

視覚的透過による把持物体軽量化の研究

小笠原 駿*1 酒田 信親*1

The study of weight reduction of grasping objects by visual transparency

Shun Ogasahara*1 and Nobuchika Sakata*1

Abstract --- 本研究では、把持物体を視覚的に透過させた場合に軽く感じる現象は「透明である」ということが重要だと考え、「透明時の背景がどのようなものであっても軽く感じる」という仮説を立て実験を行った。実験の結果、仮説は支持されなかったものの、透明化には物体を軽く感じさせる効果がある可能性が示唆された。また、被験者が把持物体は透明であると感じた強さも重さの知覚に影響を与えることが示唆された。今後は、実世界や AR 環境で透明になるカバンを実現したり、本研究で定性的に軽く感じた条件では、定量的にどれだけ軽かったのかを評価することを考えている。

Keywords: 重さ知覚、Pseudo-Haptics、透明、透過、VR

1 はじめに

近年、高性能かつ安価な頭部装着型ディスプレイ(以下 HMD)の普及により、多くの人が手軽に仮想現実(以下 VR)を体験可能になった。また、HMD による視覚情報と触覚などのそ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す技術である。例えば、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[1]や、物体の輝度値を変化させて疲労度を軽減させるという研究[2]がある。

我々は物体の透明度を変化させることで重さ知覚にどのような変化が出るのかを調査した[3]。その結果、物体の外観に対する視覚的な透明度と持ち上げた時に知覚する重さは線形的にはならなかったが、透明時に軽く感じる傾向があることがわかった。そこで本研究では、把持物体を視覚的に透過させた場合に軽く感じるという現象は「透明である」ということが重要だと考え、透明時の背景がどのようなものであっても軽く感じるという仮説を立て実験を行った。

2 関連研究

2.1 VR 内で物体の外観の操作による重さ知覚の変化

Machigashi らは、仮想物体の外観を操作することで重さの錯覚が実世界と同様に発生するかを調査した[1]。重さの錯覚には、同重量の大きな物体と小さな物体を持ち比べると、小さい物体の方を重く知覚する現象

(size-weight illusion (SWI))がある[4]。また、同重量で色が異なる物体を持ち比べると、明色の物体の方を重く知覚する現象(brightness-weight illusion (BWI))[5]や、同重量でも金属など重そうな素材の物体を軽く知覚し、木など軽そうな素材の物体を重く知覚する現象(material-weight illusion (MWI))がある[6]。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、コントローラの動き(Control)と仮想物体の動き(Display)の C/D 比を操作することで結果の頑健性を検証した。被験者は、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 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 持ち上げた位置とした。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、それぞれ連続で持ち上げた。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感じたかを回答し、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:確信している)で評価した。

実験結果より、VR における BWI と MWI の効果は、実世界における効果と矛盾することが示されたが、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

*1 龍谷大学大学院

*1 Graduate School of Ryukoku University

じると報告されたため、VR における SWI の効果は実世界と同じであることが示された。さらに、結果の頑健性を調べるため、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。その結果、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、大きさ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多くなった。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。

2.2 AR での色の変化による疲労度の軽減

Banらは、物体の色を変化させることで知覚する重さを変更し、物体を扱う際の疲労を軽減するシステムを提案した[2]。Web カメラで撮影した画像を、画像処理によって物体の輝度値を変化させた画像に変換し HMD を介して提示する AR システムを構築した。実験 1 では、被験者はテーブルの上に置かれた台に五つの箱を乗せ、さらに元の場所に戻す作業を 5 回指示された。このとき、被験者は HMD を通して提案システムにより白色、灰色、黒色の内の一つに変化された箱を提示された。まず、リファレンスとして灰色条件を行った後、黒条件と白条件で交互に片手で課題を行い、最後に再び灰色条件を行った。評価は VAS 法による主観的評価と筋電位の変化による筋疲労の客観的評価を用いて行われた。その結果、色条件間に有意差があり、白色では主観的にも客観的にもユーザの疲労を抑制可能なことがわかった。

