



# アバターへの身体所有感が Pseudo-haptics 効果に与える影響の検討

How the Body Ownership of Virtual Avatars influences Pseudo-haptic Effect

子系卓<sup>1)</sup>, 伴祐樹<sup>1)</sup>, 割澤伸一<sup>1)</sup>

Takashi KOITO, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

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

**概要:** 視覚情報を操作することで擬似的に触覚を感じさせる Pseudo-haptics という錯覚が知られている。しかし、その効果は個人差が大きいことが分かっており、安定性向上が課題である。本研究では錯覚効果に影響する因子として身体所有感に着目し、アバターに対する身体所有感を変化させた際の重量知覚 Pseudo-haptics 効果を測定した。その結果、身体所有感の構成要素のうち「受容成分」「操作成分」が錯覚効果との間に正の相関を有した。これにより、身体所有感は重量知覚 Pseudo-haptics に影響する因子であることが示唆された。

**キーワード:** Pseudo-haptics, クロスモーダル, 身体所有感

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) が広く普及するとともに、VR 体験のリアリティ向上を目的とした触覚の提示が試みられるようになってきている。複数の感覚器がそれぞれ刺激を受ける際、刺激同士が干渉することで知覚が変化するというクロスモーダル錯覚を利用した手法は、複雑になりがちな触覚提示の中で簡易で小型なデバイス実装で済むことが多く、注目を集めている。その中でも特に簡便なものとして、視覚情報の操作のみで触覚錯覚を生み出す Pseudo-haptics という技術が存在する。

Pseudo-haptics は Lécuyer ら [1] によって提唱された現象であり、身体動作を反映するポインタの位置や速度を適度に変化させることで、触力覚提示デバイスなしに擬似的な触力覚をユーザに知覚させることができる。この現象によって、様々な皮膚感覚や深部感覚を提示できることが明らかにされている。Samad ら [2] は、おもりの持った状態で手を上下した時に、現実の手の移動距離と視覚提示した移動距離、つまり入力感度を変化させることで重量知覚が変化することを示した。また、その錯覚効果量について、錯覚無し状態との比較を通して g 単位で定量評価した。このときの入力感度について、入力インタフェースの変位 (Control) と画面上のオブジェクトの視覚的変位 (Display) の比率のことを、Computer-Human Interaction の分野において C/D 比と呼ぶ (図 1) [2]。Pseudo-haptics を用いることで視覚刺激のみで触力覚をユーザに知覚させられるため、視聴覚にくらべて普及が進んでいない触力覚コンテンツを業務用途から教育、娯楽にまで幅広く浸透させることへの一助になることが期待される。

しかし一方で、Pseudo-haptics はある種の錯覚であるた

めにその効果は個人差が大きいことが示されており、実社会で普及させていく上で安定性向上が強く求められている [1]。安定性を向上させるには、まず Pseudo-haptics に影響を与える因子を特定しなければならない。因子としては、体験者の年齢等の個人的な要素や Pseudo-haptics とともに提示される他の五感刺激等の環境的要素が考えられる。例えば、デスクトップ環境においてマウスカーソルをマウスにより操作する際の Pseudo-haptics では、体験者の年齢や性別により錯覚効果が異なることが示唆されている。本研究ではその因子の一つとして身体所有感に着目した。

身体所有感とは、自分の身体部位について、その身体部位が自分に属している感覚のことである。これは自分の体だけでなく、仮想物体に対して生起させることができ、その感覚を身体所有感錯覚 (IVBO) と呼ぶ [3]。

身体所有感の生起要因として、同期が大きな役割を果たすことが分かっている。同期の種類としては時間、空間、形態などが挙げられる。時間的同期とは与えられる刺激が同時であることを指し、自身主導の内部刺激と、他者による外部刺激の同期の双方を含む。空間的同期とは位置や姿勢が正しいかを指し、本来あるべき、意図した通りの場所と角度で対象物が存在するかが関係する [4]。形態的同期とは自身の想定している外見とどれだけ近いかを指す。基本的には、できる限り自身に近いものの方が身体所有感が高い [5]。

身体所有感錯覚は、感じた対象によって体験者に様々な影響を与える。Ogawa らは、球状アバターを使用した場合より、リアルな人の手のアバターを使用した場合の方が、映像内で実際の手の動きとズレた動きを映しても気づきにくいことを示した [6]。

