

MR 環境下での錯覚現象 R-V Dynamics Illusion に関する諸考察

山田 泰己^{*1} 橋口 哲志^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Further Considerations on R-V Dynamics Illusion on Mixed-Reality Environment

Taiki Yamada^{*1}, Satoshi Hashiguchi^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Asako Kimura^{*1}

Abstract --- We have been studying the illusion phenomenon “R-V Dynamics Illusion” caused by different motional states of real object (R) and virtual object (V). Previously, we discovered a phenomenon that was when superimposing moving virtual liquid on a real object, the weight was perceived as being lighter than an actual object. As a next step, this paper confirmed that the same illusion phenomenon occurred even when the visual stimulus was changed from a liquid to a rigid body. Furthermore, if the visual stimulus is a rigid body, the impressions of the sound and the tactile sense will be strengthened when the object collides with this rigid body, so it is considered that not only the visual stimulus but also the influence of auditory and tactile senses will grow larger. Therefore, we conducted an experiment and analysis to find out what kind of influence be caused to this illusion when we also placed auditory and tactile stimuli.

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

1 はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) では、没入感のある立体映像空間に、3次元音場環境、力覚フィードバック・デバイスを導入することで、仮想環境体験のリアリティが向上する。すなわち、各々の技術・表現力向上が、体験者に臨場感や没入感を与える。

一方、VRの発展形である「複合現実感」(Mixed Reality; MR)では、これまで実空間と仮想空間の視覚的な融合を中心に研究が進められてきたが、VR同様に聴覚・触力覚提示の導入は、リアリティの向上が期待できる [1]。特に、MR空間における視覚刺激は、実物体の触力覚はそのままに仮想物体を重畳描画することで外観を変更できる (以下、MR型視覚刺激)。このMR空間特有の性質は、視触覚相互作用による効果が得られ、視覚刺激に誘発させるような触感や力覚を生成できる場合がある。

例えば、我々がMR技術を用いて内部に錘を固定したケースに、手の振りに応じて物体内部の液体が揺れるCG映像を重畳描画したところ、「液体が入っているように感じる」、「液体が揺れると軽く感じる」という意見が得られた。そこで、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

現象を「R-V Dynamics Illusion」と命名した [2]。

視覚と触覚の齟齬を組み合わせた代表的な錯覚現象として Pseudo-Haptics [3] があるが、我々は R-V Dynamics Illusion をこの錯覚の一種ととらえ、視触覚間に差異を発生させた場合に、触力覚に与える影響について系統的に分析してきた [4-9]。

これまで、同錯覚現象に関する研究は視覚刺激が液体の場合のみ確認しているが、本研究では、次なるステップとして重畳描画する仮想物体を液体から見た目の印象が異なる剛体に変更した場合、同錯覚現象に与える影響を確認する。視覚刺激が剛体となると、先行研究で提示した液体の条件よりも衝突や移動時の触感の印象が強くなり、見た目と触感の齟齬が大きくなる。そのため、先行研究と同様には R-V Dynamics Illusion が発生しない可能性もある。また、これまでは視覚刺激のみを対象として R-V Dynamics Illusion の発生条件を調べてきたが、物体内部の可動物を剛体とすることで、聴覚、触覚が物体の移動知覚に与える影響が大きくなり、視聴触覚の相互作用を検証するうえでのよいテストベッドとなりうると考えられる。

そこで、本稿では、まず、剛体の運動を想起させる仮想物体を提示することで R-V Dynamics Illusion が発生するのか確認する。そして、仮想の剛体の大きさや運動状態が同錯覚現象に与える影響

*1 立命館大学大学院情報理工学研究所

*1 Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

を確認する。最後に、仮想の剛体に対して聴覚刺激を付与することで同錯覚現象に与える影響を確認・分析する。

2 関連研究

R-V Dynamics Illusion は、視覚刺激と触力覚の差異によって生じる錯覚現象であり、Pseudo-Haptics の一種という立場から視触覚相互作用の分析が行われてきた。

そもそも Pseudo-Haptics は、身体動作と連動して動く視覚刺激（マウスのカーソルなど）の運動量を変化させることで、抵抗感 [10] やテクスチャの凹凸感 [11]、硬軟感 [12] などの多彩な疑似触力覚を実現することが可能である。しかし、ケース内部に球などの剛体を入れた場合にみられる壁面に球が当たったときの衝撃に関しては、視覚刺激のみでこれを再現することは難しい。

一方 R-V Dynamics Illusion は、例えば、振り動作に応じて移動する水の CG (MR 型視覚刺激) を把持物体 (剛体) 内部に重畳描画することで、中身が動いているような触感や特に重さ知覚に影響を与え、元の重さより把持物体が軽く知覚される現象である。本錯覚現象は、心的な重さ知覚の変化だけでなく、錯覚時で物体を軽く知覚したときに、筋活動量が下がる現象が確認されている [13]。また、本錯覚現象によって実物体の重さがどの程度軽く知覚されているのか計測するため、重さが同等となるよう実物体の質量を実際に増減させる実験が行われた。その結果、錯覚現象による重さの変化は、実際の質量の変化として換算できることが確認された [14]。しかし、ケース内部の移動物体が剛体の場合に、同様の錯覚現象が起こるかどうかは確認されてこなかった。

