

R-V Dynamics Illusion が Size-Weight Illusion に与える影響

西川歩未^{†1} 片岡佑太^{†2} 橋口哲志^{†1} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要: “R-V Dynamics Illusion” は、実物体に液体を模した仮想物体を重畳描画し、実物体の運動状態を視覚的に変更することによって、物体の重さ知覚に影響を与える錯覚現象である。一方、同じ質量の物体でも、形状が大きいものを軽く、小さいものを重く知覚する “Size-Weight Illusion” も、重さに関する錯覚現象としてよく知られている。先行研究では、R-V Dynamics Illusion において、実物体と仮想物体を全て同一形状に限定していたが、外観の大きさを変更することによって Size-Weight Illusion が同時に発生することは十分に考えられる。そこで、本研究では R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion を組み合わせた際の依存・補完関係を確認した。

キーワード: 複合現実感, 重さ知覚, R-V Dynamics Illusion, Size-Weight Illusion

1. はじめに

実空間に仮想物体を実時間で継ぎ目無く融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、人工現実感 (Virtual Reality; VR) の発展系として注目を集めている。MR 研究やその応用の大半は、幾何学的整合性や光学的整合性など、視覚的な MR の実現に向けられてきたが、近年多感融合 (視覚, 聴覚, 触覚) を目指した MR 研究も活発化している。

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・融合することができる。例えば、玩具の銃に対し、近未来的な銃の CG 画像を重畳描画するといったように、実物体に触れながら、その表面に実際とは異なる CG モデルを重畳描画することで、CG による視覚と実物の触感を上手く融合する (リアリティを向上する) ことができる。

一方、MR 技術を利用すれば、見ているものと触っているものが異なるという、現実世界では起こり得ない状況を実現することもできる。人の触力覚は視覚からの刺激の影響を受けることが知られているが、このような状況下では、どのような触力覚が知覚されるのだろうか？

見ているものと触っているものの間に意図的に齟齬を生じさせた例として、Pseudo-Haptics という錯覚現象が知られている。Pseudo-Haptics は、身体動作とそれを反映した視覚刺激の間に齟齬を生じさせることにより、触力覚提示装置を用いることなく擬似的な触力覚を生起することができる錯覚現象である [3]。

同様に、我々は MR 空間において視触覚間に齟齬を発生させることで、触力覚に様々な変化が生じることを確認してきた [4-6]。その過程で、実物体 (剛体) の内部に液体の CG を重畳描画し、体験者の手の振りに応じて液体を揺らしたところ、触力覚の変化を伴う錯覚現象に遭遇した。

我々は、このような実物体 (R) と仮想物体 (V) の異なる運動状態が引き起こす錯覚を R-V Dynamics Illusion と命名し、種々の触力覚の中でも特に、顕著な変化があった重さ知覚に着目し、系統的实验を行ってきた [7][8]。具体的には、実物体と仮想物体の大きさを同一形状とし、剛体の実物体に対して仮想の液体を MR 提示した際に、物体を軽く知覚することを確認した。

一方、重さ知覚における錯覚現象の顕著な例として Size-Weight Illusion (大きさ重さ錯覚) が知られている。Size-Weight Illusion は、同じ質量の物体にも関わらず、その形状の大小に応じて異なる重さに知覚される錯覚現象である [9]。

Size-Weight Illusion については、発生メカニズム解明に向けて古くから取り組まれているが、物体内部に可動物が入っている場合については検証されていない。また、R-V Dynamics Illusion に関しても、物体の容積と仮想物体の運動状態を同時に変化させた場合に、どちらの影響がより強いのか (それぞれが加算的に影響するのか、打ち消し合うのか) まだ確認されていない。

そこで本研究では、Size-Weight Illusion と、動的な視覚刺激の提示を行う R-V Dynamics Illusion を組み合わせた際の影響を確認し、その依存・補完関係について報告する。

2. 関連研究

人間は、身体の能動的な筋肉運動 (振る・持つ・叩くなど) により、物体の重さや大きさ、性質などを知覚することが可能である。これはダイナミックタッチと呼ばれ [10]、この特性を活かした触力覚提示デバイスが開発されてきた。例えば、PHANToM [1] や SPIDAR [2] のように、アームやワイヤを体験者が動かし、仮想物体との接触感を提示することによって、VR/MR における表現力向上が目指されてきた。しかし、何れも接地型の装置であり、体験環境によっては装置の大型化は避けられない。

一方、触力覚提示デバイスを用いることなく擬似的な触力覚を提示する手法として、Pseudo-Haptics が知られている。Lecuyer らは、マウスカーソルの移動速度を変化させ

^{†1} 立命館大学 情報理工学部
College 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

ることで、表面形状の凹凸を表現する手法を提案している [11]. また、Ban らは、実物体の形状をディスプレイ越しに変化させることで、硬さが変わったように知覚することを確認した [12]. このように視覚・触覚相互作用では視覚刺激が優位となり、触覚に影響を与えることがわかる. また、力覚に関しても視覚刺激の影響を受けることが分かっており、Taima らは、MR 技術を利用し、把持物体の持ち上げ量を多く見せかけることで、疲労が軽減するという知見を報告している [13]. 本研究で扱う R-V Dynamics Illusion も、MR 型視覚刺激を利用することで、触力覚提示デバイスを利用することなく、疑似的に力覚を変化させる錯覚現象である.

