



身体動作指標に基づくアバタ間の移行容易性の可視化

小川真輝¹⁾, 横坂拓巳¹⁾

1) NTT 株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所 (〒 243-0918 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1,
{maki.ogawa,takumi.yokosaka}@ntt.com)

概要: 現実の身体と異なる特性を持つアバタが多数提案され, 能力や体験の拡張が実現されている。一方, 場面や目的に合わせてアバタを円滑に乗り換えるための, アバタ間類似度に基づく自然な変身方法に関する知見は限定的である。本研究では, アバタ間での移行しやすさを可視化する「アバタ変身マップ」の構築を目指す。予備検討として, サイズや動作ゲインが異なるアバタを乗り換える際の移行しやすさを身体動作指標によって定量的評価・可視化する。

キーワード: アバタ, 多次元尺度構成法, 運動適応

1. はじめに

メタバースなどバーチャル空間における社会活動が拡大するにつれ, そこでの活動に用いる身体としてのアバタの重要性が増している。現実身体の見かけや機能を模倣したアバタも用いられる一方で, 現実身体では不可能な新たな体験や能力を実現するアバタも多く提案されている [1]。異なるコミュニティや物理法則, 世界観を有する空間を移動する体験など, 場面や目的に合わせてアバタを選択・変更する際のユーザ体験の向上のため, 違和感なく柔軟にアバタ間で変身するための方法論の整備が必要である。

現実身体と異なるアバタの自然な導入方法はこれまでも調べられてきた。例えば, 筋肉質なアバタの導入時, ユーザ自身がダンベルを握る動作によって段階的に変化をさせると身体化感覚が維持されやすい [2]。一方, 従来の研究では, 現実身体と似たアバタからの変化や, 特定のアバタ特性への変化に焦点が置かれることが多く, 様々なアバタ間の変身へ一般化できる知見は限られている。また, 変調する部位やパラメタでアバタを整理する試みもあるが [1], ユーザが実際にアバタを使う際の体験の側面からアバタ間の関係を表現する研究は不足している。アバタ間での柔軟な変身を実現するため, 多様な特性を持つアバタに対してユーザ体験に基づいた体系的な関係の表現が必要である。

そこで本研究では, 多様なアバタ間の移行容易性を空間上での相対位置関係として可視化する「アバタ変身マップ」を提案する。これは, ユーザやデザイナーに, 自然な変身を実現するアバタ選択や調整量の把握を可能にするものである。加えて, このようなマップが実現すれば, マップの各次元を構成するアバタの特徴を調べることで, アバタ体験を規定する本質的な要素の解明にもつながると考えられる。

特に本研究では, マップ構築にあたり, アバタ変化時の運動適応の円滑さを移行容易性の指標とすることを検討する。VR アプリケーションにおいて現実とは異なる運動系への適応の円滑さを計測する身体動作指標が提案されており [3], これを用いることでアバタ間の移行容易性を取り出せると

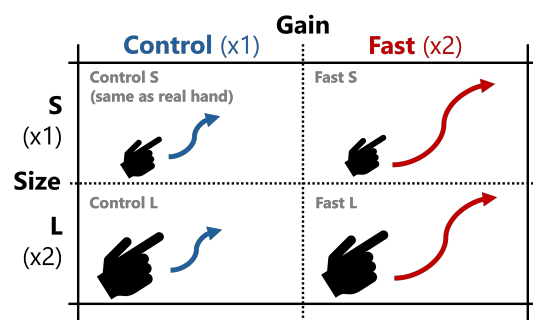


図 1: 使用した 4 種類のバーチャルハンドアバタ

考えた。この指標に基づいてアバタ間の距離指標を算出し, 多次元尺度構成法 (MDS) を用いてそれらの相対位置関係を構築することによりアバタ変身マップを実現する。本研究では予備的な検証として, ゲインやサイズの変更といった比較的単純な操作を加えたバーチャルハンドアバタを用いたユーザスタディを行い, どのような運動指標がアバタ間の相対位置関係を適切に表現できるかを検討する。

2. 実験

本実験では, VR を用いた到達課題中にバーチャルハンドアバタが切り替わる際の身体動作指標および主観的なやりにくさを測定した。

2.1 参加者と実験環境

参加者は 5 名 (女性 2 名, 男性 3 名, 平均年齢 29.8 歳 (SD=3.76)) であった。Meta Quest3 を VR 環境提示に用い, ハンドトラッキング (右手) とコントローラ (左手) を同時に使用した。バーチャルハンドの位置が 50 Hz で記録された。VR 環境は Unity 6000.0.47f1 により構築された。

