



上肢装着型力覚提示装置を用いた身体の空間的拡張が 巨大アバタによる破壊行動時の身体性に与える影響

Effects of Spatial Body Augmentation Using an Upper-limb Wearable Force Feedback Device on Embodiment During Destructive Actions by a Giant Avatar

澤橋龍之介¹⁾, 西濱里英²⁾, 中村太郎³⁾

Ryunosuke SAWAHASHI, Rie NISHIHAMA, and Taro NAKAMURA

- 1) 中央大学 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, r_sawahashi@bio.mech.chuo-u.ac.jp)
2) 中央大学 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, r_nishihama@bio.mech.chuo-u.ac.jp)
2) 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27, nakamura@mech.chuo-u.ac.jp)

概要: 本研究では, 巨大アバタを用いた VR 環境において, 力覚提示が身体性に与える影響を検証した. 身体所有感と運動主体感に着目し, 装着型力覚提示装置を用いて, ユーザの上肢動作と巨大アバタの腕動作を同期させ, ビルを破壊するインタラクションを設計した. 装置は磁気粘性流体ブレーキと振動モータを組み合わせ, 関節加速度に応じた慣性力および衝突感を提示可能とした. 実験の結果として, 力覚提示条件では身体所有感が高く, 重量感や破壊感の向上が示唆された. 一方, 運動主体感に関しては自身で操作している感覚のスコアが低くなった.

キーワード: 力覚提示装置, MR 流体ブレーキ, 身体性, 巨大化

1. はじめに

近年, バーチャルリアリティ (VR) 技術は, リハビリテーション, 災害訓練, OJT (On-the-Job Training) など, 様々な分野で広く応用されている. さらに, VR は人間の認知機能を調査するための重要な手段となっており, その中でも, 仮想身体の身体性に関する研究が盛んである. 身体性には, 身体部位が自分のものであるという感覚 (身体所有感) と, その身体を自ら制御しているという感覚 (運動主体感) が含まれる. この概念に基づいて, 人間の知覚を評価した例は多く存在する[1][2]. この分野の基礎となる錯覚としてラバーハンドイリュージョン (RHI) [3]があり, 自己の感覚が多感覚統合によって影響を受け, 知覚される身体の境界には可塑性があることを示している. しかし, RHI では, 実際の手とゴムの手との間に位置的な不一致が生じる. VR 環境で仮想の腕を用いることにより, 位置や姿勢をより正確に一致させることが可能になる. このアプローチにより, 空間的な不一致の影響を受けずに, 刺激に対する人間の反応を検証できる. 例えば, VR 内で刺激を操作し, 実空間では不可能な身体サイズの変容といった身体空間的な拡張を容易にシミュレーションできる.

仮想アバタの人気も高まっており, その証拠にソーシャル VR プラットフォーム VRChat では 2025 年 1 月に同時

接続ユーザー数が過去最高を記録した[4]. このような観点からも, ユーザが自身の身体とは異なる形状や大きさのアバタを纏った際に, その身体化がどのような影響を与えるかを理解することが重要になってくる.

先行研究では, 子供の視点体験[5]や, プロテウス効果を介して鳥に変身する[6]といった全身の変身体験が探求されてきた. 巨大アバタになった感覚を再現した研究として, 視覚スケールングを用いた研究[7]や振動と映像演出を組み合わせた研究[8]がある. また, 足裏の振動で歩行感と身体所有感を高めるアプローチ[9]も存在している.

このように, 多くの研究が身体の表層的な特徴に焦点を当ててきた一方, 巨大アバタに対し視覚と力覚の統合を探索した研究は例を見ない. サイズ変容した身体はスケール効果により, 動作時の慣性に影響を及ぼし, 通常サイズとは異なる感覚フィードバックが必要と考える.

したがって本研究では, 全身に力覚提示可能な装着型デバイスを用いて, VR 空間の巨大なアバタを操るために深部感覚フィードバックが与えられた際の, 身体所有感と運動主体感の関係を明確にすることを目的とする. 本稿では, 巨大アバタの腕を同期し, ビルを破壊する動作時の身体性とそのインタラクション自体を評価した.

