

# 実物体の質量が R-V Dynamics Illusion に与える影響の分析

大嶋 佳奈<sup>\*1</sup> 橋口 哲志<sup>\*1</sup> 柴田 史久<sup>\*1</sup> 木村 朝子<sup>\*1</sup>

Kana Oshima<sup>\*1</sup>, Satoshi Hashiguchi<sup>\*1</sup>, Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>, and Asako Kimura<sup>\*1</sup>

**Abstract** --- We discovered the “R-V Dynamics Illusion” which is a this psychophysical phenomenon caused by the difference between dynamics of the real object (R) and the virtual object (V) movement 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 is perceived by the MR visual stimulation. In addition, further experiments will be are conducted when changing to change the mass of the real object or as well as when changing the liquid capacity of the CG, we consider 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。

\*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

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を [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、お互いに打ち消しあうことなく、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

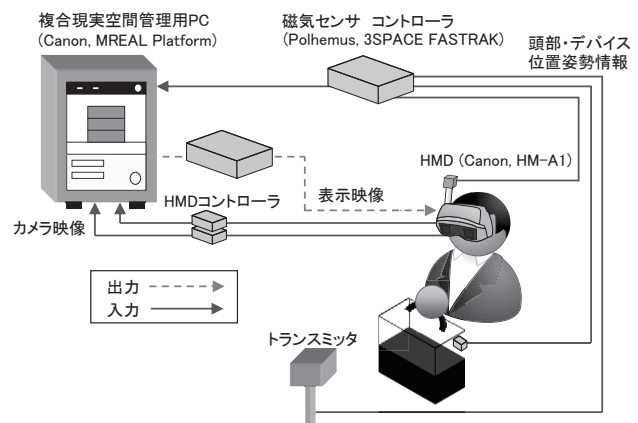


図 1 システム構成  
Fig.1 System Configuration

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、各々の条件下での重さ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. 体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. 体験者が 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 度以上傾けるとピープ音が通知される. 音が鳴ると、すぐに逆方向に振るよう指示しており、ピープ音が提示される時間はごく短時間である.

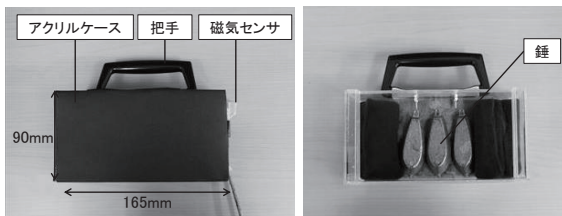


図2 実験で使用した実物体  
Fig.2 Real Object Used in Experiments



(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

#### 【使用する実物体】

体験者が把持する実物体として、幅 165×奥行 80×高さ 90mm のアクリルケース (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。

- ・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少の重さである 500g
- ・女性でも片手で持って振ることができる最大の重さである 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」では体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。

### 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。具体的には、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ている。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事前十分練習させた。

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。

- 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
- 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

れること (R-V Dynamics Illusion が発生すること) を確認した。

## 5 実験 2:各質量における重さの弁別閾

### 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弁別閾を調べる。

R-V Dynamics Illusion は、実際の質量は同じであるのに見た目と内部の運動状態の際により重さを異なって感じる現象である。よって、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化する (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、知覚される重さの弁別閾を液体容量を基準に求める。そして、錯覚によって知覚できる重さの弁別閾 (液体容量がどの程度変化したときに重さの違いを感じるのか) を確認する。

### 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 の各質量での重さの弁別閾を求める。液体容量は、図 5 に示す 4 種類の提示パターン I ~ IV にしたがって液面位置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、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体位置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、液体の揺れのあり、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) 液体容量の変更において 4 種類の提示パターン (図 5) からランダムに 1 パターン選出する

