

基礎論文

R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響の測定と考察

大嶋 佳奈^{*1} 橋口 哲志^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Measuring and Discussion of the Influence on Weight Perception by R-V Dynamics Illusion

Kana Oshima^{*1}, Satoshi Hashiguchi^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Asako Kimura^{*1}

Abstract --- We discovered the “R-V Dynamics Illusion,” a psychophysical phenomenon caused by the difference between the dynamics of real object (R) and virtual object (V) in mixed reality (MR) space. Previously, we confirmed that the real object is lightly perceived by a MR visual stimulation with a movable portion. In this paper, as a next step, we experiment to measure how much lighter the real mass will be perceived by the MR visual stimulation. In addition, further experiments will be conducted to change the mass of the real object as well as changing the liquid capacity of the CG to see the change in weight perception caused by R-V Dynamics Illusion.

Keywords: Mixed Reality, Sense of Weight, Visual Stimulation, Psychophysical Influence

1 はじめに

現実世界と仮想世界を違和感なく実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術は、これまで幾何学・光学的整合性といった視覚的な融合を中心に研究が行われ、その功績から医療、教育、娯楽など、様々な分野に応用されるようになってきた。

MR 空間では現実世界に存在するものはそのまま利用し、付加させたい情報だけを電子的に生成し、融合することができる。つまり、現実世界に存在する物体への触力覚をそのまま活かせるため、本物の触感を得て、そこに視覚的にのみ電子的なデータを重ね合わせるという用途が考えられる。このとき、単純に触覚にあった仮想物体を重畳描画するだけでなく、実物体とは異なる仮想物体を敢えて重畳描画することで、視覚・触覚双方の感覚が相互に作用し、新たな触感として知覚される場合がある。このような視覚・触覚の相互作用は、知覚心理学、ヒューマンインタフェースの分野でも興味を集めている。

我々の研究グループでは、この MR 技術を利用した視覚・触覚の相互作用・補完作用について研究を行ってきた [1-3]。現実世界と仮想世界を実時間で組み合わせることができるため、例えば現実世界で起こっている現象に CG 映像を重畳描画し、視覚と触力覚感覚の間に意図的に差異を作り出すことが可能となる。

我々は、これまで、このような MR 技術による視覚刺激 (以下、MR 型視覚刺激) が触力覚にどのような影響を与えるのかを系統的に実験、分析してき

た。その一つとして、実物体 (R) と仮想物体 (V) の異なる運動状態に着目した錯覚現象 R-V Dynamics Illusion を発見した [4]。例えば、実物体のケース (剛体) に手の振りに応じて物体内部の液体が揺れる CG 映像を重畳描画することで、液体が揺れているような感覚や物体の重さが軽くなった感覚が得られることを確認した。

これまでは、重畳描画する液体の粘性や容量を変更することで、知覚される重さに影響があるかどうかを確認した。その結果、例えば液体の粘性を低くすることや、液体容量を少なく見せることで実物体の質量よりも軽く知覚されることがわかった。しかし、本錯覚現象の影響により、実際にどの程度質量が軽く知覚されているのかまでは分析していなかった。

そこで本論文では、次なるステップとして R-V Dynamics Illusion を発生させた場合に、実物体の質量がどの程度軽く知覚されているのかを測定し、その結果について述べる。

2 関連研究

そもそも重さは、皮膚の単位面積あたりにかかる圧力や、筋収縮による筋、腱、関節、靭帯の受容器の活動量、運動命令に関する間接的な情報など様々な要因によって知覚される [5-7]。ここでいう間接的な情報とは、例えば物体の大きさや色の明暗などの視覚的情報のことであり、視覚のみの変化で重さを錯覚する R-V Dynamics Illusion の発生要因の一つと考えられる。

間接的な情報が重さ知覚に与える影響が顕著に表れている現象の一つとして Size-Weight Illusion がある [8]。これは、質量が同じ物体でも、物体の

*1 立命館大学大学院情報理工学研究科

*1 Graduate School of Science & Engineering, Ritsumeikan University

容積が小さいものを重く、大きいものを軽く知覚する錯覚現象である。他にも、見た目の材質が重さ知覚に影響することを示した Material-Weight Illusion [9] が知られている。また、人は彩度が高い物体ほど重いと予想すること [10] や、明度が低いものほど重く予想するが実際に物体を持ち上げた場合には、明度が明るいものより軽く知覚されることが示されている [11]。しかし、R-V Dynamics Illusion のように、物体内部に可動物が入っていることによる重さ錯覚については、これまで報告されていなかった。

一方、Pseudo-Haptics [12] は、身体動作とそれを反映した視覚刺激の間の差異によって生じる錯覚現象として著名である。R-V Dynamics Illusion は、身体動作を反映した動的な視覚刺激によって、液体が揺れているような感覚といった疑似力覚が発生しており、Pseudo-Haptics の一種とも言える。しかし、Pseudo-Haptics に関する従来研究において、把持物体の重さ錯覚を扱う事例はほとんど見られない。

我々の研究グループでは、これまでに R-V Dynamics Illusion が発生する条件を確認するために、重畳描画する液体の粘性や容量を変更することで、知覚される重さが変わること [4]、仮想物体の内部を液体から剛体（振り動作に応じて球体が転がる）に代えた場合でも、物体を軽く知覚すること [13]、R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の影響は、お互いに打ち消し合うことなく、加算されること [14] などを明らかにしてきた。

一方で、Size-Weight Illusion に関しては錯覚量を測定する試みがあるが [15-17]、R-V Dynamics Illusion の錯覚量、すなわち R-V Dynamics Illusion によって、具体的にどの程度物体を軽く知覚しているのか、については測定されていない。