2.2 実験条件

実験では, アバタとして白色の右手バーチャルハンドを用い, その操作性を以下の 2 つの条件によって変化させた。

1. ゲイン条件: 到達課題の開始点を基準に手の位置ベクトルが 2 倍に拡大 (Fast) または現実と同期 (Control)

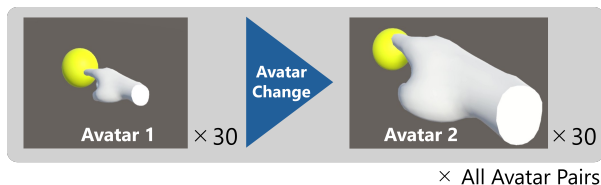


図 2: 到達課題の手順

2. サイズ条件：手のサイズが2倍に拡大 (Large; L) または現実と等倍 (Small; S)

これらの各条件の組み合わせで4条件のバーチャルハンドを用いた (図1)。なお、バーチャルハンドの位置は操作点として用いる人差し指先端の位置とし、サイズ条件のLでは人差し指先端の位置は変化しない形でサイズ拡大を行った。移行容易性は変化前と変化後の順序も影響すると想定されることから、4種類のアバタに対して順序付きの全組み合わせである12組に対し、評価を行った。各参加者においてこれら12組の順序はランダムに実施された。

2.3 到達課題

VRでの運動適応測定の先行研究[3]における実験デザインのうち、本研究では到達課題を採用した。実験では、各アバタ組に対して、1つめのアバタで30試行の到達課題を行った後、1つめのアバタがフェードアウト(0.5秒)し、1秒後に2つ目のアバタがフェードイン(0.5秒)する。このアバタ変化の後、連続して2つめのアバタで30試行の到達課題を行う (図2)。その後、VR環境内に表示される「アバタ変化直後の操作はどれくらいやりにくく感じましたか」という質問に対して、7段階のリッカート尺度 (1が全くやりにくくなかった、7が非常にやりにくかった) で左手コントローラを用いて回答する。1つのアバタ組での実験が終了すると、20秒の休憩の後に次のアバタ組での実験が開始する。また、4組のアバタ組の実験が終了するごとに5分間、ヘッドマウントディスプレイを外しての休憩を行った。

到達課題の1回の試行では、VR環境内に出現するスタート球 (直径3cmの白い球) からゴール球 (直径5cmの白い球) までバーチャルハンドを動かす課題を行う。スタート球に触れ0.5から0.8秒の間のランダムな時間経過で試行が開始され、ゴール球まで手を動かし、ゴール球に触れ1秒が経過すると試行が終了する。1秒の待機時間の後に、次のスタート・ゴールの球が同時に出現して次の試行が開始される。なお、球との接触は常に右手人差し指先端で行い、触れている間は球が黄色く変化する。VR環境に入った際の位置合わせ時のユーザの視点位置を基準に、スタート球は下方に30cm・前方に30cmの位置に配置された。ゴール球は、スタート球からの距離が40cmで、ユーザから見て、スタート球を基準にyaw方向に $0, \pm 20, \pm 40$ 度・pitch方向に $0, 5, 10$ 度 (スタート球よりも上方向にずれる向き) の15通りの位置から2回ずつの計30試行分がランダムな順で提示された。スタート球のサイズ・ゴール球のサイズとスタート球からの距離はFast条件では2倍に拡大され、現実の手

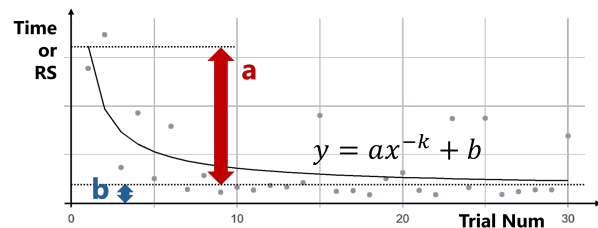


図 3: 学習曲線のイメージ (Fast S から変化して Control S になった際の参加者平均の RS でのフィッティング例)

で必要となる精度や動作を条件間で一致させた。

実際の実験では、操作方法の理解のため、最初に練習課題として Control S アバタ (現実の手と対応付いたアバタ) のみを使用して実験の手順について確認を行った後、12のアバタ組に対する本番の実験を実施した。実験全体の所要時間は、参加者ごとに異なるものの、90分程度であった。

