



# 仮想空間における触感の有無が 大きさ重さ錯覚に与える影響の分析

Size-weight Illusion in VR Space with or without Haptic Feedback

和田洗一<sup>1)</sup>, 笹田明良<sup>1)</sup>, 松室美紀<sup>1)</sup>, 前東晃礼<sup>2)</sup>, 新井田統<sup>3)</sup>, 柴田史久<sup>1)</sup>, 木村朝子<sup>1)</sup>

Koichi Wada, Akira Sasada, Miki Matsumuro, Akihiro Maehigashi, Sumaru Niida, Fumihisa Shibata and Asako Kimura

1) 立命館大学 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

2) 静岡大学 (〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836)

3) KDDI 総合研究所 (〒356-8502 埼玉県ふじみ野市大原 2 丁目 1-15)

**概要**: 大きさ重さ錯覚とは同じ重量でも、大きい物体より小さい物体の方が重く知覚されるという錯覚である。本研究では、触覚フィードバックの差異に着目し、現実空間と仮想空間での大きさ重さ錯覚の発生傾向を検討している。仮想空間における物体の持ち上げ動作を行う際について、以下の3条件で錯覚の発生傾向を比較した: 現実空間, 仮想空間 (現実空間と同じ触覚フィードバック), 仮想空間 (触覚フィードバックなし)。結果, 同じ仮想空間でも触感の有無により異なる傾向となり, 仮想空間における大きさ重さ錯覚の生起には触感が重要な要因であることが示された。

**キーワード**: 大きさ重さ錯覚, 触覚, 現実と仮想の比較

## 1. はじめに

Virtual Reality (VR)技術による五感への刺激提示は、主に視聴覚に頼っており、触覚への刺激提示の質は視覚へのそれと比べ顕著ではない。近年では、この不足を補うため、手持ち型の Transcalibur[1]や、固定型の PHANTOM[2]など、様々な触覚フィードバックのためのデバイスが提案されてきた。一方で、そのようなデバイスの設置、装着なしに触覚フィードバックを与えようと、視覚刺激を用いた錯覚を利用した研究も行われている。

その中でも、pseudo-haptics[3]は盛んに研究されている。実際の手や物体の動きとは異なる動きを視覚的に提示することにより、様々な触覚フィードバックを与えられることが示されている。例えば、Dominjon ら[4]は、ファントムデバイスに接続した実物のボールを用い、実物と仮想のボールの動きの量の比 (Control / Display ratio; C/D 比) を操作した。実験参加者は仮想のボールを見ながら、実物のボールを持ち上げた際に、C/D 比の変化に応じて異なるボールの重さを知覚した。

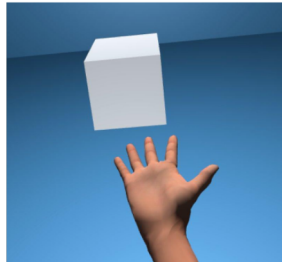
しかし、動き方を操作する以外の視覚刺激を用いた触覚フィードバックの研究は少ない。動き以外、例えば操作対象の見た目により得られる触感を変えることができれば、VR における触覚フィードバックの表現の幅が広がると考

えられる。そこで、我々は重さの知覚に着目し、現実世界で広く生じることが示されている大きさ重さ錯覚を VR での重さの表現に利用できるのではないかと考えた。

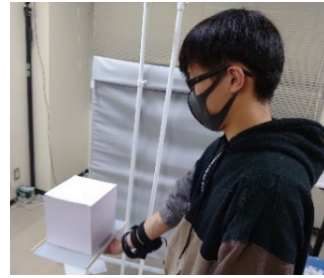
大きさ重さ錯覚とは、同じ重量でも大きい物体より小さい物体の方が重く知覚されるという錯覚であり[5]、中でも Heineken らは仮想空間でも大きさ重さ錯覚が起こることを示している[6]。しかし、この実験では、仮想物体を観察しながら実物体を持ち上げており、実際には触ることができない仮想物体でも同様に錯覚が起こるかは明らかではない。そこで、我々の研究グループでは現実で物体を持ち上げずに、大きさ重さ錯覚が生じるかを検討した[7]。その結果、いくつかの条件を設定したが、全体として見ると仮想空間での大きさ重さ錯覚を観察することはできなかった。しかしながら、実験ではコントローラを握っていることや、仮想空間では手が一軸方向へしか動かないことなどの、現実での持ち上げ動作と乖離する部分も多く、それらが結果に影響した可能性もある。

