

視覚・触覚刺激の同期を用いた全身運動をするアバターへの 身体所有感と運動錯覚の誘発方法の検討

福本 慎太郎^{†1,a)} 成願 元喜^{†1,b)} 三野 星弥^{†1,c)} 板谷 玲哉^{†1,d)} 中山 一輝^{†1,e)}
山岡 悠^{†2,f)} Mahzoon Hamed^{†1,g)}

概要：スポーツにおける技術の向上を目指す上で、熟練者の動きを手本として観察しそれを真似る観察学習が多く用いられ、その有用性も示されている。この観察学習において、手本動作をする対象に身体所有感や運動錯覚などの身体に関する錯覚が生じていると学習の効果が上がることが、鍵盤押し下げ運動や片手ボール回しなどにおいて報告されている。これらの先行研究では身体の一部を用いた運動の学習のみを扱っていたが、これを複雑な動きを伴う全身運動でも実現できれば、多くの人々の助けとなることが期待される。しかし、観察者が静止した状態で、全身運動を伴う手本動作の観察学習を行うという状況においても、身体所有感および運動錯覚を誘発できるかは明らかになっていない。よって本研究では、視覚・触覚刺激の同期によって、全身運動を行うアバターを静止状態で観察する学習者に対して、身体所有感および運動錯覚を誘発できるかを確認することを目的とする。そこで我々は、ヘッドマウントディスプレイと振動モータを用いて、視覚刺激と触覚刺激を任意の場所とタイミングで観察者に与えることができるシステムを開発し、同期された視覚・触覚刺激を与えることで全身運動を行うアバターに対してこれらの錯覚が誘発されるかを検証した。その結果、視覚・触覚刺激の場所に関わらず、視覚・触覚刺激が同期することで、全身運動を行うアバターを静止状態で観察する学習者に対して、身体所有感および運動錯覚を誘発できることが確認された。今後は、被験者実験を再度行い、本システムが全身運動の観察学習効果を向上させられるかを検証する予定である。

キーワード：観察学習, 全身運動の学習, 視覚・触覚刺激の同期, 身体所有感, 運動錯覚

A Method for Inducing a Sense of Body Ownership and a Motor Illusion in an Avatar Performing Whole Body Movement By Using Synchronized Visuo-Tactile Stimuli

Abstract: To improve skills in sports, observational learning, in which learners observe and imitate the movements of skilled players, is often used, and it has been shown as useful. It has been reported that the effects of observational learning are enhanced when body-related illusions, such as a sense of body ownership and motor illusion, arise in subjects in such research as keyboard pushdown and one-handed ball spinning. These previous studies dealt only with the learning of movements using a part of the body, but it is expected to help many people if this can be realized for whole-body movements with complex movements. However, it has not been clarified whether it is possible to induce the sense of body ownership and the motor illusions even in the situation where the observer is stationary and observes and learns a model movement with whole-body motion. Therefore, the purpose of this study is to confirm whether the synchronization of visuo-tactile stimuli can induce a sense of body ownership and motor illusions in learners who observe an avatar performing a full-body movement in a stationary state. We developed a system using a head-mounted display and a vibration motor that can provide visuo-tactile stimuli to the observer at arbitrary locations and timings. Then we verified whether the synchronized visuo-tactile stimuli can induce these illusions in an avatar performing whole body movement. As a result, we confirmed that synchronized visuo-tactile stimuli can induce a sense of body ownership and a motor illusion in learners who observe a whole-body-moving avatar in a stationary state, regardless of the location of the visuo-tactile stimuli. In the future, we plan to conduct another subject experiment to verify whether our system can improve the effectiveness of learning to observe whole-body movements.