上記の先行研究ではアバターのリアリティによって視覚

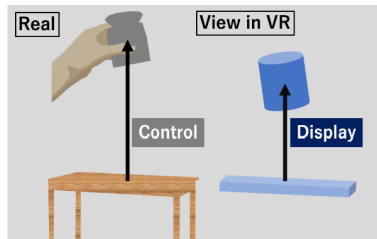


図 1: 重量知覚 Pseudo-haptics の概略図。

に対する信頼度が変化することを示唆している。Pseudo-haptics は実際の入力動作を視覚的に変化させることにより擬似的な触力覚を生起させる。そのため、高いリアリティをもつアバターを用いることにより視覚に対する信頼度が向上することで、Pseudo-haptics における C/D 比操作に気づきにくくなる可能性がある。Pseudo-haptics は提示映像が現実から大きく乖離し違和感を覚えると効果が低減するとの報告があるが、C/D 比操作に気づきにくい場合、提示映像をより大きく操作しても違和感が生起されにくいと考えられる。つまり、リアリティの高いアバターだと C/D 比を大きく変化させることができ、結果として Pseudo-haptics 効果を大きく提示することができる可能性がある。ここで、アバターのリアリティとはアバター外見の自身との類似性のことであるが、アバターと自身の類似性によって変化する感覚として身体所有感が挙げられる。

IVBO と視触覚クロスモーダル効果の関係については研究がすすめられており、Gonzalez ら [7] は棒に触れる映像と振動を提示すると実際に棒に触れていると錯覚する現象について、アバターがある場合は無い場合と比べて錯覚を強く感じingことを示唆した。そのため、アバターに対する強い IVBO の生起がクロスモーダル錯覚の強化に繋がっている可能性があり、視触覚クロスモーダルの一つである Pseudo-haptics においても同様の効果が期待される。

そのため本研究は IVBO が Pseudo-Haptics 効果に与える影響を明らかにすることを目的とする。本稿ではその第一段階として、重さを提示する Pseudo-haptics において C/D 比が一定のとき、アバターへの身体所有感を向上させると Pseudo-haptics 効果も向上するという仮説を検証する。

## 2. 実験方法

### 2.1 設計

Pseudo-haptics 効果の身体所有感による影響を検証するため、アバターを用いて身体所有感を変えながら Pseudo-haptics 効果量の変化を計測する。

### 2.2 条件

実験で提示する Pseudo-haptics の種類としては、主観的等価点を求めることで効果を定量評価できることから、1 章で述べた重量知覚を利用した [2]。

身体所有感を変化させるためのアバター形状として球体、ロボット、ヒトを利用した。これは同目的の先行研究で多く使用されており [5]、現実に対する形状的同期を崩していく

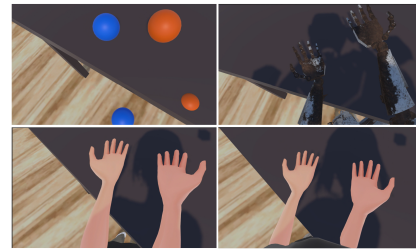


図 2: 実験で使用したアバター。(左上: 球体, 右上: ロボット, 左下: ヒト男性, 右下: ヒト女性)