そこで、本研究ではケース内部の移動物体が剛体の場合にも R-V Dynamics Illusion が発生するのか、更に音や振動などによって衝撃の感覚を追加した場合にはどうかを実験・分析する。

ところで、衝撃のような強い力覚提示を行う方法として、PHANTOM [15] や SPIDAR [16] などの力覚提示装置を用いて、実際にアクチュエータによって衝撃を与えることが考えられる。しかし、本研究のように片手で持ち上げられる程度の中重量物体 (500g~1kg 程度) に導入するにはデバイスの規模が大きく、内蔵することも難しい。そこで、小型かつ本来の力覚提示装置と同様の力覚を提示するために、疑似力覚を用いた提示方法が検討されている。

疑似力覚を提示する方法として、皮膚の構造や受容器の特性を活かして、小型モータや振動子を用いた触覚刺激による提示がある [17]。この手法は、実

際に物体に生じた振動を収録して、それを再生すると実現できる [18]。また、収録する振動や振動の強度を変更することで、様々な材質や形状のものを再現することも可能になる。

本稿では、中重量物体にも搭載可能で、かつ聴覚・触覚刺激で統制が取りやすい手法として、単純に実際のケースと剛体の衝突時の音を集音し、それぞれの出力機器で再生する方法を採用する。この手法であれば、聴覚・触覚刺激は、同様の音情報を用いることができるため、視覚刺激と各々を組み合わせた実験を行うことができる。このように、物体内部を運動する物体に着目し、視聴触覚の刺激が触力覚に与える影響を分析した例はない。

3 実験目的と準備

3.1 実験目的

視覚刺激を利用する錯覚現象では、実際の触感と視覚刺激から想起される触感 (見た目の触感) に大きな齟齬があると発生しづらいと予想される。剛体同士が衝突したとき衝突音や振動は大きい、しかし MR 型視覚刺激だけでは、これらの触感がないため R-V Dynamics Illusion が発生しない可能性がある。

また、この錯覚現象は慣性力、重心、重さといった力覚に影響を与えるが、これまでの実験を通して、特に重さ知覚において顕著な差異が感じられることがわかっている。これに加えて、Size-Weight Illusion [19] といった著名な錯覚現象でもみられるように、重さ知覚は視覚と触力覚の相互作用が生じやすく、その評価方法も参考にできるため、重さ知覚を対象とすることにした。

本研究では、まず仮想の移動する球体を重畳描画することによって本錯覚現象が発生するのかを確認する (実験 1)。さらに先行研究において、移動物体の容量や移動の速さが本錯覚現象に影響を与えることが分かっている [2]。そのため、仮想の球の大きさや速さを変更することでも重さ知覚が変化する可能性があり、実験 2 ではその影響を分析する。実際の物体がケース内で衝突したとき衝突音や振動は中身の移動、衝突感を知る大きな手掛かりとなる。仮想の球体がケースと衝突する時に疑似的な衝突音や振動を付与すれば、見た目と触感の齟齬が小さくなり移動感が向上すると予想されるが、このような音や触感の付与が本錯覚現象にどのような影響を与えるのかについてはまだわかっていない。そこで実験 3 では、MR 型視覚刺激に音や触覚を導入する第一段階として、比較的实际の衝突に近い聴覚刺激・触覚刺激を導入しその影響について分析する。

・実験 1 : MR 型視覚刺激として動的な剛体 (球) を提示した場合 R-V Dynamics Illusion が発生

するのか確認し、分析

- ・実験 2: 仮想の球の大きさや速さを変更した場合 R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を確認し、分析
- ・実験 3: 仮想物体同士の衝突時に聴覚・触覚刺激を提示し、衝突感を表現した場合 R-V Dynamics Illusion が重さ知覚に与える影響を分析

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で用いる MR システムの構成を図 1 に示す。本実験では、ビデオシースルー型 HMD (Canon, HM-A1) 及び MR 空間管理用ソフトウェア (Canon, MREAL) を用いる。体験者の頭部及び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領域の抽出を行い、その領域をマスキングすることで、手領域に仮想物体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、聴覚刺激は密封型ヘッドホン (Peltor 社, Htm79a) を、触覚刺激は振動スピーカ (アクーヴ・ラボ社, バイプロトランスデューサ Vp416) を用いて提示した。

【使用する実物体】

被験者が把持する実物体として、把手を取り付けた幅 165 × 奥行 80 × 高さ 90mm のアクリルケースを用いる。振動スピーカは、球がケースの底面を転がることを考慮し、ケースの底面に振動スピーカの出力部全面が接触するように固定した。一つの振動スピーカでも十分にケース全体を振動させることが可能であり、装置の簡易化のため、振動スピーカを一つ搭載した [20]。また、ケース内に錘を固定し、アクリルケースの重さを 750g になるよう統一した。なお、この質量は先行研究で本錯覚現象の発生を確認した条件を踏襲した (図 2)。