3. MDS によるアバタ変身マップ作成

3.1 身体動作指標

運動適応の度合いを測る身体動作指標の候補として、先行研究[3]で用いられていた指標のうち、HCI分野で広く用いられる到達時間 (Time)、および適応の特徴をロバストに捉えられるとされていた Refined Space (RS) を用いた。RSは運動軌道が修正フェーズに入った位置から運動を終了した位置までの距離として定義され、算出方法は[3]に倣った。

3.2 MDS 作成のための距離指標

MDS作成に用いる距離指標としてのアバタ変化時の運動適応の円滑さの算出のため、先行研究[3]の解析手法に倣い、前節の身体動作指標それぞれの時系列変化を power function ($y = ax^{-k} + b$) にフィッティングし学習曲線を得る。学習曲線は各アバタ組の後半アバタで実施する30試行に対してフィッティングする。図3が得られる学習曲線の例である。

過去の運動適応がその後の類似した運動適応に与える影響として、①学習が速くなる (学習率 k が高い) あるいは②前回の適応が残って最初から適応が進んだ状態になる現象が知られている[4]。ここでは①に対応するのは学習率 k であり、 k が大きいほど学習が速い、すなわち直前のアバタからの移行容易性が高いと捉え、 $k' = 1 - k/k_{max}$ を距離の指標の候補とした。ただし、 k_{max} は全てのアバタ組における2つめのアバタの学習率 k のうち最大の k を用いる。

一方、②に対応する指標は、1つめのアバタを操作することによって、2つめのアバタに乗り換えたときの適応度合いがどれくらい変化したかを示すものと考えられる。この適応度合いは2つめのアバタの学習曲線において、初期試行の運動指標値 ($x=1$ のときの y) から、学習飽和値である b を引いた値 $y_{x=1} - b = a$ に対応するとして、フィッティング係数のうち a を距離の指標の候補として用いることとした。なお、 a は大きいほど適応が進んでいない、すなわちアバタ間の距離が遠いことを意味するため、変換を行わず a を直接距離の指標とする。

3.3 多次元尺度構成法 (MDS)

MDS では、多次元的な特徴を含む項目間の類似度（距離）を低次元のユークリッド空間上に表現する。ここでは、距離指標として前節の k' および a を各順序付きアバタ組について算出し、非計量 MDS によって各アバタ条件をプロットする。本研究では、アバタ 1 からアバタ 2 への変化時の距離指標とアバタ 2 からアバタ 1 への変化時の距離指標を平均した値を、アバタ 1 とアバタ 2 間の距離指標として用いる。

4. 実験結果

統計的検定では、有意水準を $\alpha = 0.05$ とした。

4.1 MDS の妥当性評価と指標選定

参加者全体で平均した身体動作指標の時系列変化に対して学習曲線をフィッティングした結果から距離指標を算出し、MDS を作成した。本節では、MDS 作成に関わる解析・指標の妥当性の検証を通じて、アバタ変身マップに適した指標を選定する。

4.1.1 学習曲線フィッティング性能

距離指標の元となる学習曲線のフィッティングが適切に学習過程を捉えられているかの確認として、フィッティング時の決定係数を算出した。アバタ組全体の平均の決定係数 R^2 は、TIME では 0.095、RS では 0.118 であった。この値は、先行研究 [3] での TIME で 0.52、RS で 0.92 といった値と比較すると非常に小さい。参加者数が少なく平均データが外れ値の影響を受けやすかった可能性も考えられるが、今回の実験では学習が生じにくいアバタ組も存在することから、先行研究より決定係数が低くなることは予想された結果である。加えて、先行研究で学習過程が観測されたとする基準は $R^2 > 0.09$ とされており、今回も平均値ではその基準を満たしていることから、ここでは決定係数の低さを許容して解析を行うこととした。

4.1.2 距離指標の傾向の参加者間一貫性

参加者によらず類似した傾向が得られているかという点での一般性の検証のため、全参加者の身体動作指標平均から学習曲線をフィッティングした結果が、各参加者で個別にフィッティングした結果とどれだけ相関するかを確認した。具体的には、距離指標として用いる a および k' について、全体の平均データから得られる値と、各参加者のフィッティングで得られる値との相関係数を算出した。相関係数の平均は、TIME を用いた解析では a で 0.071、 k' で 0.046 であった。RS を用いた解析では a で 0.31、 k' で 0.21 であった。TIME と比較すると RS では、各参加者の一貫した傾向を反映するマップが作成しやすい可能性がある。

4.1.3 ストレス値

ストレス値とは、距離指標がマップに反映できた度合いの指標であり、MDS で表現する空間の次元の決定や、作成されたマップの妥当性を示すために用いる指標である。今回は予備検討として少ない項目数で MDS を作成するため、2 次元での表現に限定し、その際のストレス値を算出した。算出されたストレス値は、使用する身体動作指標（TIME か

