

R-V Dynamics Illusion における各種刺激の影響分析 (6)

～実物体の各種条件の拡張と評価～

坂海輝^{†1} 藤光翼^{†1} 片岡佑太^{†2} 山田泰己^{†2} 橋口哲志^{†3} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要：我々は、実物体に対して、振り動作に応じて揺れる仮想の液体を重畳描画したところ、物体の重さ知覚が変化する錯覚現象に遭遇した。この錯覚現象を“R-V Dynamics Illusion”と命名し、これまで錯覚が知覚に与える影響や、発生条件を明らかにする研究を行ってきた。しかし、実物体と仮想物体の組み合わせは多様であり、先行研究で確認されてきた錯覚の発生条件は限定的であった。そこで本稿では、実物体の「質量」と「把持方法」の条件を拡張し、各条件を組み合わせ、従来の重さ知覚に与える影響を評価することに加えて、振りやすさの観点からも評価を行い、R-V Dynamics Illusion が触力覚に与える影響を分析した。

キーワード：Mixed Reality, R-V Dynamics Illusion, 重さ知覚

1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、現実空間と仮想空間を実時間で違和感なく融合することが可能である。人工現実感 (Virtual Reality; VR) の発展形である本技術は、従来の VR 技術の限界を打破するものとして期待が大きく、医療や教育、娯楽といった様々な分野への応用が期待されている。

MR 空間では、実空間に存在するものに対して、付加させたい情報だけを電子的に生成して融合することが可能である。この特性を利用することで、実物体の触感を得ながら、そこに電子的な視覚情報を重ね合わせることができる。そのため、視触覚間の情報が異なるという、実空間では作り出すことが困難な状況を、意図的に作り出すことが可能である。

一方、視覚と触覚に取って代わって差異を生じさせることで、触力覚に錯覚が発生することが知られている。例えば、Pseudo-Haptics [1] は、身体の動作と、その動作を反映した視覚情報の間に差異を生じさせることで、物理的な刺激を提示することなく、疑似的な触力覚を生じさせる。

我々が所属する研究グループでも、MR 空間において、身体の動作と、その動作を反映した視覚情報の間に差異が生じた場合に、触力覚にどのような影響があるかについて分析を行ってきた [2-4]。その過程で、体験者の振り動作に応じて液体が揺れる CG 映像を剛体のケースに重畳描画したところ、ケース内の液体が動いたような触感やケース自体の重さが増したように感じる錯覚現象に遭遇した。我々はこの現象を、実物体 (R) と仮想物体 (V) の異なる運動状態が引き起こす錯覚現象“R-V Dynamics Illusion”と命名し、これまでに錯覚によって発生する知覚の変化を系統的に分析して

きた [5-10]。

R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を分析する中で、実物体の質量に着目した実験が行われた。その結果、実物体の質量が変化しても R-V Dynamics Illusion が発生し、重さを錯覚することを確認した [10]。しかし、上記の先行研究は質量の条件が限定的であり、実物体を容易に把持できないほど質量を大きくした場合や、非常に小さな質量にした場合の実験は行われていない。また、ヒトの重さ知覚は物理的な質量の違いに限定されるわけではなく、持ち上げる際の力の入れ方や、把持方法によって変化することが明らかになっている [11]。R-V Dynamics Illusion は、物体を振ることで錯覚が発生するため、どのような質量と把持方法で生じするかについて検討することは肝要である。

さらに本錯覚について、2015年9月29日～10月3日に開催された「ISMAR 2015」で技術展示を行ったところ、体験者から、「液体を見ながら振ると振りやすく感じる」といったコメントが得られ、提示する視覚情報によって、重さ知覚に加えて振りやすさも変化していることが示唆された。

そこで本稿では、実物体の「質量」および「把持方法」の各種条件を拡張し、これまで確認されてきた重さ知覚、および振りやすさの知覚へ与える影響を分析した内容について報告する。

2. 関連研究

R-V Dynamics Illusion は、実物体に重畳描画された液体や球などの仮想物体が、体験者の動作に合わせて動くことで、重さが変わったり、内容物が移動しているように知覚したりする一種の錯覚である。視覚情報のみを変更することで疑似的に触力覚が変化することから一種の Pseudo-Haptics と考えることもできる。