R-V Dynamics Illusion の影響を実際の重さとして計測することができれば、どのパラメータが R-V Dynamics Illusion にもっとも影響を与えるのかを比較したり、目標となる重さに錯覚するパラメータ値を求めたりすることができる可能性もある。

そこで、本論文では R-V Dynamics Illusion によって実物体がどの程度軽く知覚されているのかを質量として測定することを目指す。

3 実験目的と準備

3.1 実験目的

本論文の目的は、R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を測定することである。液体の揺れの有無や容量といったMR型視覚刺激のパラメータを変更した際に、どのくらい重さが変わったと錯覚しているのかを、実物体の重さを変更したものと

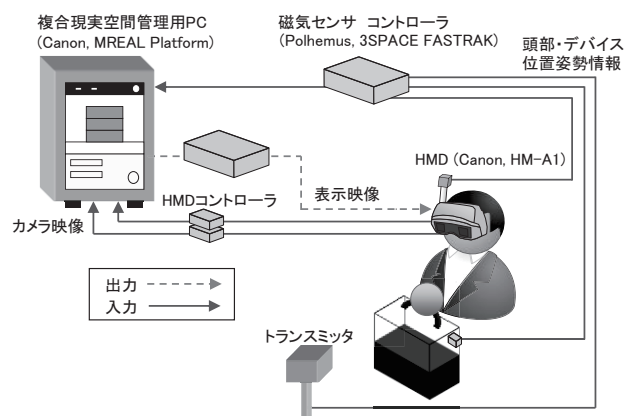


図1 システム構成

Fig.1 System Configuration

比較することで測定し、各パラメータが錯覚に与える影響を分析する。

しかし、実物体の質量を変更することで同錯覚現象が発生しなくなる可能性も考えられる。そこで、まず実験1では、実物体の質量を変更した場合でも R-V Dynamics Illusion が発生するかを確認する。次に実験2では、実物体の重さ、揺れの有無、仮想液体の容量を変更し、各々の条件下において重さの違いがわかる液面容量の弁別閾を確認する。最後に、実験3では、実験2で求めた弁別閾を用いて、R-V Dynamics Illusion によって実物体がどの程度軽く知覚されているのかを測定する。

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で用いるシステムの構成を図1に示す。MR映像提示には、ビデオシースルー型HMD (Canon, HM-A1) および MREAL Platform (Canon, MP-110) を用いる。被験者の頭部と実物体の位置姿勢情報は、磁気センサ (POLHEMUS, 3SPACE FASTRAK) から取得する。被験者がMR空間を観察する際、HMDのカメラキャプチャ画像に対して手の領域を抽出し、その領域をマスキングすることで、手領域にCGが重畳描画されないようにする。本システムは、30fpsで動作しており、予備実験において時間的遅れ・ずれは感じないという意見を聴取している。また、把持物体を振る角度を統一するために、磁気センサから得られる物体の角度情報を用いて、水平を0度とし、左右に30度以上傾けるとビーブ音が通知される。音が鳴ると、すぐに逆方向に振るよう指示しており、ビーブ音が提示される時間はごく短時間である。

【使用する実物体】

被験者が把持する実物体として、幅165×奥行80×高さ90mmの亚克力ケース (300g) を用いる (図2)。実験では、以下に示す3種類の質量の実物体を用いる。

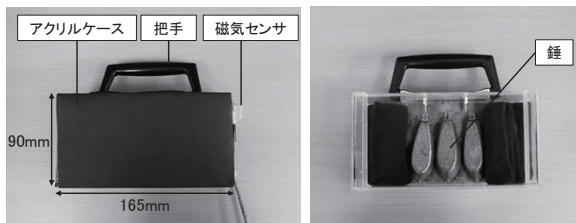


図2 実験で使用した実物体
Fig.2 Real Object Used in Experiments



(a) CG 揺れあり (b) CG 揺れなし (c) CG なし

図3 実験で使用した視覚刺激
Fig.3 Visual Stimulation Used in Experiments

- ・このケースのちょうど半分の高さ (45mm) まで水を入れた際の質量である 750g
- ・予備実験で実際に水が入って揺れていることを全被験者が知覚できた最小の質量である 500g
- ・女性でも片手で持って振ることができる最大の質量である 1000g

なお、実物体の質量は、ケース中央に固定した錘の質量を変えることで調整している。

【視覚刺激】

実験では、実物体と同じ寸法の仮想容器に液体を入れた視覚刺激を提示した。MR型視覚刺激は「CG揺れあり」「CG揺れなし」の2種類と、仮想物体を一切重畳描画しない視覚刺激「CGなし」の計3種類を使用する(図3)。MR型視覚刺激で提示される仮想容器(白色)の内部には液体(水色)のCGが描画されており、「CG揺れあり」では被験者が容器を左右に振る動作に合わせて中の液体が左右に揺れ、「CG揺れなし」では容器を振っても中の液体が揺れない。この液体の揺れには、液面を直線に近似した簡易的なモデル(先行研究[4]参照)を適用している。このモデルは、被験者は容器を左右にしか振らない、しぶきや波のような詳細な表現は行わず液面を直線と近似するという前提のもと、液体の揺れを簡易表現したものである。このモデルを適用することで物体内部に水が入っているように知覚されることは、先行研究[4]で確認している。

