



# アバタ外見と整合性の取れた身体感覚を提示する 力覚フィードバック手法の研究

近藤俊<sup>1)</sup>, 橋本健<sup>1,2)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {shun\_kondo, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) ソニーコンピュータサイエンス研究所 (〒 141-0022 東京都品川区東五反田 3 丁目 14-13, hashimoto@csl.sony.co.jp)

**概要:** VR 空間において、ユーザは現実と異なる姿のアバタを操作できるが、実身体と大きく異なる外見を持つアバタを操作する場合、外見から予想される運動感覚と実身体での運動感覚の不一致が違和感を生むことがある。本研究では、身体装着型の力提示装置を用いて身体運動のインピーダンスを変化させ、アバタ外見と整合性の取れた身体感覚を提示する手法について検討した。ゴリラ、鳥、アンモナイト、クラゲの 4 種類のアバタを用いた実験において、ベイズ最適化により各ユーザに最適な力覚パラメータを探索した結果、力覚フィードバックの最適化により納得感と身体所有感が有意に向上することが確認された。一方で、アバタの視覚的印象評価のみから最適な力覚パラメータを予測することは困難であり、ユーザごとの個別最適化が重要であることが示された。

**キーワード:** アバタ, 力提示装置, ベイズ最適化

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 空間では、ユーザは現実の身体的制約を超えて、多様な外見のアバタを使用することができる。これにより、例えば腕が複数あるアバタや、動物アバタといった、人間の身体の範疇を超えたアバタを使用し、超現実的な体験をすることができる。操作するアバタが自分の身体そのものであると感じる感覚は身体所有感 [1] と呼ばれ、身体所有感が高いほど VR 体験の没入感も向上する。また、身体所有感ヒト型のアバタだけではなく、様々な外見のアバタを使用しているときにも生起することが報告されている [2]。

一方で、アバタの外見が実身体から大きく離れすぎると違和感が生じ、身体所有感が低下することがある。身体所有感を高めるためには、視覚と触覚の同期や視覚と運動の同期といった多感覚の同期が重要である [3]。さらに、アバタ外見の特徴に合わせて力覚フィードバックを与え、リアルなシミュレーションをすることで身体所有感が強化されることが示唆されている [4]。力覚フィードバックによって運動感覚を変えることは、違和感の軽減や身体所有感の向上に有効なアプローチであり、とくに実身体と大きく異なる構造をもつアバタに対して有望な手段であると考えられる。しかし、アバタの外見に応じてどのような力覚フィードバックを提示すべきかについては、未だ十分な知見が得られていない。

本研究では、身体装着型の力提示装置を用いて身体運動のインピーダンスを制御することで、アバタ外見と整合性の取れた身体感覚を提示する手法を提案した。具体的には、ベイズ最適化を用いて各ユーザに最適な力覚パラメータを探索する枠組みを構築し、実身体とは大きく異なる外見を

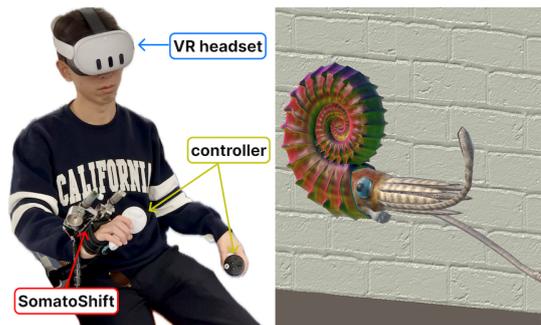


図 1: 実験中の様子 (アンモナイトアバタ使用時)。

もつ 4 種類のアバタ (ゴリラ、鳥、アンモナイト、クラゲ) を用いた実験により、提案手法の有効性を検証した。

## 2. 実験

本実験では、適切な力覚フィードバックによりアバタ外見と運動感覚の組み合わせの納得感が向上するかを検討した。また、アバタの印象評価により得られた因子スコアが、最適な力覚パラメータと関係する可能性を検討した。これに基づき、以下の作業仮説を立てた：

