

スイッチ操作力の差異が運動主体感に与える影響の評価

襲原 凜^{*1}, 温 文^{*1}, 濱崎 峻資^{*1},
前田 貴記^{*2}, 加藤 元一郎^{*2}, 山川 博司^{*1},
山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*1}

Evaluation of the Effect of the Power of Button-pushing on Sense of Agency

Rin MINOHARA^{*1}, Wen WEN^{*1}, Shunsuke HAMASAKI^{*1},
Takaki MAEDA^{*2}, Motoichiro KATO^{*2}, Hiroshi YAMAKAWA^{*1},
Atsushi YAMASHITA^{*1} and Hajime ASAMA^{*1}

^{*1} The University of Tokyo

^{*2} Keio University

When using a remote control system, good operational feeling is very important, and many research on this field has been done. Modeling of cerebral function is also an approach for this field. In this research, we direct our attention to the “sense of agency.” Sense of agency is an aspect of body sensation, and is the experience that one feels their action controlling the consequence. The present study is about the effect of power of action on sense of agency. We measured the sense of agency in different power conditions. Power was manipulated by changing the hardness of button which we used during the task. We found that with strong power action sense of agency is enhanced when there is a long delay (700ms) between one’s action and the consequence. This suggested that the power of action contributes to the sense of agency.

Key Words : Sense of Agency, Button-pushing, Power

1. 序 論

近年科学技術は日に日に進歩してきており、人間は日常の中で数え切れないほどの機械を使って生活している。その中で、災害現場など、人が入り込めない場所における遠隔操作技術に関する研究、開発が進んでいる。これらの技術が広く普及するためには、優れたインタフェースの開発が不可欠で、遠隔操作インタフェースの操作性、操作効率の向上を目的とする研究が多数行われていて、その分野も視覚関連、触覚関連、操作方法関連、などと多岐にわたっている⁽¹⁾。

ネットワーク等を用いてロボットの遠隔操作を行うことを考え、その模式図を図1に示す。図1に示すように、ロボットを操作する際には操作者はロボットの動作や、ロボットが見えない場合にはロボットからの映像を頼りに操作を行う。しかしその際インタフェースの通信性能等が原因でその間に時間遅れが生じてしまうと、操作者のストレス、作業効率の低下につながってしまうことが考えられる。

近年ではこの課題に対するアプローチとして、ヒト

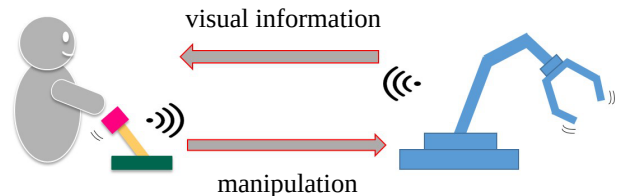


Fig. 1 Remote controlling

の脳機能や身体について工学的な側面からモデル化する研究が盛んに行われている。例えば、2005年から2009年に行われた移動知に関する研究においては、ヒトの様々な環境に対する適応的行動能力を、動くことにより生じる脳、環境、身体の間の相互作用によるものととらえ、生物学的な知見、工学的な知見の双方を用いたモデル化が試された⁽²⁾。しかし、ヒトの身体認知に関する脳内メカニズムは未だ解明されていない事柄も多い。

ヒトの身体認知に分類される感覚として、運動主体感 (Sense of Agency) がある。運動主体感とは、Gallagher

^{*1} 東京大学

^{*2} 慶應義塾大学

によって提唱された概念で、「ある運動を引き起こしている、あるいは生み出しているのは、他の誰でもない自分であるという感覚」と定義される⁽³⁾。実際に遠隔操作技術などにおいては操作における同期感が必要であり、遠隔操作に際しては運動主体感を得られることが大変重要である。この運動主体感に関しては多くの研究がなされており、Blakemore, Jeannerod らは運動主体感の脳内メカニズムに関するモデルを提唱している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし、運動主体感の生起のメカニズムについてはまだ検証されていない事例も多く、現在でもこの分野に関して多くの研究が進められている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。なお、遠隔操作の際の重要な課題となる操作における時間遅れに関連する研究としては、自分の動作からそれに対するフィードバックの間に時間遅れが生じると運動主体感を感じにくくなることが報告されている⁽⁶⁾。