Keywords: Observational learning, Whole-body-movement learning, Synchronized visuo-tactile stimuli, Sense of body ownership, motor illusion s

1. はじめに

スポーツにおける技術の向上を目指す上で、動作の習得や改善は重要な要素の一つであり、その方法として観察学習がある。観察学習とは、学習動作を既に習得している他者の動きを観察しその行動型を学ぶ学習方法であり、広く一般的に行われている [1]。当該方法をより効果的に行うことができれば、あらゆるスポーツに取り組む人々の技術向上に貢献できることが期待される。

この観察学習において、手本動作をする対象に身体所有感や運動錯覚などの身体に関する錯覚が生じていると学習の効果が上がることが、鍵盤押し下げ運動や片手ボール回しなどにおいて報告されている [2], [3]。身体所有感とは、観測している身体がまさに自分のものであるという主観的感覚であり [4]、この感覚を観察対象に感じると学習効率が向上することが示されている。例えば、仁科らは、液晶モニタに映し出されたコンピュータグラフィックス (CG) による仮想の手が、ピアノを弾く動作に似たキー押しを行う様子を被験者に観察させ、その動作を学習させた。その際、CG の手が観察者のものであるかのように感じさせることで、学習の精度と効率が上がることを報告している [2]。また、運動錯覚とは、運動の実行を伴わない安静状態にも関わらず、あたかも自身が運動しているかのように知覚している心理状態であり [5]、観察学習中にこの錯覚を抱くことで、学習効率が向上することが示されている。例えば、Nojima et al. は非利き手上に設置した液晶モニタに、熟練者のボール回しの映像を映すことで運動錯覚を誘発しながら観察学習を行わせた。その結果、運動錯覚の度合いとボール回しの回数の向上に正の相関が見られたことを報告している [3]。これらの先行研究では、身体の一部を用いた運動の学習のみを扱っていたが、身体に関する錯覚を用いた観察学習を複雑な動きを伴うスポーツにおける全身運動にも応用できれば、多くの人々の助けとなることが期待される。

しかし、観察者が静止した状態で、全身運動を伴う手本動作の観察学習を行うという状況においても、身体所有感および運動錯覚を誘発できるかは明らかになっていない。先行研究では、身体所有感および運動錯覚の誘発方法とし

て視覚・触覚刺激の同期が広く用いられているが、これらの多くは観察者と観察対象の動きが共に静止している状況を扱っており [6][7]、観察対象が全身運動を行っている状況はほとんど扱われていない。なお、視覚・触覚刺激の同期とは、観察対象の身体を筆で撫でる映像を提示しながら、同じタイミングで観察者の身体を実際に筆で撫でるなどをして作られる、観察者の視覚と体性感覚の両感覚から入力される情報が時間的かつ空間的に整合性が取れている状況である [8]。また、身体所有感や運動錯覚を誘発する他の方法も提案されてはいるが、それらの方法は全身運動の観察学習に応用することは難しいと考えられる。例えば、身体所有感を誘発する方法として、観察者とアバターの動きの同期が挙げられるが、アバターが観察者と違う動きをする観察学習では用いることができない。また、運動錯覚の誘発方法に関しても、観察者の四肢の上に液晶モニタを設置し、運動の様子を撮った動画を再生するというものが挙げられるが [9][10][11]、これは映像中の四肢が実際の身体につながって見えることで錯覚が誘発されると考えられており [9]、胴体を含む全身の映像を表示する必要がある全身運動の観察学習では、この方法を用いることは難しい。

そこで本研究では、視覚・触覚刺激の同期によって、全身運動を行うアバターを静止状態で観察する学習者に対して、身体所有感および運動錯覚を誘発できるかを確認することを目的とする。我々は、ヘッドマウントディスプレイ (以下、HMD) と振動モータを用いて、視覚刺激と触覚刺激を任意の場所とタイミングで観察者に与えることができるシステムを開発し、被験者実験を通してどのような視覚・触覚刺激を与えることでこれらの錯覚が効果的に誘発されるかを検証した。なお、観察者に提示するアバターの全身運動としては野球のスイングを用いた。また、観察者に与えた視覚刺激としては円錐形オブジェクトがアバターに触れる映像を、触覚刺激としては観察者の身体に貼り付けたモータの振動を用いた。被験者実験では、効果的に錯覚を誘発する方法を調査するため、視覚・触覚刺激の同期の有無だけでなく、視覚・触覚刺激の個数と位置の違いも独立変数として追加し、身体所有感および運動錯覚の度合いを調査した。