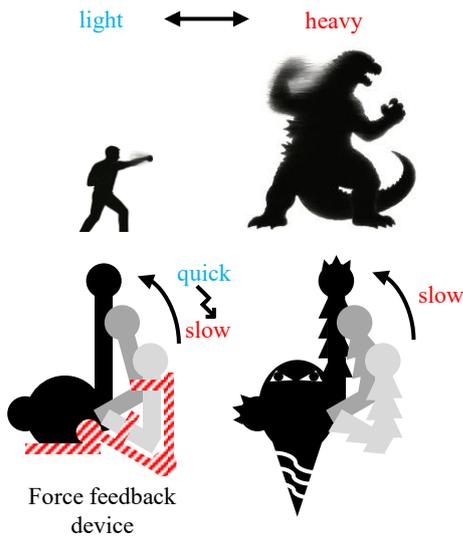


図 1: 巨大アバタの身体性を向上させるコンセプト

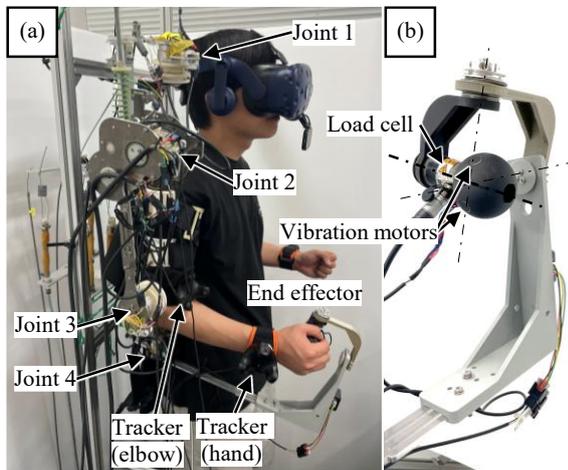


図 2: 4 自由度装着型力覚提示装置
(a)全体図 (b)振動子付きエンドエフェクタ

2. コンセプト

力覚提示装置を用いて大型アバタの身体性を向上させるコンセプトを図 1 にイメージ図として示す。巨大な身体はスケール効果によって断面積依存の筋力よりも質量や慣性の増加の影響が支配的になる。そのため、四肢を動かす際の加速度が抑制され、身体全体の動作周波数が下がる。したがって、この動作が遅くなる状態を装着型装置による力覚フィードバックで再現することにより身体性が向上すると考える。

3. 装置

3.1 装着型力覚提示装置

本研究で使用する上肢装着型力覚提示装置を図 2 に示す。肩と肘に合計 4 自由度を持ち、各関節に MR ブレーキ、ロータリエンコーダとクラッチ機構が配置されている。手先は図 2 (b)に示すように回転 3 自由度のジンバル型のエンドエフェクタを握る。手で握るボールには 4 つの振動モータ (Mini vibration motor 2.7mm, Seeed Technology Co., Ltd.)

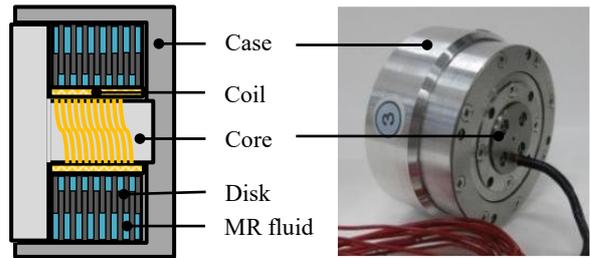


図 3: 磁気粘性流体ブレーキ (MR ブレーキ)

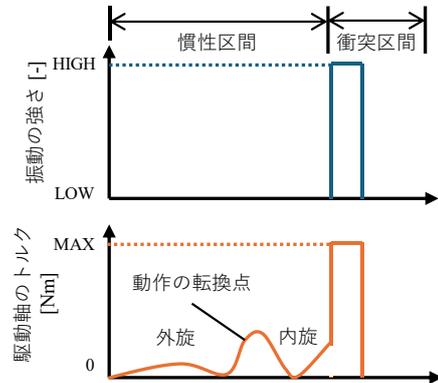


図 4: 装着型装置で提示する力覚

が 90 度位相に配置されている。人工筋肉が背中側に取り付けられているが、本稿では使用しない。また、肩関節部に装置の上腕部の重量を軽減するために受動型自重補償装置を採用している。人体との接続は上腕と胸、腰部で面ファスナとベルトを用いて固定する。装置の重量は約 7.0 kg である。