一方で運動主体感に関連する現象として、Haggard により提唱された主観的な統合 (Intentional Binding) という現象がある⁽⁸⁾。これは運動主体感を感じる際に自分の行為とそれによるフィードバックまでの時間が短く感じられる傾向のことであり、この傾向に関する評価手法も確立されている。Moore らは、「Intentional Binding は主観には現れない運動主体感を検出できる」と主張しており、主観評価で計測されるものを顕在的な運動主体感、Intentional Binding により計測されるものを潜在的な運動主体感と呼んでいる⁽⁹⁾。顕在的な運動主体感を感じる事が前提化されるような連続的な操作を行う際には、この潜在的な運動主体感を向上させることが作業効率の向上につながると考えられる。

2. 研究 目 的

運動主体感に関しては現在までに多くの研究がなされてきており、その脳内メカニズムに迫る研究もあるが、身体運動に際して使う力の大きさ、つまり運動指令の出力の大きさが運動主体感に与える影響はまだ検証されていない。

そこで本研究の目的を、運動の出力の大きさが運動主体感に与える影響の検証とする。本研究では、「運動の出力が大きい場合の方が運動主体感を強く感じる」という仮説を立てた。

この仮説の根拠としては、Demanet らによる努力 (Effort) と Intentional Binding についての研究があり、右手で Intentional Binding を計測する課題を行っている最中に左手でストレッチバンドを引っ張った場合、バンドをより強い力で引っ張った場合の方が強い運動主体感を感じると報告されている。Demanet らはこれを心理的努力の大きさによる影響として、心理的努力が大きい方がより強い Intentional Binding が生じたと

主張している⁽¹⁰⁾。

この研究では顕在的な運動主体感の評価は行われていないが、この研究からより大きい心理的努力がある場合にはより強い潜在的な運動主体感が得られることが分かっている。運動の出力が大きくなる場合には、出力が小さい場合よりも大きな心理的努力が働くと推定され、顕在的な運動主体感、潜在的な運動主体共に促進されと考え、先に述べたような仮説を得た。本研究では、以上に述べた仮説の検証を行う。

3. 手 法 設 計

運動の出力の大きさが運動主体感に与える影響について、以上に述べた仮説を検証するための手法を設計する。

先に述べた仮説の検証を行うためには、運動の際に使う力が異なる条件下で運動主体感の評価が行える実験環境を設計する必要がある。そこで本研究では図2のようなスイッチボックスを作製し、被験者はこのスイッチボックスを用いてスイッチ操作課題に取り組んだ。図2の3つのスイッチは見た目やストロークは同一で、押すために必要な力だけが異なるものである。運動主体感の評価方法、被験者が実際に取り組んだ課題について、以下に述べる。

3.1 評価方法 顕在的な運動主体感の評価方法の1つとして、「自分で動かしているように感じたか」について主観をもとに評価するというものがある。これは Maeda らなどにより用いられている手法で、運動主体感を感じたかどうかを直接被験者に問うものである⁽⁶⁾。

Intentional Binding の評価方法としては、Interval estimation と呼ばれる手法を用いた。これは、被験者に自分の動作とそれに対するフィードバックの間の時間間隔を推定させるというものであり、Ebert らにより用いられている手法である⁽¹¹⁾。

3.2 課題 本研究において被験者は、運動主体感の主観評価を行う課題1と、Intentional Binding の評価を行う課題2に取り組んだ。それぞれの課題の具体的な手続きを以下に示す。