実験 2 では、実験 1 の結果を踏まえて、提案システムはどの程度疲労を軽減するのか、また、同程度の疲労であればどの程度作業可能時間が延びるのかを調査した。この実験の目的は、持ち上げられた物体の明るさを強めたり弱めたりして、反復作業の達成回数を比較することで、本システムの有効性を定量化することである。この実験では、被験者は HMD を装着し、実験 1 と同様に、対象物体の輝度値を変化させた合成映像を視聴した。どの程度疲労を軽減できるかを評価するために、被験者に反復課題を実施してもらい、その達成数をカウントした。被験者は、ダンベルを使った上腕二頭筋カールを、1 分間に 20 回のテンポで、決まったフォームでできる限り続けた。各被験者は異なる条件(白/黒、左手/右手)で 4 回の試行を二日に分けて行った。評価は黒色条件と白色条件の反復回数を比較した。その結果、反復回数の平均値の間には有意差があり、物体の輝度を高くすることで、蓄積する疲労を大幅に軽減可能なことが示された。

3 把持物体を透明化した場合の重さ知覚測定実験

3.1 実験設計

本研究では、把持物体を透明化した際に、背景として見える床の色や素材を変化させ、持ち上げ時の重さ知覚の変化を検証する。

本実験では、被験者に VR 内のカバン(図 1 左)と動きを同期させた実世界のカバン(図 1 右)を持ち上げてもらった。このとき、VR 内のカバンの側面と上面に床の映像を映して擬似的に透明(図 2)にした。疑似的に透明にする方法として、まず目の位置からカバンの角の方向に Ray を発射し、地面と接触する座標を取得する(図 3(1))。このとき、カバンの真上にカメラを配置し Layer 設定でカバンを非表示にしておく(図 3(2))。図 3(2)のカメラ映像から、図 3(1)で取得した 4 点をもとにホモグラフィ変換を行う(図 3(3))。この処理した映像をカバンに配置した Plane に貼り付けることで疑似的に透明にしている(図 3(4))。このような変換をした理由は、実世界で透明になるカバンを実現させることを考えると、実世界ではカバンそのものを透明にはできないため、カメラ映像を処理しディスプレイに映したのを見るという、実世界に近い目目で実験を行うためである。また、同様の理由で実装の関係上残ってしまう枠を考え、VR 内でも枠を表示して実験を行った。



図1 VR 内のカバン(左)と実世界のカバン(右)

Fig.1 Bag in VR (left) and bag in the real world (right)



図2 透明化したカバン

Fig.2 Transparent bag

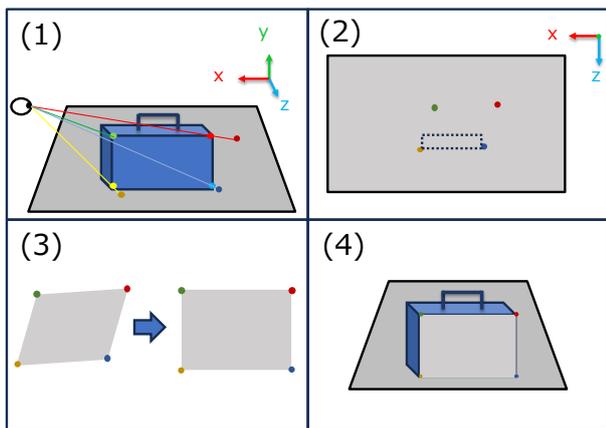


図3 透明化手順

Fig.3 Transparency procedure

実験時に把持させるカバンの重さは 2kg で行った。2kg としたのは、事前実験にて 1kg~10kg で数人に実験を行ってもらった結果、2kg が最も透明と不透明間の差を感じやすい傾向があったためである。また、カバンの大きさは横幅 46[cm]、奥行き 16[cm]、高さ 36[cm]である。

床のテクスチャは Maehigashi らの研究[1]を参考に白色、黒色、木、金属、さらに白色と黒色に格子状に線を追加して床が映っているとわかりやすくしたものを加えた(図4、図5)。木や金属は、事前実験から複数のテクスチャの中から正しく識別しやすく、透明と不透明間の差を感じやすいものを選択した。また、この事前実験の際に最も差を感じやすい傾向があった木条件において、カバンの枠の有無による違いを確認するため、枠が見えないようにした条件も加えた(図6)。この7条件を不透明状態が基準の場合と透明状態が基準の場合の2パターンで行うため、計14条件で実験を行った。