Pseudo-Haptics は、視覚情報のみを変更することで、触力覚提示デバイスを使用することなく様々な触覚を提示することが可能である。例えば Punpongsonon ら [12] は、柔らかい実物体を指で押し込む際に、模様の動きをプロジ

^{†1} 立命館大学 情報理工学部

School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

^{†2} 立命館大学大学院 情報理工学研究科

Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

^{†3} 龍谷大学 理工学部

School of Engineering Science, Ryukoku University

ェクタで表現して視覚的に変調することで、硬さ知覚が変化することを報告している。その他にも Lecuyer ら [13] は、操作している実物体の動きに対する、仮想物体の速度に差異を発生させることで、抵抗感や凹凸感を表現できることを報告している。また、Ban ら [14][15] は、実物体をつまんだ手を変調することで、仮想物体の大きさや傾きに応じた知覚に変化することを報告している。

さらに、視覚情報を変更することで、実物体の重さ知覚を錯覚させる現象も数多く発見されている。著名な現象として Size-Weight Illusion が挙げられる [16]。これは、同質量の物体でも、視覚的な体積が大きい物体ほど持ち上げた際に、軽く知覚する錯覚現象である。その他にも、物体の明度 [17] や見た目の材質 [18] によって、ヒトはその物体を持ち上げた際の重さを錯覚することがある。これらの錯覚現象は、視覚情報だけではなく実物体の重さや大きさなどを変更した場合についても発生するのかが検討されている。例えば倉井ら [11] は、視覚情報だけでなく持ち上げる際の把持方法によって重さ知覚が変化することを報告している。つまり、R-V Dynamics Illusion においても実物体の条件によっては、錯覚現象への影響も否定できない。

以上のことから、実物体の各種条件を変更することで、R-V Dynamics Illusion に影響を与える可能性は高い。そこで、本研究では実物体の質量、および把持方法を変更し、それぞれが R-V Dynamics Illusion に与える影響を重さと振りやすさの観点から分析する。

3. 実験目的と準備

3.1 実験目的

本実験では、実物体の質量と把持方法の条件によって R-V Dynamics Illusion の発生にどのような影響を与えるか分析を行う。

実験 1 では、R-V Dynamics Illusion がどのような条件で発生し、重さ知覚に影響を与えるか分析するため、様々な質量と把持方法を組み合わせることによって、実物体の重さの評価を行う。

実験 2 では、同条件における振りやすさの評価を行う。各実験を通して、実物体の各種条件が錯覚に与える影響を分析する。

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で使用する MR システムの構成を図 1 に示す。MR 空間を構築するために、ビデオスルースルー型 HMD (Canon, HM-A1) および MREAL Platform System (Canon, MP-110) を使用した。また、実物体に仮想物体を重畳描画するために、実験参加者の頭部と実物体の位置姿勢情報を磁気センサ (Polhemus, 3SPACE FASTRAK) から取得した。

さらに、MR 空間を観察する際、HMD のキャプチャ画像に対して仮想物体を重畳描画すると、仮想物体が実物体より

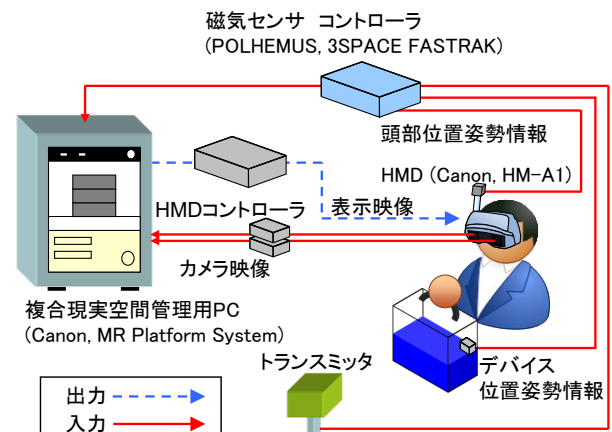


図 1 MR システムの構成



図 2 使用する実物体

も手前に描画されるオクルージョン問題が発生する。そこで、HMD からキャプチャした画像に対して、手領域の抽出とマスキング処理を行うことで、実物体と仮想物体の位置関係が正しく保たれるよう処理した。

【実物体】

実験参加者に把持させる実物体として、把手を取り付けた幅 165mm × 高さ 90mm × 奥行き 80mm のアクリルケース (以下、ケースとする) を使用した (図 2)。実験では下記の、質量が異なる 3 種類の実物体を使用しており、錘を入れることで質量を調整している。