**H1:** 最適な力覚フィードバック条件では、フィードバックがほとんど与えられない条件よりも納得感スコアが有意に高くなる。

**H2:** アバタの印象に関する因子スコアが近ければ、最も整合する力覚パラメータも似たものになる。

### 2.1 実験環境

実験は座位にて行われた。VR 環境の視覚提示にはヘッドマウントディスプレイ (HMD)(Meta Quest 3) を使用した。アバタの操作は、HMD 付属のコントローラで動き

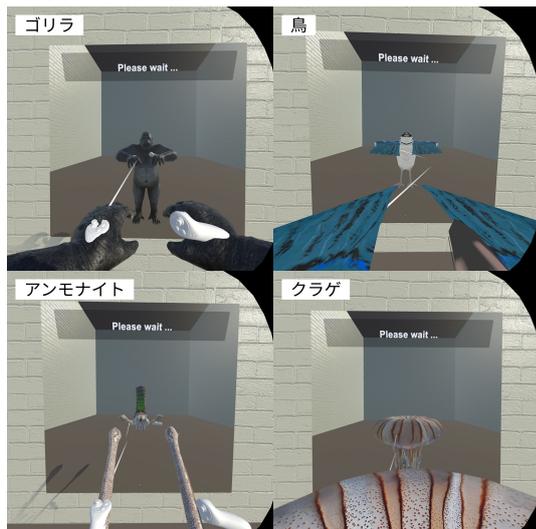


図 2: 実験で使用した 4 種類のアバタの視点とコントローラのマッピング位置。実験中はコントローラを非表示にした。

をトラッキングすることにより行った。右手に力提示装置を装着する必要があったため、右コントローラは横向きに、左コントローラは通常の縦向きの持ち方で把持させた。また、VR 空間は、壁に囲まれたシンプルな環境に統一した。参加者が自身のアバタを確認できるように、目の前に鏡を配置し、アンケート回答のためのユーザインタフェースを空間内に表示した。実験中の様子を図 1 に示す。

## 2.2 アバタ

実験参加者が操作するアバタとして、ゴリラ、鳥、アンモナイト、クラゲの 4 種類を用いた (図 2)。これらのアバタは、それぞれ異なる身体的特徴と想定される運動感覚を持つことから、多様な身体印象と最適な力覚パラメータの関係性を網羅的に調査する目的で選定した。

## 2.3 力提示装置

手首の回転運動に対して慣性・粘性・剛性を変化させることができる身体装着型力提示装置 SomatoShift [5] を使用した。力提示は 2 物体がバネダンパ系で接続されたモデルで表現し、4 つの力覚パラメータ  $I_2$  (慣性モーメント)、 $k$  (ばね定数)、 $c_a$  (絶対速度ダンパ)、 $c_r$  (相対速度ダンパ) を変更することで、多様な運動感覚を生成した。

## 2.4 ベイズ最適化

最適な力覚パラメータの探索にはベイズ最適化を用いた。システムは Python で実装し、Optuna と BoTorch を使用した。最適化対象のパラメータの候補値は以下のように設定した。

- $I_2$  : [0.0005, 0.001, 0.002, 0.004]
- $k$  : [0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8]
- $c_a$  : [-0.008, -0.004, -0.002, -0.001, 0.0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08]
- $c_r$  :  $c_r = 2$  if  $c_a < 0$ , else  $c_r = 0$

ベイズ最適化の目的関数  $f(I_2, k, c_a, c_r)$  は、各試行後の 2 つのアンケート項目 Q1 (納得感) と Q2 (身体所有感) の

平均値とした。

$$f(I_2, k, c_a, c_r) = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (1)$$

## 2.5 実験参加者

実験参加者は 12 名 (男性 6 名・女性 6 名, 平均年齢 22.42 歳 ( $SD = 1.11$ )) であった。全ての実験参加者は実験に関する事前知識を持たなかった。実験参加者には、実験終了後、謝礼として Amazon ギフト券 3,000 円が支払われた。実験の所要時間は 100 分程度であった。

## 2.6 実験計画

実験は参加者内計画で行われた。参加者は 4 種類のアバタ条件をゴリラ、鳥、アンモナイト、クラゲの順番で体験した。各アバタについて、力覚フィードバックを受けながら手首を動かす、その際のアバタの外見と運動感覚の組み合わせに対する納得感と身体所有感を評価した。この評価値を最大化するような力覚パラメータの組み合わせを、ベイズ最適化を用いて効率的に探索した。各アバタに対するパラメータ探索は 20 回実施した。実験条件を統制するため、アバタごとに特有の環境を用意したり特定のタスクを課したりすることはしなかった。

