



# 歩行時の上肢運動を用いた身体表象の変容技術に関する研究

旭博佑<sup>1)</sup>, 齊藤寛人<sup>1)</sup>, 櫻田国治<sup>1)</sup>, 前川和純<sup>1)</sup>, 門内靖明<sup>1)</sup>, 稲見昌彦<sup>1)</sup>

1) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

**概要:** VR においてアバタとユーザ間の形態が大きく異なる際に身体所有感が低下することが報告されている。本研究では、歩行時の上肢運動調整が異なる体幅を持つアバタへの適応時に及ぼす影響を検証した。実験では、歩行時の腕の広げ方がその後の身体表象を変容させ、アバタへの身体所有感を促進する効果が確認された。本研究から、歩行介入に伴う身体表象変容が、多感覚同期を用いた従来のアバタ適応を補完する可能性が示唆された。

**キーワード:** 身体性認知, 感覚・知覚, 行動・認知, 心理

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) において、ユーザは自身とは異なる身体特性を持ったアバタを用いて体験を行うことが可能である。その身体は、体型が異なるアバタから、巨人や小人、動物型や無機物型のアバタに至るまで多岐にわたる。そしてアバタはツールとしての役割に留まらず、プロテウス効果 [1] に代表されるように、アバタの装用に伴ってユーザの認知や行動を実際に変化させることがある。そのようなユーザの変化に深く寄与する要素として挙げられるのが、アバタを自己身体と見なす身体所有感であり、視覚運動・視覚同期などの多感覚刺激により高まることが知られている [2]。しかしアバタとユーザの形態的な非類似性が大きい場合には、その効果が限定的になることが報告されている [3]。従って、多様な身体特性を持つアバタを活用していくには、形態的に非類似なアバタに対しても身体所有感を高める設計戦略が求められる。

本研究はこの課題に対し、視覚的にアバタを提示する前にユーザ自身の身体に対する脳内モデルである身体表象をアバタの形態に近づけることで、アバタへの適応を促進させるアプローチを考えた。特に歩行における上肢運動に着目し、歩行中の腕の広げ方を調整することによる身体表象の変化と、異なる体幅を持つアバタへの適応時に及ぼす効果を検証した。本稿では、アプローチの有効性を検証するために実施した 2 つの実験について報告する。

## 2. 関連研究

### 2.1 多感覚同期による身体表象の変容

視覚運動同期はユーザの運動をアバタと同期させ、視覚同期はユーザへの触覚とアバタの被刺激映像を一致させることで身体所有感を高める手法であり、標準化された質問票や行動指標、皮膚電位などの生理指標に基づいて評価される [2]。例えば、ユーザより体幅が広いアバタへの視覚同期によりユーザが歩く際に壁との距離感が増したことが報告されており [4]、多感覚同期によるアバタへの適応がユーザの身体表象に影響を与えたことを示唆している。

しかし、ユーザの身体表象とアバタの形態との非類似性が多感覚の情報解釈や統合に影響を及ぼし、それがアバタへの適応プロセスの制約となることが知られている。例えば、ユーザの身体表象と視認された身体の体型が異なる場合には身体所有感が生じにくいことが報告されている [5]。

### 2.2 固有受容感覚の錯覚を用いた身体表象の変容

多感覚同期以外にも、固有受容感覚の錯覚によりユーザの身体表象を変容させる手法が存在する。Lackner らは、腱振動刺激による静止部位への伸展錯覚を利用し、他の触覚的な手がかりと合わせることで、例えば鼻が伸びた感覚など、身体の形状や姿勢の錯覚を誘発できることを報告した [6]。

更に、振動などの外部刺激がない場合でも、自身の運動に起因して身体表象が変容することが知られている。Brown らは視覚遮断下で腕を反復的に動かした後の参加者の腕の位置の評価が、実際の位置から遠ざかる方向へドリフトしたことを報告した [7]。Proske らはその主な要因として筋紡錘の刺激馴化や筋肉の履歴依存性を挙げており [8]、固有受容感覚が筋紡錘の感受性変化や筋肉の物理的特性の影響を受けることで、身体表象が変容することを示唆している。