2. 提案システム

提案システムの構成を図 1 に示す。本システムでは観察者にアバターを見せるデバイスとして、VIVE PRO 2 (HTC 製) を使用した。HMD に表示するアバターはゲームエンジンの Unity で作成し、HMD と接続した PC 上で動作する。振動モータは観察者の触覚刺激を与える箇所に貼り付ける。振動モータの制御基板 (Arduino) は PC と有線で接続し、Unity からの命令でモータを振動させる。アバターには振動モータ取り付け位置に円錐形のオブジェクトが描画されており、アバターとの接触を繰り返す様子

^{†1} 現在、大阪大学基礎工学研究科
Presently with Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{†2} 現在、大阪大学情報科学研究科
Presently with Graduate school of Information Science and Technology, Osaka University

a) fukumoto.shintaro@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

b) jogan.genki@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

c) mitsuno.seiya@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

d) itatani.reiya@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

e) nakayama.kazuki@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

f) yu-yamaoka@hiel.ist.osaka-u.ac.jp

g) mahzoon@irl.sys.es.osaka-u.ac.jp

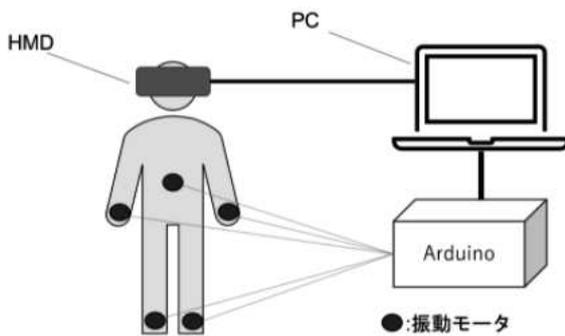


図 1 システム構成

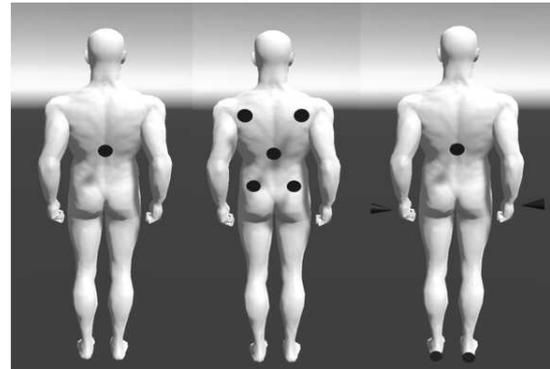


図 2 視覚・触覚刺激の与え方 (左: 背中 1 か所, 中央: 背中 5 か所, 右: 全身 5 か所)

を表示される。その際、接触のタイミングと同期して振動モータが震える。円錐形のオブジェクトがアバターに接触したことを強調するため、接触している間オブジェクトが黒色から赤色に変化する。アバターへの円錐形のオブジェクトの接触と、モータの振動のタイミングが同期することによって、アバターに対する身体所有感と運動錯覚を誘発する。

提案システムを用いた運動学習の手法は、アバター静止フェーズとアバター運動フェーズで前後半に分かれる。2つのフェーズに共通することは、(1) 観察者がアバターを直立で動かずに観察し続けること、(2) アバターに円錐形のオブジェクトが接触するのと同期して振動モータが震えること、の2つである。

最初に行うアバター静止フェーズでは、アバターが被験者に背中を向けて直立する様子を HMD に表示する。観察者とアバターが同じ姿勢で、かつ視覚と触覚の情報が同期している様子を見せることで、アバターへの身体所有感と運動錯覚が誘発されることを期待する。後半のアバター運動フェーズでは、アバターが野球のスイング動作をする様子を HMD に表示する。この野球のスイング動作は、前もって実験者の動作を計測して作成された。動作の計測には VIVE PRO 2 と VIVE Tracker を使用した。VIVE Tracker は体に装着して 3次元空間上の位置を計測できる。今回は頭、両肘、両手首、腰、両膝、両足の計 10 点の位置を計測して動作を記録した。前半のアバター静止フェーズで身体錯覚が促されたアバターが動作する様子を観察することで、観察者がアバターの行う運動を学習する効果が促進されることを期待する。

