

複合現実環境下での R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の相互作用

片岡 佑太^{*1*3} 西川 歩未^{*2*4} 橋口 哲志^{*2} 柴田 史久^{*2} 木村 朝子^{*2}

Reciprocal Influence between R-V Dynamics Illusion and Size-Weight Illusion in Mixed Reality Space

Yuta Kataoka^{*1*3}, Ayumi Nishikawa^{*2*4}, Satoshi Hashiguchi^{*2}, Fumihisa Shibata^{*2}, and Asako Kimura^{*2}

Abstract - The aim of this paper is to reveal the influence that the two illusions: “R-V Dynamics Illusion” and “Size-Weight Illusion” have on each other in mixed reality space. R-V Dynamics Illusion is an illusion that affects our perception of weight by superimposing moving virtual liquid on a real object. On the other hand, “Size-Weight Illusion” is a well-known illusion that is related to the perception of weight. It is a phenomenon where we perceive small objects to be heavier than large object even if they have the same mass. In previous research, we confirmed this phenomenon under the condition where the real object and the virtual object are the same size. However, R-V Dynamics Illusion and Size-Weight Illusion happen at the same time is likely when changing the size of the virtual object. Therefore, in this research, we combine two illusions and analyze whether if they cancel each other out or occur simultaneously by subjective experiment and measuring muscle activity. As a result, we confirmed both illusions occurring at the same time, and affecting the perception of weight and muscle activity.

Keywords: Mixed Reality, Sense of Weight, 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 に関する研究の多くは、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。しかし、近年では視覚に加え、触覚や聴覚など、別の感覚も併せた多感覚融合を目指した研究が活発化している^[1]。

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・融合することが可能である。例えば、玩具の銃に対して、近未来的な銃の CG 映像を重畳描画すると言ったように、実物体に触れながら、その表面に類似した形状の仮想物体を重畳描画することで、MR 世界のリアリティを向上させることができる。

しかし、逆に MR 技術を利用することで、視覚と触覚の間で意図的に差異を作り出すこともできる。人の触覚は視覚から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、人はどのような触覚を知覚するのだろうか。

見ているものと触っているもの間に、敢えて差異を

発生させた例として、Pseudo-Haptics が知られている^[2]。これは、身体動作とそれを反映した視覚刺激の間に差異を発生させることで、物理的な触覚提示を行うことなく、疑似的な触覚を知覚できるというものである。触覚提示装置無しに、視覚情報のみで簡易に触覚を再現できるため、種々のインタフェース開発への応用が期待されている。

我々は、MR 空間における Pseudo-Haptics という立場から、視覚間に差異を発生させた場合に、触覚へ与える影響を系統的に分析してきた^[3-7]。その中で、実物体 (鍾を固定) に液体を模した CG 映像を重畳描画し、体験者の手の振り動作に応じて液体を揺らすと、実際よりも「軽く」知覚されるという錯覚現象を発見した^[6]。我々は、この実物体 (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 と命名した。これまで、同錯覚に関する実験は、大きさの違いによって生じる「重さ」の錯覚現象である、Size-Weight Illusion (大きさ重さ錯覚) の影響を排除するために、実物体と仮想物体の形状が同一条件の場合に限定し、現象の分析を行ってきた^[7]。

一方、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^[8]。この現象に関して、実空間に限らず VR 空間でも発生することや^[9]、被験者の把持力や脳波を計測した例など^[10]、発生条件・メカニズム解明に向けて取り組まれてきた。しかし、重さを比較する対象としては、何れも単純な実物体やテクスチャ画像を使用した例が多く、物体内部に液体などの可動物を入れ、その内容物の容積や運動状態にも同時に着目した場合は検証されていない。

*1: 立命館大学大学院情報理工学研究科

*2: 立命館大学情報理工学部

*3: 現在, トヨタ自動車株式会社

*4: 現在, 三菱電機株式会社

*1: Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.

*2: College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.

*3: Toyota Motor Corporation

*4: Mitsubishi Electric Corporation

そこで本研究では、MR 空間の中で、重さに関する錯覚現象である Size-Weight Illusion と、動的な視覚刺激の提示を行う R-V Dynamics Illusion, そして仮想物体の内容物の容量を組み合わせた際の因果関係を、主観実験及び筋電位計測を通して確認することを目的とする。つまり、仮想物体の形状と、その内部の運動状態、内容物の容量を同時に変化させた場合に、それぞれが加算的に影響し合うのか、もしくは打ち消し合うかについて、その関係を分析する。