- 150g: ケースを構築する上での最小質量
- 750g: ケースの半分の高さまで水を入れた際の質量
- 2000g: 男性が片手で把手をつまんで振れる最大質量

本実験では実物体のケースを把持し、振り動作を行うが、その際の把持方法としては、様々考えられる。例えば、「握りこむ、つまむ、掌にのせる、側面を持つ、指に引っ掛ける」などの把持方法である。しかし、これら全てに対して実験を行うと試行回数が膨大となるため、本実験では、代表的な把持体系となる下記の 3 種類の方法で把持させた (図 3)。

- 握りこむ: 自然に振ることで安定して振ることができる
- つまむ: 安定感に欠けるが精密に物体の情報を把握できる
- 掌にのせる: 安定感はあるが振る動作に不向き

【仮想物体】

重畳描画する仮想物体のケースの寸法は、実物体と同様の大きさ (幅 165mm × 高さ 90mm × 奥行き 80mm) とした。

また、ケース内に重畳描画する液体の高さは、ケースの半分の高さである 45mm とした。なお、ケースは白色、内部の液体は青色に着色されている (図 4)。重畳描画する仮想物体として、下記の 3 種類の視覚情報を使用した。

- ・仮想物体なし：仮想物体を何も重畳描画しない条件
- ・揺れなし：実物体を振ってもケースに重畳描画した液体が揺れない条件
- ・揺れあり：実物体を振るとケースに重畳描画した液体が揺れる条件

液体の揺れには、しぶきや波のような詳細表現は行わず、液面を直線に近似した簡易的なモデルを適用した [5]。

3.3 評価方法

実験参加者に 2 種類の視覚情報の実物体を振らせ、重さや振りやすさについて比較をさせた。先行研究 [9] では、Thurston の一対比較法 [19] を使用し実験が行われた。しかし、Thurston の方法は、比較した条件が曖昧な差異であっても、強制的に優劣を判断させる手法であるため、差異が見られない条件間であっても、差異があると判断される可能性がある。そこで本実験では、差異を感じないという中間的な回答も許容する Scheffé の一対比較法 [20] を使用して評価を行った。

まず実験 1 の重さに関する評価では、実験参加者に 2 種類の実物体を振らせたあと、前者または後者のどちらが軽いかを評価シートに指差しで回答させた。評価シートは、5 段階のリッカート尺度を使用し、「前者が軽い (-2)」「どちらかと言えば前者が軽い (-1)」「同じ軽さ (0)」「どちらかと言えば後者が軽い (+1)」「後者が軽い (+2)」とした。

続いて実験 2 の振りやすさの評価では、実験 1 と同様に、実験参加者に 2 種類の実物体を振らせたあと、どちらが振りやすかったかを回答させた。評価シートは、「前者が振りやすい (-2)」「どちらかと言えば前者が振りやすい (-1)」「同じ振りやすさ (0)」「どちらかと言えば後者が振りやすい (+1)」「後者が振りやすい (+2)」とした。

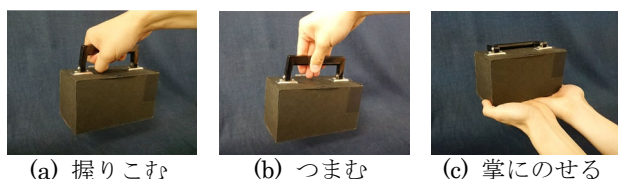


図 3 実験で使用する把持方法

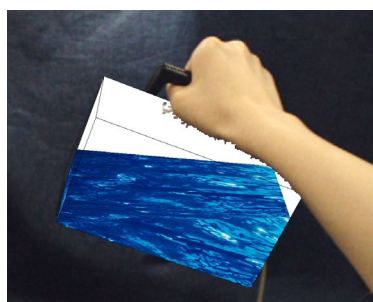


図 4 ケースに重畳描画する液体

4. 実験 1：質量や把持方法が R-V Dynamics Illusion に与える影響の確認

4.1 実験目的

実物体の質量や把持方法が R-V Dynamics Illusion に与える影響を重さの観点から評価するため、それぞれの組み合わせごとに実物体の重さを比較する。また、どのような条件の場合に R-V Dynamics Illusion が発生しやすいか傾向を分析する。

