

研 究 報 告 書

視線行動に基づいた心の中の身体の可視化と身体適正化を支援する 基盤技術の創成

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 12 月 ～ 2020 年 3 月

研 究 者: 松宮 一道

1. 研究のねらい

社会の高齢化に伴う、加齢による運動機能の障害や脳卒中による運動麻痺を有する患者の急増は、現代社会が抱える重要な問題である。しかし、現状のリハビリテーションの方略では、治療的介入により運動機能が向上しても、その向上効果が持続しないことが多く、これが運動機能障害を有する高齢者の社会復帰を阻む要因となっており、運動機能障害を克服する有効な手段を講じることは高齢者の Quality of Life (QOL)を向上させるために緊急に対応すべき重要課題である。運動機能障害を有する患者は、運動能力が単に低下しているだけでなく、心の中で感じている自分の手や足に異常が生じていることが指摘されている。実際に、加齢による転倒の増加は、運動機能の低下に「心の中の身体」がうまく適応していないことを示唆し、逆に手や足の運動能力に障害がなくても「心の中の身体」に異常が生じれば、運動機能障害が起きることが知られている。これらの事実は、自分の身体に対して主観的に経験される「心の中の身体」が適正な状態になっていないと深刻な運動機能障害を引き起こすことを意味している。このことから、「心の中の身体」の回復が運動機能障害を克服する鍵を握っていると考えられる。しかし、運動機能障害を有する患者が訴える「心の中の身体」の異常は患者の主観的印象であるため、その病態は目に見えない。本研究では、この問題の解決に向けて、自分の手などの身体部位の動きと協調する視線の動きを中心とする人の行動特性に着目して、視線行動の観測から「心の中の身体」のメカニズムを解明および「心の中の身体」を可視化し、運動機能障害などのリハビリテーションやスポーツ促進のための身体能力開発などに役立てることを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

「自己身体の気づき(自分の身体認知)」に関して、体性感覚処理と視覚処理で得られた情報が一つの統合的な処理過程で認識されるとする従来の説に対して、今回、目に見える「物理的な身体」ではなく、目に見えない「心の中の身体」を、バーチャルリアリティ技術を用いた実験心理学的手法により解明し、「身体所有感」と「身体定位」の二つの処理過程で認識されていることを新たに発見した(研究成果リスト: 原著論文 1、学会発表 3, 4)。本発見は、運動機能障害のリハビリテーションや身体能力開発などの分野において、新しい知見をもたらす画期的な成果である。本研究では、被験者自身の手は見えないようにし、その代わりにコンピュータグラフィックスにより作成された手(CG ハンド)を提示し、CG ハンドに対して身体所有感を制御できる実験環境を構築し、「自己身体の気づき」のメカニズムを解明した。本成果は、二つの乖離した自己身体の気づきの処理過程の存在を初めて明らかにするもので、運動機能回復のためのリハビリテーションに重要な役割を果たしている身体認知のメカニズ

ムを理解する上で重要な発見となった。この発見により、運動機能障害を有する患者の心の中で感じている自分の手や足の異常の度合いや、事故などにより身体の一部を失った患者が装着する義手や義足などの自己身体への帰属の度合いを評価するための指標作成の新たなガイドラインを提供する可能性があり、運動機能回復のリハビリテーションに画期的な効果が期待できる。

(2) 詳細

研究テーマ A「身体と視線行動の関係」

周辺視野に提示された視覚目標に視線を向けるために急速な眼球運動(サッカード)が生じるが、周辺視野に視覚目標が現れる前に注視対象に強く注意を向けているとサッカードが始まる潜時が長くなることが知られている(ギャップ効果)。このギャップ効果を用いることで、主観的に経験される「心の中の身体」に向けられる注意をサッカード潜時から抽出することを試みた。しかし、ギャップ効果により身体に向けられる注意を抽出することはできなかった。その他にも、ギャップ効果と類似した効果として知られるディストラクタ効果に対して、身体注意の影響を抽出できるかどうか試みたが、身体注意の影響を取り出すことはできなかった。これらの結果は、サッカード潜時は身体に向けられる注意の測定には使えないことを示唆する。