そこで、本研究では、現実と仮想空間の環境を可能な限り一致させ、統制された状況下で、以下の2点について検討を行った。

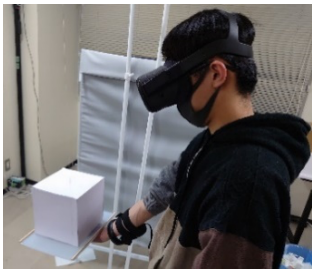
**RQ1**: 現実、仮想空間で同一の触覚フィードバックが与えられた場合、つまり、視覚情報のみが同一の形状の



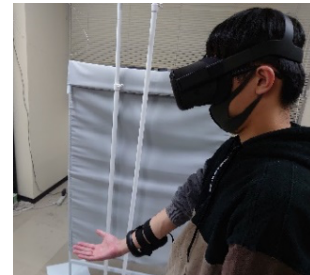
(a) 仮想空間における体験者の視点からの映像



(b) 現実（触覚フィードバックあり）条件



(c) 仮想（触覚フィードバックあり）条件



(d) 仮想（触覚フィードバックなし）条件

図1: 実験環境

仮想物体に置き換えられた時、同じ程度の大きさ重さ錯覚が生じるか？

RQ2: 同じ仮想物体を観察し持ち上げる時の、触感の有無により大きさ重さ錯覚の生起に差異は生じるか？

## 2. 実験

参加者は基準の立方体と比較対象の立方体を順に持ち上げ、基準の立方体を持ち上げた時に知覚する重さを100とし、比較対象の立方体で感じた重さを数値で回答した。

### 2.1 実験条件

第一に、仮想空間(図1(a))と可能な限り仮想空間に近づけた現実空間とで、大きさの重さ知覚への影響にどのような違いがあるかを調べる。そのために、現実の立方体を見ながらその立方体を実際に持ち上げる、現実(触覚フィードバックあり)条件(図1(b))と、仮想の立方体を見ながら現実の立方体を持ち上げる、仮想(触覚フィードバックあり)条件(図1(c))を比較した。そして、仮想空間において触覚フィードバックが重さ知覚に与える影響を調べるため、仮想の立方体を見ながら実際の立方体を持ち上げる、上記の仮想(触覚フィードバックあり)条件と実際には何も持ち上げない仮想(触覚フィードバックなし)条件(図1(d))を比較した。

提示される立方体の辺の長さは、仮想・現実ともに大(5cm)、中(2.5cm)、小(1.75cm)の3種類とした。現実の中、小の立方体は、大の立方体と同じ重さとなるよう調整した。追加のおもりなしと、100g、200gのおもりを追加した、全3種類の重さの立方体(0g, 100g, 200g)を用意し、計9種類の立方体の重さが評価された。ただし、現実の立方体がない場合は重さを変えることができないため、大きさの異なる3種類の立方体の重さが評価された。

基準に用いる立方体は大サイズとし、その重量によって評価に影響がある可能性を考慮し、追加のおもりを100gと200gの2種類とした。また、各立方体の評価は2回ずつ行った。全ての参加者が全ての条件を行ったため、現実、仮想(触覚フィードバックあり)における試行回数はそれぞれ36回であった。また、仮想(触覚フィードバックなし)は6回であり、計78試行を2日に分けて行った。

持ち上げの環境は、VR環境でよく見られる、立方体が空中に浮いている状況にした。この環境に合わせ、現実の立方体が空中に浮いているように見える装置を作成した(図1(a))。持ち上げを行う際に手のひらに触れる立方体の大きさが重さ知覚に影響を与えないよう、手のひらより十分に大きい板を用意し、その上に立方体を載せた。そして、頭上の十分な高さから無色透明の紐を使い、立方体を乗せた板を吊した。