【MR 型視覚刺激】

MR 型視覚刺激として提示するケースの寸法は、実物体と同様、幅 165 × 奥行 80 × 高さ 90mm である。ケース内に入れる剛体は、まず物理法則の数式化が容易な球体とし、基準とする球の大きさは、実物体のケースの高さの半分の 45mm とした。実際に使用した MR 型視覚刺激が図 3 である。ケースの内壁面は白色、球体は黒色に着色している。この色は、コントラストを強くし、球体の移動に着目しやすいように選定した。

球の移動は、図 4 に示す簡易的なモデルを設定した。このモデルにおいて、被験者はケースを左右に

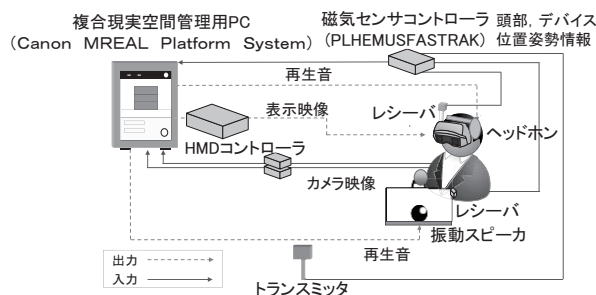


図 1 システム構成

Fig.1 System Configuration

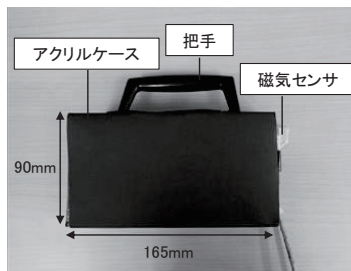
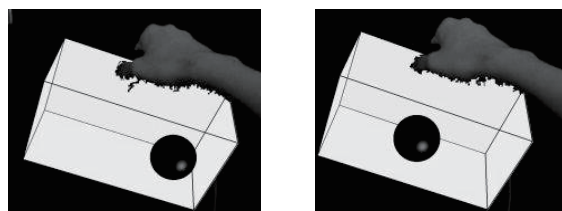


図 2 実験で使用した実物体

Fig.2 Real Object Used in Experiments



(a) 移動ありの場合 (b) 移動なしの場合

図 3 実験で提示した仮想物体

Fig.3 Virtual Object Used in Experiments

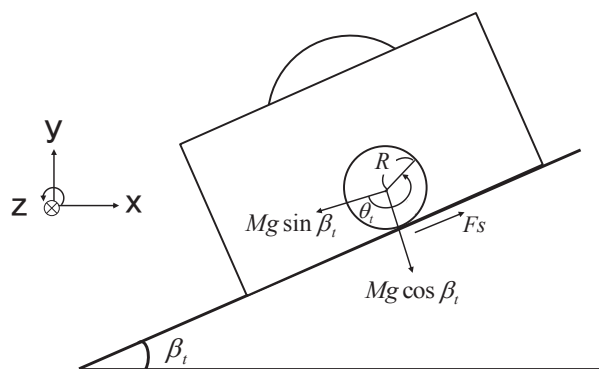


図 4 球の動きの簡易モデル

Fig.4 Simplified Model of Ball Movement

しか振らず、球は斜面を必ず転がりながら移動し、空気抵抗は作用しないという条件を設けると以下の運動方程式が成り立つ。

$$M\alpha(t) = Mg \sin \beta_t - F_s \quad (1)$$

M は球の質量、 $\alpha(t)$ は時刻 t における球の加速度、

g は重力加速度, β_i は把持物体の傾き (時刻 t に磁気センサから得られた z 軸回転の角度), F_s は球に作用する静止摩擦力とする. 球は斜面を移動する際回転するので, 球の慣性モーメントを I_G , 時刻 t における回転角を $\theta(t)$, 球の半径を R とすると,

$$I_G \theta(t) = R F_s \quad (2)$$

と表すことができる. よって, 静止摩擦力の置き換えができ, 以下の式が成り立つ.

$$M \alpha(t) = M g \sin \beta_i - \frac{I_G}{R} \theta(t) \quad (3)$$

また, 球は斜面を必ず転がりながら移動するので, 以下の式が成り立つ.

$$\theta(t) = \frac{\alpha(t)}{R} \quad (4)$$

式 (3) に, 式 (4) の $\theta(t)$ を代入・変形すると,

$$M \alpha(t) = M g \sin \beta_i - \frac{I_G}{R^2} \alpha(t) \quad (5)$$

$$\left(M + \frac{I_G}{R^2}\right) \alpha(t) = M g \sin \beta_i \quad (6)$$

球の慣性モーメントは一般的に $I_G = \frac{2}{5} M R^2$

と表されるので, 式 (6) に代入すると,

$$\left(M + \frac{2}{5} M\right) \alpha(t) = M g \sin \beta_i \quad (7)$$

$$\frac{7}{5} M \alpha(t) = M g \sin \beta_i \quad (8)$$

式 (8) を解くと以下の式が成り立つ.