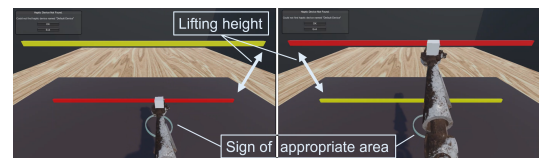


図 3: 提示映像。おもりを上下する際、規定の高さを超えるとバーが赤く光る。水平方向にずれるとリングが紫に光る。

観点から選定されている。アバターに対する身体所有感を十分変化させるため、全身アバターを用いた。その際前腕の角度は Pseudo-haptics 効果に影響する [8] ため、球体アバターは手と肘に球体を配置して角度を知覚可能な形とした。また、性別にあったアバターを利用することで身体所有感が向上することが分かっている [5] ため、男女両方のアバターを用意した。本実験では参加者ごとの性別にあったアバターを利用する。実際の映像ではそれぞれ図 2 のように表示される。また、身体所有感を形状以外の要因でも変化させるため、アバターの手に水平方向のブレを与えた。本実験においては、鉛直方向の移動量操作は Pseudo-Haptics に直接干渉してしまうため加えることができないが、水平方向に関しては、高さ知覚に影響のない範囲であれば Pseudo-Haptics に干渉しないと推察される。これにより位置的同期が崩れ、身体所有感に影響を与えられると考えた。その際、高さの把握が難しくなると Pseudo-Haptics の移動量操作が意味をなさなくなる。そこで、水平方向のブレが高さ知覚に影響しないことの検証実験を行った。4 名を対象とし、モノの持ち上げ動作をした際、ブレの有無で高さへの認識が変化したかを聞き取る形で確認した。以上より、本実験ではアバター 3 種とブレの有無による計 6 条件での検証を行った。

### 2.3 実験システム

提示映像については、Unity を用いて作成した実験シーンをヘッドマウントディスプレイ (HMD) (VIVE, Cosmos Elite) により提示した (図 3)。手の動きのトラッキングには VIVE Tracker (3.0) を利用した。バーの間隔は 0.2 m、おもりは一辺 4 cm の白い立方体であり、手の正しい水平位置を示す半径 4 cm のリングを下方に配置した。

重量提示には、3D Systems 社の TouchX を利用した。Ito らの研究 [9] では提示重量ごとにおもりを用意する必要があり、異なる重さを提示する際に持ち替えが発生してしまう。同じ持ち方のまま高頻度で重量を変化させるという要求を、TouchX を用いて提示重量を遠隔操作することで解決した。



図 4: 実験時の様子.

手で持つおもりと TouchX を接続するため、3D プリンターを用いて一辺 4 cm の立方体状把持部を作成した。

## 2.4 評価項目

Pseudo-haptics 効果の評価には、先行研究 [9] と同様に二重上下法を用いた。この手法では、視覚情報の操作をした場合としていない場合を比較することで、基準重量 (230 g) に対する主観的等価点 (PSE) を測定する。

身体所有感の生起度合いは、先行研究で身体所有感の評価に用いられるアンケートにより評価した [3]。このアンケート項目を主成分分析することで、大きく受容、操作、変化の 3 つに分類できることが確かめられている。受容成分は仮想身体への許容度、操作成分は動作制御の自己帰属感、変化成分は自己認識の変化に関する項目で構成される。

評価項目が偏らないよう、本実験ではその 3 分類から複数項目を引用し、本実験に合う形に改変し和訳した。

## 2.5 実験手順

### 2.5.1 練習タスク

練習タスクはアバターを表示せずに行い、実験参加者は本番タスクで行うおもりの上げ下げと、知覚した重さの比較を試した。初めて HMD を装着する実験参加者もいたため 5 分ほどかけて上下動作の感覚と VR 環境に慣れさせたが、これは円滑に本番タスクを進めることを目的としている。

### 2.5.2 本番タスク

本番タスクの内容は PSE 測定であり、測定には二重上下法を用いた。タスク中、HMD 内では図 3 のような映像が映し出され、1 分間に 55 回のペースで指示音が流れていた。その時の実験参加者の様子を図 4 に示す。実験参加者はまず周囲を見回したり腕を動かすなどして、自身が VR 空間内でどのような状況下にあるのかを把握した。

おもりをもち、上下 2 本のバーの間で利き腕を 3 回上下した。音に合わせて 2 拍で上げて、2 拍で下げるといったテンポで行われた。これを 2 回行い、どちらのおもりが重たく感じたか回答した。以上のタスクを 1 セットとし、二重上下法で定めた基準に達するまでこのセットを繰り返した。セット内 2 回のうち一方は基準である 230 g かつ移動量操作あり (C/D 比 0.8) の提示であり、もう一方は二重上下法で規定された重量を、移動量操作無しで提示された。提示の順番は二重上下法に基づき交互に行われた。これにより、何 g のおもりが 230 g かつ移動量操作ありの基準と釣り合うように感じるのか (PSE) を調査した。PSE が 230 g より大きな値であれば、Pseudo-Haptics 効果によって本来の重さよりも重く知覚したことになり、逆に 230 g より小さな値であれば本来よりも軽く感じたことになる。