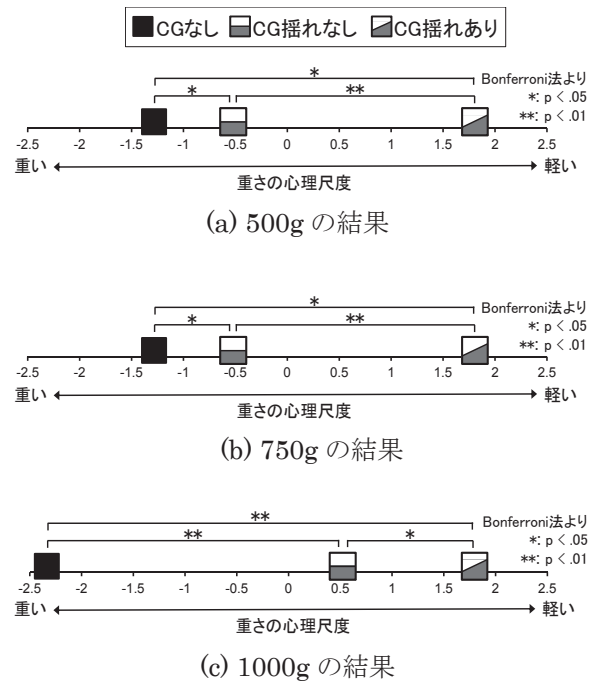


図 4 実験 1 の結果

Fig.4 Result of Subjective Experiment1

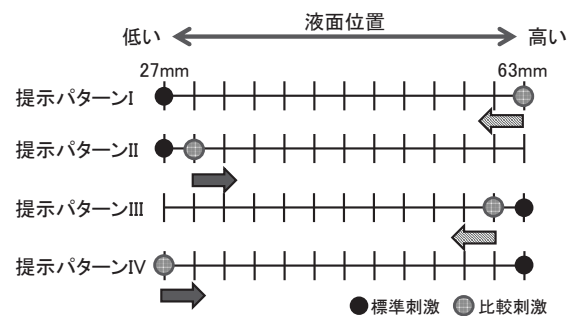


図 5 実験 2 の提示パターン

Fig.5 Variety of Pattern Presentation  
Used in Experiments2

- (5) 実物体に (4) で選出したパターンにしたがって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) 被験者が重さの違いを回答できるまで (5)~(7) を繰り返す
- (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 段階ずつ液面位置を変えて (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) 残りの液体の状態でも (2)~(12) を繰り返す

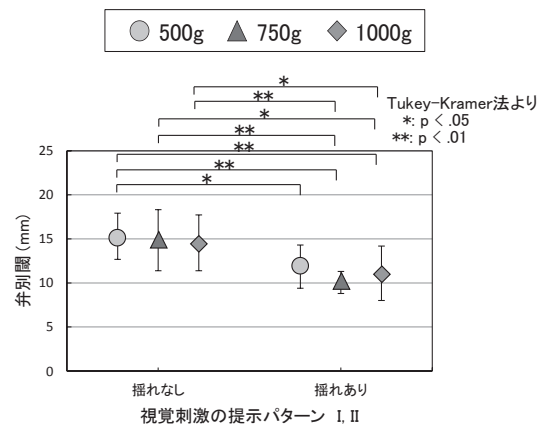
### 5.3 結果と考察

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での重さの弁別閾と有意差検定 (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。

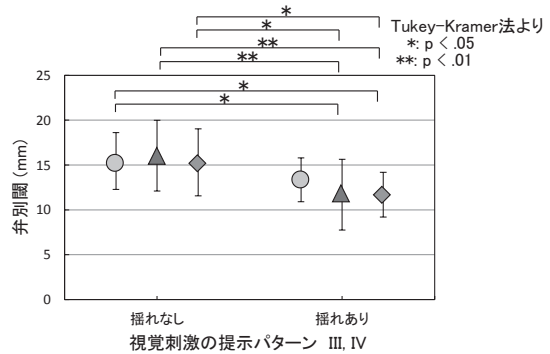
- (i) 質量間で重さの弁別閾に有意差が見られない  
 各質量で、視覚的に液体容量を変化させても重さの弁別閾には有意な差が見られなかった。実物体で重さの弁別を測定した場合、質量が大きくなるほど弁別閾も大きくなることが知られているが、実験 2 の結果から、実物体の質量を変えても R-V Dynamics Illusion による重さ錯覚の弁別閾にはほとんど影響しないことがわかる。
- (ii) 各提示パターンにおいて、揺れなしよりも揺れありの方が、重さの弁別閾が小さい  
 揺れの有無を比較すると、揺れありの場合に重さの弁別閾が有意に小さい。その一方で、質量間には有意差がみられなかった。我々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、重さ知覚の弁別閾も小さくなることがわかる。
- (iii) 液体容量が 27mm, 63mm の場合、63mm の方が重さの弁別閾が大きい傾向がある

