



運動主体感による運動能力の向上

Sense of agency improves motor control

松宮一道¹⁾

Kazumichi MATSUMIYA

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09, matsumiya@tohoku.ac.jp)

概要: 身体感覚は正確な運動制御において重要であるが、この感覚がどのように運動制御に影響を与えているのかは不明である。身体感覚には、身体部位が自分の身体の一部に属していると感じる経験(身体所有感)と自分が身体を制御していると感じる経験(運動主体感)の二種類がある。現在、身体所有感と運動主体感の両方が運動能力の向上に関わると考えられているが、これらの身体感覚を分離して運動能力への影響を調べた研究はない。本研究では、二つの身体感覚を独立して制御し、運動主体感だけが運動能力の向上に関わり、運動の開始に選択的であることを示す。

キーワード: 運動主体感、身体所有感、運動制御

1. はじめに

運動能力の改善を目的とした身体感覚の人工的操作に関する研究が活発に行われている[1-6]。身体感覚は正確な運動制御を行う上で重要であり、運動制御において身体の状態を感じることができなければ、正確に身体を制御できなくなることは容易に想像がつく。身体の状態を知るために、我々の脳は二つの脳内機構を持つと考えられている[7]。一つは、自分の身体を動かすために脳が筋肉に運動指令を出し、この運動指令から予測される感覚信号と身体運動が起こった後に得られる感覚信号を比較するという脳内機構である。この比較によって、運動指令による予測と実際の感覚信号が一致すれば、身体運動の主体が自分であるという感覚(運動主体感)が得られる[8]。もう一つは、一つの身体部位から得られる視覚、触覚、自己受容感覚といった異なる感覚情報を統合する脳内機構である。この統合過程によって、身体部位が自分の身体の一部に属しているという感覚(身体所有感)が得られる[9,10]。しかし、運動主体感と身体所有感がどのように身体の運動制御に関わっているのかは明確ではない。

運動主体感は、運動開始や運動維持などの運動制御のすべての様相において得られると考えられていたが[11]、運動主体感は運動の開始にだけ関与している可能性を最近の研究が示唆している[6,8,12]。しかし、運動主体感の運動開始への関与を示唆した研究は、**intentional binding** と呼ばれる、時間知覚を指標とする運動主体感の潜在的測定法を用いており[13]、質問票を用いて顕在的に測定される運動主体感でも同様の関係が得られるかは不明である。

さらに、身体所有感が運動制御に影響を与えるかどうか

については意見が分かれている。いくつかの研究は、身体所有感が手の到達運動の到達位置のエラーや運動開始方向に影響を与えたり [14,15]、身体所有感が把持運動時の親指と人差し指の間の距離に影響を与えたりすることを報告している[16]。また、能動的に自分の手を触ると、触覚が減衰することが知られているが、この能動的触覚の減衰も身体所有感の影響を受けるという報告がある[5]。その上、脳損傷患者を用いた研究にも身体所有感が運動制御に影響を与えると報告する研究がある[17]。

しかし、一方で、身体所有感が運動制御に影響を与えないことを示唆する研究も多数存在する。運動麻痺を患った患者が麻痺肢に対して身体所有感を保持していたり[18]、健常者においては身体所有感がなくても適応的な運動制御が可能であったりする[19]。さらには、最近の研究において、身体所有感が手の到達運動に影響を与えることを見出せなかったことを報告する研究がある[20,21]。

身体所有感による運動制御への影響について見解が分かれている理由は何であろうか?これまでの過去の研究で身体所有感を操作するために用いられてきた行動課題はすべて自発的な行為を含んでいた。そのような自発的な行為は典型的に身体所有感だけでなく運動主体感も生み出し、この運動主体感が運動制御系に影響を与えていた可能性が考えられる[22]。そのため、従来の行動課題では、身体所有感が本当に運動制御系に影響を与えていたかどうかを明確にできない。

そこで本研究では、従来の行動課題とは異なるアプローチを採用することで、運動制御における身体所有感と運動主体感の機能的な役割を明らかにすることを試みる。具体

的には、被験者の見えない手と一緒に動くコンピュータグラフィックスで描かれた手（CG ハンド）を眼で追跡することを考える。この状況は、眼と手の協調運動と、動いているCGハンドに対する身体所有感と運動主体感の錯覚の両方を誘発する。

眼と手の協調運動は、運動制御の行動指標として用いることができる。特に、眼と手の協調運動では、追跡している手の網膜像を安定化させるために追跡眼球運動と呼ばれる滑らかな眼の動きが発生する。この追跡眼球運動は、自分が自発的に動かした手を追跡する場合に、追跡精度が向上することが知られている[23-25]。実際には、手に対する眼の遅延時間が減少し、追跡ゲイン（眼球速度/手の速度）が増大し、追跡の失敗に伴い生じるサッカード眼球運動の頻度が減少する。これは眼球運動システムが眼と手の協調運動時に手の運動指令信号を利用していることを示しており、眼と手の協調運動が自分の手の運動制御能力を評価するために利用できることを意味する。