## 3. 仮説

本研究では、アバタを視覚的に提示する前にユーザの身体表象をアバタに近づけることで形態的に非類似なアバタに対する身体所有感を促進させるアプローチを構想し、特に歩行中の上肢運動調整に基づく手法を用いて実験することで、以下の 2 つの問いを検証する。

**RQ1:** 歩行時の腕振りを調整することは、ユーザ自身の体幅に関する身体表象を変容させるか。

**RQ2:** 歩行時の腕振りを調整することは、対応する体幅を持つアバタへの身体所有感を促進するか。

実験 1 では、RQ1 について検証する。本研究では、歩行時の腕振りにおける腕の広げ方を調整することで、歩行後の通常姿勢において体の幅に対する認識が変化すると予想し、以下の仮説 H1 と H2 を立てた。

**H1:** 歩行時の腕の広げ方の狭い/広い条件では、歩行後の

通常姿勢における体の幅に対する認識が通常時に比べて細く/太くなる。

**H2:** 歩かない場合に比べて、歩く条件では、腕振りの調節による身体表象の変容の効果が強くなる。

実験 2 では、RQ2 について検証する。本研究では、歩行時の上肢運動の調整を用いたことによる身体表象の変容が、対応した体格を持つアバターへの身体所有感の生起時間や持続時間、強さにポジティブな影響を与えることを予想し、以下の仮説 H3 と H4 を立てた。

**H3:** 腕を広げた状態で歩いた後には、何もしない場合と比較して、体の幅の広いアバターへと適応しやすくなる。

**H4:** 腕を狭めた状態で歩いた後には、何もしない場合と比較して、体の幅の狭いアバターへと適応しやすくなる。

## 4. 実験 1

### 4.1 参加者

実験参加者は合計 16 名（男性 11 名、女性 5 名）であった。実験中に体の不調を訴えた参加者 1 名と技術的な問題により中断した参加者 1 名はデータが除外され、最終的には 14 名のデータが分析用に残された（男性が 10 名、女性が 4 名、年齢  $25.43 \pm 3.32$  歳）。参加者の視力は全員正常または矯正視力で、運動障害はなかった。

### 4.2 実験手法

参加者は HMD (Oculus Quest 3) を装着し、トレッドミル ( $1.5\text{km/h}$ ) 上に立った。実験は、運動条件を挟んで運動前後に体幅認識タスクを行う構成 (図 1) で、全 6 条件をラテン方格法に基づいてカウンターバランスを取って実施した。運動条件は、腕の広げ方 (狭い/通常/広い) と運動 (静止/歩行) を組み合わせた  $2 \times 3$  の要因計画とした。腕の広げ角度は、Azure Kinect で計測した骨格情報から算出し、通常時を  $25^\circ$ 、狭い条件を  $18.75^\circ$ 、広い条件を  $37.5^\circ$  として、参加者にその角度を維持しながら 1 分間の運動 (静止または歩行) を行ってもらった。運動中、参加者は自己の身体を視認することはできず、正面の注視点を見るよう指示された。運動条件の試行ごとに、最後に質問票に答えてもらった。

### 4.3 評価指標

**アフォーダンスタスク指標** 実験参加者は、3m 前方に提示された直径 0.2m の 2 本の黒いポールの間隔を、自身が自然な立位で肩を回転させずに通れると判断する幅まで、コントローラを用いて調整した。開口部の初期の幅は 0.1m, 0.5m, 0.9m, 1.3m の 4 種類から並び替えて提示された。

**自己幅評価タスク指標** 実験参加者は、正面の位置に表示されたバーを自身の身体の横幅と照らし合わせて、自身の身体と合うようにその横幅を調節した。2m 前方、2m の高さに表示された 0.05m 四方のバーを用いて、肩幅、ウエスト幅 (胴幅)、腰幅について聞いた。開始幅は 0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m の 4 種類から並び替えて提示された。