次に、サッカード潜時と異なる、別の行動指標を使用して、「心の中の身体」と視線行動の関係を調査した。ここでは、主観的に感じている自己身体的位置に、直接、視線を向けることを行った。このような身体に向けられる視線行動は、行動を行うにあたり、心の中の身体表現にアクセスする必要があるため、身体に向けられた視線行動がどのような行動特性を示すかを詳細に調べることで、心の中の身体表現の特性を明らかにすることができる。具体的な研究結果については公開できる段階にならないため省略するが、本研究結果から、視線行動は意識的な身体表現であるボディ・イメージに、一方、手の行動は無意識的な身体表現であるボディ・スキーマにアクセスしていることが示唆された。これは、運動機能障害を克服する鍵を握る「心の中の身体」を可視化する上で、指差し行動ではなく視線行動の利用が重要であることを示している。

また、視線が同じ場所に向けられているときでも眼は常に動いている。このような微小な眼球運動の中には、高速度の跳躍運動があり、マイクロサッカードと呼ばれる。マイクロサッカードは、視覚的注意によって影響を受けることが報告されている。本研究では、自己身体に向けられる注意によってマイクロサッカードがどのような影響を受けるのかを調べた(学会発表 1)。本研究結果から、手に対して向けられる能動的な注意については、マイクロサッカードが生じることがわかった。この結果は、マイクロサッカードも「心の中の身体」の可視化に利用できることを示唆する。



図1. 自分の身体に向けられる視線行動と指差し行動.

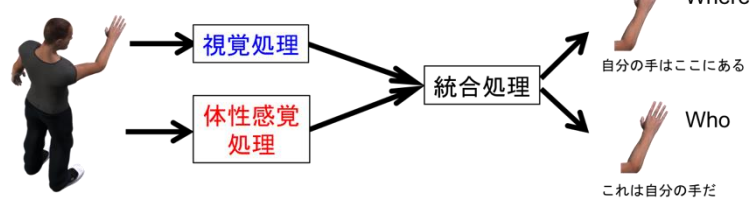
研究テーマ B「自己身体の気づきに関する処理過程の解明」

実験心理学的研究により、「自己身体の気づき」は、脳内において手などの身体部位から得られる視覚情報と体性感覚情報が統合されることで、自分の身体部位を身体の一部であると認識されることが報告されている。自己身体の気づきを評価する際には、「自分の身体であると感じる」(身体所有感)という質問票を使った主観的評価と、「自分の身体があると感じる場所」(身体定位)を知覚的に判断する客観的評価の二つがあり、これらの評価され

た結果は、極めて相関が高いため、同じ処理過程を反映していると仮定されていた。それに対して本研究では、被験者自身の手は見えないようにし、その代わりにコンピュータグラフィックスにより作成された手(CG ハンド)を提示し、CG ハンドに対して身体所有感を制御できる実験環境を構築した(図 3)。さらに異なる感覚情報を統計的に最適な方法で統合する最尤(さいゆう)推定モデルを適用することで「自己身体の気づき」のメカニズムを解明し、一つの統合処理過程とする従来の仮定とは異なり、自分の身体であるという気づきには、「これは自分の手だ(who)」と感じる身体所有感、「自分の手はここにある(where)」と感じる身体定位を認識する二つの処理過程が存在することを発見した(図 2 参照)。

身体所有感の評価値と身体定位の評価値に対して、身体に関する視覚情報のノイズ(身体部位の見えにくさ)の影響を心理物理実験により調べ、このノイズの影響を最尤推定モデルで説明できるかどうかを調べた。感覚情報のノイズによってその感覚情報の重みが系統的に変わることが予想した。もし、身体所有感と身体定位が同じ処理過程を共有しているならば、これらの二つの処理過程におけるノイズの影響は、ともに最尤推定モデルと一致した振る舞いを示すはずである。しかし、本研究

