



VR における遠隔視点での落下音の音高の違いがもたらす 共感的な重量感知の錯覚の検討

Investigation of the illusion of sympathetic weight perception induced by different pitches of falling sound in remote viewpoints in VR

松本隼哉¹⁾, 石毛智哉²⁾, 水谷賢史³⁾

Shunya Matsumoto, Ishige Toyama, Kenji Mizutani

- 1) 東海大学工学研究科医用生体工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117, 4CEYM009@tokai.ac.jp)
- 2) 東海大学工学研究科医用生体工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117, 5CEYM001@tokai.ac.jp)
- 3) 東海大学工学研究科医用生体工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117, mk3149@tokai.ac.jp)

概要: 本研究は、VR 空間における重量錯覚に対し、音高や倍音成分などの聴覚要因と共感性の関与を検討する。特に、ミラーニューロンが視覚・聴覚刺激に反応し、他者視点での体験を通じて重量感覚を形成する可能性に注目し、統合的な神経メカニズムを実験的に検証することを目的とする。これにより、より現実感の高い VR 体験設計への応用が期待され、リハビリや教育分野への展開も視野に入れている。

キーワード: クロスモーダル、重量錯覚、共感性、遠隔視点

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ (VR) 技術の著しい進展により、現実世界に近い感覚体験の再現が可能になってきている。視覚や聴覚を通じた感覚情報の提示によって、実際には存在しない物体の「重さ」をユーザーに知覚させる、重量感覚の錯覚を引き起こす試みが多く報告されている。中でも、物体が落下した際の映像に衝撃音を付与し、その音高を変化させると、ユーザーの知覚する重量感が変わることが示されており、具体的には高い音は軽く、低い音は重く感じられるという傾向があることが明らかとなっている[1]。さらに、音量の大小や音に含まれる倍音成分 (音色) も重量感覚の形成に寄与していることが報告されており[2]、聴覚的要素が重量錯覚の鍵を握っているといえる。

本研究では、こうした錯覚が生じる背景にある神経的メカニズムとして、ミラーニューロンの働きに着目する。ミラーニューロンは他者の動作やそれに付随する音を観察するだけで、自身の対応した運動系を操作した場合と同様の神経活動を引き起こすニューロン群であり、他者の感覚や意図を自身のものとして理解する共感的メカニズムを支えていると考えられている[3]。これまでの研究では、視覚や聴覚を通じて得られる他者の行動情報が、観察者自身の神経活動に影響を与えることが示されており、VR 環境においてはその効果が一層強化される可能性がある[4]。

このような背景を踏まえ、本研究では、VR 空間における遠隔視点での観察状況において、物体が落下した際の衝撃音の「音高変化」が、観察者に共感的な重量感覚の錯覚を引き起こすかどうかを検討する。とくに、視覚情報、聴覚刺激、そして共感性が統合的に働く中で、ミラーニューロンの活動がこの錯覚にどのように関与しているかを探ることを目的とする。こうしたアプローチを通じて、感覚統合と共感性による知覚の変容メカニズムを明らかにし、より現実感の高い VR 体験の構築に資する知見を得ることを目指す。

2. 実験内容

2.1 VR アプリケーション

本実験では、VR 環境下でダンベルを掴み、持ち上げて落とす一連の動作を再現するために、ゲームエンジン Unity (ユニティ・テクノロジーズ) を用いて専用のアプリケーションを作成した (参考文献 1 図 1 参照)。仮想空間には、現実の実験機と同じ高さ 70 cm の机を配置し、ダンベルの着地点とした。アプリケーションを起動すると、画面奥にある高さ 30 cm から仮想ダンベルが現れて自然に落下する。その際、被験者の現実の手の位置に合わせて仮想の手も表示され、手に持ったコントローラのボタンを押すことで、仮想の手がダンベルを把持できるようになってい

る。被験者は Oculus Rift S (Oculus 社) のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着し、実験プロトコルに従って操作を行った。動作には 130 g の Oculus Touch コントローラ (Meta 社) を使用し、椅子に座った状態で、手を前に伸ばして仮想機からダンベルを掴み、肩の高さに相当する 30 cm の台の高さまで持ち上げる動作に限定した。

実験開始前には、被験者に一連の流れを説明し、特にダンベルの着地音に注目するよう指示した。その後、実験者の合図で HMD を装着し、利き手にコントローラを持って待機した。シーンが再生されると、仮想空間内でダンベルが落下し、衝撃音が聞こえる。