**質問票スコア** 実験参加者は、運動後に身体の幅がどのように変化したと感じたか (例: 「肩の幅が広くなったと感じた」) を、1 が「強く同意しない」、7 が「強く同意する」と

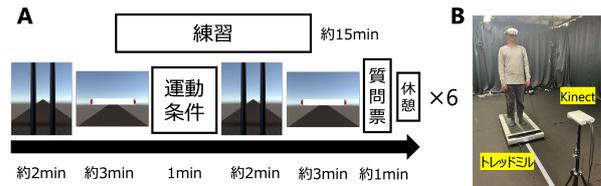


図 1: 実験 1 の概要 A: 実験手順, B: 実験の様子

表 1: 身体幅に関する質問票

Item	Statement
Q1	運動後、身体の形状が変化したと感じた
Q2	運動後、肩幅が広がったと感じた
Q3	運動後、肩幅が狭まったと感じた
Q4	運動後、ウエスト幅が広がったと感じた
Q5	運動後、ウエスト幅が狭まったと感じた
Q6	運動後、腰幅が広がったと感じた
Q7	運動後、腰幅が狭まったと感じた

して 7 段階のリッカート尺度で評価した。質問票の内容は、表 1 に示す通りである。

### 4.4 結果

各客観指標の運動前後の差分値、および主観評価スコアに対して被験者内計画による反復測定分散分析 (Repeated Measures ANOVA) を実施した。Shapiro-Wilk 検定を行った結果、一部の条件で正規性が棄却されたため、ノンパラメトリックデータに対して分散分析を可能にする方法として知られる整列ランク変換 (ART) を施した。

アフォーダンスタスクと自己幅評価タスクの結果は図 2 に示している。アフォーダンスタスクにおいて、腕の広げ方の主効果に有意差が認められた ( $F(2, 26) = 11.18, p < .001, \eta_p^2 = .462$ )。事後検定の結果、腕を狭める条件では、通常条件や広い条件に比べて、有意に狭い間隔が選択された。一方、運動 (静止/歩行) の主効果 ( $F(1, 13) = 3.20, p = .097, \eta_p^2 = .197$ ) および交互作用 ( $F(2, 26) = 0.31, p = .739, \eta_p^2 = .023$ ) に有意差は認められなかった。自己幅評価タスクでは、いずれの部位においても有意差は認められなかったが、歩行時には腕を広げる/狭める条件にかけて、より自己評価幅が太く/細くなる傾向がグラフから観察された。

質問票スコアの結果は図 3 に示している。身体部位に対する幅認識の多くで、腕の広げ方の主効果が有意であった。例えば、肩を広く感じたかという問いでは、腕を広げる条件が他の条件より有意に高いスコアを示した ( $F(2, 26) = 26.91, p < .001, \eta_p^2 = .674$ )。逆に、肩を狭く感じたかという問いでは、腕を狭める条件が有意に高いスコアを示した ( $F(2, 26) = 22.69, p < .001, \eta_p^2 = .636$ )。全体として、腕を広げる条件では身体を「広く」感じ、狭める条件では「狭く」感じる傾向が一貫して見られた。また、ウエストを広く感じたかという問いでは、運動と腕の広げ方の間に有意な交互作用が認められた ( $F(2, 26) = 3.64, p = .040, \eta_p^2 = .219$ )。これは、腕を広げる動作によるウエスト幅を広く感じる効果が歩くことで特に顕著になることを示唆している。

