

令和 6 年 9 月 13 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01785

研究課題名（和文）ヒト身体における仮想的運動神経支配入れ替えが引き起こす適応的可塑性の解明

研究課題名（英文）Adaptive plasticity induced by virtual motor innervation switching in the human body

研究代表者

板口 典弘（Yoshihiro, Itaguchi）

慶應義塾大学・文学部（三田）・准教授

研究者番号：50706637

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ヒト上肢における感覚と運動の対応関係が入れ替えられた状況を仮想的に実現することを通して、身体の適応的可塑性を多面的に検討することを目指した。研究成果は総じて、身体と道具の学習あるいは制御過程において、座標変換という概念を通して統一的に解釈できる可能性を示した。また、脳機能障害との関連において、運動遂行における運動計画機能の重要性も確認した。さらに、身体化という現象あるいは身体という概念を考える際に、地球環境（重力）そのものを考慮する必要があるという、これまでの理論にない学術的示唆を得ることもできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、「ヒトとは何か」「身体とは何か」という根源的な問題に答えるいくつかの理論的示唆を提供するものである。また、心理学研究と運動制御研究を組み合わせることにより、知覚と運動という両側面から身体を捉えることを可能とした点でも学術的な意義が大きい。このような成果は、モノづくり、スポーツ、リハビリテーションの分野に応用できる可能性がある。特に、脳機能障害との関連において、運動行為の実行に困難を抱える患者に対して、運動計画機能の訓練が重要であることを確認した点で、大きな社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to investigate the adaptive plasticity of the human body from multidimensional perspectives by implementing a virtual environment in which the sensorimotor correspondence in the human upper limb is experimentally altered. The results showed the possibility of a unified interpretation of the learning or control processes of the body and tools through the concept of coordinate transformation. They also confirmed the importance of the motor planning function in motor execution in relation to brain dysfunction. Furthermore, we obtained a new idea, never proposed before, namely that it is necessary to consider the global environment (gravity) itself when considering the phenomenon of embodiment or the concept of the body.

研究分野：心理学

キーワード：身体 運動 知覚 道具 感覚運動機能 脳損傷

## 1. 研究開始当初の背景

道具を長期間使用し、その扱いに熟達すると、私たちはその道具をまるで自身の身体のように感じることもある。この現象は“道具の身体化”とよばれ、私たちヒトの感覚運動制御の柔軟さを示す一例であり、近年ではその神経基盤も徐々に明らかになりつつある。ただしこれまでの研究では、道具の身体化現象が「身体と道具が別個の存在である」という前提を出発点としていることについては、あまり疑問が持たれてこなかった。しかしながら、この暗黙の仮定に基づくと、道具の身体化は身体の更新・拡張であるという枠組みに縛られた議論になってしまう。その一方で、運動計算論的な立場に立つと、必ずしも身体と道具を区別する必要はない。すなわち、私たちの身体も“道具の一つ”であるとみなすことができる。このように考えると、道具の身体化は、新たな“道具の獲得”または“道具の更新”であると捉えることができる。このような考え方に基づき、私たちの肉体は果たして“身体”なのか“道具”なのかという大きな問いに答えることを目指し、研究を計画した。

なぜ身体ではない“道具”を使うことは難しいのだろうか。それは、道具を使用する際には、私たちが普段用いている身体の視覚運動対応とは全く異なる対応関係を用いる必要があるためである。たとえば、PC画面上のマウスカースルを“上”にもっていきたい場合には、私達はマウスを“前”に動かさなければならない。このように、道具使用時には、物理世界における運動と、私たちの筋がおこなう運動の方向・大きさは、必ずしも一致しない。この乖離を解消させるために我々は、学習経験によって視覚(感覚)情報と運動情報を対応づけていく。視覚情報から運動実行に至る情報の変換を座標変換と呼ぶ。座標変換に関わる問題は道具使用時に顕著になるものの、私たち自身の“身体”を使用する際にも、このような座標変換が生じている。たとえば「視覚座標で入力されたターゲットへと手を伸ばす運動」は、「複数の、時系列的な筋収縮活動」に変換されて初めて達成される。この座標変換は私たちが生まれた時から学習し続けてきているため、“道具”と異なり、無意識のうちに苦労もなく達成される。この点において、身体と道具の運動制御において質的な違いは存在しない。

## 2. 研究の目的

研究の目的は、ヒト上肢における感覚と運動の対応関係が入れ替えられた状況を仮想的に実現することを通して、身体の適応的可塑性を多面的に検討することであった。具体的には、到達把持運動の運動学的計測、視覚刺激により惹起される自動的運動応答、生理指標の変化、さらに脳機能障害を有する患者の行動成績を検討することによって、脳・身体・道具の関係性についての理論的な検討をおこなうことを目指した。