4.2 実験条件

実物体の質量 3 種類 (150g, 750g, 2000g)、把持方法 3 種類 (握りこむ、つまむ、掌にのせる) を組み合わせた 9 条件で評価する (表 1)。そして、9 条件それぞれに対して、視覚情報 3 種類 (仮想物体なし、揺れなし、揺れあり) のうち、2 種類を振り比べながら重さを比較する。つまり、試行回数は $9 \times 3P_2$ (実物体の質量と把持方法の組み合わせ \times 仮想物体の組み合わせ) = 54 回となる。

様々な質量の実物体の比較を繰り返すと、前試行の質量が次試行の結果に影響する可能性があるため、1 日の試行は 1 種類の質量のみで行った。例えば、表 1 における、同じ質量の条件 P1, P2, P3 は同日に実験を行い、異なる質量の条件 P1, P4, P7 では同日に実験を行わない。さらに、質量が大きい P7, P8, P9 の条件の試行については、それぞれの試行で 1 日あけ、筋疲労の影響を排除した。

実験時は、姿勢や振り動作を統制するように教示した。実験参加者には、直立した姿勢で肘を約 45 度に屈曲させ、実物体を把持させた。振り動作は、全ての把持方法でメトロノームのテンポに合わせて実物体を振れることが確認できた 70 BPM とした。また、実物体が水平のときを 0 度とし、約 30 度で左右に振るよう教示した。さらに、手を内側にひねる向きから振り始めるよう統制し、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。

表 1 実験 1 での提示パターン

	P1	P2	P3
提示パターン			
質量	150g	150g	150g
把持方法	握りこむ	つまむ	掌にのせる
	P4	P5	P6
提示パターン			
質量	750g	750g	750g
把持方法	握りこむ	つまむ	掌にのせる
	P7	P8	P9
提示パターン			
質量	2000g	2000g	2000g
把持方法	握りこむ	つまむ	掌にのせる

4.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 実験参加者に HMD を装着させる
- (2) 9 種類 (P1~P9) の条件の中から 1 つをランダムに選択する
- (3) 3 種類 (仮想物体なし, 揺れなし, 揺れあり) の提示パターンの中から 2 つをランダムに選択する
- (4) (3) で選出した提示パターンの 1 つを提示する
- (5) メトロノームに合わせて実物体を 10 回振らせる
- (6) (3) で選出したもう一方の提示パターンを提示し, (5) を繰り返す
- (7) 1 つ目と 2 つ目の提示パターンを比較し, どちらがより軽く知覚したかを 5 段階で回答させる
- (8) 同一の実物体の質量と把持方法で, 残りの提示パターンも (3)~(7) を繰り返す

実験参加者は成人男性 10 名である。また, 試行を連続で行われた場合, 筋疲労が重さ知覚に影響を与える可能性があるため, 試行間で腕に疲労感や違和感が無いかを確認した。そして, 感覚の変化がある場合は変化が回復するまで休憩を取らせた。

4.4 実験結果・考察

実験 1 の結果を図 5 に示す。図中の数直線は重さの心理尺度を示しており, 数値が小さいほど実物体を重く知覚し, 数値が大きいほど実物体を軽く知覚していることを示す。また, (a)~(c) は実物体の質量ごとに分類しており, 各数直線は把持方法ごとに分類している。結果から, 以下のことがわかる。

- (i) 質量が 150g の場合は, 把持方法が「握りこむ」のときのみ, 「揺れあり」の提示パターンを最も軽く知覚する
- (ii) 質量が 750g, 2000g 場合は, 把持方法に依らず「揺れあり」の提示パターンを最も軽く知覚する
- (iii) 「仮想物体なし」の提示パターンを重く知覚する傾向にある

(i) では, P1 (150g, 握りこむ) において, 「揺れなし」と「揺れあり」の提示パターン間に有意差が見られたが, P2 (150g, つまむ) と P3 (150g, 掌にのせる) には, それらの提示パターン間に有意差は見られなかった。このことから, 質量が小さい実物体の場合, R-V Dynamics Illusion は把持方法によって発生しにくくなり, 重さ知覚に与える影響が小さくなったと考えられる。

(ii) では, P4 (750g, 握りこむ) ~P9 (2000g, 掌にのせる) の 6 条件において, 「揺れなし」と「揺れあり」の提示パターン間に有意差が見られた。これらは, 把持方法に依らず仮想の液体が揺れることで実物体を軽く知覚しているため, (i) の結果を踏まえると R-V Dynamics Illusion の発生には把持方法より, 実物体の質量が影響を与えることが示唆される。