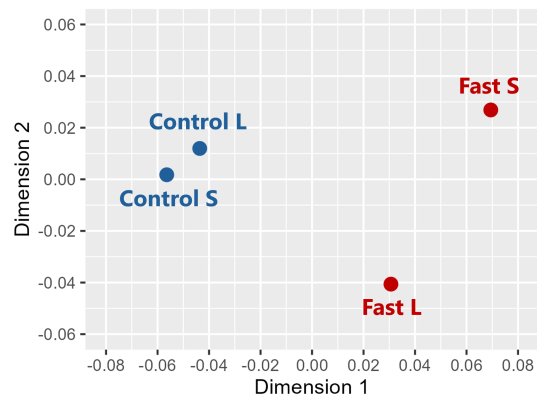


図 4: 作成したアバタ変身マップ（距離指標：RS の学習曲線から算出された a ）

RS か）・距離指標（ k' か a か）によらず、いずれも 10^{-15} より小さく、これは今回使用した距離指標が 2 次元空間で十分表現されることを意味する。

4.1.4 アバタ変身マップに適した指標

学習曲線のフィッティングに使用する身体動作指標としては、TIME と RS が候補であった。先行研究 [3] でロバストに運動学習の特徴が捉えられるとされているのは RS であり、実際、今回の結果でもわずかながら RS の方がフィッティングの決定係数は高い。距離指標の参加者間相関の結果からは、RS の方がより参加者間で共通する特徴を全体でも得やすいことが示唆された。これらから、TIME より RS が今回の目的に適している可能性がある。

距離指標としては、 k' と a が候補であった。実験の結果、 $k=0$ としてフィッティングされるケースが複数あることが明らかになった。新たな適応が必要ないほど移行がスムーズだった場合も多く含まれると考えられるにも関わらず、 k' では $k=0$ の場合は最も距離が遠い値として変換され、指標が適切に移行の円滑さを表現できなかったと言える。また、過去の運動学習の影響に関して、学習率の増減 (k) に比べて初期の身体動作指標の変化 (a) では、直近の学習の影響が現れやすい [5] ことも知られており、 a の方が今回の実験デザインでのアバタ間の相性を反映しやすい可能性もある。

これらの検討により、今回は RS から得る学習曲線における a が最もアバタ変身マップに適する距離指標だと判断した。以降の結果では、 k に基づく結果は割愛し、TIME から得られた MDS については補足的に報告する。

4.2 作成したアバタ変身マップ

前節までの議論に基づき、RS による学習曲線から得られた a を距離指標としたときのアバタ変身マップが図 4 である。現実身体と対応付いた Control S アバタから見た距離は、Control L が最も近く、Fast S が最も遠い。TIME での a に基づくマップにおいても、位置関係の差はあるものの Control S から見た距離の大小関係に関しては図 4 と等しかった。

4.3 主観評価

身体動作指標から算出した移行しにくさが主観的なやりにくさと整合するかを検証するため、距離指標 a と主観的や

りにくさの回答（1 から 7 のリッカート尺度で、数字が大き
いほどやりにくさを感じたことを意味する）の相関を解析し
た。全 5 名の参加者×12 組のアバタで 60 対のデータにお
ける相関は、TIME による a と主観指標で相関係数 $r = 0.255$
($p < .05$)、RS では相関係数 $r = 0.237$ ($p = 0.068$) と、有意
または有意傾向の弱い正の相関がみられた。一方、計 60 回
答のうち 25 回答は 1 の「全くやりにくくなかった」であっ
たため、回答結果に底効果が生じていた可能性もある。

5. 考察

ユーザスタディの結果、アバタ変身マップに適した指標
として、学習の特徴をとらえやすい身体動作指標 RS によ
る学習曲線において、アバタ切り替え後の適応が必要な初
期エラーに対応する a をアバタ間の距離指標として採用し
た。図 4 で示したマップの内容の妥当性について考察する
と、まず Control S と Control L が近くに位置していること
について、サイズの変更のみでは身体運動と視覚運動の対
応付けは変化せず運動学習の必要は少ないことから、妥当
な結果と考えられる。Fast 条件が Control 条件から離れた位
置にあることも、ゲインを加えると感覚運動適応が必要に
なることから妥当だと言える。一方興味深いことに、Fast L
と Fast S は同一方向ではなく、Control 条件から見て Fast L
の方が近い側にある。これは、ゲインの拡大時にサイズも
合わせて拡大すると、「自己の身体サイズが大きくなった」
という意味的な解釈が可能になり、ゲインのみが拡大する
よりも操作になじみやすかったことによる可能性がある。