また、どの被験者に対しても同様の視覚刺激を観察させるため、把持物体を振る角度を統一した。具体的には、磁気センサによる物体の角度情報を用いて水平を0度とし、左右に30度以上傾くとピープ音で通知した。音が鳴ると、すぐに逆方向に振るよう指示し、被験者の振り動作を統制した。

4 実験1:異なる質量での錯覚発生の確認

4.1 実験目的

実験3では、質量の異なる実物体においてR-V Dynamics Illusionが重さ知覚に与える影響を測定する。しかし、実物体の質量を変更することで同錯覚現象が発生しなくなる可能性が考えられる。

そこで、実験1では実物体の質量を変更した場合でもR-V Dynamics Illusionが発生するかを確認する。

4.2 実験内容・手順

実験は、サーストンの一対比較法に基づいて行った。視覚刺激は図3に示した3種類で、MR型視覚刺激としては仮想容器のちょうど半分の高さ(45mm)まで液体が入っているものを用いた。実物体の質量は、3.2節で述べた3種類(500g, 750g, 1000g)とした。

実験時は、姿勢や振る動作を統制した。具体的に、姿勢は、起立して肘を90度に屈曲させた状態で実物体を把持させた。振り動作は、メトロノームのテンポ(100BPM)に合わせた。振り幅は実物体の傾きが左右30度(水平のときを0度とする)以上となるとピープ音で知らせ、左右30度程度で一定に振るよう教示した。被験者には、教示した通りできるようになるまで事前に十分練習させた。

被験者は10名で、以下の手順で実験を行った。

- (1) 被験者にHMDを装着させる
- (2) 質量500g, 750g, 1000gから1つ選出する
- (3) 3種類の視覚刺激(図3)から2種類をランダムに選出する
- (4) (3)で選出した1つを被験者に提示する
- (5) 被験者に決められた姿勢で実物体を把持させ、メトロノームのテンポ(100BPM)に合わせて、物体を左右30度ずつ振らせる
- (6) (3)で選出したもう一方のパターンについても同様に(4)(5)を繰り返す
- (7) 1回目と2回目の試行を比較し、どちらがより重く感じるかを回答させる
- (8) 筋疲労の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (9) 残りの視覚刺激の組み合わせも、(3)~(8)を繰り返す
- (10) 残りの実物体の質量においても、(2)~(9)を繰り返す

4.3 結果と考察

実験1の結果を図4に示す。図中の数直線は、重さの心理尺度を示しており、数値が小さくなるにつれて、被験者は把持物体をより重く感じたことを示す。図より以下のことがわかる。

- (i) すべての質量において、CG なし、揺れなし、揺れありの順に軽く知覚している
- (ii) すべての質量において、各視覚刺激の間に有意差が認められる

以上より、本実験で使用した 500g, 750g, 1000g の実物体において、振り動作に対して液面が揺れるアニメーションを付与することで、物体が軽く知覚される (R-V Dynamics Illusion が発生する) ことを確認した。

ただし、サーストンの一対比較法による実験結果の数直線は、尺度間の距離を各質量で比べることはできない。よって、図 4 (a)(b) の数直線が類似しているからといって、CG 揺れありと CG 揺れなしで重さの違いを同じように知覚しているかどうかはわからない。そこで以降の実験で、各質量でどの程度重さの違いを感じているのかを分析していく。

5 実験 2: 重さの違いを識別可能な液面高さの弁別閾

5.1 実験目的

一般に、重さが異なると、重さの弁別閾も変わることが知られている。そこで、実験 1 で錯覚の発生を確認した質量 (500g, 750g, 1000g) に対して、R-V Dynamics Illusion により重さを錯覚しているときの重さの違いを識別可能な液面高さ (CG) の弁別閾を調べる。

R-V Dynamics Illusion は、実際の質量は同じであるにも関わらず、見た目と内部の運動状態の差異により重さを異なって感じる現象である。そのため、知覚される重さの弁別閾を質量として計測することができない。一方、これまでの研究から、仮想物体の液体容量を変更した場合に、知覚される重さが変わる (容量が多いほど重く知覚される) ことがわかっている。そこで実験 2 では、液体容量を変更することで知覚される重さの弁別閾 (重さの違いを識別可能な液面高さの弁別閾) を求める。今回は、液面の高さを変更し、液体容量がどの程度変化したときに重さの違いを知覚できるのかを確認する (以降、単に「弁別閾」と表記した場合は、重さの違いが初めてわかる CG 描画された液体の「液面高さの変化量」を指すこととする)。

5.2 実験内容・手順

実験 2 では、MR 型視覚刺激の CG 揺れあり、揺れなしについて、500g, 750g, 1000g の各質量での弁別閾を求める。液体容量は、図 5 に示す 4 種類の提示パターン I ~ IV にしたがって液面の高さを変えることで変更する。具体的には、最小 27mm から最大 63mm まで 3mm ずつ変化させた 13 種類を用意した。提示パターン I, II では液体容量が最小の