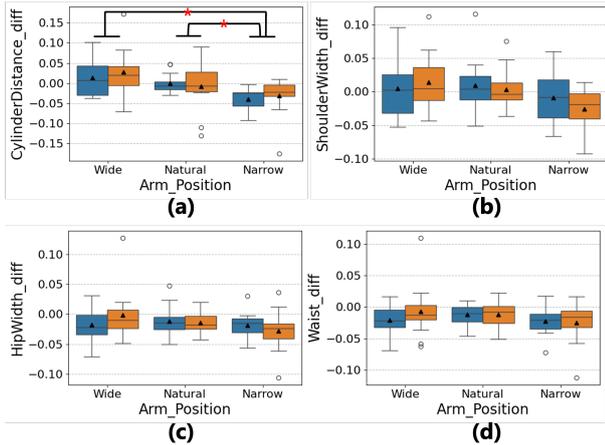


図 2: アフォーダンスタスクと自己幅評価タスクの結果 黒三角は平均値を示す。青色バーは静止条件、橙色バーは歩行条件を示す。\*は  $p < 0.05$  の有意差を示す。(a) アフォーダンスタスク、(b) 肩幅の自己幅評価、(c) 胴幅の自己幅評価、(d) 腰幅の自己幅評価

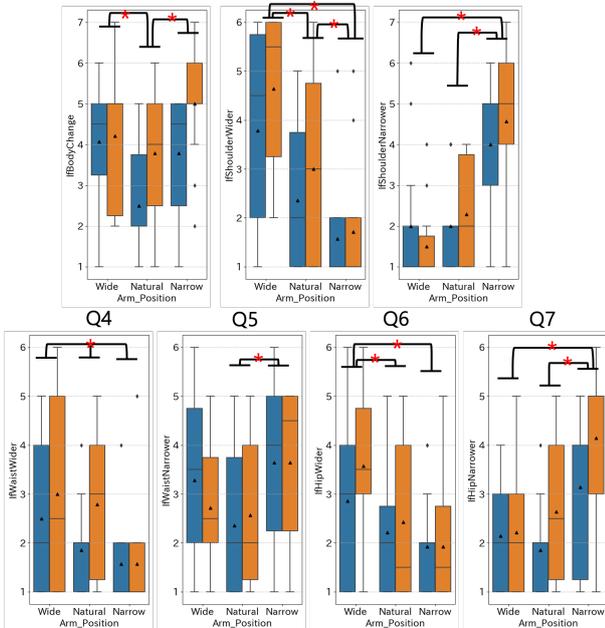


図 3: 質問票スコア 黒三角は平均値を示す。青色バーは静止条件、橙色バーは歩行条件を示す。\*は  $p < 0.05$  の有意差を示す。

5. 実験 2

5.1 参加者

実験 2 では、歩行時の腕振りの調整によって変容した身体表象がもたらす身体所有感の促進効果を検証するために、実験 1 の参加者のうちでも特に、質問票スコアで Q2 (運動後に、肩幅が広がったと感じた) と Q3 (運動後に、肩幅が狭まったことを感じた) について 4 以上のスコアをつけていた人の中から 6 名 (男性 4 名、女性 2 名、年齢  $25.67 \pm 2.16$  歳) に参加してもらった。

5.2 実験手法

参加者自身の身長・肩幅に基づきベースとなるアバタを作成し、これを基に肩幅を  $\pm 0.1m$  変更した「体幅の広いアバタ」と「体幅の狭いアバタ」を用意した。実験は以下の 4