Size-Weight Illusion は、物体の形状が小さいものを重く、大きいものを軽く知覚する現象であるが、これは視覚情報がある場合の方が、より顕著に効果が得られることが分かっており [14], Rock らは、体験者が手に持った実物体を、拡大鏡を用いて視覚的に大きさを変更することで、異なる重さに知覚されると報告している [15]. 金らは、SPIDAR を用いて Size-Weight Illusion の発生を検証し、見た目から予測した重さと、実物体を把持した際の体性感覚との齟齬によって生じることを示唆した [16]. しかし、Size-Weight Illusion に関する諸般の研究は、実空間での錯覚現象の確認や、ディスプレイを用いて間接的に表示している例が多い.

本研究では、まず実空間で把持している物体の外観のみを MR 技術によって変更することで、MR 空間でも Size-Weight Illusion が発生するかどうかを確認する.

一方、実物体内部の動的変化を錯覚させる研究として、南澤らは、指先装着型の力覚提示装置を用いて、仮想物体内部の質量や内部ダイナミクスを表現する手法を提案している [17]. また、実物体に液体を模した仮想物体を重畳描画することで、重さ知覚にも影響を与えることが分かっている [7][8]. Size-Weight Illusion の効果に加え、そこに内部ダイナミクスを発生させることで、R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の両方の効果が現れる可能性は高い. そこで本研究では、MR 空間における Size-Weight Illusion の効果を確認すると共に、内部ダイナミクスを生起させた際の両錯覚現象の影響を分析する.

3. 実験目的と実験準備

3.1 実験目的

本研究では、R-V Dynamics Illusion が Size-Weight Illusion に与える影響について、両錯覚現象の依存・補完関係を確認する. まず予備実験では、実物体に対して異なる形状の仮想物体を重畳描画し、MR 空間において Size-Weight Illusion が発生するか確認する. 実験 1 では、Size-Weight Illusion に対して、物体内部に液体の揺れを想起させる仮想物体を重畳描画し、揺れの有無によって重さ知覚が異なるか主観実験によって確認する. 実験 2 では、その液体容量

を変更し、実験 1 と同様に主観実験を行う. また、実験 3 では、主観実験でのパラメータにおける筋電計測を行い、錯覚が起こっている際の、人間の運動学的変化を観察する.

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で用いた MR システムの構成を図 1 に示す. MR を実現するためのシステムとして、ビデオスルー型 HMD (Canon, HM-A1) および Canon MREAL を用いる. また、被験者の頭部と実物体の位置姿勢情報を、磁気センサ (Polhemus, 3SPACE FASTRAK) によって取得することで、実物体上に仮想物体を重畳描画している.

さらに、MR 空間を観察する際、単純に仮想物体を重畳描画すると、仮想物体が実物体よりも手前に描画されるオクルージョン問題が発生する. この問題に対し、HMD からのキャプチャ画像に対し、手領域の抽出とマスキングを行い、手領域に CG 映像が描画されないよう処理する.

【実物体】

実験では、把手を取り付けたアクリルケース (幅 165mm × 高さ 90mm × 奥行き 80mm) を実物体として用いる. ケース内部には錘を入れて固定し、同じケースの高さ 45mm まで水を入れた際の重量である 750g に調整している (図 2).

【仮想物体】

仮想物体として提示する容器の寸法は、実物体と同様の大きさ (幅 165mm × 高さ 90mm × 奥行き 80mm) を基準として、容器の高さを 135mm (150%), 180mm (200%), 225mm