3.2.1 課題 1. 主観評価課題 ディスプレイの画面 (約 175mm × 240mm) において、約 5mm 四方の白色の正方形のボックスが下方から上方へ秒速約 20mm で移動する。移動中のランダムなタイミング (ボックスがスクリーン下部に現れてから 1 秒後～4 秒後の間) で、ボックスの色が黄色に変わる。被験者は、ボックスの色が変わるのを見た後、可能な限り素早く利き手人差し指でスイッチを押す。被験者がスイッチを押すと、ディスプレイ内のボックスが約 25mm 上方に瞬間

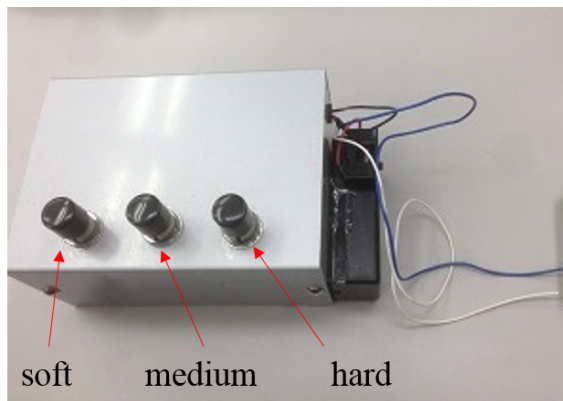


Fig. 2 Operating switch box

的にジャンプ（移動）するが、「被験者がスイッチを押す瞬間」と「ディスプレイ内のボックスが上方に瞬間的にジャンプする瞬間」の間には時間遅れが存在し、その時間遅れの長さは一定ではない。

被験者に対しては、「被験者自身がスイッチを押したときにボックスがジャンプする場合と、コンピュータが勝手にジャンプさせる場合がある」と教示し、被験者は自分がボックスをジャンプさせたと感じたかどうかを「Yes」、「No」の二択で上に述べた一回の試行ごとに口頭で回答する。図3は実験開始からボックスのジャンプまでの流れを模式的に表したものである。

3.2.2 課題2. 時間間隔推定課題 課題1と同様のスイッチ操作の後にボックスがジャンプした後（図3を参照）、ボックスのジャンプが自分のスイッチ操作から何ms後であると感じたか、一回の試行ごとに100ms単位で口頭で回答する。図4は色が変わる瞬間からボックスのジャンプまでをより詳細に表したものであり、被験者は図中の赤い矢印に相当する部分の時間間隔を推定する。なお課題2を行う前には、被験者は100msの時間間隔に慣れるために次に示すような事前課題を行った。

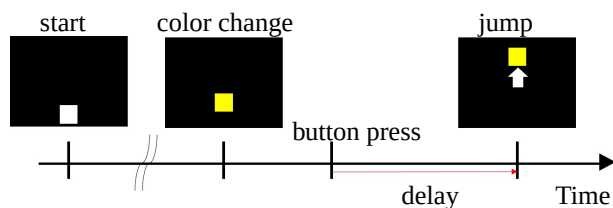


Fig. 3 Procedure of each trial

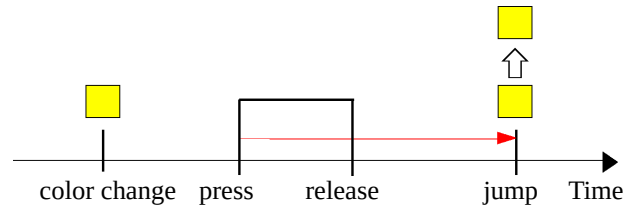


Fig. 4 Interval to estimate in Task2

3.2.3 課題2の事前課題 課題2の事前課題として、以下のようなテスト課題を用意した。

被験者がマウスをクリックすると、スクリーン上に直約20mm大の円形状黒色オブジェクトが表示されるが、その表示される時間は100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000（単位はms）のいずれかである。被験者はオブジェクトが何msの間表示されたかを100ms単位で推定する。この推定値が7回連続で正解もしくは正解値の前後100msのいずれか、が続いた時点でこの課題を終了とした。