2. 関連研究

人は、身体の能動的な運動（振る・持つ・叩くなど）により、物体の重さや大きさなどの性質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^[11]、生態心理学の分野において、その知覚メカニズム解明に向けて研究が進められてきた。ダイナミックタッチは、実際に物体を視認することなく、その性質を知覚することができる。

これに対し、意図的に見ているものと触っているものに差異を発生させ、再現の難しい感覚を補完・提示する研究が多数行われてきた。その代表例として、Pseudo-Haptics が挙げられる。これは視覚刺激の提示のみで、抵抗感^[12]やテクスチャの凹凸感^[13]、硬軟感^[14]などの多彩な触覚知覚表現を実現している。このように、視触覚間の相互作用では視覚優位となり、その特性を活かした触覚提示手法が各種提案されている。

Pseudo-Haptics は力覚面に関しても、影響を与えることが分かっている。Pusch ら^[15]は、HMD 上に表示された仮想の手を動かすことで、体験者の手は動いていないにも関わらず、手の移動感を知覚したと述べている。また、Dominjon ら^[16]は、ディスプレイに表示された仮想球に対し、デバイスを介して持ち上げる際、その仮想球の移動速度が重さ知覚に影響することを報告している。視覚情報のみの操作によって疑似力覚（重さ知覚）が生じている点は本研究と密接に関係しており、R-V Dynamics Illusion もその一種である。

一方、Size-Weight Illusion も Pseudo-Haptics と同様、視覚の影響によって発生する、重さ知覚に関する錯覚現象である。Size-Weight Illusion は、同質量の場合でも、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。Rock ら^[17]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、異なる重さに知覚すると報告している。また、金ら^[9]は、触力覚提示装置である SPIDAR を用いて、Size-Weight Illusion の発生を検証した。しかし、Size-Weight Illusion に関する諸般の研究は、実空間で錯覚現象を確認している場合や、視覚情報をディスプレイによって間接的に表示している場合が多い。

さらに、実物体内部の動的変化を錯覚させる研究とし

て、南澤ら^[18]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物体内部の動きを表現する手法を提案している。また、Yao ら^[19]の研究では、筒の中で転がる球の振動と衝突を記録・再生することで、空の筒の中で球が転がっているような感覚を与える手法を提案した。これらの研究では、物体内部の動的変化を、触力覚提示装置の利用や触覚刺激の提示によって実現している。これに対して R-V Dynamics Illusion は、物体内部の動きを視覚刺激のみで提示している。

この時、Size-Weight Illusion の効果に加え、そこに液体の揺れなどの動的変化を発生させることで、R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion, 双方の効果が同時に現れる可能性は高い。そこで本研究では、まず保持している実物体の外形のみを MR 技術によって変更することで、MR 空間でも Size-Weight Illusion が発生するか確認する。さらに、MR 空間における Size-Weight Illusion の効果を確認すると共に、仮想物体の液体による動的変化を提示した際の、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、以下の4つの実験を通して、R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion, 仮想物体の内容物の容量の間での因果関係を、主観実験及び筋電位計測により分析する。

- (a) 予備実験：同じ実物体に、容積の異なる仮想物体を重畳描画し、MR 空間でも Size-Weight Illusion が発生するか確認する
- (b) 実験1：容積の異なる仮想容器の内部に、液体を模した CG 映像を重畳描画し、その揺れの有無によって Size-Weight Illusion に与える影響を分析する
- (c) 実験2：実験1の液体容量を変更し、Size-Weight Illusion に与える影響を分析する
- (d) 実験3：実験1, 2の幾つかの実験条件について筋電位計測を行い、錯覚時の筋電変化を観察する

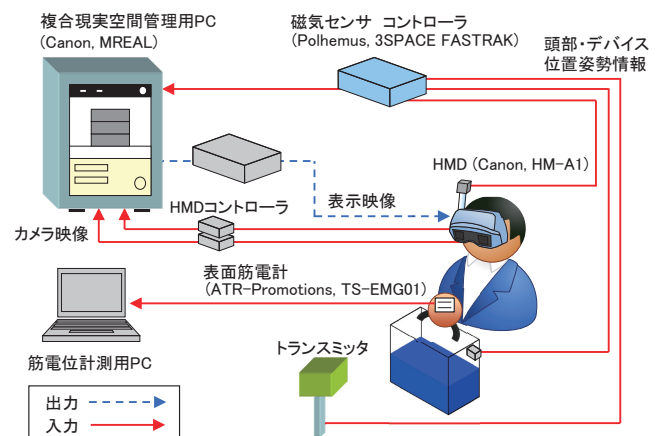


図1 機器構成

Figure 1 System configuration

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 を実現するシステムとして、ビデオスルー型 HMD (Canon, HM-A1) 及び MR 空間管理用ソフトウェア (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する。