表 1: 身体所有感について問う質問とダミーアンケート

Q1	アバターを自分の体のように感じたか
Q2	見ているアバターの部位を、自分の体の一部として感じたか
Q3	アバターに人間らしさを感じたか
Q4	自分の体の形/質感などが変化したように感じたか
Q5	普段と違う体を操作していると感じたか
Q6	自分の見た動きが自身の動きだと感じたか
Q7	自分の見た動きは自身が操作していると感じたか
Q8	酔いのような感覚を抱いたか

## 2.5.3 アンケート

実験参加者は 1 条件の本番タスクが終わるごとにアンケートへ回答した。アンケートには身体所有感を評価するための 7 つの質問と、ダミーである酔いに関する 1 つの質問が記載されており (表 1)、7 段階のリッカート尺度で回答した。項目は 2.4 節で述べたとおり Roth らの研究 [3] を元にした。Q1~Q3 は「受容」、Q4~Q5 は「変化」、Q6~Q7 は「操作」の分類に入る。Q8 はダミーである。

## 2.6 実験参加者

本実験では 17 名の参加者を対象にして行った。内訳は男性 16 名と女性 1 名で、全員 21~22 歳、右利きであった。

## 3. 結果・考察

まず、アバタの種類やブレの提示有無によりアバタに対しての身体所有感が変化したかについて結果を示す。アンケート項目の回答結果を図 5 に示す。ART ANOVA [10] を行った結果、「受容」を評価する全項目の回答はアバター変化、ブレの有無の主効果が有意であった ( $p < .01$ )。一方、「操作」を評価する項目は全てブレの有無のみの主効果が有意 ( $p < .01$ ) であり、「変化」の項目の主効果は有意でなかった。いずれにおいても、交互作用は有意でなかった。以上より、用意したアバタ条件によって身体所有感 (受容成分と操作成分) が変化したことが示唆された。

続いて、各条件下での PSE の結果を図 6 に示す。検定として、IVBO と同様に ART ANOVA [10] を用いた。PSE は実際の重量 (230 g) を超えていたので、Pseudo-haptics 効果は提示できていたと判断できる。しかし、ブレの有無には有意な主効果が見られた ( $p < .01$ ) 一方、アバター間の主効果は有意傾向に留まった ( $p < .1$ )。交互作用は有意でなかった。これは各アバターに対する身体所有感の個人差が大きく、アバター単位では PSE と身体所有感の関係性が判断できないためと推測される。本実験でアバターやブレの条件を用意したのは IVBO が低い状態から高い状態まで、広く満遍なく PSE を測定することで相関を見ることが目的であった。各アバタ条件は多様な IVBO を提示する手段であり、IVBO と PSE の相関をみることにより身体所有感の生起度合いと Pseudo-haptics 効果の関係性を明らかにする。

アンケートの各項目について、スピアマンの順位相関係数を用いて PSE との相関係数を計算した。その結果、受容成分と操作成分に該当する全ての項目について、PSE との間に有意な正の相関が認められた ( $p < .05$ )。一方で変化成分の項目は有意な相関が見られなかった。図 7 には受容を

