



VR における落下衝撃時の映像と衝撃音の持続時間が重量知覚に与える影響

Effects of Visual and Impact Sound Duration During Falling Impacts on Weight Perception in VR

石毛智哉¹⁾, 外山昂久¹⁾, 吉村優樹²⁾, 水谷賢史¹⁾

Tomoya Ishige, Takahisa Toyama, Masaki Yoshimura, 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, 5CEYM001@tokai.ac.jp)

2) 東海大学工学部医工学科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117, 4CEYM009@tokai.ac.jp)

概要: VR 技術の発展に伴い, 仮想物体との自然なインタラクションを実現する重量感覚提示手法の研究が重要な課題となっている. 従来研究では視覚が中心であったが, 近年は複数の感覚器官間の相互作用であるクロスモーダル知覚を活用した手法が注目されている. 本研究では, 視覚と聴覚のクロスモーダル効果を利用し, VR 環境において落下衝撃時の映像と衝撃音の持続時間が重量知覚に与える影響を検証し, 効果的な聴覚刺激条件を明らかにする.

キーワード: クロス・マルチモーダル, 感覚・知覚, 視覚, 聴覚

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 技術の急速な発展により, デジタル空間における多感覚体験の実現が重要な研究課題となっている. 特に, 仮想物体との自然なインタラクションを実現する重量感覚提示技術は, 医療リハビリテーション[1]や遠隔手術支援システム[2]など, 幅広い応用領域において必要不可欠である. しかし重量感覚の効果的な提示は技術的に困難であり[3], 新たな手法の開発が求められている.

従来の VR 環境における重量感覚提示手法は, 視覚遅延[4]や動作遅延[5]といった視覚・運動感覚に基づくアプローチが主流であった. しかし近年, 複数の感覚器官間の相互作用を活用するクロスモーダル知覚に基づく新たな手法[4]が注目されている. 特に聴覚刺激による重量感覚誘発に関する研究では, 武田ら[6]により着地衝撃音の周波数特性が物体の重量知覚に影響を与えること, 永田ら[7]により VR 環境における落下衝撃音の音色と音高の変化が重量感覚に影響し, 特に低音高の音が重量感の増大に寄与することを報告している.

しかしながら, これらの先行研究は音の周波数や音量特性に焦点を当てており, 衝撃音の持続時間が重量知覚に与える影響については十分に検討されていない. 本研究では, VR 環境において落下衝撃時の映像と衝撃音の持続時間が重量知覚に与える影響を定量的に検証し, 効果的な聴覚刺

激条件を明らかにすることを目的とする.

2. 方法

2.1 実験環境

本実験環境は, ゲームエンジン Unity (Unity Technologies) を用いて開発した VR アプリケーションにより構築した. 実験参加者は HMD (Oculus Rift S, Oculus 社) および重量 130g の Oculus Touch controllers を装着してシステムを操作した. 仮想環境には, 3D アセット HQ Dumbbells を用いたダンベル形状のオブジェクトを配置し, Oculus Integration の AvatarGrab 機能により, 実際の把持動作に対応した仮想物体の操作を実現した.

実験空間の設計において, 実際の机と同一の高さ (70cm) に仮想机を配置し, ダンベルの着地面として機能させた. アプリケーション起動時, ダンベルは被験者手前側の高さ 30cm の空中に表示され, そこから自由落下を開始する (図 1). 被験者の実際の手位置には仮想手が出現し, コントローラーの把持ボタン操作により仮想ダンベルの保持が可能となる.

音響条件については落下衝撃音の持続時間のみを実験変数として設定し, 永田ら[7]が用いた金属音をベースとして採用した. 持続時間の大幅な延長時に生じる音質劣化を避けるため, 永田らの音源を調整し, 持続時間を 1080ms としたものを 1 倍速条件として設定した. この 1 倍速条件

を基準として、再生時間を 2 倍速, 1.5 倍速, 0.75 倍速, 0.5 倍速, および無音の計 6 条件を用意した。

各再生速度条件における音響特性の時間変化を分析するため、Python 言語を用いてスペクトログラム解析を実施した。図 2 に基準音 (1 倍速) のスペクトログラムを示す。