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常に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て、手領域の抽出とマスキングを行うことで、CG 映像が手領域に描画されないよう処理する。

尚、被験者には実験を行う前に、疲労を感じた場合は何時でも実験を中止できる旨を伝え、実験参加への同意を得た上で実験を行った。また実験を実施する際は、事前に実験内容に関する説明を十分に行い、テスト試行を行った後、不快感や嫌悪感がないかを聴取した上で、細心の注意を払って実施した。

【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、錘を中心に入れて固定し、全体の重量が同ケースの半分の高さ (45mm) まで水を入れた際の重量である 750g となるように調整している (図 2)。本実験では視覚刺激が重さ知覚に与える影響を分析するため、実物体からの触力覚による影響を無視できるように、実物体の重心位置を中心に統一した。

【仮想物体】

仮想物体として提示する容器の寸法は、実物体の大きさ (幅 165mm × 高さ 90mm × 奥行き 80mm) を基準として、容器の高さが 90mm (100%), 135mm (150%), 180mm (200%), 225mm (250%) となる 4 種類を用意した (表 1~3)。

予備実験では、実物体に対して形状が異なる仮想容器のみを重畳描画する (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している (図 3)。さらに、被験者の振り動作に合わせて、液体の揺れがない場合とある場合に分けられる (表 2 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、仮想物体の形状に応じて、液体容量を変更した CG 映像を重畳描画する (表 3 C1 ~ C4, C1_1 ~ C4_1)。

実物体は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。液体の運動アルゴリズムについては先行研究^[6]を参照されたい。なお、実

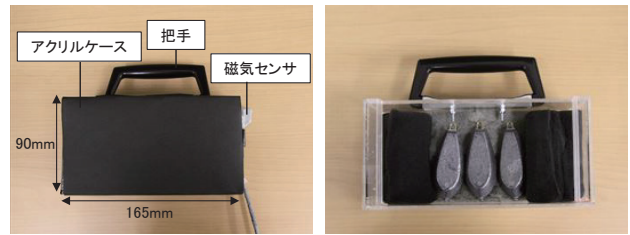


図 2 実験で使用した実物体

Figure 2 Real object used in experiments

表 1 予備実験での提示パターン

Table 1 Experimental patterns in preliminary experiment

	R0	A1	A2	A3	A4
提示パターン					
幅×高さ (mm)	165×90	165×90	165×135	165×180	165×225

表 2 実験 1 での提示パターン

Table 2 Experimental patterns in experiment 1

	R0	B1	B2	B3	B4
提示パターン					
		B1_1	B2_1	B3_1	B4_1
幅×高さ (mm)	165×90	165×90	165×135	165×180	165×225
液体容量 (mm)		45	45	45	45

表 3 実験 2 での提示パターン

Table 3 Experimental patterns in experiment 2

	R0	C1	C2	C3	C4
提示パターン					
		C1_1	C2_1	C3_1	C4_1
幅×高さ (mm)	165×90	165×90	165×135	165×180	165×225
液体容量 (mm)		45	90	135	180

験風景は図4の通りである。

【筋電位計測】

物体の外観を変更するだけで重さ知覚に錯覚が発生するのであれば、身体の筋活動にも影響を与える可能性がある。Koike ら^[20]は、視覚刺激が重さ知覚に与える影響を筋電位によって評価しており、本研究でも同様に筋活動量を観察することにした。具体的には、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位計測を行う。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^[21]。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^[22]。%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。

4. 予備実験

4.1 実験目的

まず予備実験として、実物体に対して異なる容積 (高さ) の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。同じ実物体に対して視覚的に仮想容器の形状を変更し、Size-Weight Illusion が発生するか実験を行う。

4.2 実験条件・手順

【実験条件】

予備実験では、容積が異なる 4 種類の仮想物体 (A1 ~ A4) を重畳描画する場合、仮想物体を重畳描画しない場合 (R0) の計 5 種類のうち 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いて、どちらがより重く感じたか比較・回答させる。これを全ての組み合わせについて行い、各条件で被験者が知覚する重さの心理尺度を算出する。

また、振り方の違いによる影響を排除するため、実験前に姿勢や振り動作を教示し、全ての被験者で統制をとった。具体的には、直立した姿勢で肘を約 90° に屈曲させている。また、振り動作は実物体を自然に振りやすい