$$\alpha(t) = \frac{5}{7} g \sin \beta_i \quad (9)$$

本研究では, この式 (9) で求めた値を実験で使用する球の加速度とする. また, 球の大きさは, 直径 45mm を基準とし 50%, 75%, 100%, 125%, 150% の 5 種類 (表 2) を, 式 (9) から算出される値に係数 25%, 50%, 75%, 100% を掛けることで異なる速度 4 種類を用意した (表 3). 実験開始時の球の初期位置は, ケースの端であり, 球は静止しているため初速度は 0mm/s である.

表 1 実験 1 での提示パターン

Table 1 Experimental Patterns in Experiment1

提示パターン	状態
P_A1	CG の提示あり (移動あり)
P_A2	CG の提示あり (移動なし)
P_A3	CG のなし

表 2 実験 2 での提示パターン (大きさ)

Table 2 Experimental Patterns in Experiment2 (Size)

提示パターン	球の大きさ
P_B1	50% (22.50mm)
P_B2	75% (33.75mm)
P_B3	基準 100% (45.00mm)
P_B4	125% (56.25mm)
P_B5	150% (67.50mm)

表 3 実験 2 での提示パターン (速度)

Table 3 Experimental Patterns in Experiment2 (Speed)

提示パターン	提示する刺激
P_C1	100% (標準)
P_C2	75%
P_C3	50%
P_C4	25%

表 4 実験 3 での提示パターン

Table 4 Experimental Patterns in Experiment3

提示パターン	提示する刺激
P_D1	CG のみを提示
P_D2	CG・触覚刺激を提示
P_D3	CG・聴覚刺激を提示
P_D4	CG・聴覚・触覚刺激を提示

【聴覚刺激】

実験 3 で使用する, 仮想物体と実物体との衝突を表現する聴覚刺激として, 実験で使用するアクリルケース (厚み 3mm) と直球 45mm (基準の仮想球と同サイズ) の実物の鋼球 (370g) を衝突させた際の音を収録し, 再生する. 衝突音は, IC レコーダ (ソニー, ICD-UX565F) に接続した 2 つのコンデンサマイク (ホシデン, KUB8223) を用いてステレオ録音した. マイクは, ケースに直接固定するとノイズが大きくなったため, ケース側面 (衝突させる面) から少し浮かせて固定し, 録音した. 録音された音は, サウンド編集ソフト (Sound Engine) によって衝撃時の音のみを抽出し, 式 (9) にあわせて仮想物体が衝突したタイミングで再生する.

聴覚刺激の提示には, 振動スピーカから振動を提示する際に発生する振動音が被験者に聞こえないように, 密封型ヘッドホンを用いた. 実験で提示する衝突音の音量を決めるために, 被験者 7 名に仮想球の移動を観察させながら衝突音を聴取させた. 観察さ

せた視覚条件は、実験 3 でも提示する、基準の大きさの仮想球が標準速度で移動するものである。この時、衝突音の音量を変更し印象に合う音量を回答させた結果、音量の平均は 64dB となった。全被験者に、再度この音量と見た目の衝突の印象に違和感がないか確認し、違和感はないとの回答を得た。そこで、実験 3 では衝突音を 64dB に設定した。

【触覚刺激】

実際に内部に球体が入ったケースを把持すると、様々な触覚刺激が知覚される。例えば、球体が転がる際の振動、ケース内壁面と球体が衝突する際の衝撃などである。本稿では、後者のケース内壁面と球体が衝突する際の衝撃に着目する。内部の物体が剛体の場合、衝撃の印象がかなり大きい。それに加えて、視覚刺激のみでは提示が困難であるため、視覚刺激とは異なる影響を本錯覚現象に与える可能性があると考えた。

衝突時の衝撃を表現する手法としては様々考えられるが、本論文ではまず単純に、聴覚刺激と同じ音源を触覚刺激として使用し、これを振動スピーカで提示する方法を採用した。この触覚刺激についても、

【聴覚刺激】と同様に、事前に 7 名の被験者に体験させ、こちらも視覚刺激に対して違和感のない触覚刺激となっていることを確認した。また振動の強度は、同予備実験で視覚刺激（【聴覚刺激】の場合と同様、基準の大きさの仮想球が標準速度で移動する）を提示しながら違和感のない強さを回答させ、その平均値を採用した。

実験 3 では、MR 型視覚刺激に対してこれらの聴覚刺激と触覚刺激を各々付与した・しなかった表 4 の 4 パターンの刺激を提示し、R-V Dynamics Illusion に与える影響を系統的に実験していく。