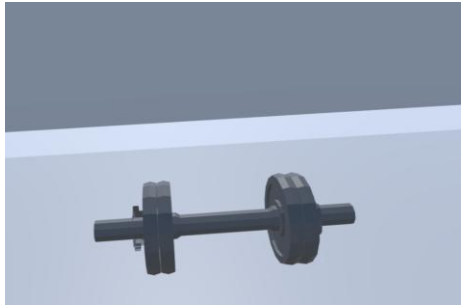


図 1: 実験環境

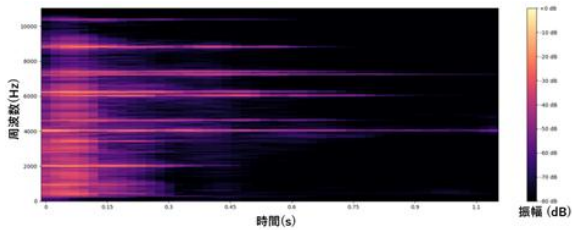


図 2 : 基準音のスペクトログラム

2.2 実験プロトコル

実験プロトコルを図 3 に示す。被験者として 20~30 代の大学生 15 名 (男性 15 名) が実験に参加し、各被験者は実験を 2 回実施した。実験者は被験者に対し実験の目的と手順を詳細に説明し、特にダンベルの着地衝撃音に注意を払うよう指示した。

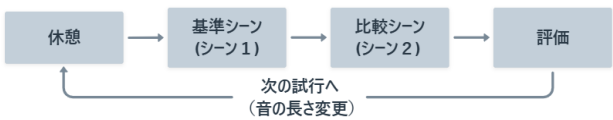


図 3 : 実験プロトコル

実験開始前に、被験者は VR や実験タスクに慣れるため、基準音による標準条件での訓練を行った。訓練では、仮想空間内で高さ 30cm の位置から落下する仮想ダンベルを観察した後、被験者は前方に手を伸ばし、机上のダンベルを把持して肩の高さまで持ち上げる動作を実施した。なお本実験は利き手で行い、適切に評価できる速度で持ち上げるよう指示した。

実験では、図 1 に示すプロトコルに従い、基準音シーン (シーン 1) を提示した後、落下衝撃音の持続時間を変更した比較シーン (シーン 2) を前述の 6 条件でランダムな順序で提示した。各比較シーンにおいて、被験者は基準シーンと同様の動作を実施した。被験者の手の動きは仮想空間内にリアルタイムで反映され、コントローラーの把持ポ

タンによって仮想ダンベルの操作が可能であった。各シーン間には十分な休憩時間を設け、疲労の影響を最小限に抑制するとともに、実験条件の統制を図った。

2.3 評価方法

実験の各シーン終了後、重量感の定量評価として ME 法 (Magnitude Estimation method) [8]を用いた評価を実施した。この評価では、基準音 (1 倍速) の重量感を 100 とし、被験者は各比較音から知覚された相対的な重量感を数値で回答した。

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 に示す。なお、統計解析にあたり、基準音と同一条件 (1 倍速) において、正確な重量判断ができていないと判断されたデータ、及び十分な錯覚効果が得られず実験姿勢が適切でないと判断されたデータについては、解析対象から除外した。

実験結果として、落下衝撃音の持続時間が重量知覚に有意な影響を与えることが明らかになった。基準音 (1 倍速, 100.0 ± 0.0) に対して、持続時間が長い条件では重量感の増加が観察され、1.5 倍速では 107.25 ± 2.07 , 2 倍速では 113.25 ± 3.85 となった。一方、持続時間が短い条件では重量感の減少が認められ、0.75 倍速では 88.5 ± 1.93 , 0.5 倍速では 87.5 ± 3.78 であった。特に無音条件では 51.65 ± 9.26 と顕著な重量感の減少が観察された。

各条件における重量感覚の違いを検討するため、基準条件と他の各条件との間で対応のある t 検定 (paired t-test) を実施した所、各条件間には有意差が認められた (1.5 倍速 : $p=0.0024$, 2 倍速 : $p=0.0027$, 0.75 倍速 : $p=9.4 \times 10^{-6}$, 0.5 倍速 : $p=0.0037$, 無音 : $p=4.9 \times 10^{-5}$)。

