

自己意識の最小単位「クオンタム・セルフ」の発見 ～メタバース設計論の確立に向けて～

人間は成長に伴い、他者と区別し自分を認識することが可能になります。その過程で「自身の身体を所有している」＝身体所有感と「動作の主体は自分である」＝自己操作感が獲得されます。しかし、これら自己意識の構成要素がどのように形成されるかは未解明なままでした。

この謎を解明するため、本研究チームは仮想空間（VR）環境にバーチャル身体を構築し、損失した自己意識の回復過程と身体運動記憶の変化を同時に記録する実験系を開発しました。

被験者がVR環境に没入した後に、視点変換、左右反転、運動方向のズレなどを伴うバーチャル身体を操作させると、被験者の身体所有感と自己操作感が同時に損失しました。しかし、運動記憶の形成に伴って回復し、身体所有感と自己操作感ではそれぞれの回復カーブが異なることが分かりました。

そこで記憶形成の数理モデルを用いて、これらの回復カーブを運動記憶の早い成分（ファスト・メモリ）と遅い成分（スロー・メモリ）に分解したところ、身体所有感は主にファスト・メモリによって駆動され、自己操作感は主にスロー・メモリによって駆動されていることが明らかになりました。

これは、ファスト・メモリとスロー・メモリこそが自己意識ダイナミクスの最小単位（クオンタム・セルフ）であり、これまでに報告されていた身体所有感と自己操作感の間の因果関係は、記憶形成のスピード差による錯覚であった可能性を示唆しています。

本研究の結果は自己意識形成の基盤となる脳領域が複数存在することを示唆しています。今後の研究でそれらを特定することで、認知的に安全なメタバースの設計論が確立されることが期待されます。

研究代表者

システム情報系

井澤 淳 准教授

研究の背景

コロナ禍の影響によりテレワークが普及するなど ICT による社会生活の変革が進んでいます。特に、仮想空間内（VR）における経済活動を提供するメタバースは、次世代産業のキラーコンテンツと言われています。そして、そこで鍵となるテクノロジーは、VRにおける身体性の獲得であると議論されています。このような議論は、自我に関する主体的な意識、すなわち自己意識にとって身体性が大きな役割を持っていることと大きく関係しています。実際、哲学者のショーン・ギャラガーは、以下のように自己意識を考察しました。自己というのは、これまでに自分に起こった経験とそこから獲得された種々の知識や特徴など、連続的・物語的な存在（ナラティブ・セルフ^{注1}）を含む。しかし、それらを排除しても残る自己の最小単位は、感覚体験に対してその主体性を即時的に意識する現象、例えば、「行為の主体が自己である感覚」＝「自己操作感^{注2}」と、「身体が自己に所属する感覚」＝「身体所有感^{注3}」である。このように提唱された概念はミニマル・セルフ（最小自己）と呼ばれ、その形成過程を調べることは、自己とは何かを考える上で重要なテーマとされてきました。

これまでの発達心理学研究では、成長の過程でまず自己操作感が形成され、次に身体所有感が形成されると考えられてきました。一方、認知科学研究では、身体所有感が自己操作感の前提条件であることが報告されています。このように、自己操作感と身体所有感の間には因果関係が報告されてきたものの、それぞれの報告は互いに矛盾していました。このような矛盾する数々の自己意識に関わる報告の背景にある統一的なメカニズムは、これまで謎のまま残されていました。

研究内容と成果

この問題にアプローチするために、本研究チームは次のような思考実験を行いました。

例えば、自身の身体の幾何学的関係性（身体イメージ）が突然変化する状況や運動企図に応じた身体運動の予測（内部モデル）が突然成立しなくなる状況では、我々はもはや自己を所有している感覚や操作している感覚を失うだろう。それでは、そのような状況がそのまま継続した場合には、我々の自己意識は変容し、新しい身体や身体運動を自己として認識するようになるのだろうか？ 我々の身体意識が運転し慣れた自動車や使い慣れた道具に拡張されるように、変容した身体イメージに対しても自己意識は適応を示すのではないだろうか？

この予測を検証するために、VR環境に構築したバーチャル身体を、ハプティックデバイス^{注4}を通じて任意に操作できるような環境を構築しました。（1）一人称視点でバーチャル身体を操作する状況（統制条件）に加えて、身体イメージを実験的に変容させるため、以下の二つの実験条件を設定しました。