## 2.7 評価指標

アバタの印象評価には、セマンティック・ディファレンシャル (SD) 法により 22 対の形容詞を用いた。これらの形容詞対はアバタの心理的側面に関する Brown らの研究 [6] の 15 項目と、力提示装置の触覚体験に関する Hashimoto らの研究 [7] の 7 項目を組み合わせたものであった。

各試行後、VR 環境内で以下の 2 項目について Visual Analogue Scale (VAS) を利用し、0 から 1 の間の連続値で評価した：

- **Q1 (納得感)**: 身体を動かしたときの感覚と身体の見目の組み合わせに納得している。
- **Q2 (身体所有感)**: 本来の自分とは違う身体の一部が自分の身体のように感じられた。

## 2.8 実験タスク

実験参加者は、まず右腕をアームレストに固定した。具体的には、前腕部分を固定し、手の甲を上に向けた状態で手首のみが自由に動く状態とした。

各試行は以下の手順で行われた：

1. 力提示装置のパラメータが設定される
2. 15 秒間、右手首を自由な速さで上下に動かす
3. VR 環境内で、左手のコントローラを使って VAS に回答する
4. アンケート結果を基に、ベイズ最適化により次の試行のパラメータが決定される

この手順を各アバタにつき 20 回繰り返した。

また、各アバタの初回試行の前に、実験参加者がアバタの動作特性に十分慣れられるよう、力覚フィードバックなしの状態での 30 秒間の自由な運動時間を設けた。

2.9 実験手順

まず、実験参加者は実験の説明を受け、同意書に署名した後、事前アンケートに回答した。その後、各アバタの2Dアニメーションを見て印象評価を行い、続いて半構造化インタビューを受けた。

次に、右手の甲に力提示装置を、頭部にHMDを装着し、両手にコントローラを持った。そして、研究従事者の補助のもと、コントローラを用いたアンケート回答手順を確認した。

各アバタについて、20回の試行が終了した後、HMDおよび力提示装置を外し、再度アバタの印象評価を行った。その後、3分間の休憩を挟み、次のアバタに移行した。このような手順をゴリラ、鳥、アンモナイト、クラゲの順番で実施した。

最後に、事後アンケートに回答し、納得感が高かった瞬間などについて半構造化インタビューを受けた。謝礼の手続きを終えた後、実験を終了した。

3. 結果

3.1 納得感と身体所有感

全試行の結果において、いずれのアバタにおいてもQ1値とQ2値の間に強い正の相関が確認された ( $r = 0.77 \sim 0.85$ )。これは、アバタの外見と運動時の感覚に対する納得感が、身体所有感と強く関連していることを示唆している。さらに、評価が最も高かった試行に限定すると相関係数はさらに高まり、特にアンモナイト ( $r = 0.97$ ) やクラゲ ( $r = 0.98$ ) において極めて高い相関が得られた。これは、感覚的な納得感が最大化されたとき、身体所有感も同時に最大化されるという関係性が非ヒト型アバタにおいても成立することを示している。

このことから、視覚的外見と運動感覚との整合性が十分に取れていれば、形状的に人間から大きく逸脱したアバタに対しても強い身体所有感を誘発できる可能性が示唆された。

3.2 力提示によるスコア向上効果の検証

作業仮説 H1 を検証するため、全試行における力覚フィードバックの二乗平均平方根 (RMS) を分析した。その結果、最小トルク試行のRMS値 (0.0178) は次に小さい試行 (0.0329) と比較して 45.9% 低い値を示した。

この最小トルク試行と各アバタにおける最高スコア試行を比較したところ、図3および表1に示すように、全てのアバタにおいて統計的に有意な差が認められた (Wilcoxonの符号付き順位和検定)。

