響の方向はCD比によって逆転し、個人間において、どちらのCD比でどちらの方向に影響が出るのかが異なるという傾向が示唆される。これは物体の大きさがCD比による予測と結果の不一致を解釈するための要因として働くのか、シャルパンティエ効果として働くのかが人やCD比によって異なっていたためであると考えられる。このことから、バーチャル物体の大きさによって、その重さ知覚を重い、または軽いといったどちらか一方に誘導することは困難であることが示唆される。

また、実験終了後に行った自由回答形式のアンケートでは、バーチャル物体の密度感に関する回答が多く見られた。その中に、「重さを回答する際、密度感と重さ感が混同した」という回答があった。これは、シャルパンティエ効果の生起理由の1つとして考えられていることである[12]ため、実験中にシャルパンティエ効果が働いていた可能性が高い。

#### 5. おわりに

本研究では、重さ知覚を操作するPseudo-haptics効果の向上を目的とし、本稿ではその第一段階として、物体の大きさによる重さ手掛かりの提示という手法についての検証を行った。しかし、この手法により目的の達成はできなかった。その原因として、物体の大きさが、CD比による予測と結果の不一致を重さによるものとして解釈するための要因として働くのか、シャルパンティエ効果として働くのかが体験者やCD比によって異なっていたためと考えられる。シャルパンティエ効果は、物体を持ち上げる前の重さ予測により発生すると考えられている[12]。そのため、持ち上げた瞬間から重さ手掛かりを提示し始めれば、シャルパンティエ効果の発生を抑制しつつ、解釈を誘導できるのでは

ないかと考える。

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」の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] Adilzhan Adilkhanov, et al. Vibero: Vibrotactile stiffness perception interface for virtual reality. *IEEE RA-L*, Vol. 5, No. 2, pp. 2785–2792, 2020.
- [2] Michael Rietzler, et al. Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception Using Perceivable Tracking Offsets. In *Proc. of the 2018 CHI*, CHI '18, pp. 1–12, Montreal, QC, Canada, 2018. ACM.
- [3] Yusuke Ujitoko and Yuki Ban. Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals. *IEEE ToH*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711, 2021.
- [4] Yuki Ban and Yusuke Ujitoko. Pseudo-haptics 効果の個人差要因解明の基礎検討. 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2021.
- [5] Majed Samad, 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.
- [6] 柳澤秀吉, 勇木徳仁. 物体の表面属性に対する視覚的感性が持ち上げ時の体性感覚に与える影響(感覚モダリティの遷移における予測感性). 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 789, pp. 1913–1924, 2012.
- [7] Veronica Weser and Dennis R Proffitt. Making the Visual Tangible: Substituting Lifting Speed Limits for Object Weight in VR. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 27, No. 1, pp. 68–79, 2018.
- [8] Yuki Ban and Yusuke Ujitoko. Enhancing the Pseudo-Haptic effect on the touch panel using the virtual string. In *2018 IEEE HAPTICS*, pp. 278–283, 2018.
- [9] Yusuke Ujitoko, et al. Modulating Fine Roughness Perception of Vibrotactile Textured Surface using Pseudo-haptic Effect. *IEEE TVCG*, Vol. 25, No. 5, pp. 1981–1990, 2019.
- [10] 齊藤寛人. 運動予測に基づく視覚的運動と自己運動との関連性の認知メカニズムについての分析. 2019.
- [11] Jacob O Wobbrock, 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.
- [12] 阿部慶賀. 「重い」と思うことは印象評価を変えるのか—印象評価における重量刺激の主観量と物理量の影響—. *実験社会心理学研究*, Vol. 55, No. 2, pp. 161–170, 2016.