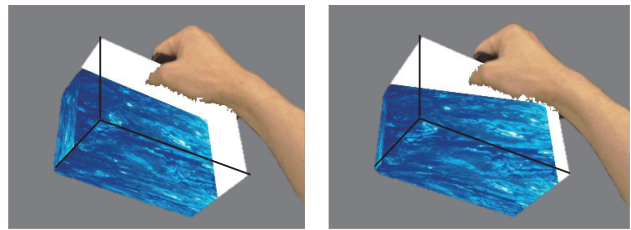


図3 実験で提示した仮想物体

Figure 3 Virtual object used in experiments

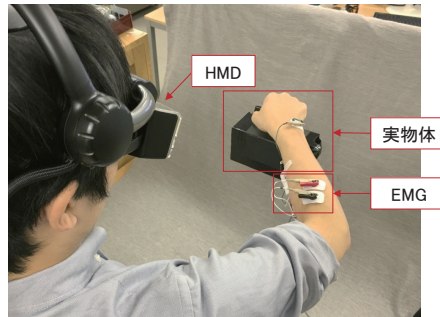


図4 実験風景

Figure 4 Experimental scene

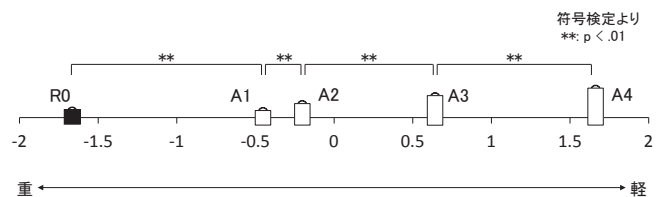


図5 予備実験結果

Figure 5 Result of preliminary experiment

メトロノームのテンポ 100BPM に統制しており、以降の実験でも同様の振り動作で実験している。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、左右に 30° 以上傾けるとごく短くビーブ音が鳴る。被験者には、音が鳴ったらすぐに逆方向へ振るよう指示した。被験者には、教示した通りできるまで事前に十分な練習を行わせた。被験者は成人 11 名 (男性 9 名、女性 2 名、平均 22.6 歳)、試行回数は 1 名あたり $3C_2=10$ 回である。

【実験手順】

- (1) 被験者に HMD を装着
- (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
- (3) (2) で選出したパターンのうち 1 つを提示
- (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、手首よりも先だけで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
- (7) 筋疲労による影響を排除するため、1 分程度のインタ

ーバルを設ける

(8) 残りの組み合わせについても (2)~(7) を繰り返す

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。また、この結果について、符号検定により有意差を確認した。なお、各マーカの形状は、提示した仮想物体の形状に対応している。図より、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している
- (ii) 仮想物体を提示しない場合を最も重く知覚している

(i) では、A1~A4 を順に軽く知覚していることが分かる。実物体に対して仮想容器を重畳描画した場合でも、Size-Weight Illusion の効果により、重さ知覚に影響を与えていた。つまり、実物体は同一条件であっても、仮想容器の容積を視覚的に変えるだけで Size-Weight Illusion が発生することが分かった。

(ii) では、R0 と A1 について、同形状・同質量にも関わらず有意差を確認した。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おり、A1 は白い仮想容器を振っている状態であるが、これは色（明度）の差が影響したと考えられる。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^[23]、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。

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、また、液体の揺れを提示することによる重さ知覚への影響、つまり R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion が同時に発生するか、打ち消し合うか、その関係を分析する。

5.2 実験条件・手順

実験 1 では、予備実験で提示したものと同形状の仮想容器を利用する。このとき、仮想容器内部に一定量の液体を重畳描画し、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) の計 8 種類を用いる (表 2)。そして、仮想物体を重畳描画しない条件 (R0) 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いて、どちらがより重く感じたかを比較・回答させる。被験者は成人 11 名 (男性 9 名、女性 2 名、平均 23.6 歳)、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

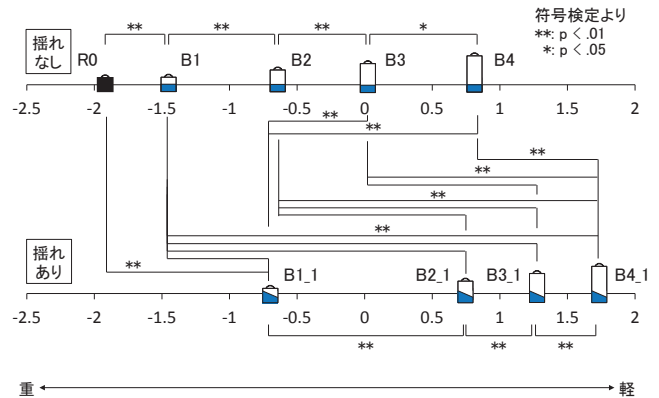


図 6 実験 1 結果
Figure 6 Result of experiment 1

をランダムに選出する」に変わるだけである。

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、上の線分は仮想物体を重畳描画しない条件と液体の揺れを提示しない条件、下の線分が液体の揺れを提示した条件を表している。図より、以下のことが分かる。