また、上記で述べたように、眼と手の協調運動には3つの行動指標があり、これらの行動指標は運動制御の異なる様相に対応する。手に対する眼の遅延時間は運動開始能力の行動指標、追跡ゲインとサッカード眼球運動の頻度は運動維持能力の行動指標となる。そのため、眼と手の協調運動を利用することで、運動主体感と身体所有感が運動制御のどの様相に影響を与えるかを明らかにできる。

動いているCGハンドに対する身体所有感と運動主体感の錯覚は、ムービンググラバーハンド錯覚と呼ばれ、身体所有感と運動主体感を独立に制御できる利点をもつ[26,27]。この現象を利用すれば、CGハンドに対して、(i)「身体所有感」はあるが「運動主体感」がない条件、(ii)「運動主体感」はあるが「身体所有感」がない条件を人工的に創り出すことができる。本研究では、これら二つの条件において、身体所有感と運動主体感が運動能力の指標である眼と手の協調運動にどのような影響を与えるかを調べた。

2. 実験方法

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）を提示した。CGハンドを自分の手と感じる「身体所有感」と、自分がCGハンドを動かしていると感じる「運動主体感」を、CGハンドに対して独立に制御できる実験環境を構築し（図1）、条件を設定した。条件(i)では、動いているCGハンドを観察すると、CGハンドを自分の手だと感じるが、そのCGハンドを自分は動かしていないと感じる。一方、条件(ii)では、CGハンドを自分の手だと感じないが、そのCGハンドを自分が動かしていると感じる。もし身体所有感が運動能力に影響を与えるならば、条件(i)で運動能力への効果が現れるはずである。また、運動主体感が運動能力に影響を与えているならば、条件(ii)で運動能力への効果が現れるはずである。

本実験には、29名の被験者が参加した。本研究は東北大

学情報科学研究科・倫理委員会により承認された。

被験者は眼球運動計測器が内蔵されたヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着し、本物の手のように見える3次元形状をもつCGハンドをHMDを通して観察した。CGハンドは被験者の実際の右手の左10度の位置に配置された。また、被験者の右手の人差し指は力覚呈示装置のアームの先端に挿入され、この装置によって指の位置が記録された。被験者はCGハンドの人差し指の先端を眼で追跡するように教示された。本実験では、被験者の手の動きのモード（能動的・受動的）と被験者の手とCGハンドの動きの同期性（同期・非同期）を変えた。これらの条件を組み合わせることで、すべてで4つの条件があった。

一つの試行の中では、最初にCGハンドに対する身体所有感と運動主体感を制御するために、60秒間（2回目以降は10秒間）自分の右手を奥行き方向に前後に繰り返して動かした（ムービンググラバーハンド錯覚誘発試行）。その後、被験者は運動開始地点から右あるいは左に手を動かし、折り返し地点に到達後、運動開始地点に戻った。その際に、被験者はCGハンドの人差し指の先端を追跡眼球運動で追跡した。すべての試行が終わった後、被験者はCGハンドの主観の様相を評価するために質問票に答えた。この質問票は、過去の研究でムービンググラバーハンド錯覚に用いられているものを使用した。

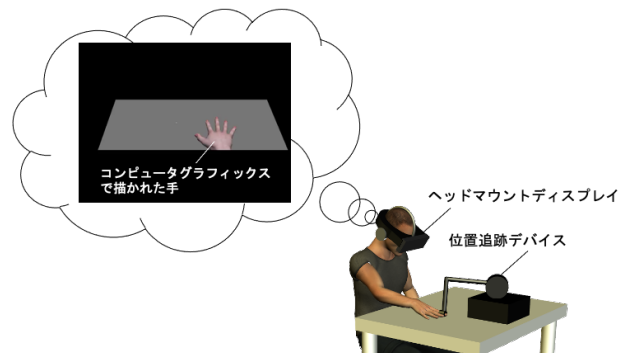


図1. 実験環境。

3. 結果と考察

手に対する眼の遅延時間が運動主体感の強度と有意に相関するが（Spearman correlation test, $r_s = -0.40$, $N = 29$, $P < 0.05$ ）、追従ゲインとサッカード眼球運動の頻度は有意に相関しなかった。一方、身体所有感の強度は、手に対する眼の遅延時間、追従ゲイン、サッカード眼球運動の頻度のいずれも有意に相関しなかった。手に対する眼の遅延時間は、眼と手の協調運動を開始する際に手の動きのオンセットがどれくらい速く眼球運動を誘発するかを示す運動開始の行動指標である。追従ゲインとサッカード眼球運動の頻度は、眼と手の協調運動が進行している際に追従眼球運動がどれくらい精度よく手の動きを追跡できているかを示す運動維持の行動指標である。これらの行動指標の特性を考慮すると、本研究が示す相関の結果は、身体所有感ではなく運動主体感が運動能力を改善し、運動維持よりも運動開始に対して選択的に向上させることを示唆する。

