

物体の透明度による重さ知覚の変化

小笠原 駿*¹ 酒田 信親*¹

The study of weight perception changes with object transparency

Shun Ogasahara*¹ and Nobuchika Sakata*¹

Abstract --- HMD による視覚刺激と触覚などの他の感覚を組み合わせると錯覚を生じることが知られており、幅広く研究されている。この中に、Pseudo-Haptics と呼ばれる技術がある。これは、疑似触覚とも呼ばれ、視覚からの情報を操作することで触覚に錯覚を起こす技術である。そこで本研究では、仮想物体の視覚的な透明度を変えることで知覚する重さに違いが生じるのではないかと考え、透明度と持ち上げたときに知覚する重さは線形的になるのではないかと、という仮説を立て実験を行った。実験の結果、仮説は全面的に支持されなかったものの、持ち上げる物体が軽いときに α 値が大きくなるにつれて重く感じる可能性が示唆された。次に、物体を持ち上げる手法を変更した追加実験では、比較対象の α 値間について差をより感じる手法を調べる実験を行った。その結果、実験した手法の中では本実験の手法が最も差を感じることを示唆された。

Keywords: 重さ知覚、Pseudo-Haptics、透明度、AR

1 はじめに

近年、高性能でありながら安価な頭部装着型ディスプレイ(以下 HMD)の普及により、多くの人々が手軽に仮想現実(以下 VR)や拡張現実(以下 AR)を体験できるようになった。近年、HMD による視覚刺激と触覚などの他の感覚を組み合わせると錯覚を生じることが知られており、幅広く研究されている。この中に、Pseudo-Haptics と呼ばれる技術がある。これは、疑似触覚とも呼ばれ、視覚からの情報を操作することで触覚に錯覚を起こす技術である。例えば、実際の木製の立方体とそれに対応する仮想物体を用いて、実際に持ち上げる移動量に対して仮想世界での移動量を操作すると、知覚する重さに違いが生じるという研究[1]や、仮想物体の大きさ・色・素材を変えることで知覚する重さに違いが生じるという研究[2]がある。そこで本研究では、仮想物体の透明度を変えることで知覚する重さに違いが生じるのではないかと考え、物体の外観に対する視覚的な透明度と持ち上げたときに知覚する重さは線形的になるのではないかと、という仮説を立てた。

2 関連研究

2.1 C/D の操作による重さ知覚の変化

コントローラの動き(Control)と仮想物体の動き(Display)の比(C/D 比)を視覚的に操作することで、物体の知覚重量を誘導・調整する事を試みた研究がある[1]。本手法は、物体を把持する際の手足のレンダリング動作にゲインを適用する。例えば、物体が重く感じられる

ようにしたい場合は C/D 比を < 1 に設定する。

実験 1 では、C/D 比を視覚的に操作することで重さが増加した、あるいは減少したという錯覚的な感覚を被験者に与えられるか検討した。仮説は、C/D 比を 1 より小さい値に設定した立方体は、C/D 比を 1 より大きい値に設定した立方体より重く感じられるというものであった。

重さの錯覚の心理物理的課題における頑強性を調べるため、また C/D 比と錯覚の関係を定量化するため、灰色の立方体の組をランダムに並べて比較し、重い方を選択する二択強制選択実験を行った。被験者は、立方体を目の高さまで持ち上げ、元に戻す動作を指示された。そして重く感じた方を新たな印の位置に置くよう指示された。終了後、被験者はアンケートに回答した。

回答を分析したところ、二つの立方体の物理的質量が同じであるにもかかわらず、被験者が重さの違いを識別していたことがわかった。また、これらの平均的な応答に対して心理測定関数を適用した結果、傾きは 0 から有意に離れた負の値であり、C/D 比の増加によって知覚される重量が減少することが示された。

実験 2 は、C/D 比操作をした立方体の重量を推定する実験である。実験 1 の装置に三次元力覚デバイス PHANToM を取り入れ、小さな発泡スチロール製の立方体を取り付けた。被験者は、右手で立方体を把持し 20cm 持ち上げる。次に左手で発泡スチロール製の立方体を手に取り、物理的な立方体の質量と一致するまでテーブルの表面に描かれた二つの仮想ボタンを使って PHANToM の質量を 10g 単位で増減させ、三つ目のボタンで記録した。