また、主観指標と採用した距離指標との間に一定の弱い
正の相関が見られたことも、今回のマップの妥当性を支持す
る結果と言える。一方、主観指標では参加者ごとに解釈が
異なったり、底効果が出たりといった制約があることは、主
観指標ではなく身体動作指標を用いることの意義と言える。

本研究の制約として、タスクの難易度の設定など実験課
題の制約に加え、アバタ変身マップに用いた身体動作指標の
制約がある。本研究では身体動作指標の学習曲線をフィッ
ティングすることで移行しにくさの指標を得たが、本研究
のように学習が生じにくい条件を含む場合には、（特に k に
ついて）適切な値が得られず解析が行えない部分もあった。
今回用いた移行しにくさの指標が、身体化感覚など既存の
概念によってどのように位置づけられるかの検証も含めて、
マップの作成方法については今後も検討が必要である。

6. 今後の展望

今後の展望として、手アバタに限定されていた今回の検
証からさらにアバタの種類を増やして、アバタ変身マップを
作成することを目指す。今回 Fast S より Fast L の方が現実
身体から馴染みやすいことが示唆されたような形で、マッ
プを作ることによって初めて解明されるアバタの性質や、体験の
本質的要素を探る。今回はアバタのペアごとに距離を平均
することで、提示順による非対称性を考慮しないマップを
作成したが、MDS には非対称性を表現可能な手法も存在す

るため、今後は非対称性も含めた可視化も検討する。

さらに、アバタ変身マップによってアバタ体験のパラメ
タを明らかにすることで、アバタや変身のデザインを支援す
るシステムにつなげたり、あるいはそれらを自動生成する
アプリケーションを目指す。例えば、状況に合わせてアバ
タを変更する際に、できるだけ違和感を感じさせずに変身
するために経由すべきアバタの最適な経路を推定し、それ
に基づいてアバタの特性を自動で調整する技術に繋げると
いった応用が期待される。また、個人ごとにマップを描き、
個人最適化されたアバタ体験を作ること考えられる。身
体動作指標を用いていることから、日常の使用の中でデー
タを取得・マップを調整することも期待される。

7. おわりに

本研究では、アバタの円滑な乗り換えのデザインを支援
するための「アバタ変身マップ」を提案した。これは、ア
バタ変化時の身体動作指標からアバタ間の移行しにくさを
表す距離指標を算出し、多次元尺度構成法 (MDS) を用いて
アバタ間の関係を可視化するものである。予備検討として、
参加者 5 名によるユーザスタディでゲインやサイズの拡大
による手アバタの変化時のマップを作成した。解析結果に
基づきマップ作成に適した指標を選定し、完成したマップが
アバタ変化の条件と照らして妥当な解釈が可能なこと、お
よび移行しにくさに関する主観指標とも弱い正の相関がみ
られる傾向を確認した。今後はより多様なアバタでのマッ
プ作成を試みる他、マップを用いた変身体験のデザイン・ア
バタ体験の本質的要素の解明を目指す。

参考文献

- [1] A. Cheymol, R. Fribourg, A. Lécuyer, J.-M. Normand, and F. Argelaguet, "Beyond my real body: Characteriza-
tion, impacts, applications and perspectives of "dissimilar"
avatars in virtual reality," *IEEE Transactions on Visualiza-
tion and Computer Graphics*, vol. 29, no. 11, pp. 4426–
4437, 2023.
- [2] R. Otono, A. Genay, M. Perusquía-Hernández, N. Isoyama,
H. Uchiyama, M. Hachet, A. Lécuyer, and K. Kiyokawa,
"I'm transforming! effects of visual transitions to change
of avatar on the sense of embodiment in ar," in *2023 IEEE
Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*,
pp. 83–93, IEEE, 2023.
- [3] D. Yu, M. Cibulskis, E. S. Mortensen, M. S. Christensen,
and J. Bergström, "Metrics of motor learning for analyz-
ing movement mapping in virtual reality," in *Proceedings
of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Comput-
ing Systems*, pp. 1–18, 2024.
- [4] J. W. Krakauer, A. M. Haggis, J. Xu, A. L. Wong, and
A. M. Haith, "Motor learning," *Compr Physiol*, vol. 9,
no. 2, pp. 613–663, 2019.
- [5] J. W. Krakauer, "Motor learning and consolidation: the case
of visuomotor rotation," *Progress in motor control: a mul-
tidisciplinary perspective*, pp. 405–421, 2009.