3.3 回帰分析

作業仮説 H2 を検証するため、回帰分析を行った。入力変数には印象評価の主観データ (3因子, 6因子, 22形容詞対) を用い、出力変数は最適な力覚パラメータ ( $I_2, k, c_a$ ) とした。線形回帰, 2次回帰, ランダムフォレスト回帰を用いたが、全モデルで平均決定係数が負値となり、モデルの汎化性能が低いことが示された。

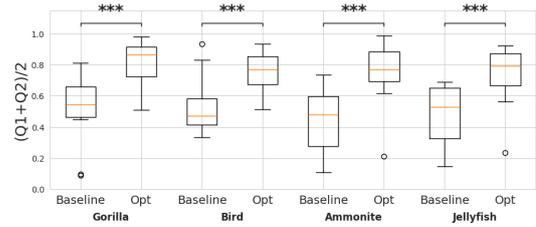


図3: 最小トルク試行と最適フィードバック試行におけるスコアの比較。

アバタ	p 値	Cohen's d
ゴリラ	0.001	1.058
鳥	0.001	1.415
アンモナイト	<0.001	1.379
クラゲ	<0.001	1.344

表1: 最小トルク試行と最適フィードバック試行の比較

3.4 クラスタリング分析

因子スコアとそれに対応する力覚パラメータの関係をモデル化することが困難であったため、因子スコアが近い場合に最適な力覚パラメータも近くなる傾向があるかを検証する。アバタの外見と運動感覚の組み合わせに関するアンケートの結果に基づき、最も評価値の平均が高かった力覚パラメータを  $I_2, k, c_a$  空間にプロットした。例としてゴリラのものを図4に示す。Factor 1~Factor 6までの因子スコアを用いてk-means法によるクラスタリングを行い、全12プロットを10のクラスタに分割した。各クラスタは異なる色で表示されており、クラスタ間の分布の違いが視覚的に確認できる。

図4から、cluster 0およびcluster 6にはそれぞれ2点が含まれていることがわかる。これら同一クラスタ内のプロット同士であっても、パラメータ空間においては互いに距離が離れて配置されていることから、同じような印象スコアでもパラメータ空間では距離が離れることが示唆される。そこで、印象スコア (因子空間) 上の距離と最適パラ

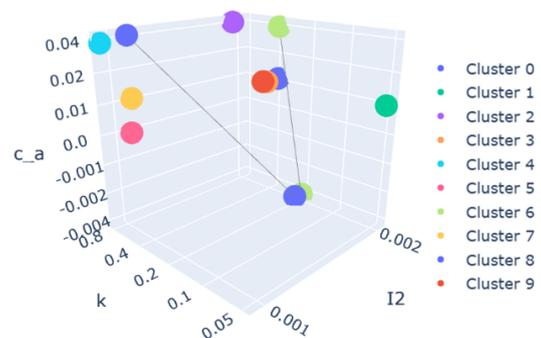


図4: ゴリラのクラスタの分布。点が重なるのを防ぐためにノイズを入れている。また、同じクラスタに属するプロット同士を線で結んでいる。

メータ空間上の距離の間に順位相関があるかについてスピアマンの順位相関係数を算出したところ、統計的に有意な相関は認められなかった ( $r_s = -0.012, p = 0.699$ ).

#### 4. 考察

本研究では、非ヒトアバタにおいて、視覚的特徴および印象評価に基づいた「納得感の高い」運動感覚を探索した。その結果、力覚フィードバックの最適化によって納得感と身体所有感が有意に向上することが示され、「力覚フィードバックの最適化によって納得感と身体所有感が向上する」という作業仮説 H1 が支持された。一方で、印象評価が近いアバタであっても、ユーザごとに最適と感じる力提示が異なる場合があり、印象と力提示の間に一意な対応関係が成立しないことが示唆された。すなわち、「アバタの印象に関する因子スコアが近ければ、最も整合する力覚パラメータも似たようなものになる」という作業仮説 H2 は支持されず、視覚的印象のみから最も納得感が高くなるような運動感覚を推定することの困難性が示唆された。