持ち上げる方法として、被験者には床に置かれたカバンを腕を伸ばしたまま持ち上げ、下ろしてもらった。このとき、持ち手部分はしっかり握ってもらった。

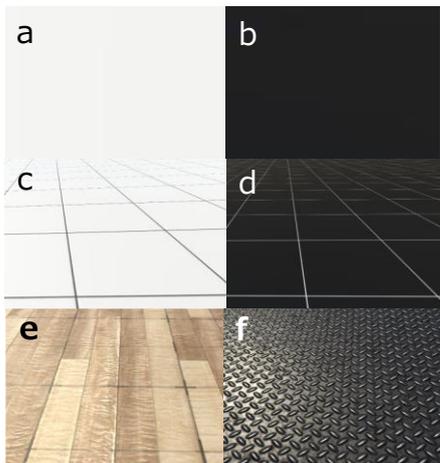


図4 床のテクスチャ

(a: 白, b: 黒, c: 白格子, d: 黒格子, e: 木, f: 金属)

Fig.4 Floor textures (a: white, b: black, c: white grid, d: black grid, e: wood, f: metal)

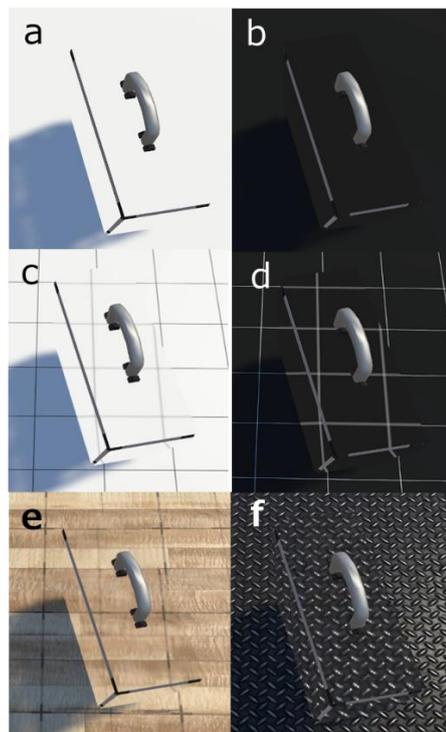


図5 各床テクスチャで透明化したカバン

(a: 白, b: 黒, c: 白格子, d: 黒格子, e: 木, f: 金属)

Fig.6 Transparent bags with each floor texture

(a: white, b: black, c: white grid, d: black grid, e: wood, f: metal)

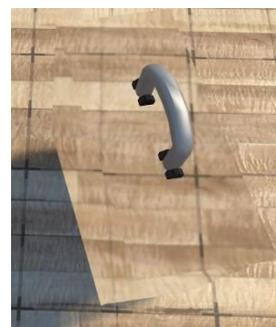


図6 枠が見えないようにしたカバン

Fig.6 Bag with no visible frame

実験の評価方法として、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(1:軽い~7:重い)とVAS法(0:軽い~100:重い)の2つのアンケートに回答してもらった。二つのアンケートを用意した理由は、まず7段階の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回答に関して選択する際の負担は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選択する際の負担はリッカート尺度よりも重い。今後の実験を考えてVAS法かリッカート尺度かのどちらかか絞るため、有意差に違いが生じているかを確認するためである。また、透明化しているとき、そのカバンが透明になっているかを5段階のリッカート尺度(1:感じない~5:感じる)で回答してもらった。

3.2 実験環境

環境の作成には Unity(2019.4.40f1)を、HMD は VIVE Pro2(図7、解像度:片目 2448×2448ピクセル(両眼 4896×2448 ピクセル、視野角:120°)、カバンの位置をトラッキングするために VIVE トラッカをカバンに固定して使用した。また、VR 内でも腕を表示させるため、専用のリストバンドを用いて利き手の手首と肘に VIVE トラッカを装着した(図7)。実世界のカバン(図1右)は3Dプリンタで作成した持ち手とトラッカを段ボールと組み合わせたもので、前述のように VIVE トラッカを取り付けてある。