### 2.2 参加者・手順

実験参加者は平均年齢21.8歳( $SD=0.737$ )の15名(男性11名、女性4名)、全員右利きであった。

始めに、実験装置の板の高さの調節、コントローラの装着を行った。参加者の立ち位置の調整の後、仮想条件の場合はキャリブレーションを実施した。その後、まず、基準の立方体の持ち上げを行った。持ち上げの際は、立方体を観察しながら肘を伸ばし、肩の回転で持ち上げるよう指示した。手が肩の高さに到達したら実験者が合図をし、参加者に持ち上げをやめさせた後に、目を閉じて手を下ろすように指示をした。現実の立方体のある条件では、実験者が立方体を手から下ろした後に、参加者に手を下ろさせた。

続いて、評価対象となる立方体を同様に持ち上げ、手を下ろした後に、前者の立方体を持ち上げた時に知覚した重さを100とし、後者の立方体で感じた重さを回答させた。

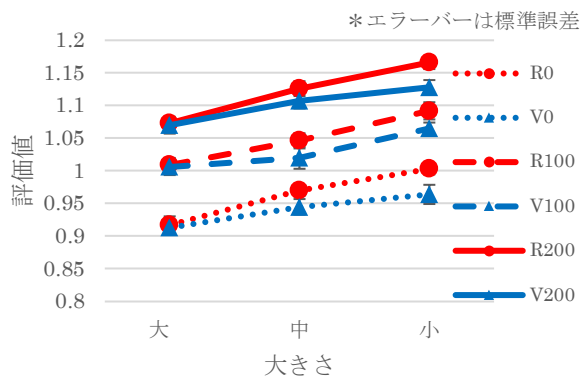


図2: それぞれの条件における重さの評価

以上の試行を、各持ち上げ環境下で各重さを基準として行わせた。持ち上げ環境は参加者間で、基準の重さは参加者内でカウンターバランスを取った。評価対象の立方体は9種類（仮想の場合は6種類）を1セットとし、ランダムな順で提示された。疲労軽減のため、試行間で10秒、セット間で3分の休憩を与えた。

### 2.3 結果

まず、現実、仮想空間で同一の触覚フィードバックが与えられた場合の重さ知覚に関して、現実（触覚フィードバックあり）と仮想（触覚フィードバックあり）における結果を図2に示す。横軸は立方体の大きさ、縦軸は参加者が感じた重さを底を100として対数変換した評価値を表す。各線は、各持ち上げ環境での各基準の重さにおける評価値の平均を示す。現実（触覚フィードバックあり）条件と仮想（触覚フィードバックあり）条件をそれぞれR、Vで、基準の立方体のおもりの重さを数字で表す。各基準の立方体の条件で、実験環境（2: 現実（触覚フィードバックあり）、仮想（触覚フィードバックあり））とおもりの重さ（3: 0g, 100g, 200g）、大きさ（3: 大, 中, 小）を要因とした参加者内での3要因分散分析を行った。その結果、基準の立方体のおもりが100gのとき、2次の交互作用は有意ではなかった ( $F(4,56) = 0.224, p = .920$ ) が、実験環境と大きさの交互作用が有意であった ( $F(2,56) = 7.748, p = .002$ )。単純主効果の分析の結果、いずれの実験環境においても、大きさの単純主効果が有意であった ( $F_s(2,56) > 25.250, ps < .001$ )。Ryan法を用いた多重比較の結果、全てのペアの差が有意であった ( $ps < .050$ )。大よりも中で、中よりも小で、評価値が大きかった。また、大きさ中 ( $F(1,42) = 9.851, p = .003$ ) と小 ( $F(1,42) = 22.061, p < .001$ ) において、実験環境の単純主効果が有意であった。現実において、仮想より評価値が大きかった。大きさ大における実験環境の単純主効果は有意ではなかった ( $F(1,42) = 0.234, p = .631$ )。実験環境 ( $F(1,14) = 12.615, p = .003$ )、重さ ( $F(2,28) = 197.468, p < .001$ )、大きさ ( $F(2,28) = 55.562, p < .001$ ) の全ての主効果が有意であった。重さに関しては、おもりが重いほど評価値が大きくな