最初に基準音を伴うシーンを再生し、被験者はダンベルを掴んで持ち上げる。その後、比較音を伴う別のシーンを再生し、同様にダンベルを掴んで持ち上げるように指示された。これにより、異なる音に対する重量感の変化を比較できるようにした。

使用した金属音の基準音源の周波数分析は、WavePad (NCH ソフトウェア) を用い、窓機能をハミング窓に設定して行った(参考文献 2 図 3 参照)。

2.2 実験プロトコル

本研究では、ミラーニューロンによる共感性重量錯覚を調査した。実験 1(図 1)では音高一定でミラーニューロンの影響を、実験 2(図 2)では音高と視覚の効果を、実験 3(図 3)では視点を統一し音高の影響を評価した。本研究では、ミラーニューロンを介した共感性重量錯覚の発生に関与する要因として、視点の違いと音高の変化に着目し、3つの実験を実施した。各実験において、被験者は Oculus Touch コントローラ (Meta 社) のコントローラを用いて VR 環境下で仮想物体の操作を行い、提示される視覚刺激および聴覚刺激に対して重量感の評価を行った。落下音には金属音を使用し、基準音 (60 dB) に加え、その音高を 0.5 倍および 1.5 倍に変化させた 3 種類の音響刺激を提示した。

実験 1 では、音高を一定に保ちつつ視点の違いが重量感に与える影響を検証した。被験者の目の前でダンベルが落下し基準音が提示されるシーンを基準とし、仮想空間内の離れた位置で他者がダンベルを落下させ、同一の基準音を提示するシーンを比較条件とした。この条件設定により、同一の聴覚刺激に対して自己視点と他者視点の違いによって重量知覚が変化するかを検討した。

実験 2 では、視点の違いに加え、音高を変化させた条件での重量感の変化を評価した。基準シーンとしては被験者の目の前でダンベルが落下し、基準音が提示された。比較シーンでは、仮想空間内の離れた位置で他者がダンベルを落下させ、音高を変化させた音 (0.5 倍または 1.5 倍) が提示された。この実験では、ミラーニューロンを介した共感性と音響の手がかりの相互作用が、重量感にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とした。

実験 3 では、視点をいずれも他者視点に統一し、音高の変化のみが重量感に及ぼす影響を純粋に評価すること

を目的とした。基準シーンでは、仮想空間内の離れた位置で他者がダンベルを落下させ、基準音が提示された。比較シーンでも同様に他者がダンベルを落下させるが、このときには音高を変化させた音が提示された。このように、ミラーニューロンの影響を一定とした条件下で音高の違いによる錯覚効果の有無を検討した。

実験 1: ミラーニューロンによる影響(音高変化なし)

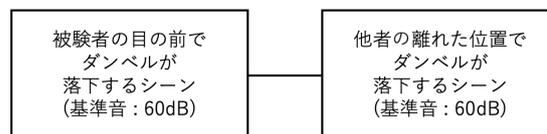


図 1: 実験 1 プロトコル

実験 2: ミラーニューロンによる影響(音高変化あり)



図 2: 実験 2 プロトコル

実験 3: 両シーンともミラーニューロンによる影響(音高変化あり)



図 3: 実験 3 プロトコル

実験では、図 1~3 に示すプロトコルに従い、被験者には実験前に流れを説明し、ダンベルの着地衝撃音に注目して観察することを要請した。被験者は実験者の指示で HMD を装着し、その後利き手にコントローラを持ち、シーンが再生されるのを待った。シーンが再生されると仮想空間上でダンベル形状の物体が落下し、音が聞こえる。基準音のシーンを再生してダンベルを掴み持ち上げる動作に続き、比較音のシーンを再生してダンベルを掴み持ち上げる動作を促した。その後実験者の指示に従い、HMD を外した後 1 セットの実験が終了し、次の比較音の実験へと移行した。

本実験では、比較対象となる 5 つの比較条件 (A~E) を設定した。条件 A の結果は実験 1 より得られた。被験者の

目の前で物体が落下し基準音が提示されるシーンを基準とし、比較シーンとしては遠隔位置における物体の落下に対して同一の基準音が提示された。条件 B および C の結果は実験 2 より得られた。基準シーンは A と同様であり、比較シーンにおいて提示される音の音高のみを変化させた。具体的には、B では高音 (1.5 倍音)、C では低音 (0.5 倍音) を提示した。条件 D および E の結果は実験 3 より得られた。いずれも基準シーン・比較シーンともに物体の落下位置は遠隔とし、音響条件のみを変化させた。基準シーンでは遠隔位置での落下に対し基準音が提示され、比較シーンでは D では高音、E では低音を提示した。これにより、視点条件を一定に保ったうえで音高変化のみの効果を抽出できるよう設計した。