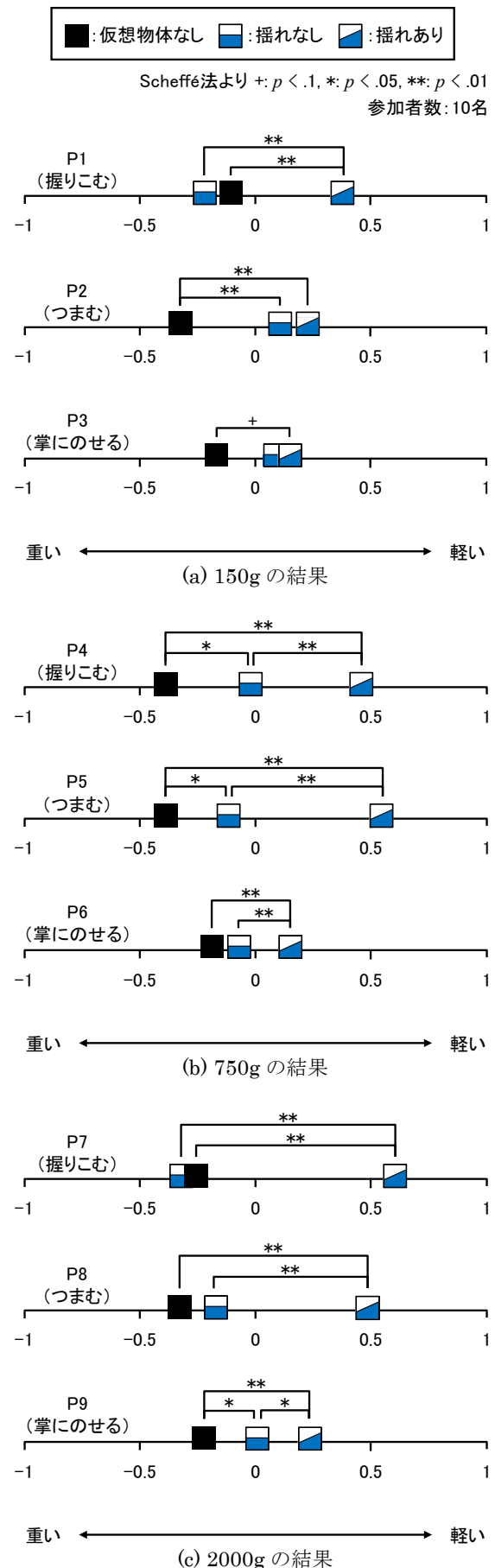


図 5 実験 1 結果 (重さの評価)

(iii) では、「仮想物体なし」の提示パターンと、揺れの有無に関わらず仮想の液体を重畳描画した提示パターン間に有意差が複数見られることから、仮想物体を重畳描画しない場合に最も重く知覚する傾向がある。この要因として、提示パターン間の明度の差が重さ知覚に影響を与えた可能性がある。小谷ら [17] は、CG 映像によって見た目を黒くした物体よりも、見た目を白くした物体の方が、持ち上げた際に軽く知覚することを報告している。本実験においても、仮想の液体を重畳描画することでケース表面の明度が変わるため、その差が重さ知覚に影響を与えた可能性が考えられる。

5. 実験 2: 振りやすさの評価における R-V Dynamics Illusion の分析

5.1 実験目的

実験 1 では、実物体の質量や把持方法が、R-V Dynamics Illusion に影響を与えることを重さの観点から確認した。実験 2 では、様々な質量や把持方法の組み合わせごとに、振りやすさの観点から R-V Dynamics Illusion への影響を分析する。

5.2 実験条件と実験手順

実験 1 と同様、実物体の質量 3 種類 (150g, 750g, 2000g) と、把持方法 3 種類 (握りこむ, つまむ, 掌にのせる) を組み合わせた 9 条件で評価する (表 1)。試行回数や休憩、姿勢など、実験上の統制は実験 1 と同様である。

また、実験手順も実験 1 と同じであるが、4.3 節の手順 (7) のみ、重さの評価から振りやすさの評価に変更している。実験参加者は成人男性 10 名である。

5.3 実験結果・考察

実験 2 の結果を図 6 に示す。図中の数直線は振りやすさの心理尺度を示しており、数値が小さいほど実物体を振りにくく感じており、数値が大きいほど実験参加者は実物体を振りやすく感じていることを示す。また、(a)~(c) は実物体の質量ごとに分類しており、各数直線は把持方法ごとに分類している。結果から、以下のことがわかる。