従来の考え方



本研究成果

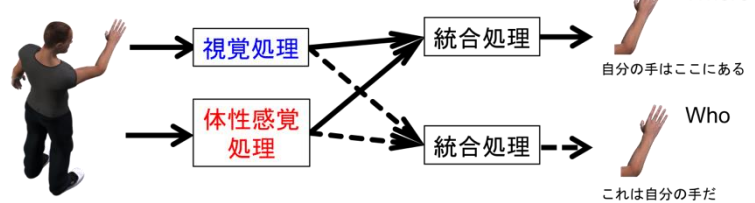


図 2. 「自己身体の気づき」のメカニズム。自分の身体の気づきには、「自分の身体部位はここにある」という空間的位置の知覚(身体定位)と「見えている身体部位は自分の身体だ」という主観的印象(身体所有感)は、同じ処理過程であると仮定されていた。しかし、本研究により、これらの処理過程は乖離した視覚と体性感覚の統合過程であることが明らかになった。

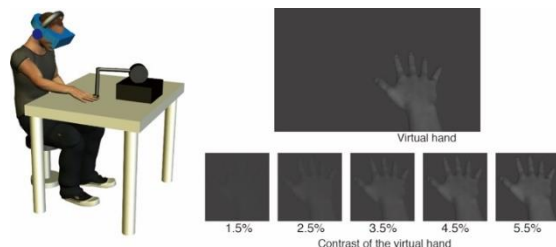


図 3. 実験装置と視覚刺激。

では、身体定位のみ最尤推定モデルの振る舞いと一致し、身体所有感は最尤推定モデルの振る舞いと系統的にずれることを発見した(図 4)。この結果は、身体所有感と身体定位が脳内では乖離した処理過程であることを強く示唆している。

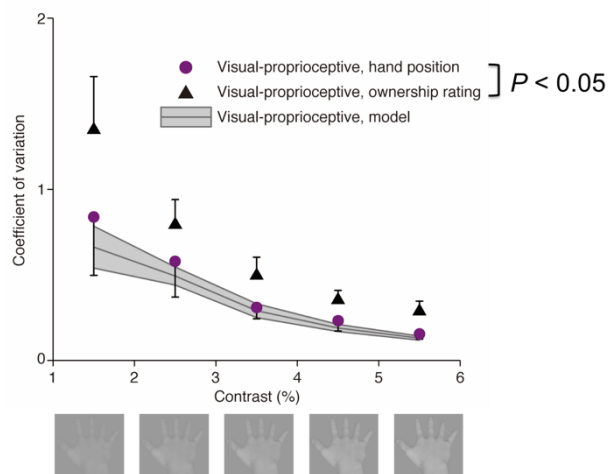


図 4. 視覚情報のノイズの影響が、身体定位は最尤推定モデルの振る舞いと一致するが、身体所有感は一致せず、系統的にずれる。

現状では、患者に「自己身体の気づき」に対する異常は、身体所有感と身体定位を明確に区別していない。例えば、義手に対する自己身体への帰属の度合いを評価するときに、義手を自分の手と感じるかという評価指標(身体所有感)と、自分が動かしたと思った位置に義手があるか(身体定位)という評価指標は、同じ指標であると仮定されている。しかし、本成果により、これら二つの指標は異なる処理過程に基づいていることが示されたため、たとえ義手を自分の手であると感じても、義手をうまく制御

できない可能性があるということになる。従って、本発見により、運動機能障害を有する患者の心の中で感じている自分の手や足の異常の度合いや、事故などにより身体の一部を失った患者が装着する義手や義足などの自己身体への帰属の度合いを評価するための指標作成の新たなガイドラインを提供できる可能性があり、運動機能回復のリハビリテーションなどにおいて画期的な効果が期待される。

研究テーマ C「運動制御における身体所有感の役割」

自分の手を動かすとき、我々はしばしばその手の動きを視線で追跡する。この眼と手の協調運動を行うには、手を動かそうとする能動的な運動意図を通して手の身体状態が予測される必要があると考えられている。眼と手の協調運動を行っている状況では、通常、追跡している手が見えており、その手は自分の手だと感じているはずである。しかしながら、これまで眼と手の協調運動において身体所有感がどのような影響を与えるかは調べられていない。そこで本研究では、CG ハンドを自分の手であると感じるかどうかによって、手の動きを追跡するときの眼球運動の追跡パフォーマンスがどのように影響されるかを調べた。具体的な研究結果については公開できる段階にないため省略するが、本研究結果から、身体所有感は運動制御に影響を与えないことが示された。この発見は、運動機能障害のリハビリテーションにおいて身体所有感の積極的に利用しても運動麻痺を改善できない可能性を示唆しており、重要な発見であると考えられる。