2.3 被験者と評価方法

被験者として、20 代の男性の大学生 10 名の協力を得て実験を行った。10 名の被験者の内 5 名は 2 度実験に参加したため、試行回数は 15 であった。2 度目の実験を行う場合は、1 度目の実験の影響を受けることを防ぐために 1 度目の実験から 1 週間の期間を開けて実施した。

各シーンの提示終了後に、重量感の定量的評価として ME 法 (Magnitude Estimation 法) [5] を用いて被験者の主観的判断を収集した。この手法では、基準音が提示されたシーンの重量感を 100 として固定し、それに対する比較音シーンでの重量感を、被験者が感じた相対的な大きさに応じて数値で回答させた。

3. 結果

ME 法によって評価された、物体の重量感覚 (平均値 \pm SD) を図 4 に示した。得られた重量感の評価値に対して、基準条件と各比較条件との間に対応のある t 検定 (paired t-test) を実施した。その結果、条件 A (比較シーン: 遠隔落下 + 基準音) において有意な差が確認され ($p = 0.0362$)、視点の違い、すなわち他者が操作する場面を観察することによって、同一音でも重量知覚が変化し得る可能性が示唆された。これは、ミラーニューロンを介した共感的な重量錯覚の存在を支持する結果と解釈できる。

基準に対し、条件 B (遠隔落下 + 高音) には有意差は見られなかった ($p = 0.2220$)。このことから、高音刺激は重量感を軽く知覚させる方向に作用すると考えられるものの、その効果は統計的に十分とは言えなかった。一方、条件 C (遠隔落下 + 低音) には有意差が認められ ($p = 0.0482$)、低音刺激が比較対象の物体をより重く感じさせる方向に働いたことが明らかとなった。

さらに、基準シーンと比較シーンの両方において遠隔落下視点をういた条件 D および E においては、D (高音) では有意傾向が見られ ($p = 0.0501$)、E (低音) では有意な差が観察された ($p = 0.0167$)。この結果は、視点を統一した条件においても音高のみの変化が重量知覚に影響を与えることを示しており、特に低音は強い錯覚効果を生じるこ

とを示唆している。

以上の結果を総合すると、ミラーニューロンを介した視点の違いによる影響に加えて、音高の変化、特に低音刺激が仮想空間における重量知覚の形成において重要な役割を果たす可能性があると考えられる。

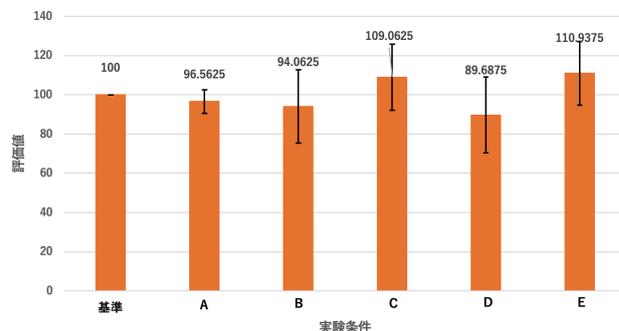


図 4 : 実験結果

4. 考察

実験の結果、条件 A では、目の前で落下 (自己視点) と遠隔位置での他者による落下 (ミラーニューロン視点) を比較する構成で、同一の基準音が提示されていたにもかかわらず有意な差が見られた ($p = 0.0362$)。この結果は、視覚的な視点の違いにより、同一の聴覚刺激でも重量知覚が変化し得る可能性を示しており、ミラーニューロンを介した共感的知覚が重量錯覚に関与していることを示唆する。

条件 B および C では、いずれも基準音に対して比較シーンの音高のみを変化させた条件であった。高音を用いた条件 B では有意差は確認されなかった ($p = 0.2220$) の、低音を提示した条件 C では有意な差が観察された ($p = 0.0482$)。これは、音高の低下が対象物をより重く感じさせる方向に作用することを示す結果であり、音高が重量感覚に与える影響の強さを裏付ける。