これらの結果は、落下衝撃音の持続時間が長いほど物体がより重く知覚され、持続時間が短いほど軽く知覚される傾向を示している。特に、音が完全に除去された無音条件では重量感が約半減し、聴覚刺激が重量知覚において重要な役割を果たすことが確認された。

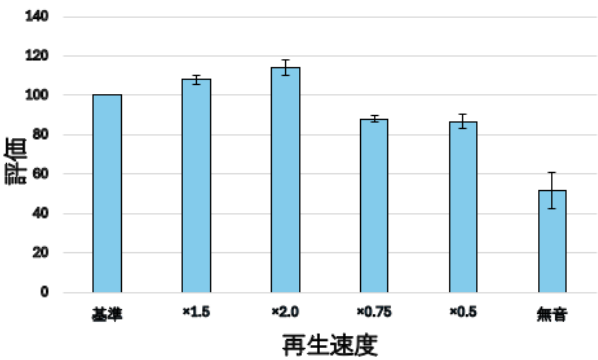


図 4 : 実験結果

4. 考察

本研究では、VR 環境において落下衝撃音の持続時間が重量知覚に有意な影響を与えることが実証された。持続時間の長い音響条件では重量感の増大が、短い条件では減少が確認された。

この現象は、人間が自然環境で獲得した統計的学習に基づく知覚メカニズムによって説明される。Gaver[9]は生態心理学的アプローチの観点から、現実世界において音響パターンが物理的事象と密接に関連していることを示した。具体的には、異なる材質の物体は特徴的な減衰特性を持ち、重い物体ほど衝撃時により長い持続時間の音を生成する傾向がある。人間はこうした音響特性と物体属性の統計的関係を、日常経験を通じて学習し、音の持続時間パターンから物体の物理的属性を推定する知覚メカニズムを発達させている[10]。本研究で観察された「長い持続音による重量感増加」は、この生態学的学習に基づく知覚プロセスの表れと考えられる。

また本研究において無音条件で約 50%の重量感減少が観測されたことは、先行研究[5][6]と一致しており、聴覚情報が重量知覚において重要な役割を担うことを再確認した。

5. むすび

本研究では、VR 環境における落下衝撃音の持続時間が重量知覚に与える影響を ME 法により定量的に評価した。その結果、持続時間の長い音響条件では重量感の増大が、短い条件では減少が確認された。これらの知見により、従来の視覚・運動感覚に基づく手法に加え、新たな聴覚刺激による重量感覚提示の有効性が実証された。

参考文献

- [1] M. Soleimani, M. Ghazisaeeedi, S. Heydari : The efficacy of virtual reality for upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review and meta-analysis, BMC Medical Informatics and Decision Making, Vol. 24, No. 135, pp. 1-25, 2024.
- [2] H. Laaki, Y. Miche, K. Tammi : Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery, IEEE Access, Vol. 7, pp. 20325-20336, 2019.
- [3] W. N. Lim, K. M. Yap, Y. Lee, C. Wee, C. C. Yen : A Systematic Review of Weight Perception in Virtual Reality: Challenges and Road Ahead, IEEE Access, Vol. 9, pp. 112145-112162, 2021.
- [4] M. Rietzler, F. Geiselhart, J. Gugenheimer, E. Rukzio : Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception using Perceivable Tracking Offsets, Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paper 406, pp. 1-13, 2018.
- [5] 平尾悠太郎, 三家礼子, 河合隆史 : VR 空間におけるクロスモーダルを用いた重さ感覚提示手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 4, pp. 263-270, 2018.
- [6] 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.
- [7] M. Takeda, K. Mizutani : Landing impact sound changed the sense of weight of objects in virtual reality, IEVC2021, Paper ID63, 2021.
- [8] 永田裕幸, 松本隼哉, 武田昌樹, 楊皓宇, 水谷賢史 : VR 環境下において物体の着地衝撃音で重さを想起させる音色の周波数と感性評価, 電気学会論文誌, Vol. 144, No. 9, pp. 936-941, 2024.
- [9] W. W. Gaver : What in the world do we hear? An ecological approach to auditory event perception, Ecological Psychology, Vol. 5, No. 1, pp. 1-29, 1993.
- [10] C. Carello, J. B. Wagman, M. T. Turvey : Acoustic specification of object properties, Acoustic Signal Processing in the Central Auditory System, Vol. 6, pp. 79-113, 2005.