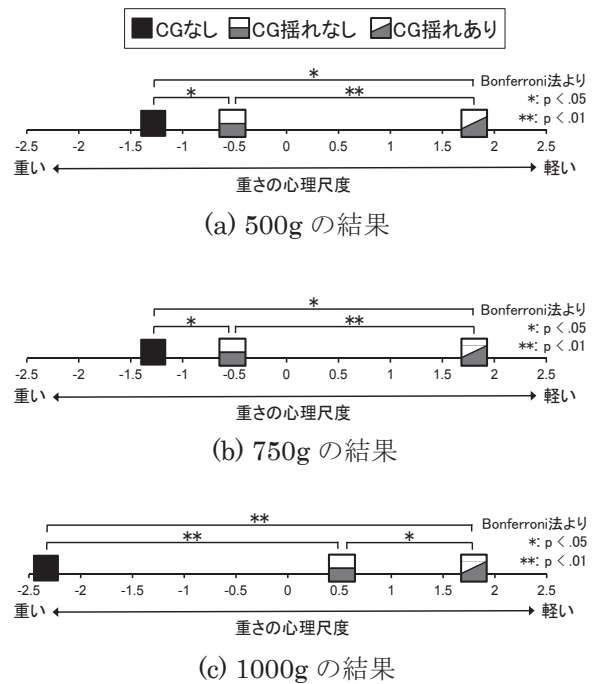


図 4 実験 1 の結果

Fig.4 Result of Subjective Experiment1

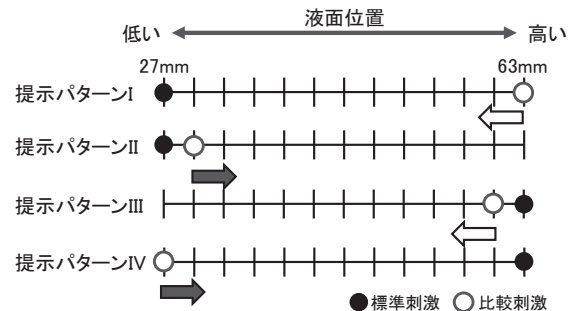


図 5 実験 2 の提示パターン

Fig.5 Variety of Pattern Presentation Used in Experiment2

場合、提示パターン III, IV では液体容量が最大の場合の弁別閾を求める。

被験者は、1 つの実物体に対して、標準刺激と比較刺激を順に比較する。標準刺激は変更せず、比較刺激のみ図 5 に示す矢印の方向に順に変更して同様の試行を行い、被験者がどの段階で重さの違いを感じるようになるか、または感じなくなるかを調べる。

実験では、液体容量の変化により重さが初めて変化したと知覚される液面の高さの変化量を弁別閾として求める。提示パターン I ~ IV に対し、液体の揺れあり、なしの場合について各質量で実験を行う。

被験者 10 名に対し、以下の手順で実験を行う。

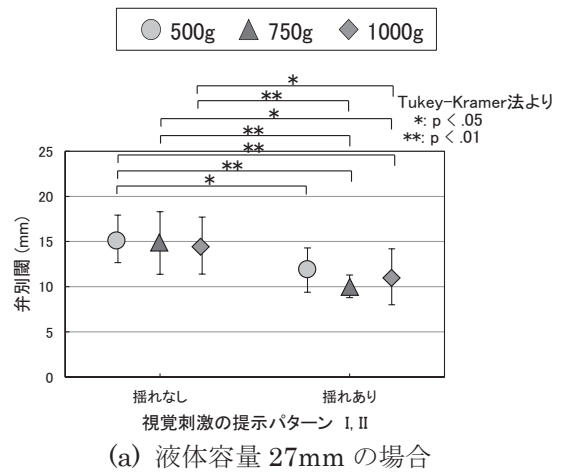
- (1) 被験者に HMD を装着させる
- (2) 液体の揺れの有無を選択する
- (3) 質量 500g, 750g, 1000g から 1 つ選出する

- (4) 図 5 の 4 種類の提示パターンからランダムに 1 パターン選出する
- (5) 実物体に (4) で選出したパターンにしたがって CG の液体を重畳描画する
- (6) 被験者に決められた姿勢で実物体を把持させ、メトロノームのテンポ (100BPM) に合わせて、物体を左右に 30 度ずつ振らせる
- (7) 標準刺激と比較刺激の 2 種類の試行を比較し、重さの違いを感じるか回答させる
- (8) 被験者は重さの違いの有無を回答する
- (9) 筋疲労の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (10) パターン I, IV では差を感じない、パターン II, III では差を感じると回答するまで、1 段階ずつ液面の高さを変えて (5)~(9) を繰り返す
- (11) 残りの提示パターンについても (4)~(10) を繰り返す
- (12) 残りの質量についても (3)~(11) を繰り返す
- (13) 残りの液体の条件でも (2)~(12) を繰り返す

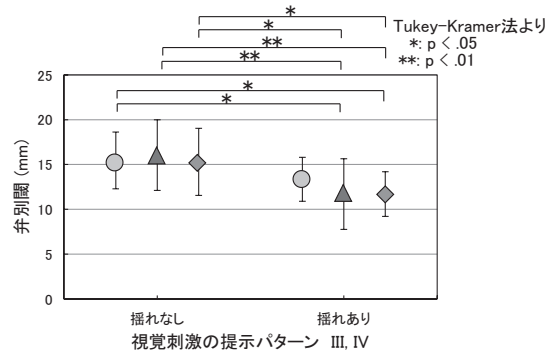
5.3 結果と考察

実験 2 の結果を図 6 に示す。図は、液体容量が 27mm, 63mm の場合について、液体の揺れがない場合、ある場合での各質量における弁別閾と多重検定 (Tukey-Kramer 法) の結果を示している。図より下に示す (i)~(iii) がわかる。