## 3. 研究の方法

### 【1】前腕への水平粘性外乱が到達把持運動における指運動に与える影響の検討

到達把持運動とは、対象に手を伸ばして掴む課題である。この日常的な身体運動は、到達成分と把持成分を協調させるため、複数の筋を時間的に重複させつつも段階的に制御するという高度な計算が必要となる。そのため、脳損傷患者の到達把持運動や、不慣れな道具を用いた到達把持運動ではそれらの成分が乖離してしまうことが知られている。しかし、それが指ではなく前腕への外乱のみで生じるのかどうかは明らかでなかった。そこで本研究では、外力をかけるためのロボットマニピュラタを用いて、水平面上の運動方向に対する粘性力を発生させ、指の開き具合(Aperture)の時間変化を検討した。

### 【2】VR環境における到達把持運動の運動制御特性の解明

VR環境上では身体が新たな視覚空間に再現され、ここではアバターを身体の代わりに制御することができ、このプロセスを身体化と呼ぶ立場もある。しかしながら、VR環境における微細な運動の性質が現実環境のそれとどのように異なるかについての知見は存在しなかった。本研究では現実環境とVR環境における到達把持運動を知覚・運動の両側面から検討した。

### 【3】視覚刺激により惹起される自動的身体反応の時間的側面の検討

視覚的に呈示された運動に対して、身体は意識せずとも反応してしまう。この身体反応は高次レベルで生じていることが申請者を含め数多くの研究が示唆している。ただし、それがどの程度の時間的スパンで生じているかは不明であった。そこで本研究では、身体反応に影響を与える視覚刺激(妨害刺激)の呈示時間タイミングを実験的に制御することで、この問題に取り組んだ。自動的身体反応は刺激-反応一致性効果を用いて定量化した。

### 【4】重力方向への負荷増加が三次元上肢運動軌道の高さに与える検討

この研究では、重力という、ヒトが生まれ落ちた際から常に暴露され、適応済みである外乱環境に対する適切な運動計画およびその調整が、健常者・片麻痺を有する患者において見られることを仮説として検討した。具体的には、前腕に重りを負荷した条件とそうでない条件における運動軌道の最大高さを測定し、条件間で比較した。さらに試行間での適応の程度を検討した。本研究は健常者および片麻痺患者を対象とした。

### 【5】失行患者に対する運動計画能力に負荷をかけたリハビリテーション効果の検討

頭頂葉を損傷すると、失行という高次脳機能障害が生じる。失行を呈する患者(失行患者)は、

筋出力・制御には問題がないものの、意図通りの運動制御がおこなえない。本研究では、運動計画能力に特に負荷をかける課題である ESC 課題をリハビリ課題として用いた場合の運動計画能力の変化を検討した。

#### 【6】視覚運動順応における課題間転移効果の検討

視覚運動順応研究において、到達課題と追従課題が用いられている。しかしながら、これら二つの課題が同様の内部モデルを獲得しているかどうかはこれまで検討されてこなかった。そこで本研究は課題間の汎化効果を検討することで二つの課題に共通する因子を検討した。

#### 【7】力知覚と力再生の繰り返しによる筋出力の最適化に関する検討

人が道具を扱うとき、必ず筋出力をする必要である。この筋出力は目的に応じて、十分かつ最適な力が用いられていると考えられる。しかしながら、この筋出力の最適さを実験的に・理論的に説明するのは困難であった。本研究では、力呈示装置を用いた繰り返しのある力の知覚と出力をおこなった場合の力出力の時系列的变化を検討した。

#### 【8】脳・身体・道具の関係性についての文献レビュー及び理論的考察

私たちは身体や道具を制御する際、感覚情報を基に運動出力をおこなっている。このプロセスについての知見を幅広いまとめ、運動学習処理が脳内でどのように生じているのか、心理学的モデルの観点から検討した。

### 4. 研究成果

【1】いくつかの運動学的指標に対する主成分分析の結果、主に第1主成分（到達成分に対応）が学習によって時系列的に変化し、第2主成分（把持成分に対応）は変化しないことが明らかとなった。この結果は、到達把持運動における到達成分と把持成分は、外乱による運動時間の延長や努力の増大の影響を受けずに、協調的に制御されていることを示唆する。本研究成果は投稿準備中である。

【2】まず、VR 環境においては身体（手）と日常物品の大きさ知覚に対して一貫して同程度（約5%）の過小評価が生じることが明らかとなった。VR 環境における到達把持運動は現実環境よりも運動時間が延長し、最大 Aperture (MGA) が大きかった。ただし、触覚フィードバックがない VR 把持では MGA は変化しなかった。また、すべての VR 把持に、把持運動中における MGA 出現タイミングが早くなった。この成果は Itaguchi (2021) で公開済みである。