*1 龍谷大学大学院

*1 Graduate School of Ryukoku University

被験者が PHANToM で調整した質量を C/D 比の関数として見ることで、知覚された質量を分析した。その結果、C/D 比が小さいと立方体が重く感じられ、大きいと軽く感じるというように、立方体の知覚質量は C/D 比操作によって系統的に影響を受けることがわかった。

2.2 VR 内で物体の外観の操作による重さ知覚の変化

仮想物体の外観を操作することで重さの錯覚が現実世界と同様に発生するかを調査した研究がある[2]。重さの錯覚には、同じ重さの大きい物体と小さい物体を比較すると、小さい物体の方を重く知覚する size-weight illusion (SWI) と呼ばれる現象がある[3]。また、同じ重さで色が違う物体を比較すると、明るい色の物体の方を重く知覚する brightness-weight illusion (BWI) と呼ばれる現象[4]や、同じ重さでも金属などの重そうな素材の物体を軽く知覚し、木などの軽そうな素材の物体を重く知覚する material-weight illusion (MWI) と呼ばれる現象がある[5]。この研究では、以下の仮説を検証するため、SWI・BWI・MWI を誘発する三つのシナリオを設定した。

仮説 1 :VR でも現実世界と同じように重さの錯覚が起こる

仮説 2a: VR では現実のような重さの錯覚は起きない
視覚的な物体の重さの違いは知覚されない

仮説 2b: VR では現実のような重さの錯覚は起きない
視覚的な物体の重さは現実とは逆に知覚される

この実験では、C/D 比を操作することで結果の頑強性を検証した。実験に用いた C/D 比のパラメータは 0.4、1.0、1.6 であった。被験者には、まず仮想物体を持ち上げる練習を行ったあと本実験を行った。本実験では、物体の初期位置を VR 環境内で身体から水平方向に 40cm、肩から垂直方向に 30cm 離れた位置に設定し、終了位置は初期位置から垂直方向に 30cm 持ち上げた。大きさ条件では大小の物体を、明るさ条件では白と黒の物体を、素材条件では木と金属の物体を、それぞれ連続的に持ち上げた。被験者は二つの物体を持ち上げた後、どちらの物体が重いと思うかを報告し、その答えに対する確信度を 5 段階(1:まったく自信が無い~5:間違いなく確信がある)で評価した。

VR における BWI と MWI の効果は、現実世界における効果と矛盾することが示された。一方、大きさ条件では、小さい物体が大きい物体よりも有意に重く感じると報告された。このことから、VR における SWI の効果は現実世界と同じであることが示された。さらに、結果の頑強性を調べるため、各条件における三つの C/D 比において重いと報告された物体の総数についてカイ二乗検定を行った結果、明るさ条件と素材条件では有意差はなく、三つの C/D 比の数に差は無いことがわかった。し

かし、サイズ条件では、有意な差が見られた。残差分析の結果、C/D 比 1.6 では、他の C/D 比に比べて重いと報告した大きな物体の数が有意に大きくなった。したがって、VR における SWI は、C/D 比の操作によってのみ影響を受けることが確認された。

3 本実験

3.1 実験設計

関連研究では、仮想物体の外観に対して、大きさ・色・素材の変化で重さ知覚が変わることは確認されたが、透明度に関しての実験は行われていない。そこで、本研究では物体の外観に対する視覚的な透明度を操作した場合の重さ知覚の変化を検証する。

仮想物体の透明度は VR・AR どちらでもできるが、VR だけでなく AR や現実世界での応用も考えて AR で実験を行うこととした。

本実験では、被験者に現実世界の立方体に仮想物体を重量表示させ、その仮想物体の透明度を変更することで重さ知覚にどのような変化が起こるかの実験を行った。

実験時に持ってもらおう対象物の重さは 150g、220g の二つで行った。220g としたのは、途中で休憩を入るとはいえ重すぎると実験中の腕の疲労によって正常に重さ知覚が行えなくなることを考えて、小谷らの研究[6]で使用された 220g から決定した。また、150g としたのは、220g と差を出すことと、VR での応用を考えると、一般的な VR コントローラの中でも軽めの Oculus Quest 2 のコントローラの重さ 150g から決定した。