- (i) 質量間では、弁別閾に有意差が見られない
各質量で、視覚的に液体容量を変化させても弁別閾には有意な差が見られなかった。実物体で重さの弁別閾を測定した場合、質量が大きくなるほど弁別閾も大きくなるのが知られているが、実験 2 の結果から、R-V Dynamics Illusion において、実物体の質量の違いは弁別閾にはほとんど影響していないことがわかる。
- (ii) 揺れなしよりも、揺れありの方が弁別閾は小さい
質量間には有意差がみられなれない一方で、揺れの有無を比較すると、揺れありの場合に弁別閾が有意に小さかった。我々がこれまで発表した論文でも、揺れのあり・なしでは、揺れを提示したときの方が軽く知覚されることがわかっている。つまり、実物体の質量の違いは弁別閾に影響しなかったが、R-V Dynamics Illusion によって重さを軽く感じた場合には、弁別閾も小さくなるのがわかる。
- (iii) 液面高さが 27mm, 63mm の場合を比べると、63mm の方が弁別閾は大きい傾向
液体容量に関して、有意差は見られないが、27mm, 63mm の間で液体容量が小さい場合の方が弁別閾は小さくなる傾向がみられた。例えば、揺れありの場合に着目すると、実物体の質量 500g の場合、(液面高さ 27mm : $11.9 \pm 6.6\text{mm}$) < (液面高さ 63mm :



(a) 液体容量 27mm の場合



(b) 液体容量 63mm の場合

図 6 実験 2 の結果

Fig.6 Result of Subjective Experiment2

$13.4 \pm 5.6\text{mm}$) であった。750g の場合は、(液面高さ 27mm : $10.0 \pm 5.6\text{mm}$) < (液面高さ 63mm : $11.7 \pm 6.8\text{mm}$)、1000g の場合は、(液面高さ 27mm : $11.1 \pm 5.2\text{mm}$) < (液面高さ 63mm : $11.7 \pm 3.9\text{mm}$) であった。また、揺れなしでも同様の傾向であった。

以上の結果より、液体の揺れや容量などの視覚刺激による影響が弁別閾に影響を与えていることがわかる。また、視覚刺激によって重さの違いがわかる液面の高さの変化量は変化し、揺れありのように軽く感じる条件において弁別閾が小さくなった。つまり、物体を軽く感じる条件ほど弁別閾が小さく、従来の重さの弁別閾と同様の傾向 (例えば、質量が小さく軽い物体ほど重さの弁別閾は小さい) であることがわかった。

実験を行う上で、被験者にはあくまで重さの違いを評価するよう依頼し、実験後にも重さを基準として回答したことを確認している。しかし、質量間で弁別閾にほとんど差が見られないことから、被験者が無意識に視覚刺激から弁別閾を判断した可能性も拭いきれない。そこで、次の実験では、この弁別閾がどの程度の重さの違いとして認識されているのかを計測する。

6 実験 3: 弁別閾における重さの測定

6.1 実験目的

実験 2 では、液体容量と揺れの有無といった視覚条件を変更した際に、違う重さとして識別される液面容量の弁別閾を計測した。しかし、被験者が視覚情報のみから弁別閾を判断している可能もあり、実際にこの弁別閾がどの程度の質量として知覚されているのかはわからなかった。

そこで実験 3 では、実験 2 で求めた弁別閾分の容量がどのくらいの質量として知覚されているのかを測定する。具体的には、液面の高さを弁別閾分増減したものに対して、同じ重さに知覚されるまで実物体そのものの質量を増減していくことで、弁別閾分の容量に相当する質量を求める。これを液体の揺れの有無に対しても実験を行う。

6.2 実験内容・手順

本実験では、液体容量 (27mm, 63mm), CG の揺れ (あり・なし), 質量 (500g, 750g, 1000g) をそれぞれ変更した 12 パターンに対して、実験 2 で求めた弁別閾分の容量に相当する質量を測定する。

使用する MR 型視覚刺激は、実験 2 で用いた液体が高さ 27mm, 63mm まで入っている 2 種類に加え、各々の条件での弁別閾分 (表 1) の液体容量を増加、または減少した 8 種類である。具体的には、比較刺激が液体の高さ 27mm の場合 (図 7 (P1)), 標準刺激として液体の高さ 27mm から弁別閾 (揺れなしは 15.0mm, 揺れありは 11.0mm) 分を増加させたものを利用する。一方、比較刺激が液体の高さ 63mm の場合 (図 7 (P2)), 標準刺激として液体の高さ 63mm から弁別閾 (揺れなしは 15.6mm, 揺れありは 12.3mm) 分を減少させたものを利用する。

被験者は、1 つの実物体に対して標準刺激と比較刺激での重さを順に比較する。そして、標準刺激の質量は変更せず、比較刺激のみ錘を増減することで 2g ずつ質量を変更していき、重さの違いを感じなくなるまでこの試行を繰り返す。

これを 3 つの質量、液体の揺れあり・なしの場合に対して、同様に実験を行い、各弁別閾に相当する質量を計測する。

被験者は、揺れなしの場合 10 名、揺れありの場合 11 名で、以下の手順で実験を行った。

- (1) 被験者に HMD を装着させる
- (2) 液体の揺れの有無を選択する
- (3) 質量 500g, 750g, 1000g から 1 つ選択する
- (4) 2 種類の提示パターン (図 7) から 1 つ選択する
- (5) 実物体に (4) で選択したパターンにしたがって液体を重量描画する

表 1 実験 3 で使用する弁別閾

Table 1 Variety of the Difference Threshold Used in Experiment 3

液体の高さ (提示パターン)	揺れの有無	弁別閾 (mm)
27mm (P1)	揺れなし	15.0
	揺れあり	11.0
63mm (P2)	揺れなし	15.6
	揺れあり	12.3