- (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している
- (ii) 仮想物体が同一形状の場合、液体の揺れを提示することで把持物体を軽く知覚している
- (iii) R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の効果は、加算的に表れる

(i) では、予備実験と同様、B1~B4 を順に軽く知覚していることが分かる。よって、仮想容器に対して液体を重畳描画した場合でも、その揺れの有無に関わらず Size-Weight Illusion の発生が確認された。

(ii) では、液体の揺れを提示することによって、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^[6]では、全て B1 と 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他の条件でも、重さ知覚への影響があることを確認した。

(iii) では、揺れなしで知覚した重さに対して、順序関係はそのままに、R-V Dynamics Illusion による効果が加算的に作用している。つまり、形状が大きいほど物体を軽く知覚する Size-Weight Illusion、そして、液体の揺れを提示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、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分析する。

先行研究^[6]では、重畳描画する液体容量を増やすと、物体をより重く知覚することが確認されている。一方、Size-Weight Illusion では形状が大きい物体ほど軽く知覚されるが、その内部の液体容量を視覚的に増加させることで、軽く知覚されない可能性がある。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、その傾向を分析する。合わせて、各条件に対して液体の揺れの有無による差異も分析する。

6.2 実験条件・手順

実験2では、実験1で重畳描画した仮想容器に対して、それらを把持した際に、手から水平面までの距離が同じ位置になるよう液体容量を変更する(表3)。そして、液体が揺れない場合(C1~C4)、揺れる場合(C1_1~C4_1)、そして仮想物体を重畳描画しない場合(R0)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、上の線分が仮想物体を重畳描画しない条件と、液体の揺れを提示しない条件、下の線分が液体の揺れを提示した条件を表している。図より、以下のことが分かる。

- (i) 液体の揺れを提示することによって、把持物体を軽く知覚している
- (ii) 重さは仮想物体の形状のみから判断されるわけではない
- (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) では、先行研究で実施されたC1とC1_1以外の仮想物体の形状や液体容量の条件下でも、R-V Dynamics Illusion が発生することが分かった。また被験者からは、液体容量が多いと、液体が揺れない場合と揺れる場合の違いを、液体容量が少ない実験1の条件より顕著に知覚した(R-V Dynamics Illusion の影響を受けやすかった)という意見が得られた。

また、(ii)(iii)について、実験1では形状の大きさに比例して重く知覚されていたが、液体容量を増やすことで、その傾向が見られなくなった。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。このことから、視覚的に物体の形状及び液体容量を変更した際、2つの情報を統合した上で重さを判断していることが示唆された。

7. 実験3

7.1 実験目的

人の重さ知覚が視覚刺激によって変化するのであれば、身体の筋活動にも変化が見られる可能性がある。

筋活動は、持っているものの重量が物理的に重ければ

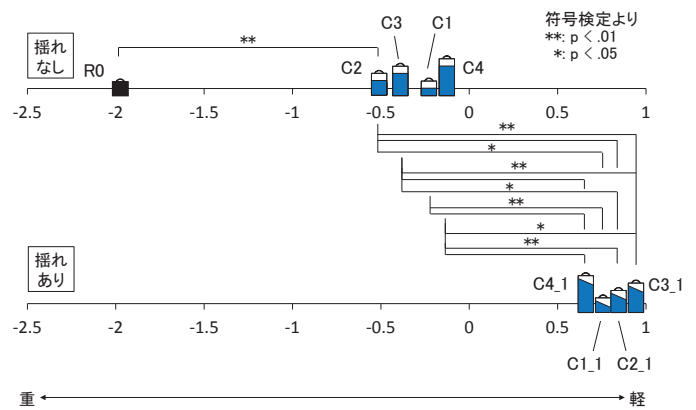


図7 実験2結果

Figure 7 Result of experiment2

活発化する。実際、実物体の重量を500g、750g、1000gと変えて(CG映像なし)、これまでの実験同様の振り動作で振ると、平均筋活動量(%MVC)はそれぞれ15.8%、16.2%、19.1%となり(被験者5名)、重量が重いほど筋活動量が大きくなる傾向が見られる。

しかし、人間が重いと感じているからといって同じように活発化するとは限らない。本章では、各々の錯覚がどのように筋活動に影響を与えるのか分析することを目的としている。実験3では、主観実験で確認した錯覚現象に対して、人にどのような力覚的影響を与えるか、平均筋活動量とその時間変化の観点から分析する。