3.2 磁気粘性流体ブレーキ

本研究で使用する MR ブレーキ (ER テック社)の外観と内部構造を図 3 に示す。本 MR ブレーキは、内部に磁気粘性流体を封入し、内部コアと連動して回転するディスクと、磁場を発生させるコイルで構成される。磁場が発生すると、ディスクの回転方向とは垂直に磁性粒子のクラスタが形成される。ディスクの回転により、クラスタが切断され、この時のせん断応力が制動トルクとして発揮される。この制動トルクは数十ミリ秒単位で制御できる。今回は電流 1 A 印可時に約 5 Nm 出力するブレーキを使用した。稿

3.3 力覚提示手法

巨大アバタを操りビルを破壊するインタラクション時の力覚提示モデルを説明する。図 4 に提示する力のイメージを示す。力覚提示は慣性区間と衝突区間に分けた。慣性区間では加速度比例する慣性力を提示する。本稿では各加速度を $\ddot{\theta}$ [rad/s²]としたとき、関節トルクとして $\tau = 0.77\ddot{\theta}$ を与えた。係数の 0.77 は暫定的に定めた値である。

肩の外旋時は加速度に応じて緩やかにトルクが増減し、外旋から内旋に入れ替わる転換点で一度トルクが最大になる。そしてビルに向かって内旋するにつれ、再度トルクが増大する。その後、衝突区間では振動モータに 3.3 V を与え、MR ブレーキで最大トルクを出力する。提示時間は 0.5 s とした。

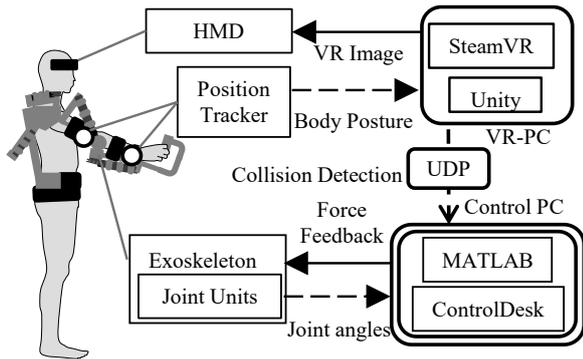


図 5: VR 力覚提示システム

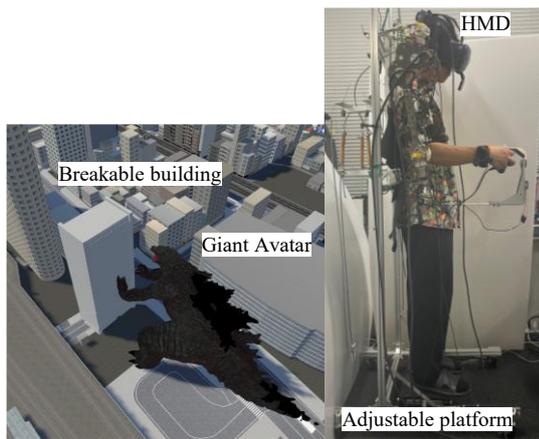


図 6: 実験環境 (左)実空間 (右)VR 空間

3.4 システム

本研究で使用するシステムの概要を図 5 に示す。本装置のシステムは VR-PC と制御 PC の 2 つから構成される。VR-PC では身体に取り付けた位置姿勢トラッカと、HMD からユーザの姿勢を取得する。そして 3DCG ソフトウェア Unity (ver. 2022.3.21f1) を使用し、実空間の身体動作と同期した VR 映像をレンダリングする。身体と仮想物体との接触判定情報を VR-PC から制御 PC に UDP 通信で送信する。制御 PC では力覚提示モデルを基に、関節角度から関節加速度を算出し、比例係数に応じた各関節トルクを指令する。

4. 実験

4.1 実験目的

本実験の目的は 2 つある。第一に身体性の観点から、巨大アバタに対する力覚提示が身体所有感および運動主体感を向上させるかの検証である。第二に、アバタを用いてビルを破壊する際、力覚提示が破壊感の向上に寄与するかの検証である。本実験は、中央大学の人を対象とする研究倫理委員会の承認 (承認番号: 2025-017) を得て実施した。