（2）バーチャル身体を第三者視点から操作するような状況と、（3）左右が反転した身体を操作するような状況です。さらに、これらに加えて被験者には知らせずに身体運動に視覚回転を与えました（参考図）。このような視覚回転を与えられると、人間には新たな身体運動記憶が徐々に形成され、精緻な運動が可能になることが知られています。本研究ではハプティックデバイスを通じて取得した運動情報を基に、数理モデルを用いて脳内の運動記憶を定量化しました。また、バーチャル身体を通じて感じる自己意識を、身体所有感と自己操作感を一定時間ごとにそれぞれの主観スコアで測定しました。このように、身体運動記憶の更新過程を記録すると同時に、バーチャル身体に起こった身体イメージ変容による身体意識の損失と適応による回復過程を測定することに成功しました。

実験の結果、自己意識は身体イメージの変容によって損なわれることがスコアの低下によりわかりました。さらに、これら自己意識の損失は、運動記憶の形成に伴って回復することが観測されました。面白いことに、この時の回復カーブは身体所有感と自己操作感で有意に異なることが明らかになりました。具体的には、身体所有感はやや緩やかなカーブを示しているのに対して、自己操作感はやや急激な回復を示したのに対して、自己操作感はやや緩やかなカーブを示してい

ました。

そこで、運動記憶形成の計算モデルを用いて、これら身体意識回復のカーブを運動記憶の早い成分（ファスト・メモリ）と遅い成分（スロー・メモリ）^{注5}）に分解したところ、身体所有感は主にファスト・メモリによって駆動され、自己操作感は主にスロー・メモリによって駆動されていることが分かりました。

ギャラガーの提唱をきっかけに、これまでの認知科学的研究では、自己意識のミニマル・セルフ（主体の即自的経験）を身体所有感と自己操作感に区別し、それらの形成過程の違いや因果関係が調べられてきました。しかし、さまざまな事象が統一されることなく報告され、その背景にあるメカニズムが不明確なまま残されていました。その結果、これが神経科学と自己意識の研究の接続にとってボトルネックとなっていました。

これに対して本研究では、ミニマル・セルフ形成のナラティブ性（時間的連続性・履歴性）に着目した新しい実験パラダイムによって、自己意識の最小単位（クォンタム・セルフ）がファスト・メモリとスロー・メモリであることを明らかにしました。これまで認識されていた身体所有感と自己操作感の間の因果関係は、実際にはスピードの異なる二つの運動記憶が同時並行的に意識に登ることで引き起こされる、ある種の錯覚であると同時に、現象論的には脳内にファスト・セルフとスロー・セルフと呼ぶべき二つの異なる動的な表象（情報）が存在することを示唆しています。

今後の展開

e スポーツやメタバースが次世代の産業として注目を浴びる一方で、現代は身体性喪失の時代とも言われています。また、自己意識は依然として思春期において重要な関心の対象であり続けています。我々が自己を自己として認識するためには、身体に対する認識が必要不可欠です。そこで、本研究チームは人間の身体認識を理解するためには、哲学、認知科学、脳科学を包括し、工学応用可能な体系とする「身体性システム科学」の構築が必要だと考えました。今後は、このような自己意識形成の動的過程に関して、その神経基盤を明らかにすることにより、安心安全なメタバース社会の設計など、次世代産業に資する設計論を神経科学に基づいて構築することを目標としています。