4 実験 1：剛体条件における R-V Dynamics Illusion の確認実験

4.1 実験目的

MR 型視覚刺激として動的な剛体を提示した場合、R-V Dynamics Illusion の発生を確認し、重さ知覚に与える影響を分析する。具体的には、実物体に対して内部で球の移動を想起させる MR 型視覚刺激を提示した場合、球の移動あり・なし条件において重さ知覚に影響があるのか確認する。また、実物体との重さを比較するため、MR 型視覚刺激を提示しない条件も提示パターンに加えた(表 1)。

視覚刺激が剛体となると、先行研究で提示した液体の条件よりも衝突や移動時の触感の印象が強くなり、見た目と触感の齟齬が大きくなる。そのため、先行研究と同様には R-V Dynamics Illusion が発生



図 5 実験風景

Fig.5 Experiments Scene

しない可能性もある。逆に、液体の場合と同じ傾向となるのであれば、球が移動する場合に実物体を最も軽く知覚するはずである。

4.2 実験条件

実験 1 では、球の運動状態が異なる 2 種類の仮想物体 (P_A1: 移動あり, P_A2: 移動なし) と MR 型視覚刺激を提示しない場合 (P_A3: CG なし) の計 3 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知覚に与え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、直立した姿勢で腕を真っ直ぐ前に胸の高さまで上げ、肘を約 45°屈曲させる(腕を真っ直ぐにした状態を 0°とする) (図 5)。

振り動作は、メトロノームのテンポ 60BPM に合わせている。60BPM は、仮想球が端から端まで十分到達でき、かつ疲労感を軽減するためできる限り早いリズムとして採用する。

実物体の振り幅は、水平を 0°とした際、左右それぞれ 30°程度とした。左右に 30°以上傾けるとごく短くピープ音が鳴り、すぐに逆方向に振るよう指示した。これらの振り動作の練習を行った上で、実験を行った。被験者は 11 名 (男性 9 名, 女性 2 名)、試行回数は 1 名あたり ${}_3C_2=3$ 回である。

4.3 実験手順

実験手順は以下の通り。

- (1) 被験者に HMD を装着させる
- (2) 3 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 45°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 (60BPM) に合わせて 5 秒間、ケースを左右に振る動作を行わせる

- (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、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

4.4 実験結果

実験 1 の結果を図 6 に示す。図中の 1 本の数直線は提示パターンごとに得られた重さの心理尺度を示している。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。また、この結果をボンフェローニ法により有意差を確認した。実験 1 の結果から、以下のことが分かる。

- (i) 仮想物体を提示しない条件が、最も把持物体を重く知覚した
 - (ii) 球が移動する条件が、最も把持物体を軽く知覚した
- (i) は、P_A3 (CG なし) は、P_A1 (移動あり) と P_A2 (移動なし) を比較すると最も重く知覚されることから分かる。P_A3 は、CG が描画されておらず、真っ黒なケースを振らせているが、P_A1 と P_A2 は CG として白いケースと黒い球が描画されている。鳴海らの研究 [21] から黒色よりも白色の方が軽く感じる傾向が示唆されている。よって、この結果も色の情報による影響で、CG なし条件が最も重く知覚した。
- (ii) は、CG を提示する条件にて、P_A1 と P_A2 を比較すると P_A1 の方が軽く知覚されることから分かる。この結果を (i) と含めて考えると P_A1, P_A2, P_A3 の順に軽く知覚されたことが分かる。また、ボンフェローニ法によりすべての試行パターンから有意水準 1% の差異が見られた。

P_A1, P_A2 の視覚刺激は、球の移動の有無に違いがある。そのため、MR 型視覚刺激で球が移動することで、重さ知覚に影響を与えていることが分かる。また、この実験条件下で、R-V Dynamics Illusion が発生しているとき、腕の筋活動量が減

少していることも確認している [22]。

これらの結果は、先行研究 [2] と同様の結果であり、視覚刺激が剛体で衝突や移動時の触感を提示しないという条件下でも R-V Dynamics Illusion が発生することを確認した。

5 実験 2：視覚刺激の変更によって重さ知覚に与える影響

5.1 実験目的

実験 1 では、動的な剛体の仮想物体を把持物体内部に提示した際、R-V Dynamics Illusion が発生し、重さ知覚に影響を与えることを確認した。同錯覚現象は、先行研究より仮想物体の液体容量や液面の速度を変更することで、重さ知覚に与える影響が変化することが分かっている。そのため、本研究のような仮想の球でも、球の大きさや速度を変更することによって重さ知覚に影響を与える可能性が高い。そこで、実験 2 では、視覚刺激の条件のみ (球の大きさ・速さ) を変更した場合の、重さ知覚への影響を確認する。

5.2 実験条件・手順

球の大きさに関する実験では、実験 1 で使用した同形状の仮想のケースを利用する。この実験では、球の大きさ・速さを変更する。球の大きさに関する実験では、被験者の手の動きに合わせて球が移動する場合 (P_B1 ~ P_B5)、球が移動しない場合 (P_B6 ~ P_B10) を含めた計 10 種類を用いる (表 2)。また、球の速さに関する実験は、球の大きさは直径 45mm に統一し、(P_C1 ~ P_C4) の 4 種類を用いた (表 3)。