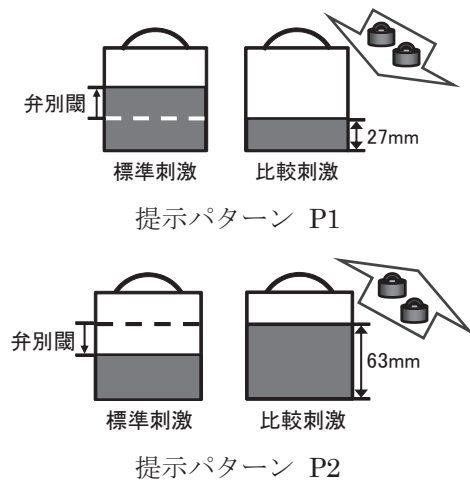


図 7 実験 3 の提示パターン
Fig.7 Variety of Pattern Presentation Used in Experiment 3

- (6) 被験者に決められた姿勢で実物体を把持させ、メトロノームのテンポ (100BPM) に合わせて、物体を左右に 30 度ずつ振らせる
- (7) 標準刺激と比較刺激の 2 種類の試行を比較し、重さの違いを感じるか回答させる
- (8) 筋疲労の影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (9) 被験者が重さの違いを感じないと答えるまで比較刺激の質量を 2g ずつ変更し、(5)~(8) を繰り返す
- (10) もう一つの提示パターンについても、(4)~(9) を繰り返す
- (11) 残りの実物体の質量でも (3)~(10) を繰り返す
- (12) 残りの液体の条件でも (2)~(11) を繰り返すただし、(2)~(4) での選択はランダムに行う。

最後に、測定した弁別閾分の容量に相当する質量を、式 (1) に示す計算式にしたがって、液体容量 1cc あたりの質量 (g) に正規化する。

$$1\text{ccあたりの質量}(\text{g}) = \frac{\text{測定した弁別閾の質量}(\text{g})}{165 \times 80 \times \text{弁別閾} 10^{-3}(\text{cc})} \quad (1)$$

この式では、変化させた液体容量を、底面積(幅 165×奥行 80mm)と高さ(弁別閾(表 1))から求め、測定した質量(g)を求めた体積(cc)で割っている。ここで求めた 1cc あたりの質量を以下、測定値と呼ぶ。

6.3 結果と考察

実験 3 の結果を図 8 に示す。図は、仮想の液面高さを 27mm から弁別閾分増加、または 63mm から弁別閾分減少させた際に、知覚された質量を正規化したものである。図より以下の (i)~(iii) がわかる。

(i) 実物体の質量が 1000g の場合、測定値が 750g より小さい

各視覚刺激の提示パターンにおいて、3つの質量のうち 750g の場合に、弁別閾分に相当する液体容量を最も重く知覚していることがわかる。

(ii) 揺れなしよりも揺れありの方が、測定値が大きい

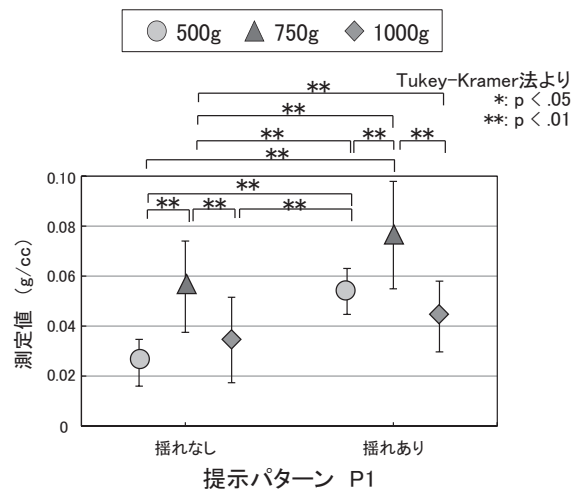
例えば、実物体の質量が 750g で CG の液面の高さが 27mm の場合に着目すると、揺れなしの場合と比べ、揺れありの場合に測定値が大きくなっていることがわかる。この傾向は、どの質量においても見られ、63mm の場合も同様であった。つまり、3種類すべての実物体の質量において、揺れを提示し、錯覚が発生しているとき(物体を軽く知覚している場合)に、測定値が増加していることがわかる。

(iii) 液面高さが 63mm の場合よりも、27mm の方が測定値は大きくなる傾向にある

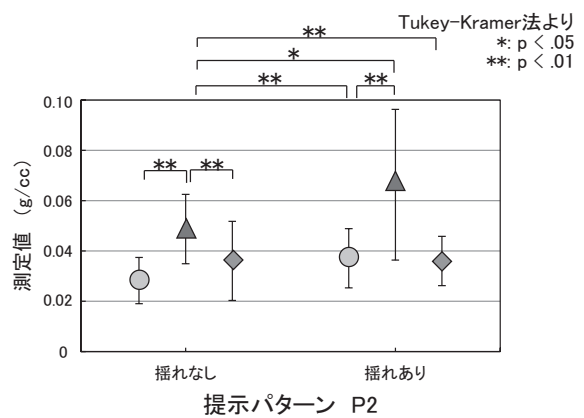
液体容量の違いに関しては、有意差は見られなかった。しかし、液体容量が小さい方が、測定値は大きくなる傾向が見られた。例えば、揺れありの場合に着目すると、実物体の質量 500g の場合、(液体容量 27mm : 0.054 ± 0.009g/cc) > (液体容量 63mm : 0.037 ± 0.011g/cc) であった。750g の場合は、(液体容量 27mm : 0.076 ± 0.021g/cc) > (液体容量 63mm : 0.066 ± 0.030g/cc)、1000g の場合は、(液体容量 27mm : 0.044 ± 0.014g/cc) > (液体容量 63mm : 0.036 ± 0.010g/cc) であった。また、揺れなしでも一部同様の傾向が見られた。