7.2 実験条件・手順

【実験条件】

実験3では、実験1, 2の主観実験で使用した条件のうち、「A1, A4, B1, B4, B1_1, B4_1, C4, C4_1」の計8種類を利用する。主観実験と同様の振り動作に統制するため、姿勢や振るテンポを教示した上で、教示した通りできるだけ事前に十分な練習をさせた。被験者は成人男性5名(平均22.8歳)、試行回数は1名あたり $sC_1=8$ 回である。

【実験手順】

- (1) 被験者にHMDと筋電位計測用の電極を装着
- (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
- (3) 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、手首よりも先だけで物体を左右に振る動作を行う
- (4) (3)を行った後、3秒間停止
- (5) (3)(4)を3回繰り返す
- (6) 筋疲労による影響を排除するため、1分程度のインターバルを設ける
- (7) 残りのパターンについても(2)~(6)を繰り返す

7.3 実験結果(平均筋活動量)

ここでは、まず振り動作全体を通して、重さ知覚に影響を与える「Size-Weight Illusion」「R-V Dynamics Illusion」「液体容量」の3つの要素それぞれが、筋活動にどの程

複合現実環境下での R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion の相互作用

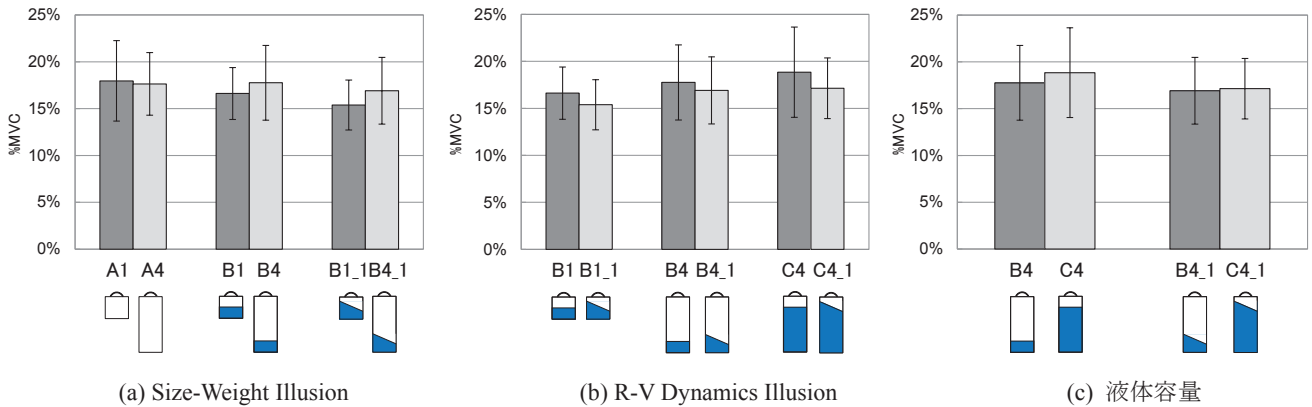


図 8 実験 3 結果 (%MVC 平均値)

Figure 8 Result of experiment3 (Average value of the %MVC)

度影響を与えているのかを確認する。図 8 に観点別に整理した結果を示す。なお、筋電位解析では、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。

【Size-Weight Illusion】

図 8 (a) より、仮想容器の内部に何も重畳描画しない場合 (A1 と A4)、形状の大きい方 (A4) の筋活動量が少し低下する傾向にあったが大きな違いはなかった。一方、仮想容器の内部に液体を重畳描画した場合 (B1 と B4, B1_1 と B4_1)、形状の大きい (B4, B4_1) 方の筋活動量が增加する傾向にあった。また、実物体を軽く知覚するからといって、筋活動量も低い値を示すわけではないことも分かる。

【R-V Dynamics Illusion】

図 8 (b) より、液体の揺れを提示することによって、数パーセントではあるが、平均筋活動量が低下している。全ての条件において筋活動量は減少傾向にあり、液体容量を増減させた場合 (B4 と B4_1, C4 と C4_1) でも、R-V Dynamics Illusion の影響が筋活動量に表れている。

【液体容量】

図 8 (c) では、仮想容器内部の液体容量を増加させても、平均筋活動量に影響を与えないことがわかる。実物体と仮想物体が同一形状の場合、液体容量の増加に伴い物体を重く知覚し、さらに筋活動量に差異は表れないことが分かっている^[6]。本実験の結果から、実物体と仮想物体の形状が異なる場合でも同様に、筋活動量に差異は見られなかった。つまり、仮想容器内の液体容量は、主観的な重さ知覚に影響を与えるものの、平均筋活動量には殆ど影響を与えないことが分かった。