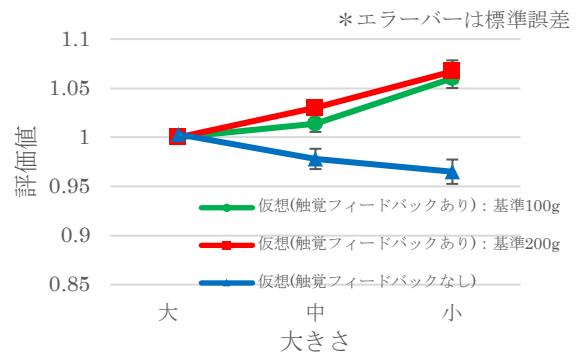


図3: 触覚フィードバックなし条件での重さ評価

なった ( $ps < .050$ )。以上から、立方体が小さいほど重く感じ、さらに、現実の方がその効果が大きかったことが示される。

基準の立方体のおもりが200gのときもほぼ同様の結果であったが、実験環境と重さの交互作用が有意であった点と ( $F(2,56) = 4.578, p = .019$ )、実験環境の主効果が有意ではない点が ( $F(1,14) = 0.004, p = .953$ ) 異なった。いずれの実験環境でも、重さの単純主効果が有意であり ( $F_s(2,56) = 65.334, ps < .001$ )、おもりが重いほど評価値が大きくなった ( $ps < .050$ )。また、おもりが軽いときは仮想の方が評価値が大きくなる傾向があり ( $F(1,42) = 3.864, p = .056$ )、おもりが重い (200g) 時は、現実において評価値が大きくなった ( $F(1,42) = 4.338, p = .043$ )。また、実験環境と大きさの交互作用に関しては、いずれの環境でも立方体が小さくなると評価値が大きくなり (単純主効果  $F_s(2,56) = 45.590, ps < .001$ ; 多重比較  $ps < .050$ )、大きさ重さ錯覚が生じたことが示された。一方、環境により評価値の差が有意であったのは大のみであり ( $F(1,56) = 4.810, p = .033$ )、実験環境による錯覚の差は基準が100gであった時と比べて小さかったと考えられる。

次に、仮想空間において触覚フィードバックが重さ知覚に与える影響に関して分析を行う。仮想（触覚フィードバックなし）では重さが無いため、触覚フィードバックあり条件の基準のおもりと比較対象のおもりが同じ重さの結果と比較を行う。仮想（触覚フィードバックあり）の基準100gと基準200g、仮想（触覚フィードバックなし）における結果を図3に示す。横軸、縦軸は図2と同様である。各線は、各条件における重さの評価値の平均を示す。実験環境（3: 仮想（触覚フィードバックあり）の基準100gと基準200g、仮想（触覚フィードバックなし））と大きさ（3: 大, 中, 小）を要因とした参加者内での2要因分散分析を行なった。その結果、実験環境と大きさの間の交互作用が有意であった ( $F(4,56) = 24.071, p < .001$ )。いずれの実験環境においても、大きさの単純主効果が有意であった ( $F_s(2,56) > 25.250, ps < .001$ )。Ryan法を用いた多重比較の結果、全てのペアの差が有意であった ( $ps < .050$ )。大よりも中で、中よりも

も小で、評価値が大きかった。また、大きさ中 ( $F(2,84) = 14.954, p < .001$ ) と小 ( $F(2,84) = 68.214, p < .001$ ) において、実験環境の単純主効果が有意であった。フィードバックありの2条件において、評価値が有意に大きかった ( $ps < .050$ )。大きさ大における実験環境の単純主効果は有意ではなかった ( $F(2,84) = 0.057, p = .945$ )。

### 3. 考察

本実験では、仮想空間における大きさ重さ錯覚の生起について調べるために、実験を行い、2つのリサーチクエスチョンへの回答を試みた。

**RQ1: 現実、仮想空間で同一の触覚フィードバックが与えられた場合、同じ程度の大きさ重さ錯覚が生じるか?**

持ち上げる対象の立方体を実際に観察するか、同一の仮想物体を観察するかのみを変更した2つの条件で、知覚される重さを分析した。その結果、現実同様に大きさ重さ錯覚が生じることが分かった。ただし、仮想空間での錯覚量は現実空間より小さい傾向があった。よって、RQ1への回答は、現実と同様の触覚フィードバックがあれば仮想空間でも大きさ重さ錯覚が生じるが、その錯覚量は現実よりは小さい、となる。