3.2.4 実験条件・実験装置 両課題におけるスイッチ操作から四角形のジャンプまでの遅延は、100ms, 200ms, 300ms, 400ms, 500ms, 700ms, 1000ms, の7パターンを用意した。また両課題で使用するスイッチについては、オムロン社製のマイクロスイッチを用いた。それぞれのスイッチを押すために必要な力は0.1N（軽い）、0.65N（普通）、2.7N（重い）とした。

また実験装置全体を表したものが図5である。図2



Fig. 5 Experimental device

に示したスイッチボックスは、スイッチを押すと図中の白いリード線と青いリード線との間に 5 V の電位差が生じる仕組みになっており、これを図 5 のようにターミナル（株式会社コンテック製高精度アナログ入出力ターミナル AIO-160802AY-USB）を介して PC と接続させ、この電位差をアナログ信号として PC 側で検出することで、先に述べたようなスイッチ操作課題を PC 画面上で行うことを可能にした。

4. 実験

3 章に述べた手法を用いて、実験を行う。

4.1 実験参加者 視力、手の健常な学生 15 名（平均年齢 22.9 ± 1.8 歳）を被験者として、上記に示す 2 つの課題を各被験者個別に静かな部屋の中で行った。

4.2 実験手順 図 6 にひとつの課題を行う際の流れを示す。図 6 に示すように、課題を始める前に試行の練習を 3 回行った。また時間間隔推定課題を行う前には前章に述べた課題 2 の事前課題にも取り組んだ。

各課題は 3 種類のスイッチごとのブロックに分けて行い、各ブロックにおいてジャンプまでの遅延 7 パターンを 1 セットとして 10 セット分の試行が行われた。つまり、各課題につき 210 試行行い、被験者は両課題合わせて計 420 試行に取り組んだ。

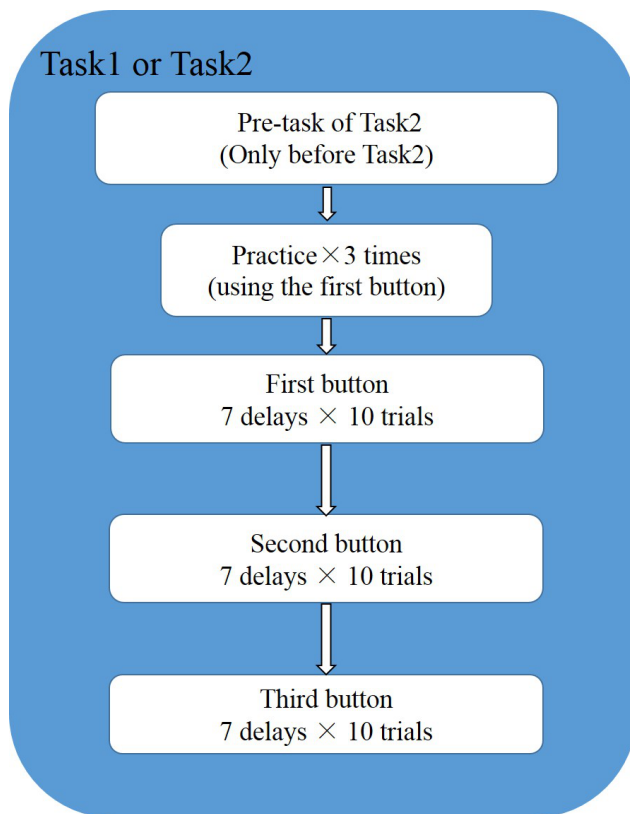


Fig. 6 Procedure of the task

なお、課題 1, 2 に取り組む順序と、各課題内でのスイッチのブロックの順番に関してはカウンターバランスを取り、各試行における遅れ時間の順序は被験者ごとにランダムに設定した。

5. 結果

5.1 主観評価課題の結果 主観評価課題の結果を図 7 に示す。

得られた結果について、被験者内要因の分散分析を行ったところ、delay の主効果は有意で ($F(6, 84) = 71.042, p < .05$)、スイッチの主効果が有意傾向を示したが ($F(2, 28) = 3.259, p < .10$)、2 つの要因の交互作用は有意ではなかった ($F(12, 168) = 1.508, n.s.$)。