以上の結果から、仮想物体の動的変化を提示する R-V Dynamics Illusion は、他の錯覚現象と比べると比較的、平均筋活動量に影響を与えやすい錯覚であることが分かった。この結果について、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 や液体容量のような

静的な変化は、平均筋活動量には影響を与えにくいことが分かる。

7.4 実験結果 (筋電波形)

次に、筋電波形の結果を示す。図 9 は、代表的な 1 名 (男性, 23.0 歳) の結果である。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、筋活動量の変動を時間軸と共に観察することで、錯覚現象の運動的特徴を考察する。なお、その他の被験者においても同様の傾向が観察された。図より、以下のことが分かる。

- (i) 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 (a), 図 9 (b))
- (ii) 液体の揺れを提示することによって、運動開始時の筋活動量が減少する (図 9 (c))
- (iii) 液体容量は、筋活動量に影響を与えない (図 9 (d))
 - (i) では、A4, B4 のように形状が大きい物体ほど、運動開始時の筋活動量は大きいことが分かる。人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、物体の重さを予測することによって錯覚が発生すると言われている。これは、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大きな力を発揮するが、実際に持ち上げてみると、本来の小さな実物体に必要な力より、大きな力を行使することから発生するというものである^{[24][25]}。本実験の結果からは、その傾向が見られ、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、この力の落差が、重さ知覚に影響していると考えられる。

(ii) では、液体を重畳描画した場合であっても、形状が大きい物体は運動開始時の筋活動量が大きい。また、液体の揺れを提示しないことによって、運動開始時の筋

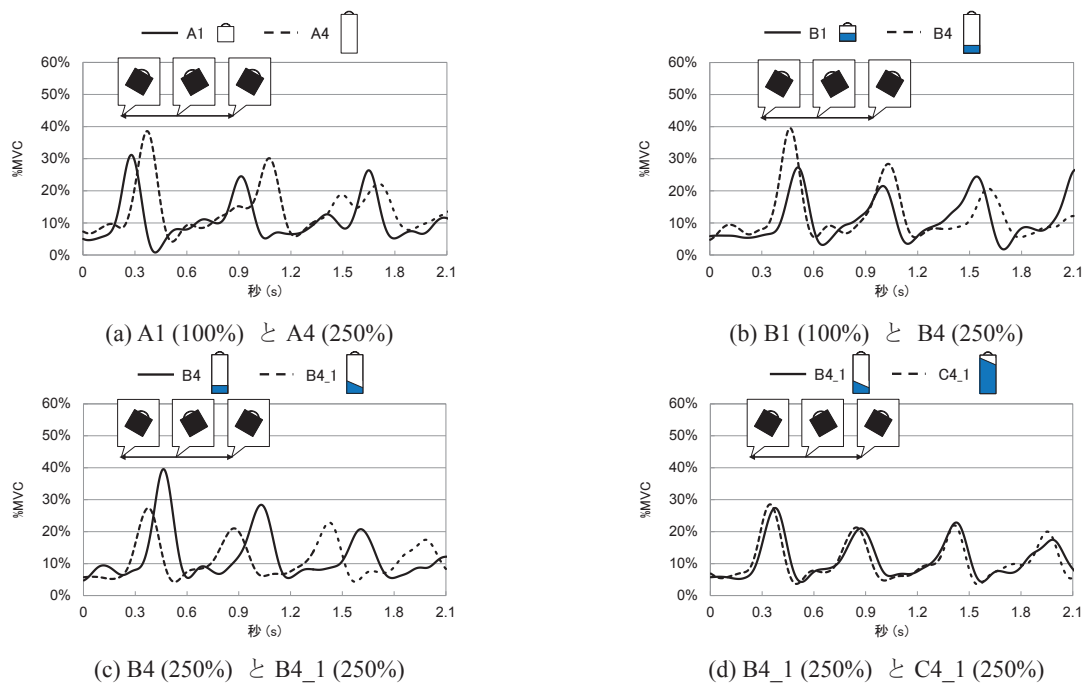


図 9 実験 3 結果 (%MVC 筋電波形)

Figure 9 Result of experiment3 (Time variation of the %MVC)

活動量が揺れあり条件と比べて大きいことが分かる。これは、液体を視認した上で実物体を振った際、人が予想する「液体は揺れるもの」という考えと齟齬が発生しており、それが力の入れ方に変化を与えたと考えられる。なお、B1 と B1_1 条件間でも、同様の傾向であった。