4. むすび

本研究は、バーチャルリアリティ技術[28]を用いて、見ている手に対して身体所有感はあるが運動主体感がない状態やその逆の状態を人工的に創り出す手法を用い、運動主体感だけが運動能力の向上に関わり、運動の開始に選択的であることを示した。研究の詳細については、<https://www.nature.com/articles/s41598-020-79910-x>を参照してください。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進機構 さきがけ (JPMJPR16DB) および JSPS 科研費 JP21K12102 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Newport, R., Pearce, R. & Preston, C. Fake hands in action: embodiment and control of supernumerary limbs. *Exp. Brain Res.* 204, 385–395, 2010.
- [2] Heed, T. et al. Visual information and rubber hand embodiment differentially affect reach-to-grasp actions. *Acta Psychol. (Amst)* 138, 263–271, 2011.
- [3] Banakou, D. & Slater, M. Body ownership causes illusory self-attribution of speaking and influences subsequent real speaking. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 17678–17683, 2014.
- [4] Burin, D. et al. Are movements necessary for the sense of body ownership? Evidence from the rubber hand illusion in pure hemiplegic patients. *PLoS ONE* 10, e0117155, 2015.
- [5] Kilteni, K. & Ehrsson, H.H. Body ownership determines the attenuation of self-generated tactile sensations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 8426–8431, 2017.
- [6] Zapparoli, L. et al. How the effects of actions become our own. *Sci. Adv.* 10.1126/sciadv.aay8301, 2020.
- [7] Jeannerod, M. *The Cognitive Neuroscience of Action* (Blackwell Publishers, Hoboken, 1997).
- [8] Haggard, P. Sense of agency in the human brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 18, 196–207, 2017.
- [9] Botvinick, M. & Cohen, J. Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature* 391, 756, 1998.
- [10] Matsumiya, K. Separate multisensory integration processes for ownership and localization of body parts. *Sci Rep* 9, 652, 2019.
- [11] Gallagher, S. Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends Cogn. Sci.* 4, 14–21, 2000.
- [12] Voss, M. et al. Altered awareness of action in schizophrenia: a specific deficit in predicting action consequences. *Brain* 133, 3104–3112, 2010.
- [13] Haggard, P., Clark, S. & Kalogeras, J. Voluntary action and conscious awareness. *Nat. Neurosci.* 5, 382–385, 2002.
- [14] Newport, R., Pearce, R. & Preston, C. Fake hands in action: embodiment and control of supernumerary limbs. *Exp. Brain Res.* 204, 385–395, 2010.
- [15] Zopf, R., Truong, S., Finkbeiner, M., Friedman, J. & Williams, M.A. Viewing and feeling touch modulates hand position for reaching. *Neuropsychologia* 49, 1287–1293, 2011.
- [16] Kammers, M.P., Kootker, J.A., Hogendoorn, H. & Dijkerman, H.C. How many motoric body representations can we grasp? *Exp. Brain Res.* 202, 203–212, 2010.
- [17] Pia, L., Garbarini, F., Fossataro, C., Burin, D. & Berti, A. Sensing the body, representing the body: evidence from a neurologically based delusion of body ownership. *Cogn. Neuropsychol.* 33, 112–119, 2016.
- [18] Fotopoulou, A. et al. The role of motor intention in motor awareness: an experimental study on anosognosia for hemiplegia. *Brain* 131, 3432–3442, 2008.
- [19] Fourneret, P. & Jeannerod, M. Limited conscious monitoring of motor performance in normal subjects. *Neuropsychologia* 36, 1133–1140, 1998.
- [20] Kammers, M. P., de Vignemont, F., Verhagen, L. & Dijkerman, H. C. The rubber hand illusion in action. *Neuropsychologia* 47, 204–211, 2009.
- [21] Kammers, M. P., Longo, M. R., Tsakiris, M., Dijkerman, H. C. & Haggard, P. Specificity and coherence of body representations. *Perception* 38, 1804–1820, 2009.
- [22] Tsakiris, M. & Haggard, P. Experimenting with the acting self. *Cogn. Neuropsychol.* 22, 387–407, 2005.
- [23] Steinbach, M.J. & Held, R. Eye tracking of observer-generated target movements. *Science* 161, 187–188, 1968.
- [24] Chen, J., Valsecchi, M. & Gegenfurtner, K. R. Role of motor execution in the ocular tracking of self-generated movements. *J. Neurophysiol.* 116, 2586–2593, 2016.
- [25] Chen, J., Valsecchi, M. & Gegenfurtner, K. R. LRP predicts smooth pursuit eye movement onset during the ocular tracking of self-generated movements. *J. Neurophysiol.* 116, 18–29, 2016.
- [26] Kalckert, A. & Ehrsson, H. H. Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency. *Front. Hum. Neurosci.* 6, 40, 2012.
- [27] Matsumiya, K. & Shioiri, S. Moving one’s own body part induces a motion aftereffect anchored to the body part. *Curr. Biol.* 24, 165–169, 2014.
- [28] Tachibana, R. & Matsumiya, K. Accuracy and precision of visual and auditory stimulus presentation in virtual reality in Python 2 and 3 environments for human behavior research. *Behavior Research Methods* (in press).