下位検定としてボンフェローニの多重比較を行ったところ、時間遅れが 700ms の場合について、軽いスイッチと重いスイッチの間に有意差があった ($p < .05$)。

5.2 時間間隔推定課題の結果 時間間隔推定課題の結果を図 8 に示す。課題 2 の結果についても同様に検定を行ったところ、delay の主効果は有意であったが ($F(6, 84) = 259.282, p < .05$)、スイッチの主効果、および 2 つの要因の交互作用は有意ではなかった（順に $F(2, 28) = 1.022, n.s.$; $F(12, 168) = 0.964, n.s.$ ）。

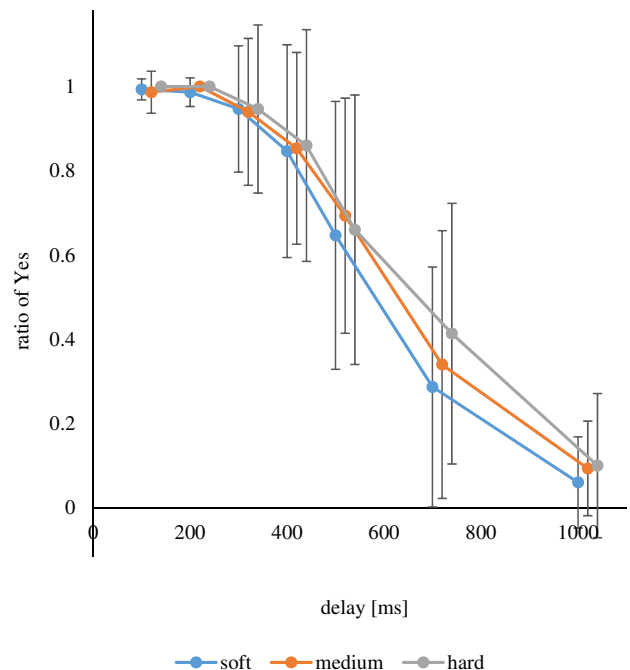


Fig. 7 Result of the agency rating task. Error bars represent standard deviations.

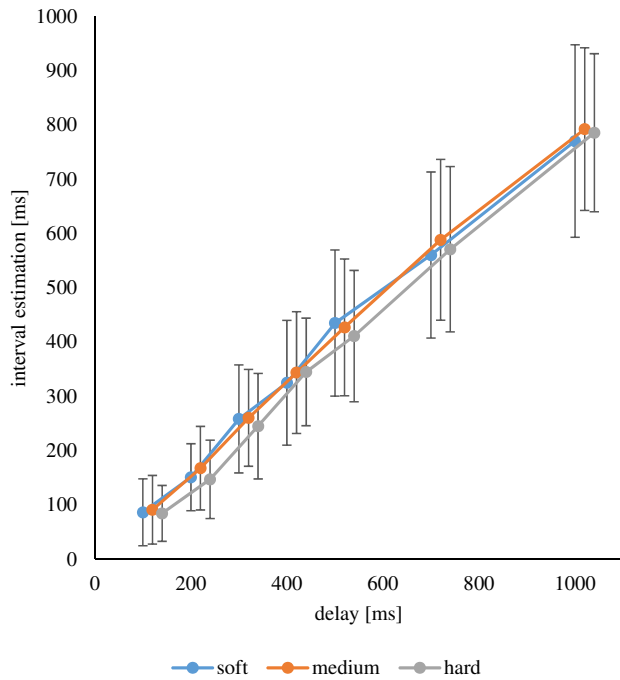


Fig. 8 Result of the interval estimation task. Error bars represent standard deviations.