実験に使用する物体は一辺 6cm の立方体とした。これは、今回の実験のような重さ知覚の違いを調べる研究では立方体を使っている研究が多く、大きさも 6cm あたりで行われている研究が多い[1][4][5]。それを踏まえて事前実験として、一辺 6cm、7cm、8cm の大きさの立方体で数人に実験を行ってもらった結果、大きすぎなければあまり違いはないといった意見や、6cm が良いといった意見があったため、本実験も 6cm で行うこととした。また、この立方体の一辺の太さは、今回の実験ではおもりを立方体の上に乗せる都合上ある程度の強度が必要のため、検討の結果 3mm で行うこととした。立方体の色については、複数の色の条件で実験を実施すると試行回数が膨大になるため、Unity の仮想物体のデフォルトの色である白色で行うこととした。

仮想物体の α 値は 0、85、170、255 の四つを使用した。 α 値とは物体の透明度を表わす 0 から 255 までの 256 段階の数値であり、255 の時は不透明で数値が小さくなるにつれ透明度が上がっていき、0 の時に完全な透明となる。被験者には、 α 値 0 基準で α 値 85、170、255 のときと α 値 255 基準で α 値 0、85、170 のときの 6 パターンで、さらに物体の重さが 150g と 220g の 2 パターン

とし、計 12 パターン持ち上げてもらった。 α 値 0 が基準の場合と α 値 255 が基準の場合の実験を行った理由は、濃い物体から薄い物体に変化したときと、薄い物体から濃い物体に変化したときの重さ知覚の違いを調べるためである。

持ち上げる手法として、被験者には立った状態で右の手のひらを上に向けて手を伸ばし骨盤の高さまで下げてもらう。そして、実験者が対象物(図 1)を被験者の手のひらの上に乗せた後、肩の高さまで上げてもらう。肩の高さまで上げた後、実験者が対象物を回収するという手法とした。ただし、この実験では、重さ知覚の事前実験として、立った状態で対象物を手のひらの上に乗せて持ち上げる、立った状態で対象物を上から把持し持ち上げる、座った状態で机の上に肘を付けたまま対象物を把持し持ち上げるという三つの動作について、数人に対して調査を行った結果、立った状態で対象物を手のひらの上に乗せて持ち上げる手法が最も効果的であったためこの手法を採用している。



図1 持ち上げる対象物

Fig.1 Object to be lifted

実験の評価手法として、被験者には質問内容は同じものの 7 段階のリッカート尺度と 0~100 で回答する VAS 法の 2 つのアンケートに回答してもらった。この二つのアンケートを用意した理由は、まずリッカート尺度は評価できる段階が少ないが被験者への負担は VAS 法より軽く、VAS 法は感覚を細かく評価できるが被験者への負担はリッカート尺度よりも重い。そのため、リッカート尺度が少なくとも VAS 法と同等の結果が出た場合、今後の実験で被験者の負担を軽くしつつ実験を行えると考えたからである。

3.2 実験環境

透明度を変える仮想物体の作成には Unity(2019.4.40f1)を、HMD とコントローラは VIVE Pro2 (図 3.5、解像度: 片目 2448×2448 ピクセル(両眼 4896×2448 ピクセル、視野角: 120°)、物体の位置をトラッキングするために VIVE トラックを、VIVE Pro 2 と Unity で AR 環境を実現するために Vive SRWorks SDK

(0.9.7.1)を使用した。この環境では、トラックの位置座標を用いた仮想物体とカメラ映像にずれが生じていた。これはカメラ映像が遅延していたためであった。この問題を解決するため、仮想物体の動きを実際の動きに対して遅延させカメラ映像と動きがリンクするようにした。また、実験に使用する枠だけの立方体とおもりを入れるための容器を 3D プリンタで作成した。また、図 1 は 3D プリンタで作成した立方体と容器とトラックを組み合わせたものである。