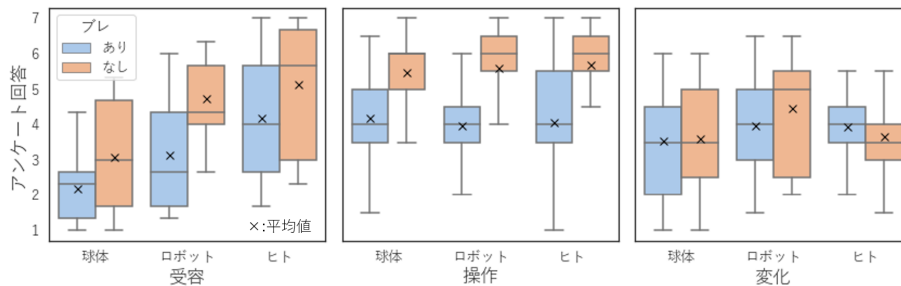


図 5: IVBO の結果。「受容」・「操作」・「変化」それぞれに対応する各項目の回答値を、参加者毎に平均したものの。

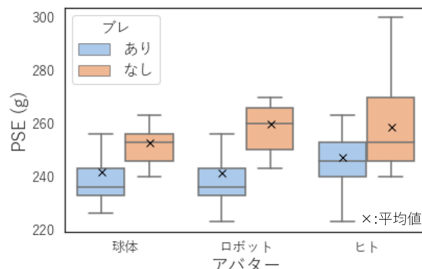


図 6: PSE の結果

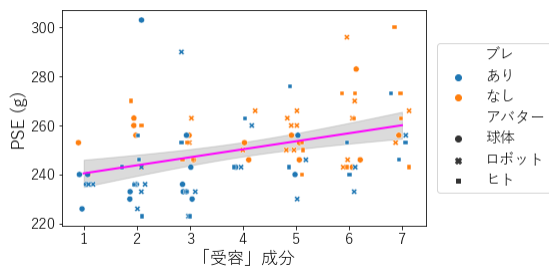


図 7: 「Q2: 見ているアバターの部位を自分の体の一部として感じたか」と PSE の散布図・回帰直線

評価するアンケート項目「Q2: 見ているアバターの部位を自分の体の一部として感じたか」についての散布図と回帰直線が表されている（信頼区間は 95%）。以上の結果より、身体所有感の受容、操作成分の向上が Pseudo-haptics 効果向上に寄与することが示唆された。

#### 4. おわりに

本研究は IVBO が Pseudo-Haptics 効果に与える影響を明らかにすることを目的とし、重量提示 Pseudo-haptics において C/D 比が一定の状態、アバターへの身体所有感を変化させたときの Pseudo-haptics 効果の変動を測定した。実験の結果、身体所有感と Pseudo-haptics 効果の間に正の相関がみられたことから、身体所有感は重量知覚 Pseudo-haptics に影響する因子であることが示唆された。

Pseudo-haptics の効果に対し、従来 C/D 比の変更のみが手段となっていたところに、身体所有感の操作という新しい角度の知見をもたらしたことが本研究の意義だと言える。

本研究では身体所有感の評価手法について主観的であるアンケートのみを利用したが、個人差が大きいというデメリットがある。近年身体所有感の客観的評価手法が報告されており [11]、これらを用いながら他の Pseudo-haptics に対しても実験を行うことで、身体所有感と Pseudo-haptics

効果の相関が一般化可能であるか調査する必要がある。

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] A. Lecuyer, et al. "boundary of illusion": an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. In *Proc. of IEEE VR*, pp. 115–122, 2001.
- [2] Majed Samad, et al. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. *Association for Computing Machinery*, 5 2019.
- [3] Daniel Roth, et al. Alpha ivbo - construction of a scale to measure the illusion of virtual body ownership. Vol. Part F127655, pp. 2875–2883. *Association for Computing Machinery*, 5 2017.
- [4] Marcello Costantini and Patrick Haggard. The rubber hand illusion: Sensitivity and reference frame for body ownership. *Consciousness and Cognition*, Vol. 16, pp. 229–240, 6 2007.
- [5] Jean Luc Lugin, et al. Avatar embodiment realism and virtual fitness training. pp. 225–226. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 8 2015.
- [6] Nami Ogawa, et al. Effect of avatar appearance on detection thresholds for remapped hand movements. *IEEE TVCG*, Vol. 27, pp. 3182–3197, 7 2021.
- [7] Mar Gonzalez-Franco and Christopher C. Berger. Avatar embodiment enhances haptic confidence on the out-of-body touch illusion. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 12, No. 3, pp. 319–326, 2019.
- [8] 茂山丈太郎ほか. アバターの関節角補正による疑似抵抗感提示. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, pp. 369–378, 2017.
- [9] Kenta Ito, et al. The effect of habituation on pseudo-haptics to manipulate weight perception. In *Proc. of Robomech*, pp. 1P1–N12, 2020.
- [10] Jacob O. Wobbrock, et al. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proc. of CHI*, pp. 143–146, 2011.
- [11] 高祖信弘, 三武裕玄, 長谷川晶一. 視触覚干渉効果による身体所有感の客観的評価. *日本バーチャルリアリティ学会大会論文集*, Vol. 25, pp. 3C3–2, 2020.