また、実験間で振り動作を同じにするため、振り速度は実験 1 同様 60BPM とする。60BPM は、速度が 25% でも 100% の場合でも仮想球が端から端まで十分到達でき、かつ疲労感を軽減するためできる限り早いリズムである。

球の大きさ、速さに関する実験はそれぞれ分けて行い、実験 1 同様に、各実験を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、

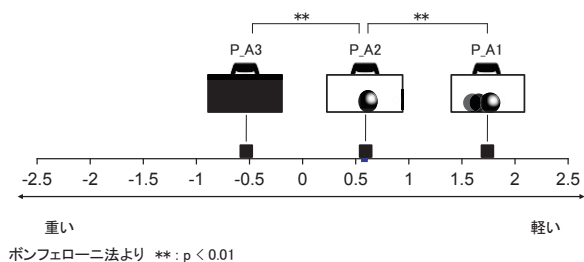


図 6 実験 1 の結果
Fig.6 Result of Experiment 1

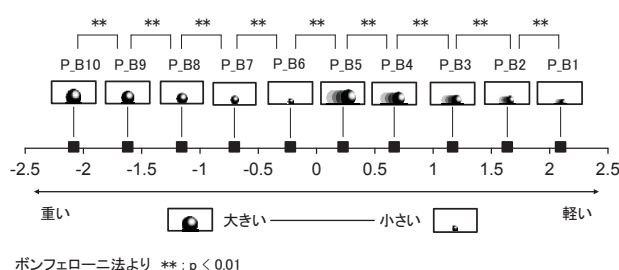


図 7 実験 2 の結果 (大きさ)
Fig.7 Result of Experiment2 (Size)

女性 2 名), 試行回数は 1 名あたり ${}_{10}C_2=45$ 回である。なお, 実験手順は実験 1 と同様だが, 実験 2 に関しては, 球の大きさに関する実験では, 「10 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」に変更する。また, 同様に球の速さに関する実験は, 「4 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」に変更する。

5.3 実験結果

球の大きさに関する実験の結果を図 7, 球の速さに関する実験の結果を図 8 に示す。図中の数直線は, 実験 1 と同様に被験者が重さに対する心理尺度を示している。実験の結果から, 以下のことが分かる。

- (i) 球の大きさに関係なく, 球が移動する条件の方が把持物体を軽く知覚した
- (ii) 運動状態が同じ条件では, 球が小さいほど把持物体を軽く知覚した
- (iii) 球の移動が遅いほど, 把持物体を重く知覚した

また, ボンフェローニ法によりすべての試行パターンから有意水準 1%の差が見られたことから球の大きさが重さ知覚に影響を与えることを確認した。

(i) の結果は, 球は移動しない場合 (P_B6 ~ P_B10) と球が移動する場合 (P_B1 ~ P_B5) では, 球の大きさに関係なく移動する場合の方を軽く知覚することが分かる。また, (ii) の結果は, 移動する条件の各大きさで P_B1 ~ P_B5 を比較すると球が大きいか方を重く感じる事が分かる。そして, この結果は, 球が移動しない条件にも見られる。これらの結果より, 球の大きさが把持物体の重さ知覚に影響を与えることが分かる。これは, 球の大きさが変わることにより, ケース全体の密度が変化することに起因している可能性がある。見た目の密度の影響が重さ知覚に影響を与えることも報告されており, 重さを異なって知覚していることが示唆される。

(iii) の結果では, すべての試行パターンから有意水準 1%の差が見られたことから, 球の速さが重さ知覚に影響を与えることが分かる。

この条件について被験者からコメントを取ったところ「球が移動することで把持物体を振りやすい」や「自身の思い通りに球が動くため軽く感じる」と

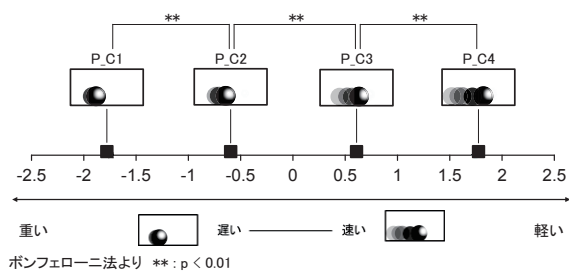


図 8 実験 2 の結果 (速さ)
Fig.8 Result of Experiment2 (Speed)

いう回答が多くあった。Pseudo-haptics の研究では, 自身の動きと連動している対象の移動速度が変化することで力覚や重さ知覚に影響を与えることがあると報告している [23,24]。このことから, R-V Dynamics Illusion は, 自身の動きと連動した物体の速度で触力覚に影響を与える点で Pseudo-haptics と同類の錯覚現象であることが示唆される。