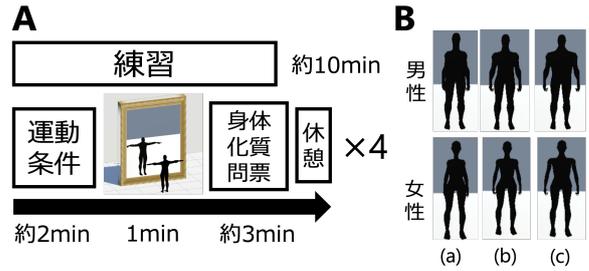


図 4: 実験 2 A: 実験手順, B: 使用したアバタ; (a) 体幅の細いアバタ, (b) 参加者の体型に合わせたアバタ, (c) 体幅の太いアバタ。

条件で構成された (図 4 参照)。

- 1: 腕を広げて歩行後、体幅の広いアバタを提示
  - 2: 腕を自然に下ろして歩行後、体幅の広いアバタを提示
  - 3: 腕を狭めて歩行後、体幅の狭いアバタを提示
  - 4: 腕を自然に下ろして歩行後、体幅の狭いアバタを提示
- 各条件で 1 分間の歩行運動後、鏡を使用して対応するアバタを 1 分間提示した。参加者はアバタの動きと自己の動きを同期させ (視覚運動同期)、身体所有感を感じた瞬間にボタンを押し、錯覚が持続する間押し続けるよう教示された。条件の試行ごとに、最後に質問票に答えてもらった。

5.3 評価指標

**時間的指標** ボタン押下データから、身体所有感の生起開始時間と持続時間を算出した。

**質問票スコア** 各試行後に身体化質問票 [9] に回答させ、身体所有感 (Ownership)、行為主体感 (Agency)、自己位置感覚 (Location) のスコアを算出した。

5.4 結果

条件 1 と条件 2, 条件 3 と条件 4 のそれぞれの組み合わせで、対応のある t 検定を実施した。但し、分析の前にデータの正規性を確認するために Shapiro-Wilk 検定を行った結果、一部の条件で正規性が棄却されたため、そのような条件を含む場合にはノンパラメトリックな検定として代わりに Wilcoxon 符号付き順位検定を行った。

体幅の狭いアバタを提示した条件において、腕を狭めて歩行した後 (条件 3) は、静止条件 (条件 4) と比較して、図 5 の A(b) と B(b) から分かるように、身体所有感の生起開始時間が有意に早く ( $p = .028$ )、持続時間も有意に長くなった ( $p = .028$ )。一方、体幅の広いアバタを提示した条件 (条件 1 vs 2) では、両指標に統計的に有意な差は認められなかったが、腕を広げて歩行した方がより身体所有感の生起を促進する傾向がグラフから観察された。

次に質問票スコアに関して、Ownership, Agency, Location のいずれのスコアにおいても、条件間に統計的に有意な差は認められなかった。しかし Ownership スコアにおいて、体幅の広いアバタを提示した条件では、腕を広げて歩行した後 (条件 1) の方が静止条件 (条件 2) よりもスコアが高い傾向がグラフから観察された。

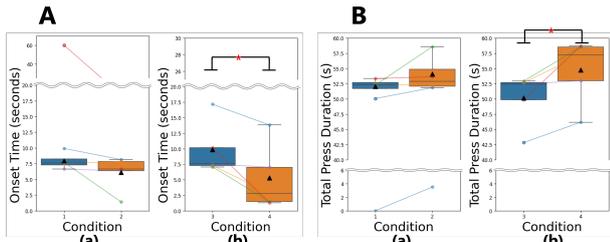


図 5: 身体所有錯覚の生起時間と持続時間 A: 生起時間, B: 持続時間; (a) 体幅の太いアバタ, (b) 体幅の細いアバタ; \*は  $p < 0.05$  の有意差を示す。

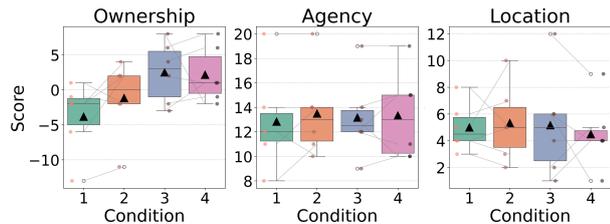


図 6: 身体化質問票の結果

## 6. 考察

本研究の一連の実験結果は、歩行時の上肢運動の調整が、ユーザの身体表象を変容させ、体幅の異なるアバタへの身体所有感を促進するという仮説を部分的に支持するものであった。実験 1 では、腕の広げ方の調整が、アフォーダンスタスクおよび複数の主観評価において、体幅の認識を変化させることが示された。これは歩行時の腕振りの調整によりその後の身体表象が変容するとした H1 を支持する。また、主観評価の一部で交互作用が確認され、多くの指標で歩行により明瞭に身体表象の変容が観察されたことは、歩行がこの変容効果を増強させている可能性を示唆し、H2 を部分的に支持する結果となった。