3.3 実験の流れ

まずは被験者に事前アンケートとして、名前、性別、年齢、利き手を Google フォームにて入力してもらった。その後、HMD を装着していない状態で実験の説明と物体を持ち上げる練習を行った。練習後、HMD を装着してもらい、実験を開始する。被験者に手のひらを上に向けて手を伸ばしてもらい骨盤の高さまで下げてもらう。そして、実験者が対象物を立方体の部分に基準となる α 値の仮想物体を重畳表示した状態で被験者の手のひらの上に乗せ、被験者に肩の高さまで上げてもらい、実験者が回収する。その後、仮想物体を比較対象となる α 値に変化させ、同様の動作を行う。これらの動作が終わったら実験者が HMD に PC のデスクトップを表示させて VIVE コントローラを渡し、被験者に基準と比べて比較対象はどう感じたかアンケートに回答してもらった。アンケートに入力後、同様の動作を繰り返してもらった。そして、重さを変えるタイミングで十分な休憩をとってもらった。休憩が終わったら休憩前と同様の動作を行ってもらい、12 パターン終了後、自由コメントに入力してもらい実験を終了した。実験の様子を図 2(左図)に、被験者が見ている景色を図 2(右図)に示す。本実験には 20~24 歳の男性 16 名が参加した。そのうち 15 名が右利き、1 名が左利きであった。



図2 実験の様子(左図)と被験者に与える映像(右図、

左上: $\alpha=0$ 、右上: $\alpha=85$ 、左下: $\alpha=170$ 、右下 $\alpha=255$)

Fig.2 The condition of the experiment (left) and the images given to the subjects (right, top left: $\alpha=0$, top right: $\alpha=85$, bottom left: $\alpha=170$, bottom right $\alpha=255$)

3.4 実験結果

実験の結果を図 3 ~ 図 6 に示す。縦軸は、基準に

対しての比較対象の重さの評価を示し、値が小さいほど軽く、値が大きいほど重いと評価したことを表わしている。また、7段階のリッカート尺度では4のとき、VAS法では50のときに基準と比較対象は同じ重さだと評価したことを表わしている。

まず、基準に対しての比較対象の重さの評価について、1群の片側t検定を有意水準5%で行った。その結果、基準よりも有意に軽いと感じていた条件を青*で、基準よりも有意に重いと感じていた条件を赤*で図中に示す。

次に、基準となる α 値と対象物の重さが同じ場合の比較対象の α 値間についてウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、有意な差が出た条件を黒*で図中に示す。

そして、基準となる α 値と比較対象の α 値が同じ場合の対象物の重さについてウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、有意な差が出た条件を緑*で図中に示す。

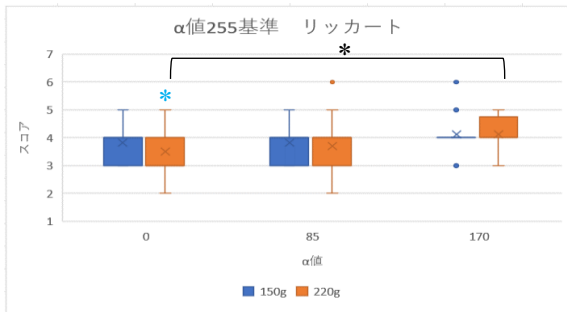


図3 α 値 255 基準での重さ評価のアンケート結果 (リッカート尺度)

Fig.3 Questionnaire results for weight evaluation based on the criterial α -value of 255 (Likert scale)

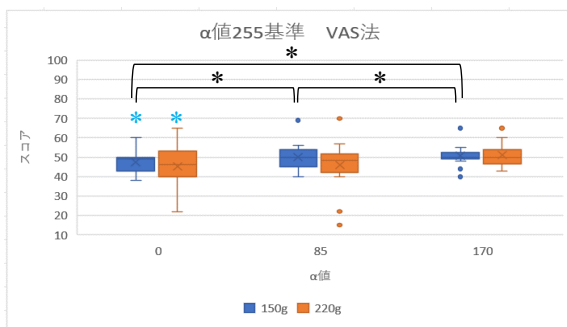


図4 α 値 255 基準での重さ評価のアンケート結果 (VAS 法)

Fig.4 Questionnaire results for weight evaluation based on the criterial α -value of 255 (VAS method)

