



# R-V Dynamics Illusion における各種刺激の影響分析 (5)

## ～聴覚刺激のパラメータを変更した場合について～

山田 泰己, 橋口 哲志, 柴田 史久, 木村 朝子

立命館大学 情報理工学研究科  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

概要：我々は、実物体と仮想物体の異なる運動状態が引き起こす錯覚現象 R-V Dynamics Illusion について研究を行ってきた。従来研究より、実物の剛体に対して液体の揺れや球体の移動を想起させる視覚刺激を提示することで、実際よりも物体を軽く知覚することがわかった。更に、仮想の球体に衝突音を付与することで視覚刺激のみの条件よりも物体を更に軽く知覚することを確認した。次なるステップとして、本研究では、提示する衝突音の音圧などのパラメータを変更した実験を行った。その結果、提示する衝突音によって触力覚が変化することを確認した。

キーワード：複合現実感, 重さ知覚, 錯覚現象

### 1. はじめに

近年、人工現実感 (Virtual Reality; VR) のリアリティ向上のため、各種インタフェースを用いて仮想空間上で触知覚を疑似的に表現する研究が盛んに行われている。これらの研究では、仮想物体の見た目をまるで実物体のように表現することから始まり、視覚情報にさらに聴覚・触覚刺激を付加することで臨場感が向上することがわかっている。

VR の発展形である複合現実感 (Mixed Reality; MR) においても、VR と同様に聴覚・触覚を提示するインタフェースを導入することで没入感の向上が期待できる。特に MR 空間は、仮想物体を実物体に重畳描画することで外観のみ変更 (以下、MR 型視覚刺激) できるため、視覚刺激によって触力覚が生起される場合がある。

著者が所属する研究グループでは、MR 型視覚刺激が触知覚に作用するメカニズムを解明するため、これまで系統的に研究を行ってきた [1 - 2]。

その一環として、内部に錘を固定したケースに、MR 技術によって、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、「軽く感じる」などの意見が得られ、この錯覚現象を「R-V Dynamics Illusion」と命名した [1]。

筆者らは、本錯覚現象の発生条件を検証するため仮想物体の種類に着目し、仮想物体を液体から剛体に変更した場合でも同錯覚現象が発生するのか実験を行った [2]。視覚刺激が剛体となると、液体の条件よりも衝突の印象が

強くなり、見た目の印象と触感の齟齬が大きいため、R-V Dynamics Illusion が発生しないのではないかと考えていたが、予想に反し同錯覚現象は発生した。さらに仮想物体の衝突感を、聴覚刺激や触覚刺激として追加表現することで、同錯覚現象の効果が変化しないのではないかと考え、仮想の剛体の衝突時に聴覚刺激や触覚刺激を付与する実験を行った。その結果、仮想物体の衝突時に衝突音を提示すると物体を軽く、振動刺激だと物体を重く感じる場合が見られた。

次なるステップとして、聴覚刺激と触覚刺激では、本錯覚現象に与える影響の役割が異なることが予想されるため、聴覚刺激と触覚刺激を個別に分析することとした。そこで本稿では、まず聴覚刺激に着目し、衝突音が R-V Dynamics Illusion に与える影響について分析する。

先行研究では、録音した衝突音を原音のまま提示していたが、音には多種多様なパラメータ (音圧, 周波数, 残響など) があり、これらを変更することで同錯覚現象の効果が影響を与える可能性がある。そこで、まずは音圧と周波数に着目し、実験を行った。

### 2. 実験準備

#### 【実験環境】

実験で用いる MR システムは、図 1 の通りで、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。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

Taiki YAMADA, Satoshi HASHIGUCHI, Fumihisa SHIBATA, and Asako KIMURA  
Ritsumeikan University

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、確認実験において時間的ずれは感じないという意見を聴取している。また、聴覚刺激の提示に用いるヘッドホンは、実験時の環境音を排除するため密封型ヘッドホン（Peltor社、Htm79a）を採用した。