さらに、条件 D および E では、基準シーンと比較シーンのいずれにおいても遠隔視点、すなわち他者が物体を落下させる状況を提示し、視覚的視点をミラーニューロン経路に統一した上で、比較シーンの音高のみを変化させた。条件 D (高音) では有意傾向が見られた ($p = 0.0501$) 一方、条件 E (低音) では有意な差が確認された ($p = 0.0167$)。このことから、ミラーニューロンの視点を統一しても、聴覚的な音高の変化だけで重量感の知覚が変化することが明らかとなった。以上の結果は、ミラーニューロンを介した視点の違いが重量錯覚の発生に寄与することに加えて、音高という聴覚的手がかりが、仮想空間における重量感覚の形成において大きな影響力を持つことを示している。特に、低音は一貫して「重さ」を増強する方向に作用しており、これは感性的印象とも一致する。また、視覚と聴覚の統合的な処理において、ミラーニューロンが媒介となって共感的な身体感覚を誘発し、さらに聴覚情報によってその錯覚が強化されるという認知メカニズムの存在が示唆された。

一方で、いくつかの条件における統計的有意差は、 p 値が有意水準 ($p=0.05$) に極めて近い結果となっており、解釈には慎重を要する。たとえば条件 D ($p=0.0501$) や条件 C ($p=0.0482$) は、いずれも臨界値付近の値であり、複数の比較を行う中で偶然的に有意差が観測された可能性も否定できない。今後は、補正付きの多重比較法 (例: Bonferroni 補正, FDR など) を適用することや、実験サンプル数の増加により統計的検出力 (power) を高めることが必要である。また、事前に効果量を推定した上で十分な検出力を確保する実験設計が求められる。

さらに注目すべき点として、条件 A において被験者は基準シーンよりも比較シーンを「軽く」感じる傾向を示していた。条件 A は視覚的には自己視点 (目の前) と他者視点 (遠隔) を比較し、聴覚刺激は同一であったことから、知覚される重さの違いは視点の違いに起因するものである。阿曾らは、三人称視点により VR の没入感を軽減させた[6]。他者が扱う物体に対しては、自己との身体的一体感が弱まるため、力感や運動負荷を自分の感覚として再現する度合いが減少し、結果的に軽く感じられた可能性がある。また、遠隔視点では運動情報の細部が曖昧になることから、落下の「衝撃」自体の印象が弱まり、重さ感が低下したとも考えられる。これは、ミラーニューロンによる共感的処理が視点や距離に応じて強度を変化させることを示唆しており、今後は視点の距離や臨場感の操作も重要な検討要素となるだろう。

このような知見は、触覚を用いずに重量感を提示するための音響インタフェース設計や、感性に基づく VR 体験の精度向上、さらには共感性の操作を伴う教育・医療・福祉分野への応用にも貢献するものである。

5. むすび

本研究では、仮想空間における重量感覚の錯覚に対して、視覚的視点と聴覚的音高が及ぼす影響を検討し、ミラーニューロンを介した共感的知覚が重量錯覚の形成に関与することを示した。特に、音高の低下が重さの知覚を増幅させる傾向が明確に観察され、聴覚刺激が重量感の調整手段として有効であることが示唆された。これらの知見は、VR における感覚表現の設計や、非接触型の触覚提示技術の開発に応用できる可能性を示している。今後は、サンプル数の拡充や多感覚統合の動的変化を含めた検討を進めることで、より実用的かつ汎用的な錯覚誘導手法の確立が期待される。

参考文献

- [1] 松本隼哉, 武田 昌樹, 永田 裕幸, 楊 皓宇, 水谷賢史: VR 環境下における物体の着地衝撃音の音量変更を用いた重量感覚提示手法の提案, 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2023.
- [2] K. Mizutani, H. Nagata, S. Matsumoto, M. Takeda: Frequency and Kansei evaluation of tones that change the

sence of weights with volume, IEVC2024, 2B_1, pp. 1-4, 2024.

- [3] E. Kohler, C. Keysers, MA Umiltà, L. Fogassi, V. Gallese, G. Rizzolatti: Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons, *Science*, Vol. 2, No. 297, pp. 846-848, 2002.
- [4] 吉田弘司, 高原一岐: 仮想現実 (VR) を用いた身体イメージの評価, 日本心理学会大会発表論文集, No. 86, 2022.
- [5] S.C. Masin, D.J. Weiss, A. Brancaccio: Further evidence of the invalidity of the magnitude estimation method, *European Review of Applied Psychology*, Vol. 71, Issue 5, pp. 1-5, 2021.
- [6] 阿曾祥大, 安部こころ, 中村公美: 3D モデルを用いた三人称視点非没入型 VR による恐怖条件付け削除手法の提案, *ヒューマンコンピュータインタラクション*, pp. 1-2, 2023.