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重さの弁別閾が小さくなる傾向がみられる (例えば、液体容量 27mm・揺れあり・500g : 11.9 ± 6.6mm < 液体容量 63mm・揺れあり・500g : 13.4 ± 5.6mm, 液体容量 27mm・揺れあり・750g : 10.0 ± 5.6mm < 液体容量 63mm・揺れあり・750g : 11.7 ± 6.8mm, 液体容量 27mm・揺れあり・1000g : 11.1 ± 5.2mm < 液体容量 63mm・揺れあり・1000g : 11.7 ± 3.9mm, 揺れなしでも同様の傾向があった)。

以上の結果より、視覚刺激による影響が重さの弁別閾に影響を与えていることがわかる。さらに、MR 型視覚刺激の要因で重く知覚されるほど、重さの弁別閾が増加するという傾向は、明るさや音の大きさ・高さなど様々な感覚でみられるウェーバーの法



(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 Experiment 2

則 (刺激の強度が大きくなれば、弁別閾も比例的に増大する) に従う結果となった。

## 6 実験 3: 弁別閾における重さの測定

### 6.1 実験目的

実験 3 では、実験 2 で求めた弁別閾がどの程度の重さとして知覚されているのかを測定する。具体的には、液体容量を弁別閾分増減したのに対して、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、弁別閾に相当する重さを求める。これをそれぞれの質量において、液体の揺れの有無に対して実験を行う。

### 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重さを測定する。

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，標準刺激の重さは変更せず，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。

これを各質量において液体の揺れあり・なし場合に対して，同様に実験を行い，各弁別閾に相当する重さを計測する。

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 つ選出する
- (4) 2 種類の提示パターン（図 7）から 1 つ選出する
- (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) 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) 残りの液体の状態でも (2)～(11) を繰り返すただし，(2)(3)(4)での選択はランダムに行う。

最後に，測定した重さを，式 (1) に示す計算式にしたがって，液体容量 1ℓあたりの重さ (g) に正規化する。

$$\text{重さ}(g/\ell) = \frac{\text{測定した弁別閾に相当する重さ}(g)}{\text{幅}165 \times 80 \times \text{弁別閾} \times 10^{-6}(\ell/\text{mm}^3)} \quad (1)$$

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，測定した重さ (g) を求めた体積 (ℓ) で割っている。

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

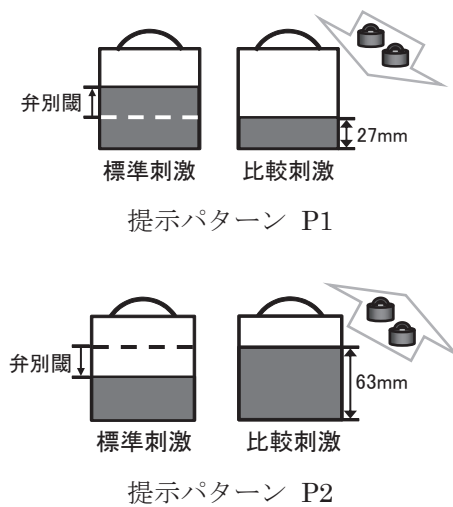


図 7 実験 3 の提示パターン  
Fig.7 Variety of Pattern Presentation

### 6.3 結果と考察

実験 3 の結果を図 8 に示す。図は，仮想の液体容量を 27mm, 63mm から増加，または減少させた際に，知覚された重さを正規化したものである。図より下に示す (i),(ii)がわかる。

- (i) 各質量において，揺れを提示した場合に単位リットルあたりの重さが重くなる傾向  
各質量において揺れを提示し，物体を軽く知覚している（錯覚が発生している）場合に，測定値が増加していることがわかる。
- (ii) 液体容量や揺れの有無によらず，実物体の重さが 750g の場合に，単位リットルあたりの重さ（測定値）をより軽く知覚

質量間では 750g の場合に単位リットルあたりの重さ弁別に相当する質量（測定値）が最も大きいことがわかる。

実物体の質量が 750g で，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， $76.4 \pm 22.5 \text{ g}/\ell$ であった。逆に，最も小さかつ

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  $48.7 \pm 14.5 \text{ g/l}$ であった。錯覚が原因で物体を軽く知覚している場合に単位リットルあたりの重さをより重く、あまり軽く知覚されていない場合には単位リットルあたりの重さをより軽く知覚するというこの傾向は、他の質量でも同様に見られた。