#### 【使用する実物体】

実験で被験者が把持する実物体には、把手を取り付けた幅165mm×奥行80mm×高さ90mmの亚克力ケースを用いる。実験では、ケースの中心に錘を固定して、重量が750gになるよう調整している（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、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、被験者が球体の移動を注視しやすいように選定した。

球の速度は、ケースは左右にしか振らず、球が斜面を移動する際には、必ず転がり、空気抵抗や慣性力は球に作用しない条件を課すことで、簡易化している [2]。

#### 【聴覚刺激】

実験で使用する衝突音は、実験で使用する亚克力ケース（厚み3mm）と直径45mm（実験で提示する仮想球と同サイズ）の実物の鋼球（370g）を衝突させた際の音を収録し、それを提示している。衝突音の収録では、ICレコーダ（パナソニック、RR-XS460）に接続したコンデンサマイク（ホシデン、KUB8223）を2つ用意し、ステレオ録音した。録音する際のマイクの位置は、ヘッドホンで衝突音を聞かせることを考慮し、被験者の耳の位置に装着した。録音された音は、サウンド編集ソフト（Sound Engine）を使用して衝撃時の音のみ抽出した。また衝突音は、仮想物体が仮想のケース壁面に衝突したタイミングで再生する。

提示する衝突音の音圧は、収録時に測定した音圧（約80dB）を基準に設定した。

### 3. 実験1：衝突音の音圧に関する実験

#### 3.1 実験目的

実験1では、衝突音の音圧が仮想物体の衝突感や把持物体の重さに与える影響を明らかにする。

先行研究では、仮想物体の衝突に対して衝突音を提示する条件の方が、提示しない条件よりもケースを軽く知覚すると結果を得た。

しかし、衝突音の音圧によって本錯覚現象が発生しない可能性や重さ知覚の傾向が変わることが予想される。

この仮説を検証するため実験1では、衝突音の音圧が衝突感や重さ知覚に影響を与えるのかを確認する。

#### 3.2 実験条件

20代の成人10名に対して、Schefféの一对比較法（浦

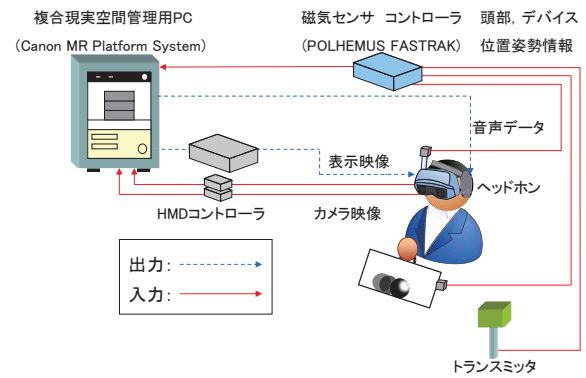


図1 システム構成

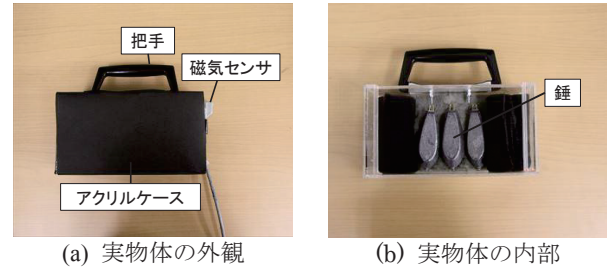


図2 実験で使った実物体

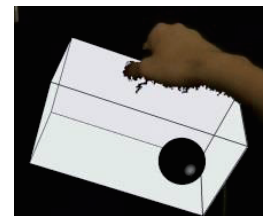


図3 実験で提示する仮想物体

の変法)に基づき重さ知覚と衝突感の評価実験を行った。

衝突音の提示パターンは、表1の通りであり、衝突音を提示しない(V1)、音の音圧が異なる4種類の衝突音(V2～V5: 60～90dB)の計5種類のうち2種類をランダムに選出し、どちらがより重く感じたか5段階で回答させた。そして、各試行で被験者が知覚したケースの重さの心理尺度を算出した。