【3】選択反応課題では、 $-150\text{ms}$  から  $+250\text{ms}$  の SOA で一貫した効果を引き起こされた。負の SOAs における一致効果は、行動手がかり提示後のディストラクタが過渡的に運動反応を妨害したことを示しており、運動計画が開始されたのちも無関係な視覚情報に影響を受ける一定の時間幅が存在することが示唆された。本研究成果は投稿準備中である。

【4】健常者を対象とした検討によって、物体把持の成功に重要である運動軌道の高さの補償は1試行レベルで生じること、さらに腕の重さが増加した場合、運動軌道の高さはベースラインに戻ることはないことが明らかとなった。この成果は Ando and Itaguchi (2022) で公開済みである。さらに、重力方向への負荷増加に対する長期的な順応も検討済みであり、その成果は投稿準備中である。さらに、麻痺患者を対象とした研究により、第一次運動野の損傷によってはおもりの負荷に対する適応的な運動計画機能は失われないことが確認された。この成果は安藤ら (2023) で公開済みである。

【5】運動計画機能が障害されていると考えられる患者に対して ESC 課題を行った結果、日常的なリハビリ効果の範囲を超えて、日常物品の取り扱いが改善した。この成果は梅田ら (2024) にて公開済みである。

【6】二種類の視覚運動順応課題の学習量は、二度目の学習初期においては約50%が他方の課題に転移することが確認された。状態空間モデルを用いて推定された保持率は Savings と呼ばれる再学習効率の指標と相関しなかった。この結果は、この成果は投稿準備中である。

【7】力知覚と力再生の繰り返しをおこなうと、最終的に個人ごとの力出力の平衡点に落ち着くことを実験的に示し、工学制御の観点からその理論的な裏付けをおこなった。この成果は、Muramatsu et al. (2022) として公開済みである。

【8】特に「身体化」という用語について研究者あるいは研究分野間で大きな齟齬があり、国内においても恣意的な用語の使用がなされていることが示唆された。この状況を打開するには、実験的証拠および臨床観察を加えた統合的枠組みを提供することが必要である。本成果の一部は、山田・板口 (2022) として公開された。また、病的身体化に対する神経心理学的観点からの理論的考察をまとめた成果が別の論文として投稿中である。

これらの研究成果は総じて、身体と道具の学習あるいは制御過程において、座標変換という概念を通して統一的に解釈できる可能性を示している。また、脳機能障害との関連において、運動行為の実行に困難を抱える患者に対して、運動計画機能の訓練が重要であることを確認した点で、大きな社会的意義がある。さらに、身体化という現象あるいは身体という概念を考える際に、地球環境（重力）そのものを考慮する必要性があるという、これまでの理論にない学術的示唆を得ることもできた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山田千晴・板口典弘.	4. 巻 39
2. 論文標題 知覚・認知と運動制御5 体性感覚と運動制御,	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 理学療法	6. 最初と最後の頁 927-936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Muramatsu Hisayoshi, Itaguchi Yoshihiro, Katsura Seiichiro	4. 巻 53
2. 論文標題 Involuntary Stabilization in Discrete-Event Physical Human-Robot Interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	6. 最初と最後の頁 576-587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSMC.2022.3184960	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ando L. and Itaguchi Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 The heavier the arm, the higher the action: the effects of forearm-weight changes on reach-to-grasp movements.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Experimental Brain Research.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00221-022-06350-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itaguchi Yoshihiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Size Perception Bias and Reach-to-Grasp Kinematics: An Exploratory Study on the Virtual Hand With a Consumer Immersive Virtual-Reality Device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 712378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frvir.2021.712378	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itaguchi Yoshihiro	4. 巻 123
2. 論文標題 Toward natural grasping with a tool: effects of practice and required accuracy on the kinematics of tool-use grasping	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Neurophysiology	6. 最初と最後の頁 2024 ~ 2036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1152/jn.00384.2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 安藤 瑠称、吉岡 実穂、大門 正太郎、板口 典弘	4. 巻 42
2. 論文標題 脳卒中片麻痺患者における腕の加重に対する適応的運動計画	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 基礎心理学研究	6. 最初と最後の頁 26 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14947/psychono.psychono.42.4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 梅田 実穂、高木 早希、大門 正太郎、板口 典弘	4. 巻 29
2. 論文標題 左脳梗塞により把持動作の障害を呈した症例	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 認知リハビリテーション	6. 最初と最後の頁 1 ~ 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.50970/cogrehab.2024.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Ando R. and Itaguchi Y.
2. 発表標題 Forearm-weight changes influence the height of reach-to-grasp movements.
3. 学会等名 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ノルウェー	University of Tromse		