(iii) 液体容量や揺れの有無によらず、実物体の質量が 750g の場合に、測定値が大きい

液体容量や揺れの有無によらず、500g よりも 750g の測定値が有意に増加した。一方、750g に対して 1000g の測定値は減少する傾向にあった(例、液体容量 27mm・揺れありの 500g :  $53.8 \pm 9.2 \text{ g/l}$ , 750g :  $76.4 \pm 21.5 \text{ g/l}$ , 1000g :  $43.8 \pm 14.2 \text{ g/l}$ )。この傾向は、視覚刺激が異なる場合でも同様であった。

以上の結果より、視覚刺激が重さ知覚に与える影響が強いほど、液体の質量を大きく推測していること(錯覚量が大きいこと)が示唆された。

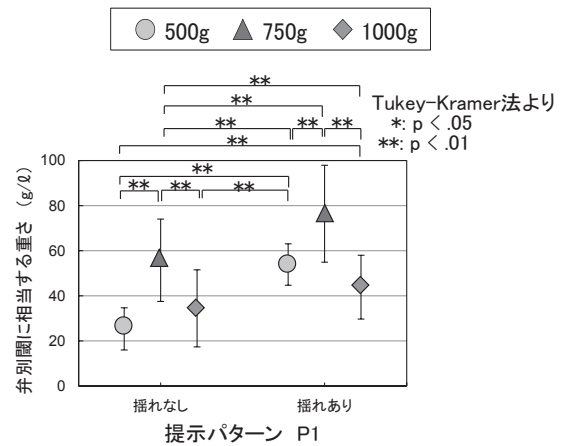
また、今回の実験により、重さ知覚に影響を与えるパラメータ(揺れの有無と液体容量)それぞれの影響を、質量として比較することが可能となった。例えば、実物体の質量が 750g の場合、液体容量 27mm で揺れありの場合に知覚される単位リットルあたりの重さは  $76.4 \pm 21.5 \text{ g/l}$ に対して、液体容量 23mm で揺れなしの測定値は  $55.7 \pm 18.3 \text{ g/l}$ である。これらの測定値の差は、 $20.7 \text{ g/l}$ となる。一方、液体容量 63mm, 揺れありの測定値は  $66.3 \pm 30.0 \text{ g/l}$ であり、液体容量 27mm, 揺れありとの測定値の差は、 $10.1 \text{ g/l}$ となる。この測定値の差からもわかるように、液体容量の差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ことがわかる。

## 7 むすび

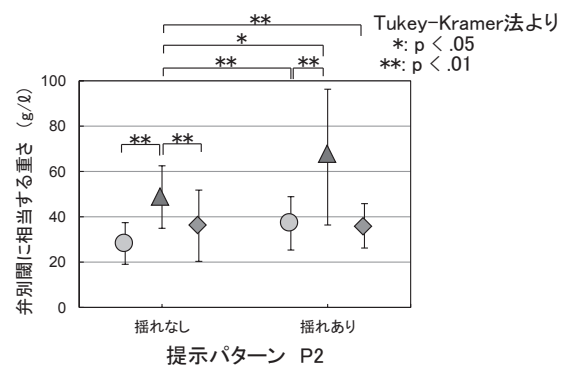
本論文では、実物体の質量や液体容量を変更し、各条件下で知覚する重さの弁別閾を求めることにより、R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を測定した。その結果、以下の3つのことがわかった。

- ・ 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、重さの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、液体の単位リットルあたりの重さは大きくなること

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、液体容量の変化に



(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 Experiment 3

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わかった。

本稿では、各質量における R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を測定した。この結果を利用することで、ある重さを知覚させたい場合は、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、質量の条件は 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。今後は MR 型視覚刺激を利用した重さ錯覚の定量化や効果的に錯覚を発生させるための条件を調べる実験を行っていく予定である。

## 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 S「複合現実型情報空間の表現力基盤強化と体系化」、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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 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, Oxford Univ Press for Am Physiol Soc, New York, 1996.
- [6] D.I. McCloskey: “Kinesthetic sensibility,” *Physiol Rev* 58, pp. 763 - 820, 1978.
- [7] P.R. Burgess, J.Y. Wei, F.J. Clark, J. Simon: “Signaling of kinesthetic information by peripheral sensory receptors,” *Annu Rev Neurosci* 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] 金載侏, 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.