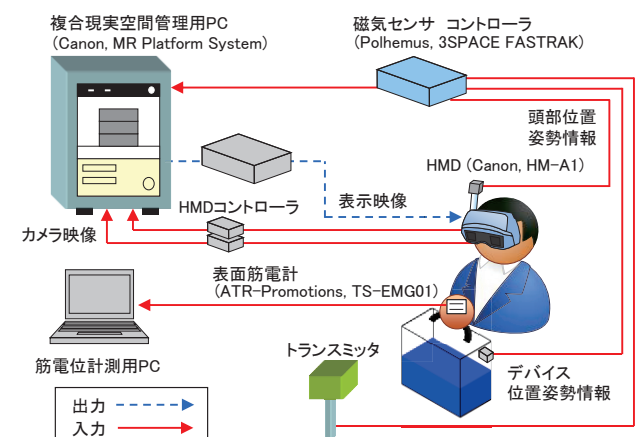


図 1 機器構成

Figure 1 System configuration

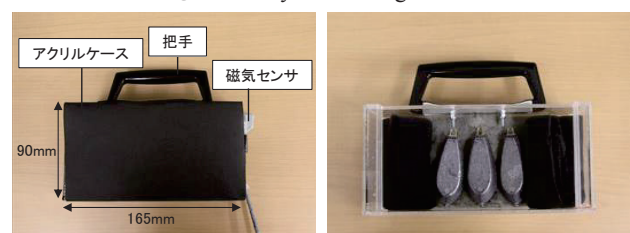


図 2 実験で使用した実物体

Figure 2 Real object used in experiments

(250%) の 4 種類を用意した (表 1)。

予備実験では、形状が異なる仮想容器のみを、実物体に対して重畳描画する (表 1 A1~A4)。実験 1 では、仮想容器の内部に液体を模した CG 映像を重畳描画する。この際、液体部分は青色、液体のない部分は白色に着色されている (図 3)。さらに、被験者の振り動作に合わせて、液体の揺れがある場合とない場合に分けられる (表 1 B1~B4, B1_1~B4_1)。なお、液体容量は実物体の半分の高さである 45mm に統一している。実験 2 では、実験 1 に対して液体容量を変更した場合の CG 映像を重畳描画する (表 1 C1~C4, C1_1~C4_1)。

被験者は、実物体を左右方向にしか振らないという条件のもと、しぶきや波のような詳細表現は行わず、液面は直線に近似して、液体の揺れを簡易表現した。運動アルゴリズムについては先行研究 [7] を参照されたい。なお、実験風景は図 4 の通りである。

【筋電位測定】

物体の外観を変化するだけで錯覚現象が生起するのであれば、身体の筋活動にも影響を与えることが予想される。そこで、実物体を振る際の回外・回内運動に着目し、特に回外運動時に作用する回外筋を対象として筋電計測を行う。計測には、表面筋電計 (ATR-Promotions, TS-EMG01) を用い、ディスプレイ電極を被験者の前腕に貼付する。なお、電極間距離は 25mm、アース電極は尺骨茎状突起とした。また、表面筋電計から導出されたアナログ信号は、サンプリング周波数 500Hz で取り込む。

表面筋電計により筋活動量を観察する手法として、筋電位の振幅情報を用いて定量化されることが多い [18]。そこで本研究では、回外筋の筋活動量を評価するため、筋電位の振幅情報から算出される。筋肉の活動量を指標化した %MVC (Maximal Voluntary Contraction) を利用する。%MVC は、最大自発筋収縮時の筋電位 (MVC) に対して計測した筋電位 (EMG) の割合を算出する。MVC は別途、自発筋収縮の最大値を計測する [19]。%MVC の算出は、式 (1) の通りである。

$$\%MVC = \frac{\text{計測した筋電位(EMG)}}{\text{最大自発筋収縮時の筋電位(MVC)}} \times 100 \quad (1)$$

解析には数値解析ソフト GNU Octave を用いて、筋電計より得られた波形を全て整流化してから正規化を行い、%MVC を算出する。この%MVC は、把持物体の重さが物理的に重くなると増加する。
























4. 予備実験

4.1 実験目的

まず予備実験として、実物体に対して形状の異なる仮想物体を重畳描画し、MR 空間における Size-Weight Illusion の発生を確認する。実物体は同一条件のもと、視覚的に仮想容器の形状を変更し、Size-Weight Illusion が発生するか

表 1 実験パターン

Table 1 Experimental patterns

	R0#	A1	A2	A3	A4
予備実験					
幅*高さ	165*90	165*90	165*135	165*180	165*225
	R0#	B1##	B2	B3	B4
実験 1					
		B1_1### 	B2_1 	B3_1 	B4_1 
幅*高さ (液量)	165*90	165*90 (45)	165*135 (45)	165*180 (45)	165*225 (45)
	R0#	C1##	C2	C3	C4
実験 2					
		C1_1### 	C2_1 	C3_1 	C4_1 
幅*高さ (液量)	165*90	165*90 (45)	165*135 (90)	165*180 (135)	165*225 (180)

※単位: mm, #の数は同一条件を示す

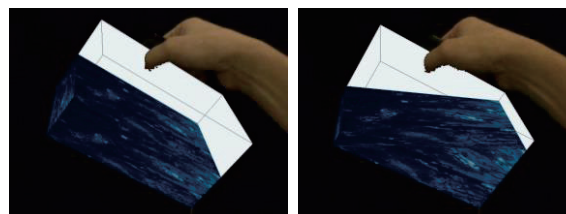


図 3 実験で提示した仮想物体

Figure 3 Virtual object used in experiments

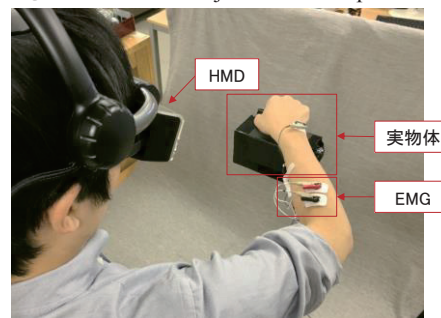


図 4 実験風景

Figure 4 Experimental scene

実験を行った。

4.2 実験条件・手順

【実験条件】

予備実験では、形状が異なる4種類の仮想物体 (A1~A4) 及び、仮想物体を重畳描画しない場合 (R0) を含めた、計5種類を提示する。そのうち2種類をランダムに選出し、サーストンの一対比較法に基づき、どちらがより重く感じたかを比較・回答させた。これにより、被験者が3つ以上の選択肢で迷うことなく、簡便に重さを判断することが可能である。そして、全ての組み合わせについて繰り返し行い、各条件で被験者が知覚する重さの心理尺度を算出する。被験者は成人11名 (男性9名, 女性2名)、試行回数は1名あたり ${}_5C_2=10$ 回である。