図 5. 眼と手の協調運動。

研究テーマD「身体位置感覚に基づく心の中の身体形状の可視化」

環境の中で自己身体部位の絶対的な位置(身体定位)を知覚するには、身体の姿勢情報に加えて身体の大きさ情報が必要になるが、身体の大きさに関する直接的な感覚信号は存在しない。そのため、環境の中で身体定位を行うには、心の中に保持された身体形状を使って身体の大きさを見積もる必要がある。この心の中の身体形状は、通常は、物理的な身体と等価な形状であると仮定されているが、実際に測定した例はほとんどない。本研究では、身体定位のときに用いられる心の中の身体形状がどのような形状になるのかを調査した。その結果、身体位置感覚に基づく心の中の身体形状は歪んでいることがわかった。さらに、この歪んだ心の中の身体形状は、身体の視覚情報と統合されると正確な身体形状に変化することを見出し、この正確な心の中の身体形状は視線行動でしか抽出できないことも明らかになった。したがって、歪みのない心の中の身体形状を可視化するには、視線行動の利用が必須であることが示唆される。

3. 今後の展開

従来、自己身体の気づきには、見ている身体部位を自分の身体であると感じる身体所有感と、見ている身体部位の位置に自分の身体があると感じる身体定位感は、同じ処理過程であると仮定していた。しかし、本研究成果により、自己身体の気づきにおける、これらの二つ主観的経験は、脳内の異なる処理過程に依存することが明らかとなった。さらに、身体定位感に基づく主観的身体形状は、指差し行動では歪んだ身体形状が現れるが、視線行動では正確な身体形状を観測できることが明らかになった。これらの成果は、本研究のねらいで述べた、心の中の身体を可視化する技術を構築する上で視線行動の利用が有効であることを示している。一方、身体所有感については、運動制御時の感覚フィードバックの予測には重要であるが、運動指令信号に基づく身体位置の予測には関係がないことが示された。

今後の研究展開として、柔軟に変容すると考えられている身体認知の動特性の解明が挙げられる。本研究で提案した視線行動による主観身体形状の可視化技術は、身体自体の可視化に着目していた。しかし、我々は、様々な道具を利用することで、あたかもその道具を自分の身体の一部のように使いこなすことができる。このような道具利用時には、主観身体形状が変容していると考えられるが、道具利用の慣れに応じて、どのように主観身体形状が変容していくのかについてはよくわかっていない。最近では、人工筋肉などを利用して身体の動きをアシストする機器の開発が行われているが、そのような機器を装着して身体行動を行うことで、主観身体形状にどのような長期的影響を与えるのかは定かではない。アシスト機器の利用を繰り返すことによる主観身体形状の変容を可視化できれば、安全に効率よく利用できるようになる。また、様々な技の伝承においても、主観身体形状の変容を可視化できれば、どの程度うまく伝承できたかを定量的に評価できるようになる。本研究成果を身体変容の可視化に展開することで、応用範囲は飛躍的に拡大すると期待できる。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

研究提案書で記載していた、健常者を使った研究項目については、当初予定していた実験から大きく方向転換をする必要はあったものの、新しい実験手法へ切り替えたことで、心の中の身体の可視化については予定していた内容をすべて達成できた。しかし、研究期間中に、東北大学医学部関係者の異動により、運動機能障害を有する患者とのアクセスがなくなってしまったため、運動機能障害を有する患者を使った身体適正化に関する研究を達成することができなかった。