実験 2 では、歩行時の腕振りの調整による身体表象の変容がアバタへの適応プロセスに寄与する可能性を示した。特に、腕の広げ方に対応した体幅のアバタへの身体所有感の生起を早め、持続時間を長くしたという結果は仮説を支持するものであった。質問票においても、腕の広げ方が広い場合に、太った体幅のアバタに対して身体所有感を生起しやすいということが示唆された。

一方で、本研究の結果の解釈には、いくつかの限界がある。HMD を装着してトレッドミル上を歩行するという特殊な環境は、参加者の注意配分や運動の質に影響を与え、結果のばらつきの一因となった可能性がある。また、実験の意図を参加者が推測することによるプライミング効果の可能性も完全には排除できない。

今後の展望としては、筋活動などのより詳細な生理指標の計測と、汎用性の検証が挙げられる。本研究での両実験を通して、腕を狭めた方が腕を広げた場合よりも明確な効果を示した。この非対称性が、身体表象の可塑性における方向依存性に起因するのか、あるいは本実験で用いた運動課題に起因するのかを明らかにするためには、筋電図などを用いた詳細な運動解析が必要である。さらに、本研究で構想した身体所

有感を促進させるアプローチが、体幅だけでなく、腕の長さなど他の身体部位に適用可能かを探求することで、本研究の適用範囲と限界を明らかにし、その実用性を高めていくことが期待される。

## 7. おわりに

本研究の主要な貢献は、アバタへの適応において、従来の多感覚同期を用いたアプローチを補完する、新たな介入戦略を提示した点にある。即ち、多感覚同期の前に身体表象を調整することで、ユーザとアバタ間のコンフリクトを予め緩和し、より円滑な身体所有感の生起を可能にする道筋を示した。得られた知見は、多様なアバタが用いられる VR システムの設計や、アバタを用いた身体イメージ障害の治療などの応用分野において新たな設計指針を提供するものである。今後は、本手法の生理学的メカニズムの解明や、より広範な条件下での有効性の検証が期待される。

謝辞 本研究は、JST, CRONOS, JPMJCS24K3 の支援を受けたものです。

## 参考文献

- [1] N. Yee and J. Bailenson. The proteus effect: The effect of transformed self-representation on behavior. *Hum. Commun. Res.*, 2007.
- [2] K. Kilteni, A. Maselli, K. P. Kording, and M. Slater. Over my fake body: Body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Front. Hum. Neurosci.*, 2015.
- [3] A. Cheymol, R. Fribourg, A. Lécuyer, J.-M. Normand, and F. Argelaguet. Beyond my real body: Characterization, impacts, applications and perspectives of “dissimilar” avatars in virtual reality. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 2023.
- [4] M. Rubo and M. Gamer. Visuo-tactile congruency influences the body schema during full body ownership illusion. *Conscious. Cogn.*, 2019.
- [5] Marta Matamala-Gomez, Antonella Maselli, Clelia Malighetti, Olivia Realdon, Fabrizia Mantovani, and Giuseppe Riva. Virtual body ownership illusions for mental health: a narrative review. *Journal of Clinical Medicine*, 2021.
- [6] J. Lackner. Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain*, May 1988.
- [7] L. E. Brown, D. A. Rosenbaum, and R. L. Sainburg. Limb position drift: Implications for control of posture and movement. *J. Neurophysiol.*, 2003.
- [8] U. Proske, A. Tsay, and T. Allen. Muscle thixotropy as a tool in the study of proprioception. *Exp. Brain Res.*, 2014.
- [9] M. Gonzalez-Franco, T. C. Peck. Avatar embodiment: Towards a standardized questionnaire. *Front. Robot. AI*, 2018.