- (i) 全ての質量において、把持方法が「掌にのせる」の場合は、「揺れあり」の提示パターンを振りやすく感じる傾向は見られない
- (ii) 質量が 150g の場合は、液体の揺れを表現したときでも、振りやすく感じる傾向は見られない
- (iii) 質量が 750g・2000g の場合は、把持方法が「握りこむ」と「つまむ」のときに、「揺れあり」の提示パターンを振りやすく感じる

(i) では、P3 (150g, 掌にのせる), P6 (750g, 掌にのせる), P9 (2000g, 掌にのせる) において、「揺れあり」の提示パターンを振りやすく感じる傾向は見られなかった。把持方法が「掌にのせる」の場合は、掌にのせて左右に傾けながら振るため、他の把持方法に比べ振りにくく、ケー

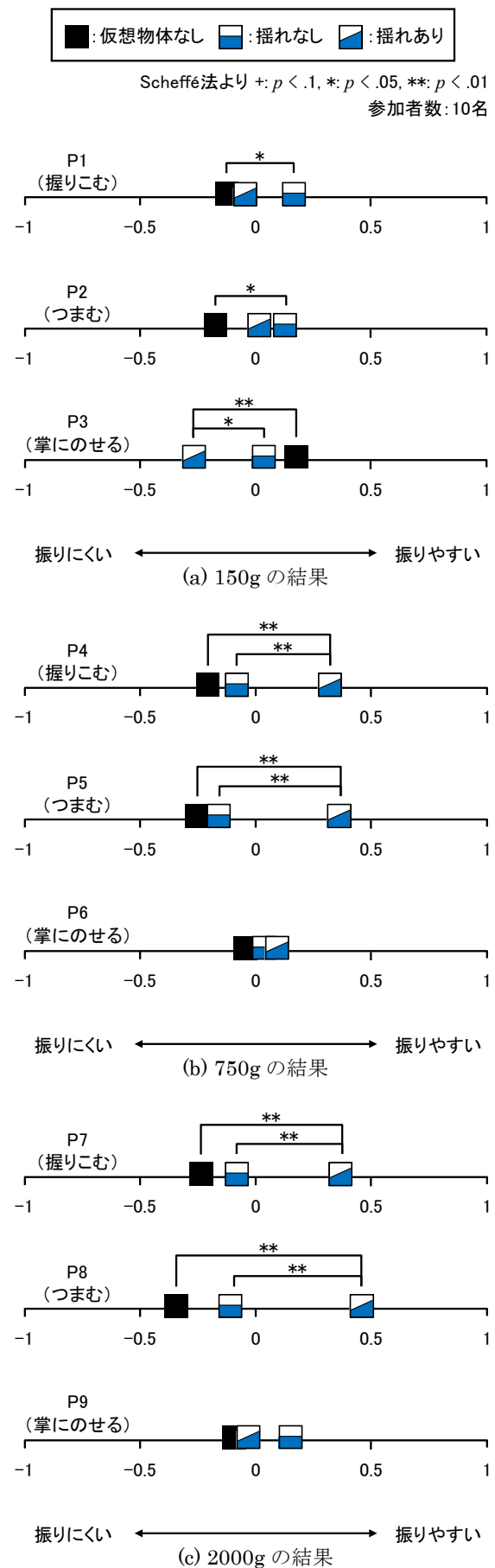


図 6 実験 2 結果 (振りやすさの評価)

スが掌から滑り落ちそうになる印象がある。また、ケースが軽くなるにつれ、手とケースの摩擦力も小さくなりその傾向が一層顕著になる。

R-V Dynamics Illusion は仮想の液体が揺れることで実際には中身が動いていないにも関わらず中身が動いたように知覚させる効果もある。P3は「揺れあり」の提示パターンを最も振りにくく感じているが、仮想の液体の揺れにより中身の疑似的な揺れを知覚し、より不安定な印象を与えたことがその要因ではないかと考えられる。一方、150gより実物体の質量が大きい条件は、手とケースの摩擦力が強くなることでケースが掌から滑り落ちそうになる印象が小さくなったため「揺れあり」の提示パターンは有意差が出るほど振りにくくなかったのではないかと考えられる。