今回の実験により、重さ知覚に影響を与えるパラメータ(揺れの有無と液体容量)それぞれの影響を質量として比較することが可能となった。

例えば、実物体の質量が 750g の場合に着目すると、液体容量 27mm・揺れありの場合に知覚される測定値が 0.076 ± 0.021g/cc に対して、液体容量 27mm・揺れなしの測定値は 0.056 ± 0.018g/cc であり、揺れの有無による測定値の差は約 0.02g/cc となる。一方、液体容量 63mm・揺れありの場合の測定値は 0.066 ± 0.030g/cc であり、先ほど述べた液



(a) 液体容量 27mm の場合



(b) 液体容量 63mm の場合

図 8 実験 3 の結果

Fig.8 Result of Subjective Experiment3

体容量 27mm・揺れありの場合との測定値の差は、0.010g/cc となる。これら測定値の差から、本実験における条件下では、液体容量よりも揺れの有無の方が重さ知覚に与える影響が大きい傾向にあったことがわかる。

また、実物体の質量が 750g のとき、測定値が最も大きかったのは液体容量が 27mm・揺れありの視覚刺激(重さが最も軽く知覚される視覚刺激)の場合で、最も小さかったのは液体容量 63mm・揺れなしの視覚刺激(重さがあまり軽く知覚されない視覚刺激)の場合であった。つまり、液体の揺れや液体容量による錯覚が原因で物体を軽く知覚している場合に、CG による液体容量の増加・減少分をより重く知覚していた。この傾向は、他の質量でも同様に見られた。

ただし、(i) の 750g だけ液体容量 1cc あたりの質量(g)が有意に大きいという結果は予想外であった。我々の当初の予想では、同じ液体容量で実物体の質量が異なる場合、質量が大きいほど被験者が同体積当たりの液体の重さを重く感じると予想してい

た。もしこの仮説が正しければ、実物体の質量が重いほど、液体容量が増えたときに感じる重さの変化も大きくなるはずである。そこで、液体容量が深さ 27mm (A) と 38mm (B) の 2 つの CG (揺れあり) を重畳描画した実物体を並べ、両者を振り比べたときに知覚される重さの差の大きさを、実物体の質量が 500g, 750g, 1000g の場合でそれぞれ比較する被験者 3 名の簡易的な実験を行った。結果は、予想通り、CG で見た目だけを変えた今回の条件下では、上記仮説が成り立つ傾向が見られた。

この仮説だけを踏まえれば、実験 3 は実物体の質量が重くなるほど、液体容量 1cc あたりの質量 (g) が単調増加するという結果となったはずである。しかし、実験 3 では、パターン (A) に対してパターン (B) と同じ重さと知覚するまで錘を増やすという、質量自体を変えるパラメータを追加している。もし、実物体の質量が異なる場合に、同じ質量の錘を追加して違う重さと知覚するといったことが起こるならば、上記仮説に加え、増やした/減らした錘自体の質量を主観的にどのくらいの重さとして認識しているかという点も考慮する必要がある。

そこで、500g, 750g, 1000g の実物体に、それぞれ同じ質量の錘を追加した場合に、重さの変化を同程度と知覚するののかについて、こちらも被験者 3 名の簡易な実験を行った。具体的には、500g, 750g, 1000g の実物体に対して (CG は何も提示せず) それぞれ 40g の錘を追加した場合と追加しない場合で、知覚される重さの差を比べたところ、実物体の質量が重いほど、40g の違いを大きく (重く) 知覚する傾向にあった。知覚される重さの差が把持物体の質量に対して単調増加するのか、把持物体の質量や質量の変化量によっても結果が異なるのかなど、被験者を増やした更なる実験が必要である (これについては、次報以降に行う予定である) が、本論文の実験条件下では、実物体の質量が増加すると、知覚される重さの変化も増加するという傾向があると考えられる。

以上のことから、

- 実物体の質量が重いほど、「CG の液体体積 (cc) (視覚的要因) に対して知覚される重さ (1)」が大きくなる
- 実物体の質量が重いほど、「追加/除去された錘 (g) (触覚的要因) に対して知覚される重さ (2)」が大きくなる

となり、実験 3 の液体容量 1cc あたりの質量 (g) は (1) / (2) によって求められる。

もし (1) と (2) の傾きが全く同じであれば、実物体の質量が 500g, 750g, 1000g いずれの場合でも、液体容量 1cc あたりの質量 (g) は変わらないはずで

あるが、実験 3 の結果では、750g だけ大きく、500g, 1000g は同程度となっている。このことから、恐らく (1) あるいは (2)、またはその両方の傾きが直線的ではなく、さらに 750g 周辺で (1) / (2) が大きくなるという性質を持っているのではないかと考えている。

7 むすび

本論文では、実物体の質量や液体容量を変更し、各条件下で重さの違いを識別可能な液面容量の弁別閾とその質量を求めることにより、R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を測定した。その結果、以下の 3 つのことがわかった。

- 実物体の質量を変更しても、R-V Dynamics Illusion が発生すること
- 視覚刺激による影響が大きい (より軽く知覚される場合) ほど、弁別閾は増加すること
- 視覚刺激が重さ知覚に与える影響が大きい (より軽く知覚される場合) ほど、液体容量の重さにおける測定値は大きくなること

つまり、視覚刺激が重さ知覚に与える影響が大きいほど、同じ容量をより大きな質量として知覚していることが示唆された。さらに、今回の実験条件では、液体容量の変化に比べ、揺れの有無の方がより重さ知覚に影響を与えることが示唆された。