同様に、衝突感についても、同様の実験の重さを評価する実験とは別で行ったが、実験方法や条件は同じである。

また、振り方の違いによる知覚の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させ（図4）、振る際には、メトロノームのテンポ60BPMに合わせさせた。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、実験を実施した。

試行回数は1名あたり ${}_5C_2=10$ 回である。また、提示する衝突音の音圧が全て異なって聞こえるか確認するため、全被験者に対して衝突音を聴き比べる予備実験を実施し、各衝突音が異なる音圧で聴こえていることを確認した。

### 3.3 実験手順

- (1) 被験者にヘッドホンと HMD を装着
- (2) 5 種類の提示パターンから 2 種類をランダムに選出
- (3) (2) で選出した 2 種類のパターンのうち 1 つ提示
- (4) 被験者は実物体を把持し、メトロノームのテンポ (60BPM) に合わせて物体を左右に振る動作を行う
- (5) (2) で選出した残りの提示パターンについても同様に (3)(4) を繰り返す
- (6) どちらがより重く感じたか回答させる
- (7) 筋疲労の影響を排除するために十分に休憩させる
- (8) 残りの組み合わせについても、(2) ~ (7) を繰り返す

### 3.4 実験結果

図 6, 図 7 はそれぞれ衝突感, ケースの重さを条件ごとに比較した結果である. 図ごとに記載した 1 本の数直線は提示パターンごとに得られた衝突感, 重さの心理尺度を示している.

#### 【衝突感の評価結果】

衝突感の評価に対して, Scheffé 法を用いて検定を行った結果, V4, V5 の条件間では有意水準 5%より小さい差はないが, その他の衝突音を提示した条件では全て有意水準 1%の差が得られた.

この結果から, 衝突音が大きくなるほど仮想球の衝突を強く感じる事, 即ち衝突音の音圧によって仮想物体の衝突感に影響を与えた事がわかる.

#### 【重さの評価結果】

同様の検定法を行った結果, V1 (提示しない条件) の条件と V2 (60dB), V3 (70dB)条件間で有意水準 1%, 基準音の V4 (80dB) で有意水準 10%の差が得られた. また, V3 (70dB), V4 (80dB)の条件間と V2 (60dB), V3 (70dB) の条件間, V1 (提示しない条件), V4 (80dB)の条件間では有意水準 5%より小さい差はないが, その他の条件では全て有意水準 1%の差が得られた.

この結果から, 以下の事がわかる.

- (i) 衝突音が大きいかほどケースを重く感じる傾向がある  
つまり, 提示する衝突音の音圧が重さ知覚に影響を与える事がわかる.
- (ii) V2, V3 の条件は, V1 よりもケースを軽く感じる
- (iii) V5 (90dB) の条件のケースを最も重く感じる  
(ii)(iii) の結果から基準音 80dB より大きい衝突音は, V1 より軽く感じない可能性が考えられる.

#### 【考察】

実験結果から, 衝突感が強い条件ほど重く感じており, 条件によっては, 衝突音を提示しない条件よりも重く感じる可能性があることが分かった.

また, 被験者のコメントを聴取したところ, 例えば, 音が小さい場合「衝突感が弱いため, 動いている仮想球を軽い素材に感じる」など, 衝突感が仮想物体の素材感に影響を受けたというコメントが多かった.