(iii) では、仮想物体の形状が同一のとき、内部に重畳描画されている液体容量の違いによって、筋電波形に差は見られなかった。平均筋活動量に関して、液体容量の違いによる有意差は見られなかったが、筋電波形を観察した結果に関しても、ほぼ差がない結果となった。

(i)(ii)(iii) から、Size-Weight Illusion では運動開始時のみ筋活動量に大きく影響を与え、さらに仮想物体の液体の揺れを提示することによって、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、筋活動量に与える影響が小さい結果となった。

8. むすび

本研究では、R-V Dynamics Illusion と Size-Weight Illusion を組み合わせた際の影響を、主観実験と筋電位計測によって確認し、分析した。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 MR 空間でも発生する
- (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) 形状が大きい仮想容器では、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) 液体の揺れを提示するように、視覚的な動的変化に対して筋電位の変化が出やすい

これらの知見は、1 つの客観的事実として、錯覚の相互関係を明らかにできたという点で価値があると考えられる。さらに、人の重さ知覚や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、活用も期待できる。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。

一方で、これらの錯覚に影響を与える要素は、他にも実物体の把持方法や質量・錘の位置・可動の有無、仮想物体のリアリティなどが考えられる。今後は、各事象がどのように人の知覚に影響を与えるかを系統的に分析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」、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] 「触覚とその応用特集号」, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 2, 2010.
- [2] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet: "Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?," Proc. Virtual Reality 2000, pp. 83 - 90, 2000.
- [3] A. Iesaki, A. Somada, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura: "Psychophysical influence on tactual impression by mixed-reality visual stimulation," Proc. Virtual Reality 2008, pp. 265 - 267, 2008.
- [4] Y. Hirano, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura: "Psychophysical influence of mixed-reality visual stimulation on sense of hardness," Proc. Virtual Reality 2011, pp. 51 - 54, 2011.
- [5] H. Omosako, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura: "Shape-COG Illusion: Psychophysical influence on center-of-gravity perception by mixed-reality visual stimulation," Proc. Virtual Reality 2012, pp. 65 - 66, 2012.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Charpentier: "Experimental study of some aspects of weight perception," *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- [9] 金載休, 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.
- [10] 田中俊輔, 大城 昌平: "視覚情報の与え方の違いによる持ち上げ動作時の脳活動と体幹筋活動に関する研究—近赤外分光法と表面筋電図による分析—", 理学療法科学, Vol. 28, No. 6, pp. 745 - 750, 2013.
- [11] 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.
- [12] A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Coiffet: "'Boundary of illusion': an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system," Proc. Virtual Reality 2001, pp. 115 - 122, 2001.
- [13] K. V. Mensvoort, P. Vos, D. J. Hermes, and R. V. Liere: "Perception of mechanically and optically simulated bumps and holes," *Applied Perception*, Vol. 7, No. 10, 2010.
- [14] F. Argelaguet, D. A. G. Jáuregui, M. Marchal, and A. Lécuyer: "Elastic Images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect," *Applied Perception*, Vol. 10, No. 17, 2013.
- [15] A. Pusch, O. Martin, and S. Coquillart: "HEMP-Hand-Displacement-Based Pseudo-haptics: A study of a force field application," Symp. on 3D User Interfaces, pp. 59 - 66, 2008.
- [16] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, P. Richard, and S. Richir: "Influence of color/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments," Proc. Virtual Reality 2005, pp. 19 - 25, 2005.
- [17] I. Rock and C. S. Harris: "Vision and touch," *Scientific American*, Vol. 216, pp. 96 - 104, 1967.
- [18] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暉: "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.
- [19] H. Y. Yao and V. Hayward: "An experiment on length perception with a virtual rolling stone," Proc. EuroHaptics 2006, pp. 325 - 330, 2006.
- [20] Y. Koike, J. H. Kim, and D. Shin: "Role of stiffness in weight perception," *Japanese Psychological Research*, Vol. 48, No. 3, pp. 174 - 187, 2006.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [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.

(2016年2月1日受付, 5月23日再受付)

〔著者紹介〕

片岡 佑太



2014年立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒。2016年,同大学院情報理工学研究科博士前期課程修了。同年4月,トヨタ自動車(株)入社。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。日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。

西川 歩未



2016年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。同年4月,三菱電機(株)入社。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。電子情報通信学会会員。

橋口 哲志 (正会員)



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)。日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞。

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。本学会論文賞,日

本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞・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. 本学会論文賞, 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞・論文賞, 情報処理学会山下記念研究賞等受賞.