図7 HMDとVIVEトラッカの装着

Fig.7 Wearing HMD and VIVE Tracker

3.3 実験の流れ

最初に被験者には実験前アンケートとして、名前、性別、年齢、利き手を Google Form にて入力してもらった。その後、実験の説明とカバンを持ち上げる練習を行った。このとき、持ち上げる手は利き手で行う事を指示した。練習後、HMDを装着してもらい、実験を開始した。被験者に基準となる状態のカバンを持ち上げ、下ろしてもらった。その後、比較対象となる状態のカバンを持ち上げ、下ろしてもらった。これらの動作終了後、HMDを外し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、3試行毎に2分の休憩時間をとった。休憩が終わったら前述と同様の動作でカバンを持ち上げ、持ち下げを行ってもらい、14条件終了後、自由コメントに入力してもらい実験を終了した。条件はランダムな順(どの床 or 枠なしか、不透明基準か透明基準か)で提示した。実験の様子を図8(左図)に、被験者が見ている景色を図8(右図)に示す。本実験には21~25歳の男性9名が参加した。そのうち8名が右利き、1名が左利きであった。



図8 実験の様子(左)と被験者に与える映像(右)

Fig.8 The condition of the experiment (left) and the images given to the subjects (right)

4 結果と考察

4.1 実験結果

実験の結果を図9~図11に示す。縦軸は、基準に対するの比較対象の重さの評価を示し、VAS法では50のとき、7段階のリッカート尺度では4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。

基準に対する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、白色条件とカバンの枠なし条件がVAS法とリッカート尺度のどちらにおいても不透明基準と透明基準の両方で有意差が確認できた。また、木条件の不透明基準ではVAS法とリッカート尺度のどちらにおいても有意差が確認でき、木条件の透明基準と黒格子の透明基準ではリッカート尺度でのみ有意差が確認できた。

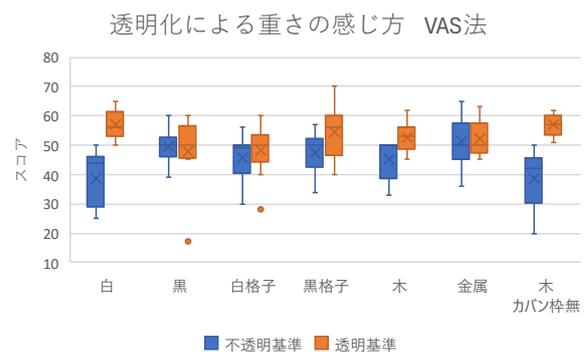


図9 透明化による重さ知覚の変化(VAS法)

Fig.9 Change in weight perception by transparency (VAS method)

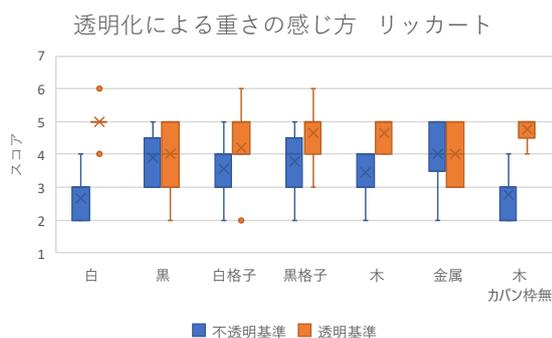


図 10 透明化による重さ知覚の変化(リッカート尺度)

Fig.10 Change in weight perception by transparency (Likert scale)