このことから, 衝突音の音圧が仮想物体の衝突感を増強させた結果, 仮想球の素材感に影響を与え, 衝突感が小さ

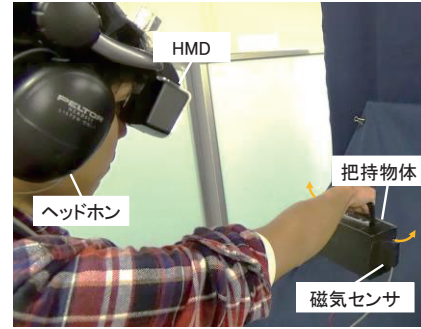


図 4 実験機材の写真

表 1 実験 1 で使用する提示パターン

提示音	衝突音の音圧
V1	提示無し
V2	60dB
V3	70dB
V4	80dB (基準)
V5	90dB

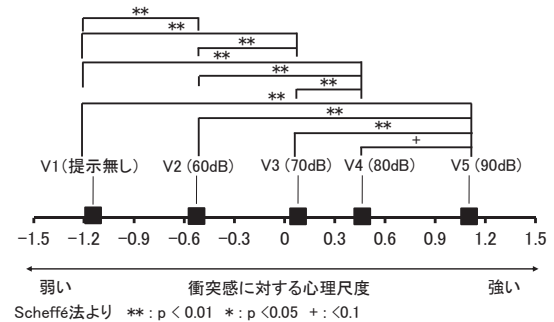


図 6 実験 1 の結果 (衝突感の評価)

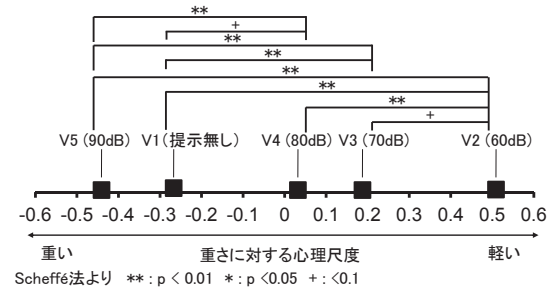


図 7 実験 1 の結果 (重さの評価)

い場合には「軽そうな球」大きい場合には「重そうな球」と認識したことでケースの重さに影響を与えた可能性が示唆される.

## 4. 実験 2 : 衝突音の種類に関する実験

実験 1 では衝突音の音圧に着目したが, 一方, 衝突音によって中身を連想するパラメータとして音圧以外にも, 音の周波数がある.

そこで実験 2 では, 衝突音の音の高さに着目し, それを低減することで仮想物体の衝突感や重さ知覚に与える影響を明らかにする.

### 4.1 実験条件

実験 2 は, 20 代の成人 10 名に対して実験 1 と同じ実験条件・手順で行った.



衝突音の提示パターンは、表 2 の通りである。衝突音の音圧は基準音の 80dB に統一し、提示する衝突音が全て異なる高さの音に聞こえるのか、全被験者に対して、実験 1 と同様の予備実験を実施したところ、被験者全員が各衝突音を異なる高さの音として聴こえていることを確認した。

#### 4.2 実験結果

図 8、図 9 はそれぞれ衝突感、ケースの重さを条件ごとに比較し、評価した結果であり、図ごとに記載した 1 本の数直線は提示パターンごとに得られた衝突感、重さの心理尺度を示している。

##### 【衝突感の評価結果】

実験 1 と同様の検定法を行った結果、F2 (原音)、F3 (5000Hz) の条件間では有意水準 5% の差だが、その他の条件では全て有意水準 1% の差が得られた。

この結果から、衝突音の音が高いほど仮想球の衝突を強く感じる、即ち、衝突音の音の高さによって仮想物体の衝突感に影響を与えることを確認した。

##### 【重さの評価結果】

同様の検定法を行った結果、V1 (提示しない条件) の条件と V5 (500Hz) 条件間には有意水準 5%、F2 (フィルタの適用なし) と F3 (5000Hz)、F4 (1000Hz) と F5 (500Hz) の条件間では有意水準 5% より小さい差はないが、その他の衝突音を提示した条件では全て有意水準 1% の差が得られた。