また、振り方の違いによる影響を排除するため、姿勢や振り動作は全ての被験者で統制するよう教示した。姿勢は直立した状態で肘を約 90° に屈曲させ、振り動作はメトロノームのテンポ 100BPM に合わせている。実物体の振り幅は水平を 0° とした際、左右それぞれ 30° 程度とし、被験者には教示した通りできるだけ事前に十分な練習をさせた。

【実験手順】

- (1) 被験者に HMD を装着する
- (2) 5種類の提示パターンのうち、2種類をランダムに選出する
- (3) (2) で選出したパターンのうち1つを提示する
- (4) 被験者は決められた姿勢 (肘を 90° に屈曲させた状態) で実物体を把持し、メトロノームのテンポ (100BPM) に合わせて3秒間、物体を左右に振る動作を行う
- (5) (2) で選出した残りのパターンについても、同様に (3)(4) を繰り返す
- (6) 1回目と2回目の試行のうち、どちらがより重く感じたかを回答させる
- (7) 筋疲労による影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (8) 残りの組み合わせについても (2)~(7)を繰り返し行う

4.3 実験結果

予備実験の結果を、図5に示す。図中の数直線は、それぞれの提示パターンにおける重さの心理尺度を示している。数値が小さいほど把持物体を重く、大きいほど軽く知覚していることを表す。符号検定の結果、各条件間に1%有意差が見られた。なお、各マーカの大きさは、提示した仮想物体の大きさに応じて表示している。結果から、以下のことが分かる。

- (i) 仮想物体の形状が小さいほど把持物体を重く、大きいほど軽く知覚する
- (ii) 仮想物体を提示しない場合を、最も重く知覚する
- (iii) 仮想容器の内部が空の場合でも、Size-Weight Illusion が発生する
- (i) より、実物体に対して仮想容器のみを重畳描画した場

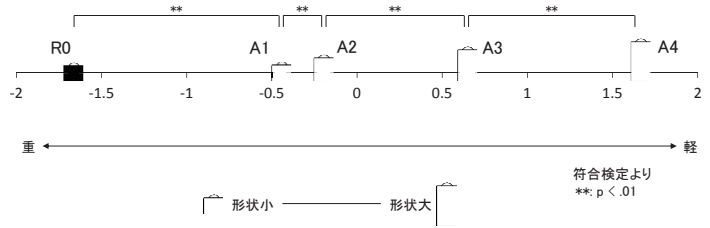


図5 予備実験結果

Figure 5 Result of preliminary experiment

合でも、Size-Weight Illusion の効果により重さ知覚に影響を与えていることが分かる。つまり、実物体は同一条件であっても、仮想容器の形状を変えるだけで Size-Weight Illusion が発生する。(ii) では、R0 と A1 について、同形状にも関わらず有意差が確認できた。R0 は、仮想物体を重畳描画せず、単純に黒い実物体のみを振っている状態であるが、これは明度による差が影響していると考えられる。物体の明度が高いほど、軽く知覚することが報告されており [20]、実物体よりも明度の高い仮想容器の方を、より軽く知覚したと考えられる。そして (iii) において、本実験での仮想物体は、容器内部が視認できるものを重畳描画したが、その状態においても Size-Weight Illusion の発生を確認することができた。

5. 実験1

5.1 実験目的

予備実験では、MR空間における Size-Weight Illusion の発生を確認した。実験1では、仮想容器内部に液体を重畳描画した場合でも、Size-Weight Illusion が発生するか確認する。また、液体の揺れを表現することによる重さ知覚への影響、つまり R-V Dynamics Illusion が Size-Weight Illusion に与える影響を確認する。

5.2 実験条件・手順

実験1では、予備実験で使用した形状の仮想容器を利用する。このとき、仮想容器の内部に一定量の液体を重畳描画するが、被験者の手の動きに合わせて液体が揺れない場合 (B1~B4)、揺れる場合 (B1_1~B4_1) の8種類を用意する (表1)。そして、仮想物体を重畳描画しない条件を含めた、計9種類から2種類をランダムに選出し、サーストンの一対比較法に基づき重さを比較する。被験者は成人11名 (男性9名, 女性2名)、試行回数は1名あたり ${}_9C_2=36$ 回である。なお、実験手順は予備実験と同様で、(2) が「9種類の提示パターンのうち、2種類をランダムに選出する」に変わる。

5.3 実験結果

実験1の結果を、図6に示す。図中の2本の数直線のうち、上線分が仮想物体を重畳描画しない条件と、液体の揺れを表現しない条件を、下線分が液体の揺れを表現した条件を表している。結果から、以下のことが分かる。