つまり、本錯覚現象によって発生した中身の疑似的な揺れと振り方の不安定さにより、「掌にのせる」の提示パターンでは振りがよく感じなかったのではないかと示唆される。

(ii) では、P1, P2, P3 いずれの条件においても、「揺れあり」を「揺れなし」の提示パターンより振りがよく感じることはなく、質量が小さい場合には視覚情報による振りがやすさへの影響は小さいことがわかる。質量が小さいほど、液体の揺れの影響を受けにくくなる傾向は実験1と同様であった。

(iii) では、P4, P5 (750g, つまむ), P7 (2000g, 握りこむ), P8 (2000g, つまむ) の4条件で、有意差が見られ、「揺れあり」を「揺れなし」の提示パターンよりも振りがよく感じていることがわかる。

(i)~(iii) の結果から、不安定な振り方や、質量が小さい実物体は R-V Dynamics Illusion の錯覚の効果に影響を与え、把持したケースが振りにくくなることを確認した。

6. むすび

本研究では、実物体の質量と把持方法が R-V Dynamics Illusion に与える影響を分析するため、様々な質量と把持方法を組み合わせ、重さと振りがやすさの観点から R-V Dynamics Illusion の影響を評価した。

本実験では、質量が小さい実物体の場合、把手を握りこむときに仮想の液体の揺れを提示することで実物体を軽く知覚することを確認した。そして、質量がある程度大きい実物体の場合、把持方法に依らず仮想の液体の揺れを提示することで実物体を軽く知覚することを確認した。これらのことから、重さの観点において R-V Dynamics Illusion の発生には把持方法より、実物体の質量が影響を与えることが示唆された。

また、質量がある程度大きい実物体かつ、把手を握りこむ、あるいは、つかむ場合、液体の揺れを提示することで振りがよく感じることを確認した。一方で、質量が小さい実物体の場合、液体の揺れが振りがやすさに与える影響は小さくなることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、科研費・基盤研究 A「手掌触覚伝達による手術手技の遠隔 VR 実地訓練基盤構築」、基盤 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] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet: "Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?," *Proc. Virtual Reality*, pp. 83 - 90, 2000.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Y. Kataoka, S. Hashiguchi, F. Shibata, and A. Kimura: "R-V Dynamics Illusion: Psychophysical phenomenon caused by the difference between dynamics of real object and virtual object," *Proc. ICAT*, pp. 133 - 140, 2015.
- [7] 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.
- [8] 橋口哲志, 片岡佑太, 柴田史久, 木村朝子: "R-V Dynamics Illusion: 実物体と仮想物体の異なる運動状態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. 21, No. 4, pp. 635 - 644, 2016.
- [9] 大嶋佳奈, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響の測定と考察", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, No. 2, pp. 259 - 267, 2017.
- [10] Y. Kataoka, S. Hashiguchi, T. Yamada, F. Shibata, and A. Kimura: "R-V Dynamics Illusion experience system in mixed reality space," *IEEE ISMAR*, 2015.
- [11] 倉井賢一, 飯田健夫: "重さ判断に及ぼす把持条件", *人間工学*, Vol. 33, No. 6, pp. 379 - 384, 1997.
- [12] P. Punpongson, D. Iwai, and K. Sato: "SoftAR: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality," *Trans. on TVCG*, Vol. 21, No. 11, pp. 1279 - 1288, 2015.
- [13] A. Lecuyer: "Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39 - 53, 2009.
- [14] Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Modifying perceived size of a handled object through hand image deformation," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 22, No. 3, pp. 255 - 270, 2014.
- [15] Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Modifying an identified position of edged shapes using pseudo-haptic effects," *Proc. VRST*, pp. 93 - 96, 2012.
- [16] A. Charpentier, "Experimental study of some aspects of weight perception," *Archives de Physiologie Normales et*

Pathologiques, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.

- [17] 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, No. 4, pp 185 - 190, 2001.
- [18] H. Ross: “When is a weight not illusory?,” *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 21, No. 4, pp. 346 - 355, 1968.
- [19] L. L. Thurstone: “A law of comparative judgments,” *Psychological Review*, Vol. 34, pp. 273 - 286, 1927.
- [20] H. Scheffé: “An analysis of variance for paired comparisons,” *Journal of American Statistical Association*, Vol. 147, pp. 381 - 400, 1952.