この結果から、以下の事がわかる。

- (i) 衝突音を提示した条件はしない条件より軽く感じる  
衝突音の音の高さを変更する実験では、衝突音を提示した全条件は、F1 よりも物体を軽く知覚した
- (ii) 衝突音の音が高いほど強く感じる

この結果から提示する衝突音の音の高さが重さ知覚に影響を与える事がわかった。

##### 【考察】

実験結果から、衝突感が弱い条件ほど強く感じており、実験 1 の衝突感と重さの関係とは逆の傾向が見られた。

被験者のコメントを聴取したところ、仮想物体の素材感に関する内容が多く、例えば、衝突音が低い場合「衝突音がこもったように聞こえ、仮想物体のケースの壁が分厚くなった感じがする」などの意見が多かった。

つまり、被験者は衝突音が低いほど仮想のケースの壁を分厚く感じ、そのため衝突感は弱く、物体を重く感じたのではないかと考えられる。

#### 5. まとめ

本稿は、聴覚刺激が R-V Dynamics Illusion に与える影響を系統的に分析するため、仮想物体に付与する衝突音の音圧や音の高さに着目した実験を行った。

その結果以下のことが分かった。

- (i) 衝突音が大きいと衝突を強く、ケースも重く感じる
- (ii) 衝突音の音の高さが低い音ほど把持物体を重く感じる

表 2 実験 2 で使用する提示パターン

提示音	音圧	ローパスフィルタの閾値
F1		衝突音の提示無し
F2	80dB	フィルタの適用なし (20 ~ 22,000Hz を提示)
F3		5000Hz
F4		1000Hz
F5		500Hz

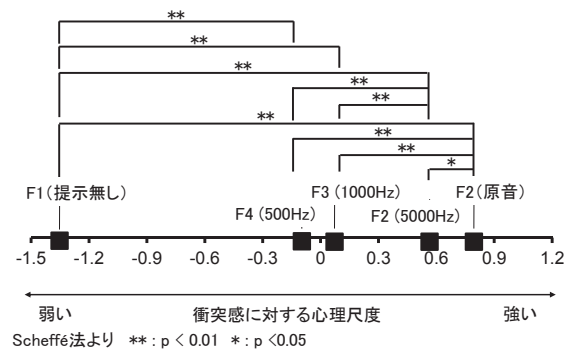


図 8 実験 2 の結果 (衝突感の評価)

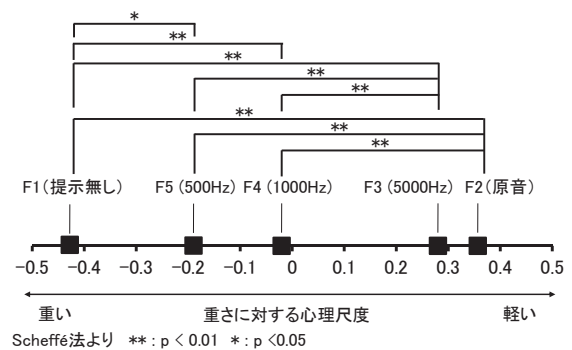


図 9 実験 2 の結果 (重さの評価)

- (iii) 衝突音の音の高さが高い音ほど衝突感を強く感じる

これらの結果から、仮想物体に付与する衝突音の音圧や音の高さを変更することで R-V Dynamics Illusion に影響を与え効果が変化することを確認した。

今後は、実験 1 や実験 2 で建てた仮説を検証するため衝突音を提示した際にケースの中身をどのように連想しているのか調査する印象実験や、聴覚刺激の提示のみでも視覚刺激と組み合わせた場合と同様の効果の傾向や錯覚の強さを比較する実験などを予定している。

#### 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] 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, 2011.
- [2] 山田泰己, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “MR 環境下での錯覚現象 R-V Dynamics Illusion に関する諸考察”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 2, pp. 269 - 278, 2017.