4.2 実験環境

VR の実験環境を図 6 に示す。破壊するビル周辺に街オブジェクトを配置し、破壊アセットとして RayFire for Unity [10] を使用した。VRoid モデルの巨大アバタ [1] の右手に接触判定オブジェクトを組み込み、その右手がビルに接触し

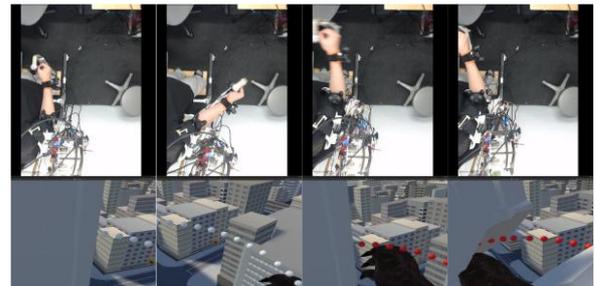


図 7: 実験の様子 (上)俯瞰映像 (下)VR 映像

表 2: アンケート項目

Q	Group	Statements
1	身体所有感	私の腕を見ているように感じた。
2	身体所有感	見えている腕が自分の身体であるかのように感じた。
3	運動主体感	私が、見えている腕の動きを操作しているように感じた。
4	運動主体感	私の腕を動かしたとき、見えている腕も同時に動く予想していた。
5	重量感	見えている腕が重く感じた。
6	破壊感	オブジェクトを自身で破壊した。

た瞬間、ビルが欠片になって崩壊する。実空間の実験環境に関して、腕以外への重量の影響を除くため装置をアルミフレームに固定した。その状態で以下の実験動作を行う。初期姿勢は「小さく前ならえ」した状態とした。次に肘を約 60 度外旋し、スイングさせて内旋しながらビルに手を接触させた。実験条件は以下の 3 条件を用意した。手先に振動だけ与える Vibration 条件、装置を装着して振動を与える Device 条件、力覚提示する Force 条件である。

4.3 実験手順

以下の手順で実験を実施した。被験者は男性 5 名 (22 ± 0.45 歳) である。

(1) 被験者統制

装置を装着する前にアバタや実験動作に馴れさせるために練習時間を設けた。このとき、被験者間で動作をそろえるために動作軌跡と動作速度の目安となるオブジェクトを描画した。

(2) 装置なし条件提示

Vibrationa 条件ではエンドエフェクタの球体のみを握らせた。この状態で実験動作を 3 回繰り返した。

(3) 装置あり条件提示

装置ありの 2 条件では、被験者は図 6 (a) のように立位状態で上腕部の固定具に面ファスナを用いて装置と接続した。こちらも実験動作を 3 回繰り返した。

各条件の動作終了ごとに表 1 に示すアンケート項目に回答してもらった。Q1 から Q4 までは身体性に関する質問である。Q5 は装置による抵抗力が被験者にスケール効果をイメージさせられるか評価するため、Q6 は破壊するというインタラクションに対する評価のために設けた。評価指標は 7 段階のリッカート尺度であり、スコアは -3 を全く同意できない、+3 を非常に同意できると設定した。