6. 考 察

本研究では運動の出力の大きさが運動主体感に与える影響を調べるため、スイッチの硬さを変えた環境を設計して運動主体感および Intentional Binding の評価を行った。その結果、主観評価に関してはスイッチの主効果は有意な傾向を示し、時間遅れが 700ms の場合に軽いスイッチと重いスイッチの間に有意に差があることが分かった。Intentional Binding に関しては、スイッチによる影響は見られなかった。

これらの結果から運動の出力の大きさは、運動主体感に影響を及ぼし、Intentional Binding には影響しないことが示唆された。以上の結果について考察する。

仮説で述べたような傾向が見られたのは、主観評価課題において視覚フィードバックまでの時間遅れが 700ms の場合のみであった。序論にも述べたように、視覚フィードバックまでの時間遅れが大きくなればなるほど運動主体感を感じにくくなることは先行研究からも報告されている。

本研究においてもその傾向に従う結果が得られ、フィードバックまでの時間遅れが大きくなるほどに運動主体感を感じにくくなり、1000ms の遅れがある場合はほとんどの被験者が運動主体感を感じていない。

実験結果全体としてこのような傾向が見られる中、700ms の場合において軽いスイッチと重いスイッチの

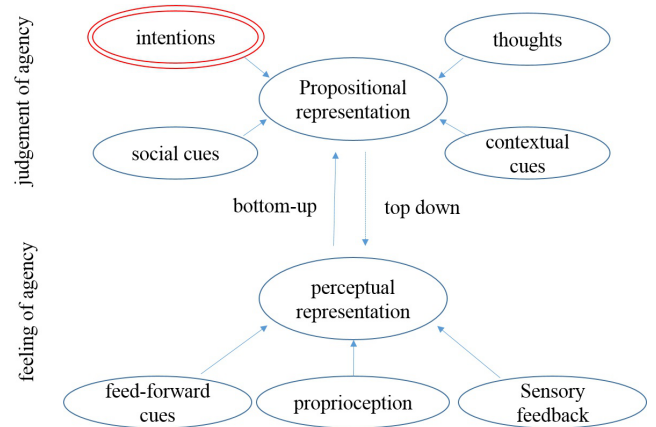


Fig. 9 The 2-step model proposed by Synofzik et al.⁽¹²⁾

間に有意な差が計測された。グラフからも見て取れるように、700ms のところでスイッチのグラフ間に最も大きく差があり、この時間遅れにおいては序論に述べた仮説が成立しているといえる。

図 7 のグラフから、700ms は運動主体感を感じる割合がすべてのスイッチで 0.5 以下になる時間遅れであり、本実験系において運動主体感を感じるかがあいまいな時間遅れといえる。本結果から、そのような時間遅れがある場合に、運動の出力が大きい場合の方が運動主体感を保たせる効果がある可能性が示唆されるが、1000ms の時間遅れではそのような結果は得られなかったため、視覚フィードバックの時間遅れが大きすぎる場合にはそのような効果はないと考えられる。

Synofzik らは、運動主体感のモデルとして図 9 に示すような “Feeling of Agency” と “Judgement of Agency” の 2 段階からなるモデルを提唱している⁽¹²⁾。これは、動作を行った瞬間の感覚 (Feeling) と、動作を行った後に運動主体感を感じたか判断する時の感覚 (Judgement) は異なるものであると主張するものである。今回の主観評価課題は、このモデルでいうところの “Judgement of Agency” を聞いている。Synofzik らは、視覚情報などにずれがあり運動主体感を感じるかどうかがあいまいな状況下では、“Judgement of Agency” は動作に対する意志 (図 9 中で赤の二重枠で囲った Intention のことを指す) 等に影響を受けうると主張している。重いスイッチを押す場合には、より強い意志が働くと推定されるので、今回得られた結果は、この主張に合致するものといえる。

序論で触れた Demanet らの研究では、Intentional Binding を計測し、心理的努力が大きい方が Intentional Binding が強く生じるという結果が得られているが、本研究では、Intentional Binding への影響は見られなかつ

た。スイッチ操作の操作力を変えた場合、押す際の心理的努力の大きさが変化すると考えられるが、同時に動作に際して指が受ける反力フィードバックも変化すると考えられる。Kawabeの研究では、動作を起こした際の視覚フィードバックの大きさ（スクリーン上のドットの移動速度）が大きい方が強い運動主体感を感じると主張しており、本実験においても、反力フィードバックの大きさが結果に影響を及ぼしている可能性がある⁽¹³⁾。

7. 結 論

本研究では、「運動の出力が大きい場合の方が強い運動主体感を感じる」という仮説を検証することを目的として、課題を行う際に必要な力が異なる環境として、3つの異なるスイッチを用いたスイッチ操作課題を設計し、運動主体感、および Intentional Binding の評価を行った。

その結果、運動主体感の主観評価においてのみスイッチの主効果が有意傾向を示し、時間遅れが700msの場合において仮説が成り立つことが明らかとなった。この結果から、時間遅れが大きい場合には操作力が大きいほど運動主体感を強く感じる可能性が示唆されたが、これは心理的努力だけではなく、指が受ける反力フィードバックも影響していると考えられる。

今後の展望としては、どの程度の時間遅れでスイッチの間に差が出るのか、スイッチの硬さの種類を増やしてどの程度の力が運動主体感を感じやすいか、などについてのより詳細な検証が挙げられる。

8. 謝 辞

本研究の一部はJSPS 科研費新学術領域研究「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」（課題番号 26120005）の助成を受けた。

参 考 文 献

- (1) 山口崇, 吉田正, 石松豊, “遠隔操作におけるマンマシンインターフェイスに関する実態調査”, 土木学会第59回学術講演会予稿集, (2004), pp.373-374.
- (2) 浅間一, 伊藤宏司, “シリーズ移動知”, オーム社, (2010).
- (3) S. Gallagher, “Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science”, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.4, No.1(2000), pp.14-21.
- (4) S.-J.Blakemore, D.A.Oakley and C.D.Frith, “Delusions of alien control in the normal brain”, *Neuropsychologia*, Vol.41(2003), pp.1058-1067.
- (5) M. Jeannerod, “The Mechanism of self-recognition in humans”, *Behavioural Brain Research*, Vol.142(2003), pp.1-15.

- (6) T. Maeda, K. Takahata, T. Muramatsu, A. Koreki, S. Iwashita, M. Mimura and M. Kato, “Reduced sense of agency in chronic schizophrenia with predominant negative symptoms”, *Psychiatry Research*, 2013(in press).
- (7) 松本倫実, 濱崎峻資, 前田貴記, 加藤元一郎, 山川博司, 高草木薫, 山下淳, 浅間一, “聴覚刺激及びリズムの周期性が運動主体感に与える影響の評価”, 第23回ライフサポート学会フロンティア講演会予稿集, (2014), p.59.
- (8) P. Haggard, S. Clark and J. Kalogeras, “Voluntary action and conscious awareness”, *Nature Neuroscience*, Vol.5, No.4(2002), pp.382-385.
- (9) J. W. Moore, D. Middleton, P. Haggard and P. C. Fletcher, “Exploring implicit and explicit aspects of sense of agency”, *Consciousness and Cognition*, Vol.21, No.4(2012), pp.1748-1753.
- (10) J. Demanet, P. S. Muhle-Karbe, M. T. Lynn, I. Blotenberg and M. Brass, “Power to the will: how exerting physical effort boosts the sense of agency”, *Cognition*, Vol.129(2013), pp.574-578.
- (11) J. P. Ebert and D. M. Wegner, “Time warp: authorship shapes the perceived timing of actions and events”, *Consciousness and Cognition*, Vol.19, No.1(2010), pp.481-489.
- (12) M. Synofzik, G. Vosgerau and A. Newen, “Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency”, *Consciousness and Cognition*, Vol.17(2008), pp.219-239.
- (13) T. Kawabe, “Inferring sense of agency from quantitative aspect of action outcome”, *Consciousness and Cognition*, Vol.22, No.2(2013), pp.407-412.