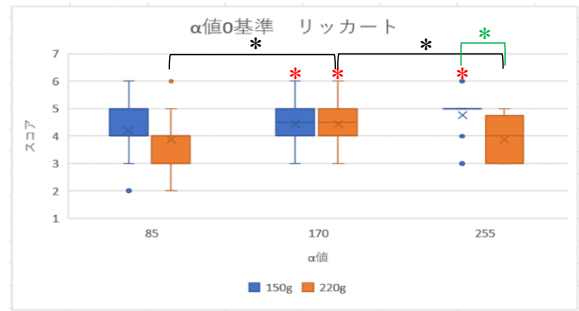


図5 α 値 0 基準での重さ評価のアンケート結果 (リッカート尺度)

Fig.5 Questionnaire results for weight evaluation based on the criterial α -value of 0 (Likert scale)

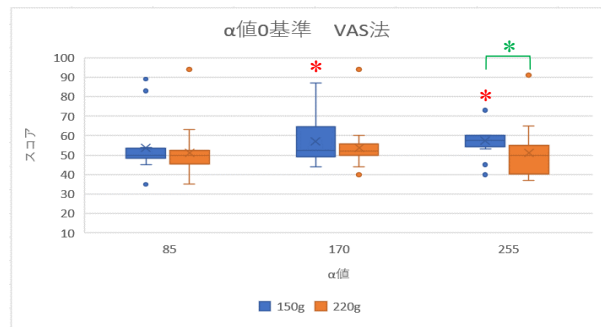


図6 α 値 0 基準での重さ評価のアンケート結果 (VAS 法)

Fig.6 Questionnaire results for weight evaluation based on the criterial α -value of 0 (VAS method)

3.5 考察

検定結果を見ると、一部ではあるものの有意差が出ているため、 α 値が大きいものから小さいものに変えることで軽く感じ、 α 値が小さいものから大きいものに変えると重く感じる可能性が示唆された。しかし、比較対象の α 値間に有意な差が全体的に出ているわけではないため、透明度と持ち上げたときに知覚する重さは線形的になるという仮説は支持されなかった。原因としては、まず自由コメントに、「実験中に酔ってから気持ち悪くなって重くなる気がした」という意見があった。つまり、酔いが結果に影響を与えていた可能性がある。しかし、今回は酔いに関するアンケートをとっていなかったため、被験者はどの程度酔っていたかはわからない。ただし、上記のような意見があったため、今回の実験の休憩は適切ではなく、休憩回数と時間を増やす必要があると考えられる。また、今回の実験では実験者が被験者に対象物を手渡ししていたため、全被験者に対して同じように置くよう努めていたものの、僅かな位置のずれや力の入り具合が結果に影響を与えていた可能性は捨てきれない。さらに、今回の対象物は立方体の上におもりやトラックを積み重ねたため縦長になった。その結果持ち上げる動作中にぐらついてしまうことあった。このぐらつきも結果に影響を与えていた可能性がある。そのため、別の

手法でも実験を行ってみる必要があると考える。

今回、仮説は支持されなかったものの、グラフを見ると 150g のときに比較対象の α 値が大きくなるにつれて重く感じているようにも見える。この傾向は 250g ではほとんど見られない。自由コメントでも、「軽い方が重さが変わった気がする」という意見が複数あった。したがって、対象物が軽いほどグラフは線形に近づく可能性がある。

また、アンケート手法では、評価の段階数が少ないと、例えば VAS 法での評価が 55 であったとき、リッカート尺度では、基準とほとんど変わらないとして 4 にする人や、基準と同じではないとして 5 にする人、のように人の性格が影響してしまう可能性が出てきたため、今後は感覚を細かく評価できる VAS 法を用いることが適していると考ええる。

4 持ち上げる手法を変更した追加実験

4.1 目的

本研究の結果を踏まえて、比較対象の α 値間について、差をより感じる手法を調べるため、持ち上げる手法を変更した二つの実験を行った。

追加実験 1: 肘を机につき持ち上げる手法

追加実験 2: 上から把持して持ち上げる手法

また、実験の評価手法として、被験者には VAS 法のみ回答してもらった。

4.2 追加実験 1 の実験設計と実験の流れ

本実験の手法を、肘を机につき持ち上げる手法に変更して実験を行った。流れとしては、まず被験者は机に肘をつき対象物(図 1)を把持する。その後、肘をついたまま対象物を 16cm 持ち上げ[4]、下ろすという手法で行った。実験全体の流れとしては、持ち上げる手法とアンケート以外は本実験と同様の流れで行った。実験には 20~22 歳の男性 8 名が参加した。そのうち 7 名が右利き、1 名が左利きであった。実験の様子を図 7 に示す。