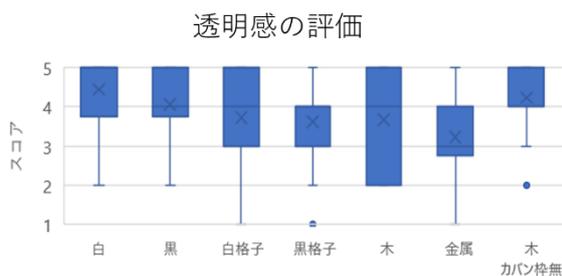


図 11 透明感の評価

Fig.11 Transparency evaluation

4.2 考察

検定結果を見ると、有意差は一部でしか出ていないため、透明時の背景がどのようなものであっても軽く感じるという仮説は支持されなかった。しかし、白色条件では不透明のカバンを持った後に透明化したカバンを持つと軽く感じ、逆に透明化したカバンを持った後に不透明のカバンを持つと重く感じている事から、白色の床で透明化すると強く効果を感じられることがわかった。また、有意差が出ていないものを見ると、明るい色の床の時は暗い色の床の時より軽く感じる傾向がある。また、被験者数が少ないので結果からは有意差がなかったものの暗い色の床でも金属を除き軽く感じているように見えるため、透明化には軽く感じさせる効果がある可能性がある。

床が木のときのカバンの枠の有無を比較すると、枠なしの方が軽く感じていることがわかる。また、透明感の評価においてカバンの枠なしの方が透明感を強く感じており、自由コメントにおいても「線や色の違いがないパターンは、透明化、軽量化を感じやすかった」、「透明感によって没入感が変化し、それに応じて重量の感覚の感じやすさが変わる気がした」という意見が出ていたことから、透明だと感じる強さによっても重さの知覚に差が出ると考えられる。今後の実験としては、本研究で重さ知覚の差を強く感じた条件に絞り、透明化時に不透明化時と同じ重さになったと感じるまで重りを追加する定

量評価を行う予定である。

また、アンケート方法では、リッカート尺度の方が多く有意差が出ており、被験者への負担も VAS 法よりも軽いため、本研究のように基準と比較した感覚に重きを置く場合はリッカート尺度を用いる方が適していると考えられる。

5 おわりに

本研究では、把持物体を視覚的に透過した場合に背景がどのようなものであっても軽く感じるという仮説を立て、VR において透明化したカバンを持ち上げると重さ知覚にどのような変化が起こるかの実験を行った。具体的には、6種類の床条件と、木の床条件でかつカバンの枠が見えないようにした1条件の合計7条件を不透明状態が基準の場合と透明状態が基準の場合で、それぞれ基準刺激と比較刺激を持ち比べることで重さ知覚の変化を調査した。

実験結果より、透明化には物体を軽く感じさせる効果がある可能性が示唆されたものの、有意差は一部でしか出ていないため仮説は支持されなかった。また、どれだけ物体が透明であると感じるかによっても重さの知覚に差が出ると考えられる。今後の実験としては、本研究で重さ知覚の差をより強く感じた条件に絞り、不透明化時と同じ重さになったと感じるまで重りを追加するという定量評価を行う予定である。これらを行い、透明化による重さ知覚に関しての検証を進めていきたいと考えている。

さらに、今後の展開として二つ考えており、一つ目は、実世界で透明になるカバンを再現することである。方法としては、事前にカバンを一定の高さから床に下ろすまでの動画から、床までの距離を紐付けした画像を用意し、距離センサで測定した距離と一致する画像をカバンの上部に取り付けたディスプレイに表示させることで透明を再現しようと考えている。二つ目は、ARで透明になるカバンを再現することである。方法としては、カバンを透過した際の背景領域を生成 AI を用いて背景を重畳表示させることで透明に近い状態を再現しようと考えている。

謝辞

本研究の一部は JSPS 研究費(課題番号 23K21689)の助成を受けたものである

参考文献

[1] 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

- [2] Ban, Y., Narumi, T., Fujii, T., Sakurai, S., Imura, J., Tanikawa, T., and Hirose, M., “Augmented endurance: controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality”. Proc. CHI '13, pp.69-77.
- [3] 小笠原駿, 酒田信親, “透明度による重さ知覚の変化”, VRSJ, vol.26, no.3, pp.62-67, 2023
- [4] Augustin Charpentier. “Experimental study of some aspects of weight perception”, Arch Physiol Normales Pathologiques, vol. 3, pp.122–135, 1981
- [5] De Camp, “The influence of color on apparent weight. a preliminary study.”, Journal of experimental psychology, vol. 2, no.5, pp.347-370, 1917
- [6] 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