大きさ重さ錯覚は、視覚的に予想される重さと実際に手を動かして得られる触覚フィードバックの差によって生じるとされている[8]。本実験では、例え仮想物体であっても、その大きさから重さを予測しており、触覚フィードバックによって生じた予測との差異により、大きさ重さ錯覚が生じたと考えられる。また、基準のおもりが100gに比べ200gの場合に、現実空間と仮想空間での錯覚量の差異が小さくなったのは、両条件、特に現実空間での回答の値が小さくなっていたためであると考えられる。基準が重かったため、大きい値を回答しにくかった可能性がある。

**RQ2: 同じ仮想物体を観察し、持ち上げる時に、触感の有無により、大きさ重さ錯覚の生起に差異は生じるか?**

実験の結果、触覚フィードバックを無くした場合、重さが大きさ重さ錯覚とは逆の方向へ知覚されることが分かった。つまり、見た目が大きい物体を重く、小さい物体を軽く知覚していた。視覚的に予想された重さが、手を動かしたときの触覚フィードバックが無かったことによって、そのまま重さの知覚に反映されたと考えられる。

以上より、仮想空間での大きさ重さ錯覚の生起には手への触感提示が重要であることが分かった。しかし、完全に現実と同じ触覚フィードバックを与える必要があるならば、冒頭で述べたような、仮想空間における触覚フィードバックの簡単な拡張には利用しにくい。そのため、今後はどの程度現実と一致した触感が必要なのか、例えば、振動程度の簡易なフィードバックでも十分であるのかに関して検討を進める必要がある。また、触感よりも主観的に物体の重さを感じるということが重要である可能性もある。その場合、触覚フィードバックの代わりに pseudo-haptics を用いても仮想空間で大きさ重さ錯覚が生じることも考えら

れる。これらの点に関しては、更なる検討が必要である。

### 4. むすび

本研究では、仮想空間における触感の有無が大きさ重さ錯覚に与える影響の分析を行った。実験結果から、手への触覚フィードバックがある場合は、仮想物体を観察している場合であっても、現実より弱いもの大きさ重さ錯覚が生じた。一方、仮想物体を観察しながら、手への触覚フィードバックがない場合では、大きさ重さ錯覚と逆、つまり、大きい物体を重く、小さい物体を軽く知覚した。

本研究では、触覚フィードバックありとなしの差異が大きかったため、実験で与えたフィードバックのどの要素が大きさ重さ錯覚の生起に重要であるかまでは明らかにできなかった。そのため、今後はフィードバックに含まれる各要素、物体との接触の知覚や、主観的に重いと感ずることなどが錯覚の傾向にどのように影響するのかを調べる必要がある。

### 参考文献

- [1] SHIGEYAMA, Jotaro, et al. Transcalibur: A weight shifting virtual reality controller for 2d shape rendering based on computational perception model. In: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2019. pp. 1-11.
- [2] MASSIE, Thomas H., et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In: *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*. 1994. pp. 295-300.
- [3] LÉCUYER, Anatole, et al. Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?. In: *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No. 00CB37048)*. IEEE, 2000. pp. 83-90.
- [4] DOMINJON, Lionel, et al. 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, 2005. pp. 19-25.
- [5] CHARPENTIER, Augustin. Experimental study of some aspects of weight perception. *Arch Physiol Normales Pathologiques*, 1891. pp. 122-135.
- [6] HEINEKEN, Edgar; SCHULTE, Frank P. Seeing size and feeling weight: The size-weight illusion in natural and virtual reality. *Human factors*, 2007. pp. 136-144.
- [7] MAEHIGASHI, Akihiro, et al. 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*. 2021. pp. 1-6.
- [8] BUCKINGHAM, Gavin. Getting a grip on heaviness perception: A review of weight illusions and their probable causes. *Experimental brain research*, 2014. pp. 1623-1629.