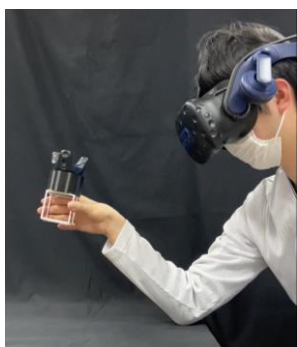


図7 追加実験 1 の様子

Fig.7 The condition of the additional experiment 1

4.3 追加実験 1 の実験結果

実験の結果を図 8、図 9 に示す。基準となる α 値と対象物の重さが同じ場合の比較対象の α 値間についてウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、0 基

準 150g α 値 85 と 255 間に有意差があった。

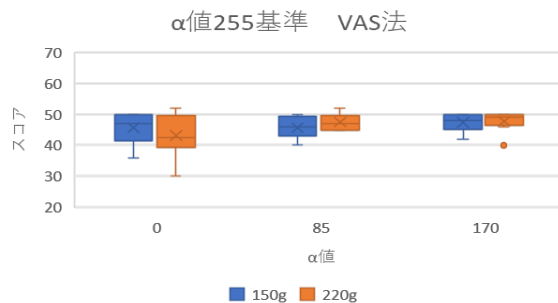


図8 α 値 255 基準での重さ評価のアンケート結果

Fig.8 Questionnaire results for weight evaluation based on the critical α -value of 255

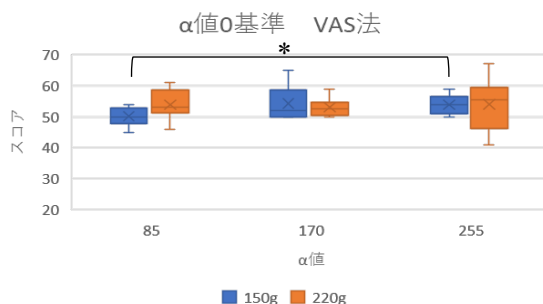


図9 α 値 0 基準での重さ評価のアンケート結果

Fig.9 Questionnaire results for weight evaluation based on the critical α -value of 0

4.4 追加実験 2 の実験設計と実験の流れ

本実験の手法を、上から把持して持ち上げる手法に変更して実験を行った。流れとしては、まず被験者は立った状態で対象物(図 10(左図))を把持する。その後、目の高さまで持ち上げ、下ろすという手法で行った。実験全体の流れとしては、持ち上げる手法とアンケート以外は本実験と同様の流れで行った。実験には 20~22 歳の男性 6 名が参加した。そのうち 5 名が右利き、1 名が左利きであった。実験の様子を図 10(右図)に示す。



図10 追加実験 2 で持ち上げる対象物(左図)と追加実験 2 の様子(右図)

Fig.10 Object to be lifted in additional experiment 2(left) and the condition of the additional experiment 2(right)

4.5 追加実験 2 実験結果

実験の結果を図 11、図 12 に示す。基準となる α 値と対象物の重さが同じ場合の比較対象の α 値間についてウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、どの条件でも有意差は認められなかった。

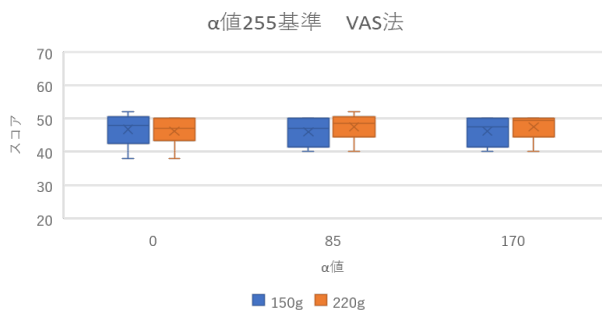


図11 α 値 255 基準での重さ評価のアンケート結果

Fig.11 Questionnaire results for weight evaluation based on the criterial α -value of 255