各質量における R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響の測定結果から得られた上記の知見を利用することで、特定の質量として知覚させたい場合に、逆に MR 型視覚刺激の液体容量をどの程度にすればよいかを求めるモデル式を設計できる可能性がある。また今回の実験では、実物体の質量は 500g, 750g, 1000g の 3 条件に留まっているが、特に 750g と 1000g の間には、R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響が最も効果的に使用できる質量が存在する可能性がある。

加えて、本論文では、CG の液体体積に対して知覚される重さ (視覚的要因) や追加/除去された錘に対して知覚される重さ (触覚的要因) について、簡易的な実験を行い考察したが、今後はさらに詳細な実験・分析を行うとともに、錯覚現象の要因や錯覚効果の最適値などについて調べていく予定である。

謝辞

本研究の実験を担当した米田暦紀氏に感謝の意を表す。なお、本研究は科研費・基盤研究 B「複合現実型視覚刺激による R-V Dynamics Illusion の研究」による。

参考文献

- [1] 家崎明子, 柚田明弘, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “複合現実型視覚刺激による触印象への影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 129 - 139, 2008.
- [2] 平野有一, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “Dent-Softness Illusion: 複合現実型視覚刺激による硬さ知覚への影響”, 同上, Vol. 16, No. 2, pp. 271 - 278, 2011.
- [3] 木村朝子, 柚田明弘, 面迫宏樹, 柴田史久, 田村秀行: “Shape-COG Illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象”, 同上, Vol. 16, No. 2, pp. 261 - 269, 2011.
- [4] 佐野洋平, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “動的に変化する複合現実型視覚刺激が重さ知覚に与える影響”, 同上, Vol. 19, No. 2, pp. 255 - 264, 2014.
- [5] S.C. Gandevia: “Kinesthesia; Roles for afferent signals and motor commands,” In Rowell LB, Shepherd JT (eds): *Handbook of Physiology, Section 12, Exercise, Regulation and Integration of Multiple Systems*, pp. 128 - 172, 1996.
- [6] D.I. McCloskey: “Kinesthetic sensibility,” *Physiological Reviews* 58, pp. 763 - 820, 1978.
- [7] P.R. Burgess, J.Y. Wei, F.J. Clark and J. Simon: “Signaling of kinesthetic information by peripheral sensory receptors,” *Annual Review of Neuroscience*, Vol. 5, pp. 171 - 187, 1982.
- [8] A. Charpentier: “Experimental study of some aspects of weight perception,” *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- [9] G Buckingham, J.S. Cant and M.A. Goodale: “Living in a material world: how visual cues to material properties affect the way that we lift objects and perceive their weight,” *Journal of neurophysiology*, Vol. 102, No. 6, pp. 3111 - 3118, 2009.
- [10] K.R. Alexander and M.S. Shansky: “Influence of hue, value, and chroma on the perceived heaviness of colors,” *Attention, Perception & Psychophysics*, Vol. 19, No. 1, pp. 72 - 74, 1976.
- [11] P. Walker, B.J. Francis and L. Walker: “The brightness-weight illusion: Darker objects look heavier but feel lighter,” *Experimental psychology*, Vol. 57, No. 6, p. 462, 2010.
- [12] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard and P. Coiffet: “Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?,” *Proc. IEEE Virtual Reality*, pp. 83 - 90, 2000.
- [13] 山田泰己, 片岡佑太, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “錯覚現象 R-V Dynamics Illusion における各種刺激の影響分析 (3) ~ 固体の運動を重畳描画した場合について Part2 ~”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 31A-3, pp. 344 - 347, 2015.
- [14] 片岡佑太, 西川歩未, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “複合現実環境下での R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の相互作用”, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 18, No. 3, pp. 177 - 186, 2016.
- [15] J.C. Stevens and L.L. Rubin: “Psychophysical scales of apparent heaviness and the size-weight illusion,” *Perception & Psychophysics*, Vol. 8, pp. 225 - 230, 1970.
- [16] D.V. Cross and L. Rotkin: “The relation between size and apparent heaviness,” *Perception & Psychophysics*, Vol. 18, pp. 79 - 87, 1975.
- [17] 金載然, 洪性寛, 佐藤誠, 小池康晴: “SPIDAR を用いた size-weight illusion の検証”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 7, No. 3, pp. 347 - 354, 2002. (2016年12月6日受付)

[著者紹介]

大嶋 佳奈 (学生会員)



2016年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実型視覚刺激が触印象に与える影響に関する研究に従事。

橋口 哲志 (正会員)



2005年職業能力開発総合大学校福祉工学科卒業。2007年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士前期課程修了。2013年九州大学大学院芸術工学府博士後期課程修了。現在、立命館大学情報理工学部メディア情報学科特任助教。触覚ディスプレイ、バーチャルリアリティ、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。本学会論文賞受賞。

柴田 史久 (正会員)



1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999年同研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て、2003年4月より立命館大学理工学部助教授。同大学情報理工学部准教授を経て、現在、同教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング、複合現実感等の研究に従事。本学会複合現実感研究委員会幹事。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会等の会員。本学会学術奨励賞・論文賞、ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。

木村 朝子 (正会員)



1996年大阪大学基礎工学部卒。1998年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同大学助手、立命館大学理工学部助教授、科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て、2009年4月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授。現在、同教授。博士(工学)。実世界指向インタフェース、複合現実感、ハプティックインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会、ACM、IEEE各会員。本学会学術奨励賞・論文賞、ヒューマンインタフェース学会論文賞、情報処理学会山下記念研究賞等受賞。