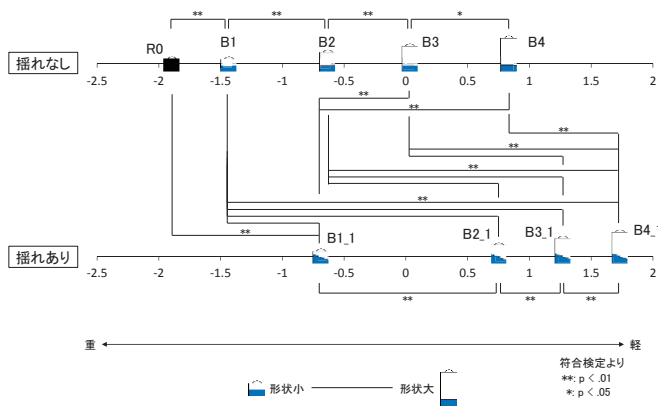


図 6 実験 1 結果

Figure 6 Result of Experiment 1

- (i) 液体の揺れの有無に関わらず、仮想物体の形状が小さいほど把持物体を重く、大きいほど軽く知覚する
- (ii) 仮想物体が同一形状の場合、液体の揺れを表現することで把持物体を軽く知覚する
- (iii) R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の効果は、加算的に表れる

(i) より、仮想容器に対して液体を重畳描画した場合、その揺れの有無に関わらず Size-Weight Illusion が発生することが分かる。さらに (ii) から、液体の揺れを表現することによって、全ての形状で R-V Dynamics Illusion が発生していることが分かる。先行研究では、全て B1/B1.1 の形状に限定して R-V Dynamics Illusion を確認していたが、仮想物体の形状が異なる場合でも、重さ知覚への影響が発生することを確認した。加えて (iii) において、形状が大きいほど物体を軽く知覚する Size-Weight Illusion、そして、液体の揺れを表現することで物体を軽く知覚する R-V Dynamics Illusion、この両錯覚が打ち消し合うことなく、加算的に重さ知覚の影響として表れていることが分かる。

6. 実験 2

6.1 実験目的

実験 2 では、実験 1 に対して仮想容器の内部に重畳描画する液体容量を増加させた場合、Size-Weight Illusion にどのような影響を与えるか確認する。我々の先行研究では、重畳描画する液体容量を増やした場合、より物体を重く知覚することが確認されている [7]。しかし、Size-Weight Illusion は形状が大きい物体ほど軽く知覚するが、その内部の液体容量を視覚的に増加させた所で、形状自体は変わらないため、結果に影響を与えない可能性がある。そこで、液体容量が Size-Weight Illusion の知覚にどのような影響を与えるか、その傾向を確認する。また、各条件に対して液面の揺れを提示した場合の差異も確認する。

6.2 実験条件・手順

仮想物体として、実験 1 で重畳描画した液体容量に対し

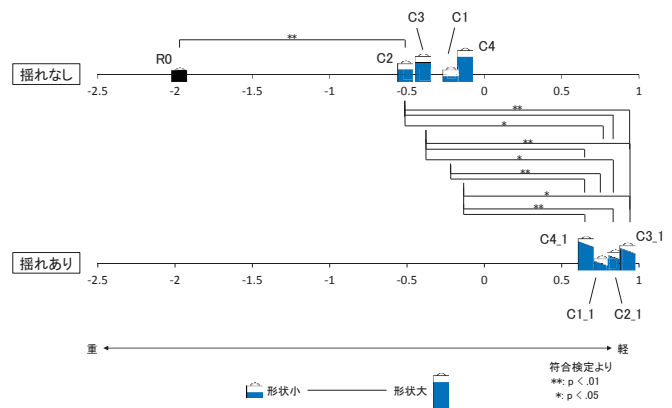


図 7 実験 2 結果

Figure 7 Result of Experiment 2

て、全て同一水平面上の位置になるよう液体容量を変更する (表 1)。そして、液体が揺れない場合 (C1~C4)、揺れる場合 (C1.1~C4.1)、及び仮想物体を重畳描画しない条件を含めた計 9 種類から 2 種類をランダムに選出し、サーストンの一対比較法に基づき重さを比較する。なお、被験者数、試行回数、実験手順は実験 1 と同様である。

6.3 実験結果

実験 2 の結果を、図 7 に示す。図中の 2 本の数直線のうち、上線分が仮想物体を重畳描画しない条件と、液体の揺れを表現しない条件を、下線分が液体の揺れを表現した条件を表している。結果から、以下のことが分かる。

- (i) 液体の揺れを表現することで、把持物体を軽く知覚する
- (ii) 仮想物体の形状が大きいほど、軽く知覚するとは限らない
- (iii) 液体容量による重さの錯覚が、Size-Weight Illusion の知覚に影響を与えている