参考図

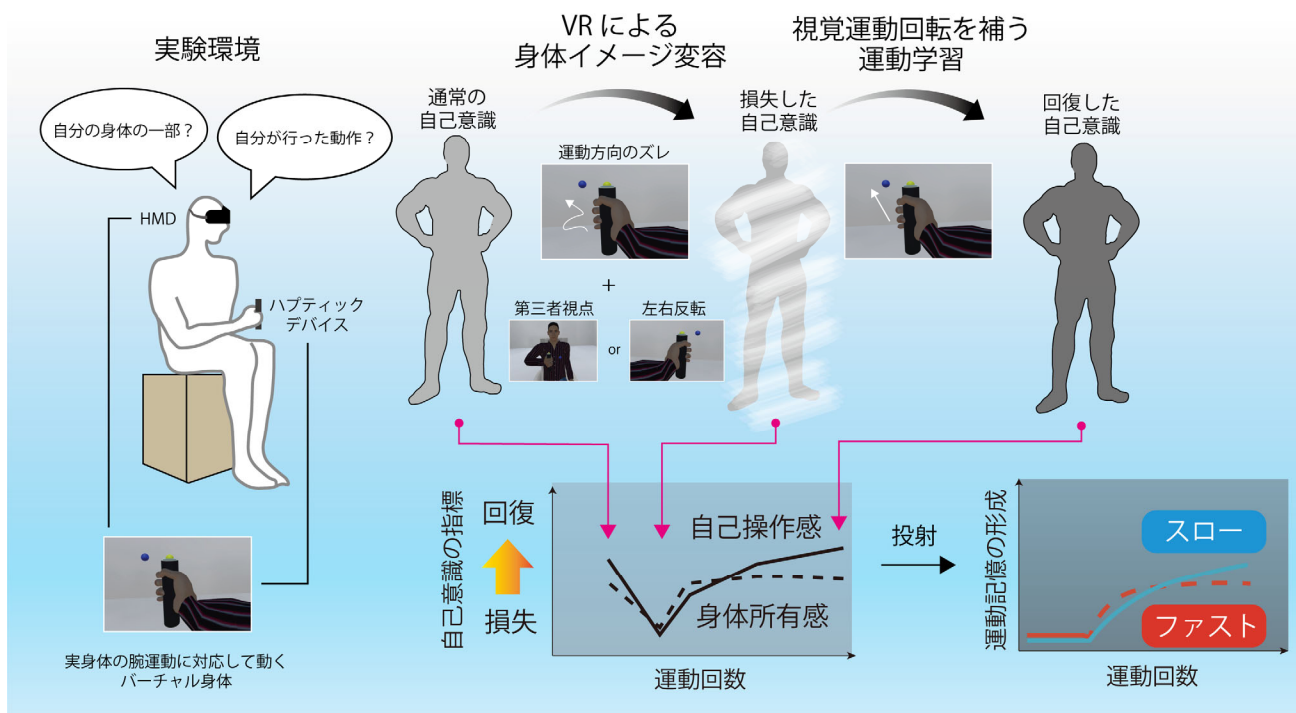


図 本研究に用いた実験手法と結果

ハプティックデバイスから取得した運動情報を基にバーチャル身体が動く実験環境を構築しました。バーチャル身体への実験的操作により変容した身体イメージは、自己意識の損失を引き起こしました。しかし、変容したバーチャル身体を用いた腕運動学習を繰り返すことで、自己意識の回復が見られました。このときの回復カーブを運動記憶の遅い成分（スロー・メモリ）と早い成分（ファスト・メモリ）に分解したところ、自己操作感は遅い成分によって駆動され、身体所有感は早い成分に駆動されていることが分かりました。

用語解説

注1) ナラティブ・セルフ

自己にまつわる過去と未来の連続性・物語によって構築される物語的自己。例えば、言語や文化、自己に関する知識といった要素を含む。感覚体験によって即時的に意識されるミニマル・セルフとは区別される。

注2) 自己操作感

行為の主体が自己であるという感覚。自己操作感の生起には、運動意図とその結果の一致が必要だと考えられている。統合失調症で見られる「させられ体験」の解明や、効果的な運動リハビリの設計において注目されている。

注3) 身体所有感

身体が自己に帰属しているという感覚。身体所有感の生起には、統合される視覚・体性感覚の一致が必要だと考えられている。道具やアバターへの身体所有感を高めることは、義手やVR設計における一つの指標になっている。

注4) ハプティックデバイス

モーターから伸びたアームの先端にあるハンドルを手で握ることで操作する装置。実験参加者の腕運

動情報の取得や力覚提示を行うことができる。

注5) ファスト・メモリとスロー・メモリ

運動学習中に形成される二つの記憶成分。ファスト・メモリは形成が早い反面、忘却も早い。一方、スロー・メモリは形成が遅いが忘却も遅く、忘れにくい記憶とされている。

研究資金

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(17K19992、19H05729)の一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 The Role of Motor Memory Dynamics in Structuring Bodily Self-Consciousness

(身体自己意識形成に対する運動記憶ダイナミクスの役割)

【著者名】 石川 椋太 綾部早穂 井澤淳

【掲載誌】 iScience

【掲載日】 11月26日 (オンライン先行公開)

【DOI】 <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103511>

問合わせ先

【研究に関すること】

井澤淳 (いざわ じゅん)

システム情報系 准教授

URL: <https://hebbbs.emp.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp