

運動司令と感覚入力の時間的な因果関係が Sense of Agency に与える影響

Sense of Agency Effected by Causal Relationship Between Motor Command and Sensory Feedback

○村林 正堂
Masataka Murabayashi
東京大学
The University of Tokyo
masataka@race.u-tokyo.ac.jp

池本 有助
Yusuke Ikemoto
東京大学
The University of Tokyo
ikemoto@race.u-tokyo.ac.jp

大武 美保子
Mihoko Otake
東京大学
The University of Tokyo
otake@race.u-tokyo.ac.jp

前田 貴記
Takaki Maeda
慶応義塾大学
Keio University
takaki@sc.itc.keio.ac.jp

加藤 元一郎
Motoichiro Kato
慶応義塾大学
Keio University
katamoto@sc.itc.keio.ac.jp

浅間 一
Hajime Asama
東京大学
The University of Tokyo
asama@race.u-tokyo.ac.jp

Abstract:

Recently, studies of self-awareness, especially Sense of Agency, the sense of controlling one's action by oneself, have been focused on in order to design novel human interfaces. In this study, we investigated how ratio of Sense of Agency changes when the relationship between muscle activities and sensory feedback is not normal. Subjects moved an object in the computer with a haptic device. Their action sequence changed in some tasks, for example it moved prior to the action. The result showed that the ratio decreases efficiently when muscle activities happen after sensory feedback. We suggest the causal sequence in actions is important for Sense of Agency.

1 はじめに

現代社会において、我々は日々機械と触れ合いながら生活をしている。機械を使わない日は全くないといって過言ではないだろう。この状況を鑑みるに真に使いやすいヒューマンインタフェースの開発は重要であると考えられる。

ヒューマンインタフェースの開発に、人間の認知や自己意識に関する理解は広く求められている。ヒューマンインタフェース設計の概念としてユーザ中心設計(UCD)が挙げられる。設計者が主導になって製品を開発するのではなく、使用者にとってどのような製品が望ましいかを念頭において製品設計を進めるという考え方であり、この設計概念はヒューマンインタフェース開発において一般的なものになっている [2]。

他方、認知心理学の分野においても、自己意識の研究は盛んになってきている。その中でも特に Sense of Agency(行為主体感、意志作用感)は自己意識の中核をなしていると考えられており、特に注目が集まっている [3]。Sense of Agency とは人が行為を起こしたときにその行為を起こした主体が自分であると感じる主観的体験のことである [1]。この感覚を説明するモデルとして、モーターコントロール理論に基づいた Forward Model が有力であると考えられている [4],[5]。その基本的な考え方は、行動する際に起きた行為の結果と事前の行為の予測の結果の比較によって、その行為が自己によって行われたかどうかを判断するとい

うものである。つまり、予想と実際の感覚の結果の差が小さかった場合、人はその行為の主体が自分であると判断するとしている。

実際に Forward Model の妥当性を示している被験者実験が数多く行われている。例えば Sato et al. は、ボタン押しの後に特定の周波数を持つ音が発生する実験系を構築し、健常な被験者に音を押した主体が健常者自身かそれとも機械によるものかを判断させた [6]。その結果、音の周波数や発生するタイミングが予想と異なっていた場合、音を起こした主体が実際には被験者自身であるにもかかわらず、自分が行った結果だと判断する傾向が有意に下がることを報告している。また、これと同様の実験系を用いて fMRI や PRT を用いた脳画像による研究も盛んに行われている [9]-[18]。Farrer et al. は、コンピューターディスプレイ上の円形オブジェクトをジョイスティックによって操作するという課題を行っている際の脳の活動を fMRI を用いて確認した [14]。その結果、オブジェクトの反応が予想と異なる、つまり、他人が動かしていると感じられるときには、両側頭頂葉下部の活動が大きくなり、自己の行為によるものだと考えられる条件では皮質が賦活することが示された。また、最近の研究では前頭葉も Sense of Agency に関与していると考えられてきている [18]。しかしながら、上記実験の多くは、行為を行った後に恣意的な変化を起こした時の Agency の変化を確認しているものであり、その行為の最中に変化を起こした際の Agency に関して詳しく

調査された事例はない。

本研究では、脳内からの筋肉への入力と行為によるフィードバックの順番を入れ替えた際の健常者の Sense of Agency の変化を被験者実験によって確認した。被験者は触覚提示デバイスを用いて仮想空間上の物体動かすタスクを行った。タスク後、被験者は自分がその行為の結果に対して Agency を感じたかどうかを答えた。実験結果より、視覚的触覚的フィードバックが筋電の立ち上がり前に発生したときは、筋電立ち上がり後に発生したときよりも Sense of Agency の度合いが有意に下がることが示される結果を得た。

2 実験

2.1 被験者

4 人の男子大学院生 (平均年齢 22.3 歳) が本実験に参加した。エジンバラテストによって被験者は全員右利きであることが事前に分かっており、精神科への通院歴はない。被験者はインフォームドコンセントを紙面で提出した。

2.2 装置とアプリケーション

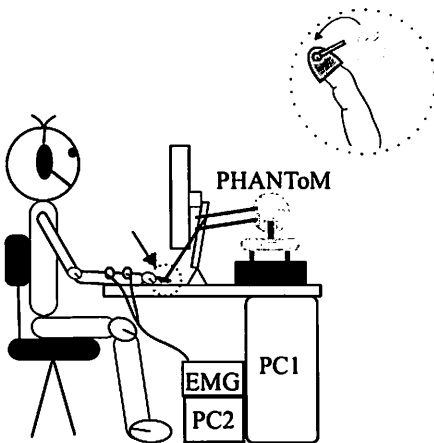


Fig. 1: The experiment equipment

実験装置全体は以下の通りである (図 1)。実験は二つのコンピュータ (PC1 と PC2) と触覚提示デバイス (PHANToM premium 1.0 Sensable, Inc), 表面筋電位計測装置 (Personal EMG 追坂電子機器) によって構成されている。PC1 は触覚提示デバイスを制御し、PC2 は EMG を計測した。被験者は、PC1 の画面内の仮想空間上の物体に PHANToM のカーソルを合わせることによって、あたかもその物体に触れているような感覚を得ることができた。また、PC1 から EMG にトリガ信号を出力することにより、コンピュータ同士の時間的な同期を実現している。被験者には実験中は右手の中指に PHANToM の指サックに装着することが義務付けられていた。中指の動きを計測するために、EMG は右前腕の浅指屈筋に取り付けた。

次に仮想空間の説明をする。PC1 上に表示されている仮想空間には以下の三つの物体が存在する。

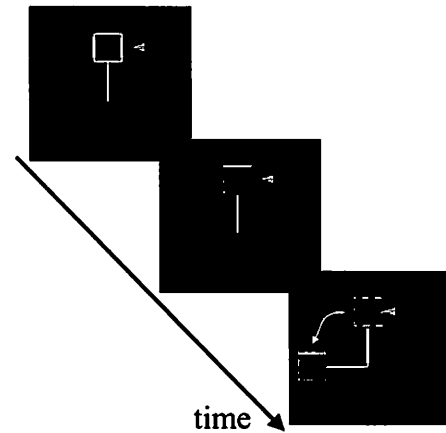


Fig. 2: The experiment flow

- (1) Cursor. 仮想空間上に存在する緑色の円錐型オブジェクトであり、PHANToM の指サックを用いて動かすことができる。
- (2) Pendulum. 振り子型の物体である。根元は固定されているが、Fig.2 のように振り子の錘が鉛直方向に対して上向きに置いてあるので、極めて不安定な状態である。実空間と同様に、触れると運動が起こる。Pendulum が動く条件は Cursor が Pendulum に触れたとき (Normal Task) と合図が出てから一定時間たったとき (Random Timing Task) の二種類である。Pendulum の先端部の色の変化を合図とする。Random Timing Task では物体の動きだけでなく、同時に被験者の指が Pendulum に触れた感覚も PHANToM によって引き起こされた。
- (3) Start. 無色透明な板状の物体であるので、触ることは出来るが見ることは出来ない。Pendulum の右方に位置している。被験者は Start が Cursor を触れるように、右手の中指の位置を維持する。

2.3 実験プロトコル

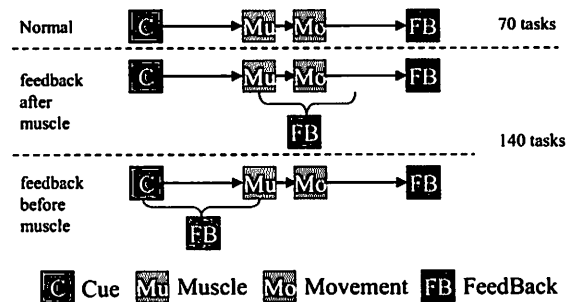


Fig. 3: Descriptions of the actions in Test

被験者は、仮想空間上の物体の動きが自分の指運動によるものであるかどうかを判断するタスクを行った (Fig.2)。実験は出来る限り外界の影響が入らない部屋で行われた。被験者は、腕の位置が快適になるようにいすの高さを調

節し、外部の音を遮断するためヘッドフォン (ATH-PRO5 audio-technica) を装着した。小指側の側面が机に触れるように設置した後、その状態で右手中指に PHANTOM の指サックを装着し、筋電計を右手前腕の浅指屈筋に取り付けた。被験者は右手中指のみを動かすことが求められ、事前に運動を確かめ、十分な数だけ練習を行った。

被験者は、合図が出るのとほぼ同時に Start から指を離し、Pendulum に出来るだけ早く触れるタスクを行った。各タスクの後、被験者は Pendulum を動かした主体が自分である感じがしたかをキー押しで答えた。回答後、再び指の位置を Start に接地し、次のタスクの準備が出来たらキーを押した。これらのタスクを決められた回数だけ行った。実験は二つの段階 Measure, Test の順番に行われた。Measure の目的は、合図が出てから運動が起こるまでの反応時間の計測だった。Measure 内の全てのタスクでは Pendulum は被験者の指が触れた後すぐに動き出した (つまり、Normal Task)。これらの結果が全て自分の行為によるものであることが事前に教示されていた。Measure 内では Normal Task を 100 回行った。Test の目的は行為の結果である Pendulum の視覚と触覚の時間的なずれが Agency にどのような変化を与えるかを確かめることだった。Test では 70 回の Normal Task のほかに 140 回の Random Timing Task を被験者は行った。Random Timing Task においてフィードバックが発生する時間は、0[ms] から Measure で計測された反応時間の平均値の間からランダムに決定した。Test 内において上記のタスクの種類はランダムな順番で表れた。したがって、Fig.3 のように Random Timing Task は筋電の立ち上がりを基準に Feedback Before Muscle Task と Feedback After Muscle Task の二種類に区別することが可能である。横軸が時間になっており、C, Mu, Mo, FB はそれぞれ、運動を起こすための合図 (Cue)、腕の表面筋電の立ち上がり (Muscle)、指の運動の開始 (Movement)、物体の動きや触感といった運動の結果としてのフィードバック (Feedback) を意味している。

3 結果・考察

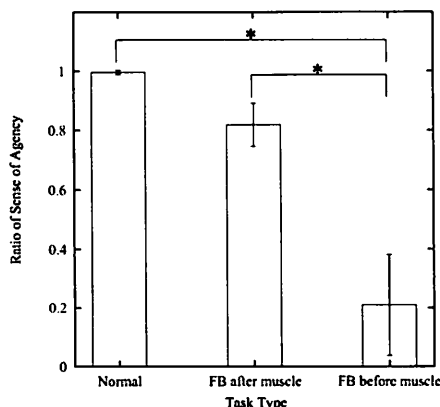


Fig. 4: Ratio of Sense of Agency

Fig.4 が結果を示している。横軸が各フィードバックのタイプ、縦軸が Sense of Agency を感じた度合いである。

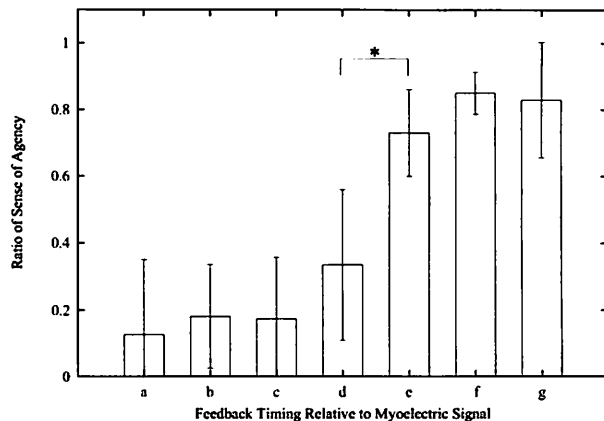


Fig. 5: Ratio of Sense of Agency for Random Timing Tasks

筋電の立ち上がりは、連続して 5 回以上電位差が大きくなる場所のうち、その電位差が最大となる場所としている。また、筋電が取れなかった計測データは今回の結果からは除外している。アクションのタイプを被験者内要因として分散分析を行った結果、アクションの違いに主効果が有ることが示された ($F(2,6) = 42.413, p < 0.05$)。また、この結果に基づき Ryan 法で多重比較を行った結果、Normal Task と Feedback After Muscle Task との間には有意な差は見られなかったのに対し、Normal Task と Feedback Before Muscle Task との間にはそれぞれ有意差が見られた。

本実験の結果は筋力が発揮され、指の運動が動くという一連の能動的な行為がその効果の前に起きることが Sense of Agency を感じる上で重要である可能性を示唆している。既存のモデルで考えれば、normal task とはフィードバックのタイミングが異なる feedback after muscle task の際に被験者の Sense of Agency は減少することが推測される。しかし、本実験ではその差は統計的に有意なものではないことが確認された。一方で、normal との時間的な差が存在する点では共通である feedback after muscle task と feedback before muscle task との間においては、人の Agency の感じ方に有意な差が有る結果になった。このことから、単純な時間的な差ではなく、筋電の立ち上がりと結果の効果の順序が Agency にとって重要であることが示唆された。筋電の立ち上がりが意味していることは、運動を起こすための筋活動が開始されたという体制感覚的入力が生じているということであり、結果の効果とは本来 Pendulum に触れたときに被験者が感じる視覚と触覚のフィードバックである。

次に、上記の考察をより厳密に確認するため、Random Timing Task のみに着目し、筋活動からフィードバック発生までの時間差を要因としてその Sense of Agency の違いを確認した (Fig.5)。縦軸が、Sense of Agency を感じた割合であり、横軸が各タスクにおいて筋電が立ち上がった時間を基準としたときのフィードバックが発生した時間である。つまり、その値が負のときは、フィードバックが先に起こるタスク (Feedback Before Muscle Task) であり、逆に正のときは Feedback After Muscle Task である。また、

水準数は7つで、時間差を40[ms]で区切ったものを1つの水準とし、その時間差の範囲は-160[ms]から120[ms]とした。この範囲はこれらの時間的ずれを持つタスクの出現する頻度の高さによって決定した。例えば、水準dはフィードバックが筋電立ち上がりよりも0[ms]から40[ms]早く発生したタスク郡においてどれだけSense of Agencyを感じたかを意味しており、水準eでは筋電の立ち上がりの方がフィードバックの立ち上がりよりも0[ms]から40[ms]早いときのAgencyをあらわしている。本実験においては、1つの水準内に10タスク以上存在する際に十分な頻度と考えた。4人の被験者全員においてこの条件が満たされたとき、時間差の範囲に含めた。分散分析を行ったところ、時間差に主効果が出ることを示された($F(6, 18) = 14.836$, $p < 0.05$)。そこで下位検定として、Ryan法を用いて多重比較検定を行ったところ、正負が入れ替わる水準(d-e)間に有意な差が認められた。このことは、フィードバックに対して筋電の立ち上がりが先行するか否かによってAgencyに大きな変化があることを示している。つまり、運動を起こそうとする筋肉の動きの身体的なフィードバックと行為の結果の因果的な関係はAgencyを判断するために重要な要因であることが示唆された。

4 緒言

本研究では、人のSense of Agencyの認知システム解明のために健常者に対して被験者実験を行った。その結果、行為の結果と筋電の立ち上がりの時間的な因果関係がAgencyにとって重要であることが示唆された。

今後は時間制御をより厳密にし、時間水準の幅を可能な限り狭めSense of Agencyにとって重要な要素を明らかにする。また、Sense of Agencyが損失した患者を対象として、同様の実験を行いたいと考えている。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費特定領域「身体、脳、環境の相互作用による適応的運動機能の実現—移動知の構成的理解—」によって行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Gallagher I I: Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends Cogn Sci* 4:14-21,2000
- [2] 吉川 榮和: ヒューマンインタフェースの認知と生理, pp. 8-9, コロナ社, 2006
- [3] 前田 貴記, 加藤 元一郎: 統合失調症の認知機能と障害と治療メカニズム-自己意識の障害について (Sense of Agency を中心に), *Schizophrenia Frontier*, 5, pp. 232-236, 2004
- [4] Frith CD, Blakemore S, Wolpert DM: Explaining the symptoms of schizophrenia: abnormalities in the awareness of action. *Brain Res Brain Res Rev* 31:357-363,2000
- [5] Blakemore SJ, Wolpert DM, Frith CD: Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nat Neurosci* 1:635-640,1998
- [6] Sato A, Yasuda A: Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition* 94:241-255,2005
- [7] Sato A: Both motor prediction and conceptual congruency between preview and action-effect contribute to explicit judgment of agency. *Cognition* 110:74-83,2009
- [8] Aarts H, Custers R, Wegner DM: On the inference of personal authorship: enhancing experienced agency by priming effect information. *Conscious Cogn* 14:439-458,2005
- [9] Chaminade T, Decety J: Leader or follower? Involvement of the inferior parietal lobule in agency. *Neuroreport* 13:1975-1978,2002
- [10] David N, Bewernick BH, Cohen MX, Newen A, Lux S, Fink GR, Shah NJ, Vogeley K: Neural representations of self versus other: visual-spatial perspective taking and agency in a virtual ball-tossing game. *J Cogn Neurosci* 18:898-910,2006
- [11] David N, Cohen MX, Newen A, Bewernick BH, Shah NJ, Fink GR, Vogeley K: The extrastriate cortex distinguishes between the consequences of one's own and others' behavior. *Neuroimage* 36:1004-1014,2007
- [12] Farrer C, Franck N, Georgieff N, Frith CD, Decety J, Jeannerod M: Modulating the experience of agency: a positron emission tomography study. *Neuroimage* 18:324-333,2003
- [13] Farrer C, Franck N, Paillard J, Jeannerod M: The role of proprioception in action recognition. *Conscious Cogn* 12:609-619,2003
- [14] Farrer C, Frith CD: Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action: the neural correlates of the experience of agency. *Neuroimage* 15:596-603,2002
- [15] Fink GR, Marshall JC, Halligan PW, Frith CD, Driver J, Frackowiak RS, Dolan RJ: The neural consequences of conflict between intention and the senses. *Brain* 122 :497-512,1999
- [16] Leube DT, Knoblich G, Erb M, Grodd W, Bartels M, Kircher TT: The neural correlates of perceiving one's own movements. *Neuroimage* 20:2084-2090,2003
- [17] Saxe R, Xiao DK, Kovacs G, Perrett DI, Kanwisher N: A region of right posterior superior temporal sulcus responds to observed intentional actions. *Neuropsychologia* 42:1435-1446,2004
- [18] Farrer C, Frey SH, Van Horn JD, Tunik E, Turk D, Inati S, Grafton ST: The angular gyrus computes action awareness representations. *Cereb Cortex* 18:254-261,2008