(i) より、仮想物体の形状や液体容量が異なる場合でも、R-V Dynamics Illusion が発生していることが分かった。全ての条件において、実物体上部からの液面位置は等しく、液面位置が低い実験 1 のような条件より、R-V Dynamics Illusion の影響を受けやすかったという意見も得られた。(ii)(iii) について、実験 1 では形状の大きさに比例して重さも変化していたが、液体容量を増やすことで、その傾向は見られなくなった。つまり、液体容量の増加が Size-Weight Illusion の知覚に影響を与えており、形状のみによって重さの判断がされていないことが分かる。

7. 実験 3

7.1 実験目的

視覚刺激によって、人間の重さ知覚が変化するのであれば、身体的な影響も観察されるはずである。そこで実験 3 では、主観実験で確認した錯覚現象に対して、人間にどのような力覚的影響を与えているか、筋肉の平均筋活動量、及

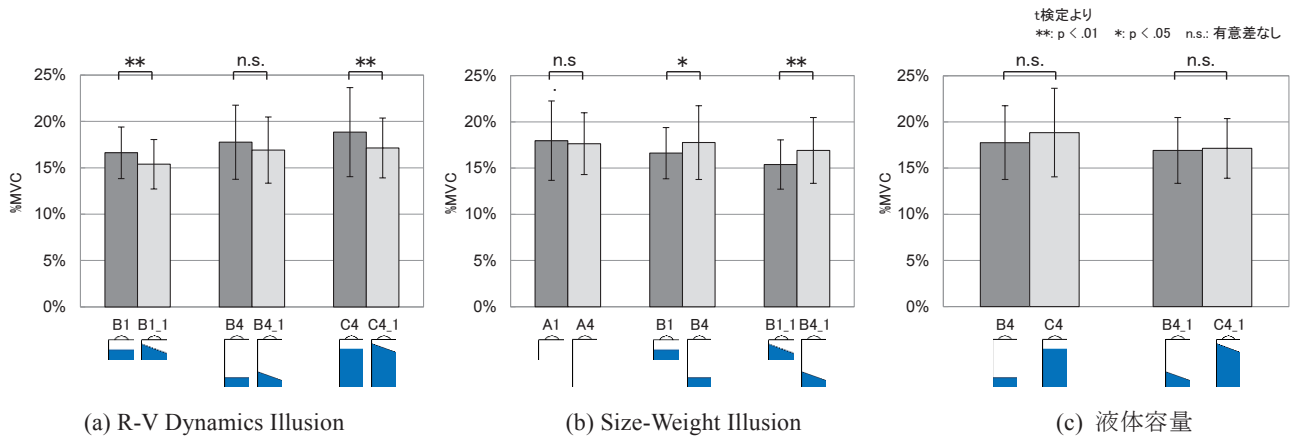


図 8 実験 3 結果 (%MVC 平均値)

Figure 8 Result of Experiment3 (Average value of the %MVC)

び筋電波形の 2 つの観点から確認する。

7.2 実験条件・手順

【実験条件】

筋電計測実験では、主観実験で確認した条件の中で、「A1, A4, B1, B4, B1_1, B4_1, C4, C4_1」の計 8 種類について計測する。被験者は成人男性 5 名である。主観実験と同様、振り動作を統制するため、左右に振るテンポや姿勢を教示し、指示した通りできるまで事前に十分な練習をさせた。

【実験手順】

- (1) 被験者に HMD と筋電計測用の電極を装着する
- (2) 8 種類の提示パターンのうち 1 種類をランダムに選出する
- (3) (2) で選出したパターンのうち 1 つを提示する
- (4) 被験者は決められた姿勢(肘を 90 度に屈曲させた状態)で実物体を把持し、メトロノームのテンポ (100BPM) に合わせて 3 秒間、物体を左右に振る動作を行う
- (5) (4) を行った後、3 秒間停止する
- (6) (4), (5) を 3 回繰り返す
- (7) 筋疲労による影響を排除するために十分なインターバルを設ける
- (8) 残りの提示パターンについても (2)~(7) を繰り返す

7.3 実験結果 (平均筋活動量)

本研究において、重さ知覚に影響を与えている要素として、「R-V Dynamics Illusion, Size-Weight Illusion, 液体容量」の 3 つが挙げられる。これらを観点別に整理した結果を、図 8 に示す。なお、筋電解析では、振り動作の開始から終了までの 3 秒間を解析区間として %MVC を算出し、解析区間内での %MVC 平均値を算出した。また、t 検定の結果、一部の条件間で回外筋の %MVC 平均値に有意差が見られた。

【R-V Dynamics Illusion】

図 8 (a) より、液体の揺れを表現することによって、平均筋活動量が低下していることが分かる。全ての条件において筋活動量は減少傾向であり、液体容量を増加させた場

合 (C4-C4_1) でも R-V Dynamics Illusion の影響が出ていることが分かる。しかし、液体容量が少ない場合 (B4-B4_1)、筋活動量は減少傾向にあるが、有意差は見られなかった。長田の研究では、視覚的な距離の遠さによって、奥行き知覚の精度が低下すると報告されている [21]。よって、液面位置が振り動作を行う手から離れており、動きに対する視覚情報の信頼度が下がったことが一要因ではないかと考えられる。