6 実験 3: 聴覚・触覚刺激を付与した条件が R-V Dynamics Illusion に与える影響

6.1 実験目的

これまでの実験から, 予想に反して聴触覚刺激が無い仮想の剛体において R-V Dynamics Illusion が発生すること, そして, 移動の有無や球の大きさといった視覚刺激の条件が, 重さ知覚に影響を与えることが分かった。しかし, 実際にケース内部で剛体が移動する場合, ケース内壁面と球体が衝突する際の衝撃や音などが知覚されるが, これらの刺激が無くても本現象は発生した。それでは, 本錯覚現象において聴触覚刺激はどのような役割があるのだろうか。この疑問を解明する第一歩として, まず衝突時に仮想の球の見た目の印象に合った衝突音や振動を提示する実験 3 を行い, 聴触覚刺激が本現象に与える影響を確認し, 分析する。

6.2 実験条件・手順

実験 3 では, 実験 1 で提示した同形状の仮想ケースを利用する。このとき, 仮想ケース内部の球の大きさは P_B3 (45mm) に統一した。提示パターンは, P_D1 (CG の提示のみ), P_D2 (CG・触覚刺激の提示あり), P_D3 (CG・聴覚刺激の提示あり), P_D4 (CG・触覚・聴覚の提示あり) の計 4 種類を用いる (表 4)。そして, この 4 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), 試行回数は 1 名あたり ${}_4C_2=6$ 回である。なお, 実験手順は実験 1 と同様で, (2) が「4 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」に変わるだけで

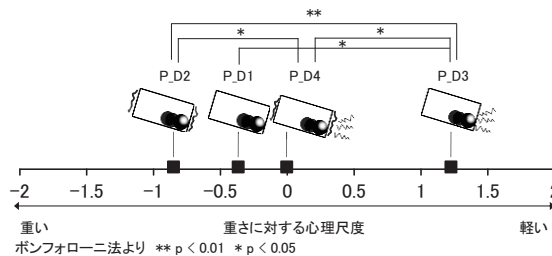


図 9 実験 3 の結果
Fig.9 Result of Experiment3

ある。

6.3 実験結果

実験3の結果を図9に示す。図中の数直線は、実験1と同様に被験者の重さに対する心理尺度を示している。実験3の結果から、以下のことが分かる。

- (i) 視覚刺激に聴覚刺激を付与することで把持物体を最も軽く知覚した
- (ii) 視覚刺激に触覚刺激を付与することで把持物体を最も重く知覚した
- (iii) 視覚刺激のみの条件と視覚刺激に触覚・聴覚刺激を同時に付与した条件では有意差がみられなかった

(i) では、P_D3 (CG・聴覚刺激の提示あり) が他の条件よりも把持物体を軽く知覚したという回答が多いこと、そしてボンフェローニ法より全ての試行パターンより5%以下の有意差があることから、本実験での聴覚刺激では、把持物体を軽く知覚させることが分かった。

(ii) では、P_D2 (CG・触覚刺激の提示あり) の場合に他の条件よりも把持物体を重く知覚した。また、ボンフェローニ法より、P_D3 (CG・聴覚刺激の提示あり)、P_D4 からは5%以下の有意差がみられ、P_D1 (CGのみの提示) からは有意差は見られないが重く知覚する傾向にある、そのため本実験の触覚刺激では、把持物体を重く知覚させる影響を与えることが分かった。

P_D2, P_D3の結果を、分析するべくコメントを整理し分類したところ、P_D2 (CG・触覚刺激の提示あり) では、「振動することで球の移動感が増す」「重心の位置が変化する」「遠心力がある感じがする」など触覚に関するコメントが多かった。一方、P_D3 (CG・聴覚刺激の提示あり) では、「衝突音によって球が固くて軽い物体に感じる」など仮想物体の素材に関する回答が多かった。これらのコメントから同じ音源であっても、聴覚刺激と触覚刺激では影響を与える知覚が異なることが考えられる。具体的には、聴覚刺激は、ケース内の物体の素材感に影響を与え、触覚刺激はケース内の物体の移動感や重心に影響を与えている可能性が示唆される。

一方、(iii) では、P_D1 と P_D4 をボンフェローニ法で比較しても有意差がみられなかった。被験者のコメントでは、P_D4 の条件が最も「ケースの中に物体が入っている感じがある」という意見が多く、触覚刺激や聴覚刺激を同時に提示することによって、内部のリアリティ自体は向上している様子が伺える。(i)(ii) の結果では、視覚刺激に対して、触覚刺激を付与した場合には重く、聴覚刺激を付与した場合には軽く知覚した。これに対して、これらを同時に付与した場合、相互の作用が打ち消しあい、従来の視