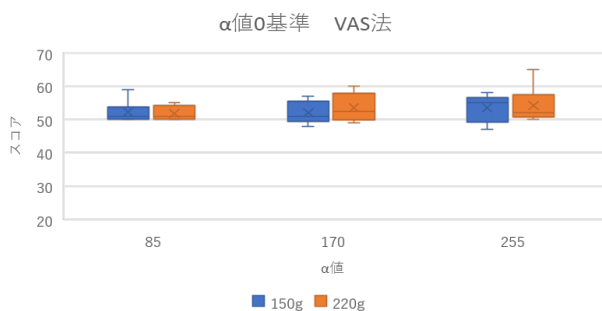


図12 α 値 0 基準での重さ評価のアンケート結果

Fig.12 Questionnaire results for weight evaluation based on the criterial α -value of 0

4.6 考察

追加実験では、追加実験 1 で 1 条件のみ有意差が出た。しかし、本実験ほど比較対象の α 値間について差は出なかった。このことから、実験した手法の中では本実験の手法が最も差を感じると考えられる。しかし、追加実験の被験者数が少ないため、この結果が確かだとは言えない。そのため、被験者の数を増やし再検討を行う必要があると考える。

5 おわりに

本研究では、AR において、現実世界の立方体に仮想物体を重畳表示させ、その仮想物体の透明度を変更することで重さ知覚にどのような変化が起こるかの実験を行った。

基準に対しての比較対象の重さの評価について、1 群の片側 t 検定を行った結果、1 条件でリッカート尺度と VAS 法の両方、1 条件で VAS 法でのみ基準より有意に軽く感じ、2 条件でリッカート尺度と VAS 法の両方、1 条件でリッカート尺度でのみ基準より有意に重く感じて

いることがわかった。

基準となる α 値と対象物の重さが同じ場合の比較対象の α 値間についてウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、3 条件で VAS 法でのみ、3 条件でリッカート尺度でのみ有意な差があり、そのうち 5 条件で比較対象の α 値が大きい方が有意に重く感じていることがわかった。

基準となる α 値と比較対象の α 値が同じ場合の対象物の重さについてウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、1 条件でリッカート尺度と VAS 法の両方有意な差があり、150g の方がより強く「重くなった」と感じていることがわかった。

以上の結果から、透明度を変えることで知覚する重さが変わる可能性は示唆されたものの、透明度と持ち上げたときに知覚する重さは線形的になるという仮説は支持されなかった。

追加実験では、比較対象の α 値間について、差をより感じる手法を調べるため持ち上げる手法を変更した二つの実験を行った。その結果、1 条件で有意差が出たが本実験ほどの差は出なかったため、実験した手法の中では本実験の手法が最も違いを感じると考えられる。

今後は被験者の数を増やし再検討を行う予定である。さらに、持ち上げる対象物を変えて実験を行うことも考えている。

謝辞

本研究の一部は JSPS 研究費(課題番号 21H03483)の助成を受けたものである

参考文献

- [1] M. Samad, E. Gatti, A. Hermes, H. Benko, and C. Parise, "Pseudo-Haptic Weight: Changing the Perceived Weight of Virtual Objects By Manipulating Control-Display Ratio", In Proc. CHI, p.1-13. ACM, 2019.
- [2] Maehigashi, A., Sasada, A., Matsumuro, M., Shibata, F., Kimura, A. and Niida, S, "Virtual Weight Illusion: Weight Perception of Virtual Objects Using Weight Illusions", Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, no. 344, pp.1-6, 2021
- [3] Augustin Charpentier. "Experimental study of some aspects of weight perception", Arch Physiol Normales Pathologiques, vol. 3, pp.122-135, 1981
- [4] De Camp, "The influence of color on apparent weight. a preliminary study.", Journal of experimental psychology, vol. 2, no.5, pp.347-370, 1917
- [5] Gavin Buckingham, Nathalie S. Ranger, Melvyn A. Goodale, "The material-weight illusion induced by expectations alone", Attention, Perception, & Psychophysics, vol. 73, no. 1, pp.36-41. 2011
- [6] 小谷賢太郎, 堀井健, "色彩が与える重量感と安定把持力の関係に関する一考察", 人間工学学会誌, vol.37, no4, pp.185-190, 2001