【Size-Weight Illusion】

図 8 (b) では、仮想容器の内部に何も重畳描画しない場合 (A1-A4)、平均筋活動量に有意差は見られなかった。しかし、仮想容器の内部に液体を重畳描画した場合 (B1-B4, B1_1-B4_1)、有意差が見られた。主観実験では、液体を重畳描画しない条件より、描画した条件の方が形状を知覚しやすくなったという意見が得られた。このことから、液体を重畳描画することで形状知覚の効果が強まり、筋活動量に影響したと考えられる。

【液体容量】

図 8 (c) より、仮想容器内部の液体容量に依らず、平均筋活動量に有意差が見られなかった。主観実験では、液体容量によって重さ知覚に影響を与えていたが、筋活動量には影響を与えない結果となった。また、先行研究では、液体容量の増加と筋活動量に相関関係は無かったが [7]、仮想物体の形状や液体容量が変わっても、その傾向は同じであった。

以上、3 つの結果から、R-V Dynamics Illusion のような仮想物体の動的な変化は、筋活動量に影響を与えやすいことが分かった。これについて、実物体は左右方向に振っており、液体の揺れに関しても左右に同期して揺れるため、その動的な変化の影響が力の緩みなどによって表れたと考えられる。一方で、Size-Weight Illusion や液体容量のように、静的な変化は平均筋活動量に影響を与えないことが分かった。

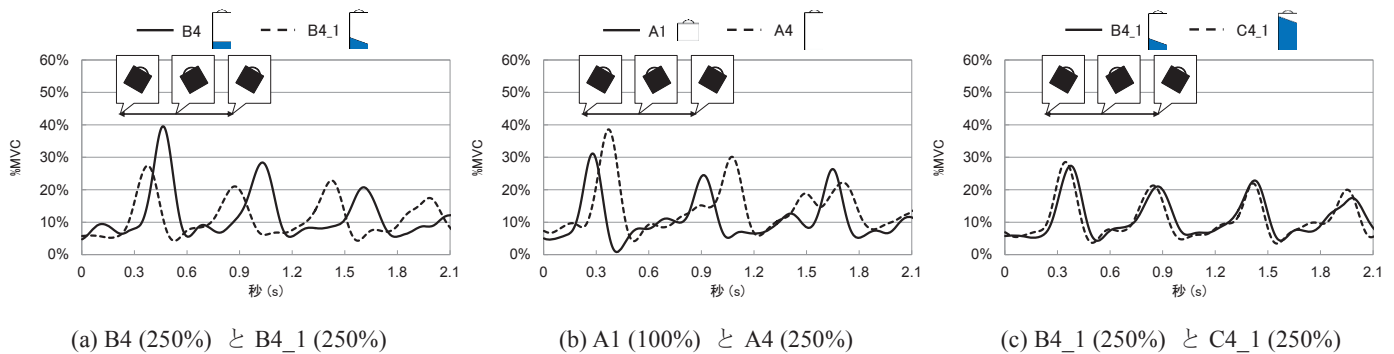


図 9 実験 3 結果 (%MVC 筋電波形)

Figure 9 Result of Experiment3 (Time variation of the %MVC)

7.4 実験結果 (筋電波形)

筋電波形を表した結果を、図 9 に示す。これは、振り動作 3 往復の時間経過と回外筋の %MVC を表している。被験者が実物体を振る際、筋電位の変動を時間軸と共に観察することで、錯覚現象の運動学的な特徴を考察する。複数人計測を行った中で、代表的な傾向である 1 名を観察した。結果から、以下のことが分かる。

- (i) 仮想物体の形状が大きい場合であっても、液体の揺れを提示することによって、筋活動量が減少する (図 9 (a))
- (ii) 形状が大きいほど、運動開始時 (本論文では、最初の 1 往復分と定義) に筋活動量が増加する (図 9 (b))
- (iii) 液体容量は、筋活動量に影響を与えない (図 9 (c))

(i) より、液面の揺れを提示することによって、筋活動量の最大値が減少していることが分かる。特に、運動開始時にその変化が顕著であることが分かる。同様に (ii) では、形状が大きい物体ほど、運動開始時の筋活動量が大きいことが分かる。人間が物体を振り上げる際、最も力を発揮するタイミングは、その振り上げた瞬間であるが、形状が大きい物体では、その傾向がより顕著であった。

そもそも、Size-Weight Illusion の発生メカニズムに関して、末梢説と中枢説が存在する [22]。前者は、重さ知覚は重量そのものより、物体の密度に基づき判断する説である [23]。例えば Size-Weight Illusion では、体験者が容積と重量から物体の密度を即時に計算するため、容積が大きく見える物体ほど密度を低く見積もり、結果的に軽く知覚する。後者の中枢説は、視覚的に大きな物体を持ち上げる際、その重さの予測から力を発揮する説である [24][25]。つまり、大きな物体は重いという予測に対し、予測以上の力を行使していることで物体を軽く知覚する。