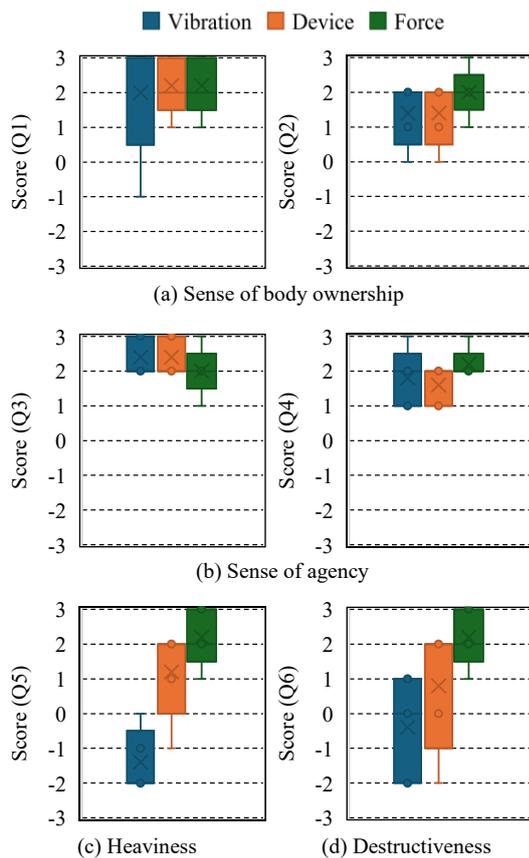


図 8: 実験のアンケートスコア

4.4 結果と考察

実験結果について、アンケートスコアの箱ひげ図を図 8 に示す。まず、身体所有感について Q1 の見た目に関しては条件間で大きな違いはなかったが、装置を装着した Device, Force 条件ではマイナス評価をした被験者が存在しなかった。Q2 の自分の身体であるように感じたかに関しては force 条件が中央値、平均値とともに最高スコアだった。以上より、身体所有感に関しては慣性力フィードバックが効果的であることが示唆された。

次に運動主体感について、Q3 の操作の主体性は force 条件のスコアが最低となった。しかし Q4 の操作の予測性に関しては比較的高いスコアを付けばらつきも小さかった。抵抗力を提示したことにより動かしづらさを感じるため自身で操作している感が減ったのだと推測する。

最後に Q5 重量感, Q6 破壊した感に関しては、スコアが Vibration < Device < Force の順に大きくなっており、装着型装置による力覚フィードバックが巨大アバターによる破壊行動インタラクションの感覚を向上させることが示唆された。

5. むすび

本研究では、力覚提示を伴う装着型デバイスにより、巨大アバターの破壊動作における身体性がどのように変化するかを検証した。実験の結果、身体所有感の向上や重量感、破壊した感の増加が確認された一方、運動主体感の 1 項目

でスコアが低下する傾向が見られた。これらの知見から、仮想身体感覚提示設計における重要な示唆を得た。

今後の展望としては、慣性力の比例係数や提示時間に最適値がないかの検証や、力覚提示する部位を下肢にも拡張し全身が巨大アバターになる感覚を提示する予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP26709006 および JP19H01127 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Bassolino, M. Franza, J. Bello Ruiz, and *et al.*: Non-invasive brain stimulation of motor cortex induces embodiment when integrated with virtual reality feedback; *Eur. J. Neurosci.*, vol. 47, no. 7, pp. 790–799, 2018.
- [2] A. Krekhov, S. Cmentowski, and J. Krüger: The illusion of animal body ownership and its potential for virtual reality games; in Proc. 2019 IEEE Conf. Games (CoG), London, UK, pp. 1–8, doi: 10.1109/CIG.2019.8848005, 2019.
- [3] M. Botvinick and J. Cohen: Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see; *Nature*, vol. 391, no. 6669, p. 756, 1998.
- [4] PC GAMER: Eight years after arriving on Steam, VRChat just hit a new peak concurrent player count. <https://www.pcgamer.com/games/vr/eight-years-after-arriving-on-steam-vrchat-just-hit-a-new-peak-concurrent-player-count/>, accessed 2025/03/15.
- [5] D. Banakou, R. Groten, M. Slater: Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes; *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12846–12851, 2013.
- [6] A. Oyanagi, R. Ohmura: Transformation to a bird: Overcoming the height of fear by inducing the Proteus effect of the bird avatar; Proc. 2nd Int. Conf. on Image and Graphics Processing (ICIGP '19), 145–149, 2019.
- [7] B. v. d. Hoort, A. Guterstam, H. H. Ehrsson: Being Barbie: The size of one’s own body determines the perceived size of the world; *PLoS ONE*, 6(5), e20195 2011.
- [8] L. Terziman, M. Marchal, *et al.*: The King-Kong Effects: Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step; 2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), USA, pp. 19–26, 2012.
- [9] J. Saint-Aubert, J. Manson, *et al.*: Effect of Vibrations on Impression of Walking and Embodiment With First- and Third-Person Avatar, in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 29, no. 12, pp. 5579–5585, Dec. 2023,
- [10] RayFire for Unity, Unity Asset Store, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/game-toolkits/rayfire-for-unity-148690>, accessed 2025/07/01.
- [11] APLIT: Godzilla, VRoid Hub, <https://hub.vroid.com/characters/2180145058756563679/models/2386882672263668972>, accessed 2025/07/01.