覚刺激のみの場合とは有意差が見られなくなったことが考えられる。

比較的实际の衝突に近い聴覚刺激・触覚刺激を用いて行った今回の実験では、聴覚刺激が軽く、触覚刺激が重く知覚された。実験で使用した衝突音は、アクリルと鋼球が衝突した際の音であり、この音は高く乾いた衝突音であったため、被験者からは「固くて軽い球が衝突した音」との意見が多かった。被験者は「軽そうな球」と認識し、軽く知覚したことが示唆される。一方、触覚刺激では、衝突音と同じ音を振動スピーカより再生しているが、前述のコメントからは、球の素材の認識よりも移動感や衝突感の知覚に影響を与えていることが分かる。よって、触覚刺激を加えることによって移動感からくる遠心力や衝突感のような疑似的な外力を感じ、重く知覚したのではないかと考えられる。即ち、触覚刺激・聴覚刺激によって重さの印象が変わることが示唆された。

また、この結果から、触覚刺激、聴覚刺激のパラメータを変更することで、意図した重さに知覚させることができる可能性も示唆される。

7 むすび

本研究では、物体内部の剛体の移動を想起させるMR型視覚刺激がR-V Dynamics Illusionに与える影響を確認し、仮想の剛体に対して振動・聴覚刺激を付与し、衝突感を提示した場合、同錯覚現象に与える影響を分析した。

実験の結果、以下のような知見が得られた。

- (a) 物体内部の剛体の移動を想起させるMR型視覚刺激を重畳描画することで先行研究と同様に把持物体を軽く知覚した。この結果より剛体の移動を想起させるMR型視覚刺激によってもR-V Dynamics Illusionが発生することが示された
- (b) 重畳描画する球の大きさや速さを変更することで、R-V Dynamics Illusionに影響を与え、把持物体を異なった重さに知覚した
- (c) 球に対して振動や衝突音を付与することで、衝突感が増し、R-V Dynamics Illusionに影響を与え、把持物体を異なった重さに知覚した

これらの知見から、R-V Dynamics Illusionは、液体だけでなく移動時の振動や衝撃などの印象が大きい剛体の仮想物体でも発生することが分かった。さらに、内部の運動を想起させる仮想物体に対して、聴覚・触覚刺激を付与し、視覚と相互に作用させることで同錯覚現象に影響を与え触覚知覚が変化することを明らかにした。これらの知見は、人の重さ知覚や多感覚相互作用を考慮したMR作品、製品、デバ

イス設計を行う際の活用にも期待できる。また、仮想物体に対して触覚・聴覚刺激を付与することで R-V Dynamics Illusion に本来の錯覚以上の効果や異なる触知覚を得られる可能性が示唆された。

一方、触覚刺激や聴覚刺激が同錯覚現象に影響を与えるパラメータとして、音量の大きさや周波数の高さなど様々な要因が考えられる。今回の実験では、音や触覚を導入する試みの第一歩という位置づけで、比較的实际の衝突に近い聴覚刺激・触覚刺激を用いて実験を行い、その結果、聴覚刺激や触覚刺激を変更することで仮想物体の素材感や移動・衝突感などに影響を与え、重さ知覚が変化するという可能性が示唆された。

今後は、提示する音源の種類、振動の強度などを変えることで、同錯覚現象にどのような影響を与えるのかについて、さらに実験・分析を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、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] 大槻麻衣, 木村朝子, 西浦敬信, 柴田史久, 田村秀行: “複合現実空間との新しいマルチモーダル・インタラクション方法の提案と実現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 247 - 255, 2008.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] 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.
- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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”, 本論文誌, 2017.
- [15] T. H. Massie and J. K. Salsbury: “The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects,” Proc. 3rd Symp. On Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 295 - 300, 1994.
- [16] M. Sato: “SPIDAR and Virtual Reality,” Proceedings of the 5th Biannual World Automation Congress, Vol 13, pp. 17 - 23, 2002.
- [17] 黒田嘉宏, 仲谷正史, 長谷川晶一, 藤田欣也: “物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 379 - 390, 2011.
- [18] 仲谷正史, 箕康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, 舘暉: “触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践”, 同上, Vol. 19, No. 4, pp. 593 - 603, 2014.
- [19] A. Charpentier: “Experimental study of some aspects of weight perception,” *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- [20] T. Tanabe, H. Yano and H. Iwata: “Properties of proprioceptive sensation with a vibration speaker-type non - grounded haptic interface,” Haptic Symposium (HAPTICS), pp. 21 - 26, 2016.
- [21] 鳴海拓志, 伴祐樹, 藤井達也, 櫻井翔, 井村純, 谷川智洋, 廣瀬通孝: “拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 333 - 342, 2012.
- [22] 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) ~ 固体の運動を重量描画した場合について Part2 ~”, 第 20 回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.
- [23] 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.
- [24] T. Yuki, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: “Controlling fatigue while lifting objects using Pseud-haptics in a mixed reality space,” IEEE Haptics

Symposium, pp. 175 - 180, 2014.

(2016年12月12日受付)

[著者紹介]

山田 泰己 (学生会員)



2015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。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、科学技術振興機構さきかけ研究員等を経て、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。