本実験結果からは、中枢説の傾向が出ており、運動開始時は重量を重く推定し、それに応じた力を発揮している。しかし、2 回目以降の振り動作からは筋活動量が減少しており、見積もった重量との差異から力を抜いていると考えられる。また (iii) より、液体容量を変化させることで、平均筋活動量に差異は出なかったが、運動開始時の筋活動量についても同様の傾向であった。

(i)(ii)(iii) から、Size-Weight Illusion では運動開始時の筋活動量に大きく影響を与え、R-V Dynamics Illusion ではその筋活動量の大きさに差異が生じていた。また、液体容量に関しては、その影響が小さいことが示唆される結果となった。

8. むすび

本研究では、R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion を組み合わせ、両錯覚の依存・補完関係を主観実験と筋電計測によって確認した。その結果、以下の知見が得られた。

- (a) 実物体に対して形状の異なる仮想物体を重畳描画することで、大きいものを軽く、小さいものを重く知覚する Size-Weight Illusion が発生する
- (b) 仮想容器に液体を重畳描画した場合でも、Size-Weight Illusion は発生する。また、その効果は R-V Dynamics Illusion と加算的に表れる
- (c) 重畳描画する液体容量を、仮想容器の大きさに合わせて増やすことで、Size-Weight Illusion の知覚に影響を与える
- (d) Size-Weight Illusion では、運動開始時に最も筋活動量が増加し、その後は低下する
- (e) 主観実験と筋電計測の結果は比例関係では無いが、視覚的な動きに対して筋電的な変化が出やすい

これらの知見は、重さ知覚や人間の力学的特性を考慮した製品設計や、デバイス設計を行う上での一知見として、活用が期待できる。また、Size-Weight Illusion は、他の様々な錯覚と同時に発生させることで、本来の錯覚以上の効果を得られる可能性が示唆された。今後は、視覚だけに限らず振動刺激などの触覚情報や聴覚情報も付与し、錯覚のメカニズム解明、及び MR における表現力向上を目指していく予定である。

謝辞

本研究の実験の一部を担当した佐々木怜奈氏 (現在、三菱電機株式会社) に感謝の意を表す。なお、本研究は、科研費・若手研究 B「複合現実空間における痛覚・温冷覚提示に関する研究」による。

参考文献

- 1) T. H. Massie and J. K. Salisbury: "The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects," Proc. ASME Winter Annual Meeting Symp. on Haptic Interfaces, Vol. 55, pp. 295 - 299, 1994.
- 2) M. Sato: "Development of string-based force display: SPIDAR," Proc. VSMM 2002, pp. 1034 - 1039, 2002.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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. The 25th Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence and the 20th Eurographics Symp. on Virtual Environments, pp. 133 - 140, 2015.
- 9) A. Charpentier: "Experimental study of some aspects of weight perception," Archives de Physiologie Normales et Pathologiques, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- 10) H. Y. Solomon and M. T. Turvey: "Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects," Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 14, pp. 404 - 427, 1988.
- 11) A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, and L. Etienne: "Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures," Proc. CHI 2014, pp. 239 - 246, 2004.
- 12) Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Controlling perceived stiffness of pinched objects using visual feedback of hand deformation," Haptics Symposium 2014, pp. 557 - 562, 2014.
- 13) Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Controlling fatigue while lifting objects using pseudo-haptics in a mixed reality space," Haptics Symposium 2014, pp. 175 - 180, 2014.
- 14) R. R. Ellis and S. J. Lederman: "The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion," Attention, perception & psychophysics, Vol. 53, No. 3, pp. 315 - 324, 1993.
- 15) I. Rock and C. S. Harris: "Vision and touch," Scientific American, Vol. 216, pp. 96 - 104, 1967.
- 16) 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.
- 17) 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲: "バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 15 - 24, 2008.
- 18) T. Sadoyama and H. Miyano: "Frequency analysis of surface EMG to evaluation of muscle fatigue," European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, Vol. 47, No. 3, pp. 239 - 246, 1981.
- 19) 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵: "表面筋電図", 東京電機大学出版局, 2006.
- 20) Y. Ban, T. Narumi, T. Fujii, S. Sakurai, J. Imura, T. Tanikawa, and M. Hirose: "Augmented Endurance: Controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality" Proc. CHI 2013, pp. 69 - 78, 2013.
- 21) 長田昌次郎, "視覚の奥行き情報とその奥行き感度", テレビジョン学会誌, Vol. 31, pp. 649 - 655, 1977.
- 22) 東山篤規: "体と手がつくる知覚世界", 勁草書房, 2012.
- 23) J. Ross and V. D. Lollo: "Differences in heaviness in relation to density and weight," Perception & Psychophysics, Vol. 7, pp. 161 - 162, 1970.
- 24) G. E. Müller and Fr. Schumann: "Ueber die psychologischen Grundlagen der Vergleichung gehobener Gewichte," Archiv für die gesammte Physiologie des Menschen und der Thiere, pp. 37 - 112, 1889.
- 25) R. S. Woodworth: "Psychology: A study of mental life," New York, H. Holt, 1921.