研究の進め方

研究実施体制は、完全に個人研究として実施することができた。さきがけの研究費により、個人の研究テーマに特化した高精度な実験装置を設営することができ、本研究の目的を遂行するための環境を入手できたことは研究を進める上で大きなアドバンテージとなった。個人で扱える環境を持てたことで、実験が失敗しても、自分のペースで研究計画を練り直す余裕が生まれたことも今回の成果に繋がったと考えている。研究費の執行については、高精度な眼球運動測定器を備え付けた HMD 等を複数購入できたため、複数の実験を平行して進めることが可能となり、有効に活用できた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究成果を社会・経済に波及させるため、現在、日立製作所と共同研究を遂行している。さきがけで得られた「心の中の身体」に関する成果は、急速に普及が進んでいるバーチャルリアリティ技術を活用しており、様々な場面での身体拡張技術へと展開できる可能性が非常に高い。本成果は、運動機能回復の支援はもちろんのこと、スポーツのやり方や機械の運転技術を効率よく伝達するための身体能力開発にも貢献することが期待できる。

その他領域独自の評価項目に基づいて、研究者自身の評価

さきがけの研究成果を国際学術誌に原著論文として出版し、その成果がプレスリリースにより海外のメディアに取り上げられ、招待講演 5 件(うち国際発表 1 件)を行った。特に、日本学術振興会賞の受賞は、極めて大きな成果であり、心理学・ヒューマンインターフェース・人工知能・複雑系・バーチャルリアリティの様々な分野の研究コミュニティから招待講演の依頼を受け、注目を浴びた。本さきがけ領域で目標とする社会実装は、日立製作所との共同研究によって、実装には至っていないが着実に前進させたという点で評価できると考える。

今後の見込み

本さきがけ研究領域の研究者との交流および領域代表が企画した様々なイベントへの参加を通して、社会的意思決定を支援する仕組みの創出が重要であることを学んだ。この社会的意思決定の基本は対人相互作用であり、そこには身体を介在した人間の行動理解が不可欠である。今後は、本研究で開発した心理物理学の実験手法を用いて、社会的意思決定のメカニズムを理解し、その科学的理解に基づいて人間の社会的行動の本質を読み解く研究へと発展させたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1.	Matsumiya, K. Separate multisensory integration processes for ownership and localization of body parts. Scientific Reports. 2019, 9:652, 1–9, DOI:10.1038/s41598-018-37375-z
2.	Shioiri, S, Hashimoto, K, Matsumiya, K, Kuriki, I, He, S. Extracting the orientation of rotating objects without object identification: object orientation induction. Journal of Vision. 2018. 18(9), 17:1–12.
3.	Shioiri, S, Kobayashi, M, Matsumiya, K, Kuriki, I. Spatial representations of a viewer's surroundings. Scientific Reports. 2018. 8:7171, DOI:10.1038/s41598-018-25433-5.
4.	Boga, K, Leduc-Primeau, F, Onizawa, N, Matsumiya, K, Hanyu, T, Gross, W. A generalized stochastic implementation of the disparity energy model for depth perception. Journal of Signal Processing Systems. 2018. 90, 709–725.
5.	Gross, W, Onizawa, N, Matsumiya, K, Hanyu, T. Application of Stochastic Computing in Brainware. IEICE Nonlinear Theory and Its Applications. 2018. 9(4), 406–422.

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. Matsumiya, K. Effects of body ownership on the ocular tracking of self-generated hand movements. International Conference on Predictive Vision, York University, June 10–13, 2019.
2. 松宮一道. 身体意識と視覚. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 東北大学, 2018 年 9 月 21 日.(招待講演)
3. Matsumiya, K. Bodily awareness and the coding of visual space. RIEC International Symposium, Tohoku University, November 18, 2017. (招待講演)

受賞

1. 松宮一道. 第 13 回(平成 28 年度)日本学術振興会賞・「視知覚と行動の相互作用に関する実験心理学的研究」

著作物

1. 松宮一道, 眼球運動と視知覚, 視覚の科学. 2018. 39(2), 21–26.

プレスリリース

2. What and where in the processing of body-part information, ScienceDaily, 2019 年 4 月 4 日

アウトリーチ

1. 日本科学未来館 サイエнтиスト・クエスト
「私たちの心と身体の不思議な関係をさぐる！」(2017 年 9 月 23 日)

以上