このようなばらつきが生じた背景には、ユーザの主観的判断や身体的特徴、および評価指標に内在する限界など、複数の要因が関与していると考えられる。

##### 4.1 個人差に基づく要因

###### 4.1.1 視覚情報の解釈段階

ユーザはアバタの視覚的特徴から独自の意味付けを行う。たとえば鳥のアバタに対して、空を飛んでいると想像したユーザ (P5) と地上で羽ばたいていると想像したユーザ (P8) では、求める運動感覚が異なっていた。このように、視覚情報の解釈や想像する文脈の違いが、運動感覚の評価に影響を与えたと考えられる。

###### 4.1.2 運動感覚の期待形成段階

非ヒトアバタは現実類似する身体を体験したことがないため、運動感覚に対する共通の期待が形成されにくい。例えば、ゴリラに対して腕の抵抗感を求めるユーザ (P2,3,5,9) と腕の軽さを求めるユーザ (P8) が存在し、ゴリラに対する共通の期待がないことが示唆された。また、タコなど実際に触れた経験の有無によっても、期待する運動感覚が異なる可能性がある。

###### 4.1.3 力覚受容段階

ユーザの筋肉量などの身体的特徴により、同じ力提示でも知覚される重さや抵抗感に差が生じる。また、実験で使用した装置の重さによる疲労も、評価に影響を与えた可能性がある。実際に、P5, P9 は加速方向の力提示を最適としながら「重さがある方が良い」と回答しており、装置の重量と力提示の相互作用が評価に影響したと考えられる。

##### 4.2 評価手法の限界

22 対の形容詞による印象評価では、アバタに対する本質的な印象差や期待のニュアンスを十分に捉えきれていない可能性がある。また、一つの運動感覚が複数の力覚パラメータの組み合わせで実現可能という構造的な曖昧さも存在し、これらが最適化結果のばらつきの要因となった可能性がある。

#### 5. まとめ

本研究では、非ヒトアバタの外見に対する納得感のある運動感覚を力提示装置で実現するため、バイズ最適化を用いてユーザごとに最適な力覚パラメータを探索した。実験の結果、納得感を最大化する力覚パラメータはユーザごとに異なり個別最適化が有効である一方、事前に評価したアバタの視覚的印象のみからその最適パラメータを一意に予測することは困難であることが明らかになった。この結果は、非ヒトアバタに対する身体化感覚や体験の質が、単一の印象評価では捉えきれないユーザの主観的解釈や期待、身体的特性といった個人的要因に強く影響されることを示唆している。本研究は、これらの個人差を考慮した力覚フィードバック設計が、非ヒトアバタの身体所有感を高め、より納得感のある体験を提供する上で重要であることを実証した。今後は、個人差の要因解明を通じて、より効果的なインタラクションデザインの実現が期待される。

謝辞本研究は、JST ACT-X (JPMJAX22KD)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013)、JST さきがけ (JPMJPR22S9)、科研費 基盤研究 (B)(25K03162) の支援を受けた。

#### 参考文献

- [1] F. Argelaguet, et al. "The role of interaction in virtual embodiment: Effects of the virtual hand representation," 2016 IEEE Virtual Reality (VR), Greenville, SC, USA, 2016, pp. 3-10
- [2] Krekhov, Andrey, et al. "Beyond human: Animals as an escape from stereotype avatars in virtual reality games." Proceedings of the annual symposium on computer-human interaction in play. 2019.
- [3] 北崎充晃. "自在化身体と身体所有感, 行為主体感, 行動変容." 日本ロボット学会誌 39.8 (2021): 701-707.
- [4] Wang, Ziqi., et al. "Wings of Imagination: Strengthening Avian Embodiment and Flight Immersion in Virtual Reality Through Multisensory Haptic Feedback." Distributed, Ambient and Pervasive Interactions. HCII 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14719, Springer, Cham, 2024.
- [5] Hashimoto, Takeru, et al. "SomatoShift: A wearable haptic display for somatomotor reconfiguration via modifying acceleration of body movement." ACM SIGGRAPH 2023 Emerging Technologies. 2023. 1-2.
- [6] Brown, Taylor, et al. "User-Avatar discrepancy scale: a comparative measurement of self and avatar views." Behaviour & Information Technology 44.9 (2025): 1907-1924.
- [7] Hashimoto, Takeru, et al. "Effects of Impedance Control on Haptic Perception of Object Properties: A qualitative and quantitative approach." IEEE Access (2025).