3. 実験

3.1 被験者

被験者として、男性 12 人が本実験に参加した。年齢は、平均が 25.75 歳、標準偏差が 3.22 歳であった。なお、本システムが提示するアバターの性別が男性であったことから、本実験では、アバターと被験者の見た目の差を小さくするために被験者の性別を男性のみに限定した。

3.2 実験条件

本実験デザインは、視覚・触覚刺激の同期の有無（同期、非同期）と、視覚・触覚刺激の個数と位置（背中 1 か所、背中 5 か所、全身 5 か所）をそれぞれ被験者内要因とした 2×3 の 2 要因計画であった。視覚・触覚刺激は、0.5Hz–1.0Hz の周期で与えられ、モータの 1 回あたりの振動時間は 0.5 秒であった。視覚・触覚刺激が同期しているときは、円錐形オブジェクトがアバターに接触するタイミングとモータが振動するタイミングが一致しており、同期していないときは、円錐形オブジェクトがアバターに接触してから 0.5–0.9 秒後にモータが振動した。また、視覚・触覚刺激の個数と位置は、背中の中心に 1 か所、背中全体に 5 か所、背中と両手足の全身に 5 か所の 3 パターンを設けた (図 2)。

3.3 実験手順

初めに、実験内容の説明をした上で、被験者から実験参加への同意を取った。その後、アバターの観察後に回答させる質問紙の内容を教示した。次に、振動モータを被験者の身体に貼り付け、HMD を被せた。このとき、貼り付けた振動モータの位置と HMD に映っているアバターの上に表示されている円錐型オブジェクトの位置にずれがないかを被験者に確認しながら、振動モータの位置を調整した。そして、被験者に「アバターに焦点を当てた状態で観察し続けてください。また、観察中はなるべく身体を動かさないようにしてください。」と教示をした上で、被験者に直立姿勢を取らせたまま、4 分間アバターを観察させた。前半 2 分間は 2 章で説明したアバター静止フェーズの映像を提示し、後半 2 分間はアバター動作フェーズの映像を提示した。なお、被験者がアバターを観察している最中は、モータの振動音や周囲の雑音が聞こえないようにするため、ホワイトノイズを聞かせ続けた。アバターの観察後、質問紙に回答させた。そして、このアバターの観察と質問紙の回答についての一連の流れを実験条件の数の計 6 回繰り返した。なお、各条件に対応する視覚・触覚刺激を被験者に提示す

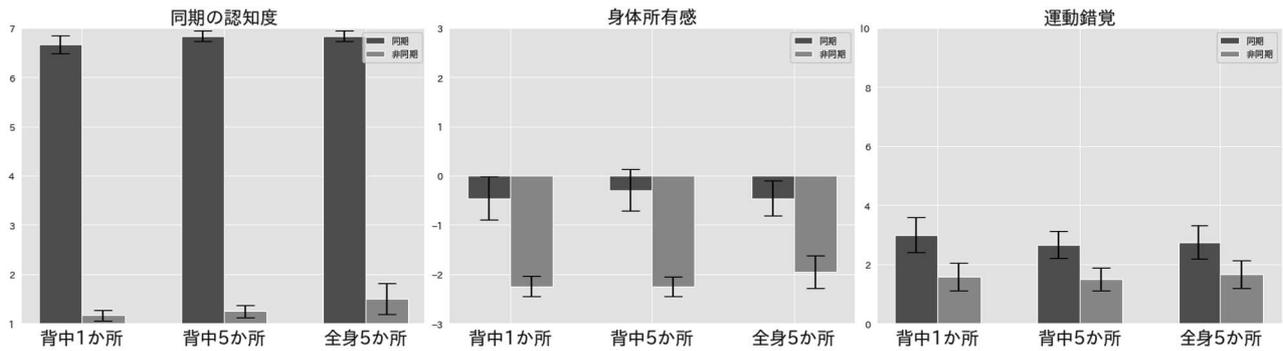


図 3 実験結果. エラーバーは標準誤差である.

表 1 実験結果 (* : $p < .05$, ** : $p < .01$, *** : $p < .001$)

Item	視覚・触覚刺激の同期			視覚・触覚刺激の個数と位置			交互作用		
	F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
同期の認知度	1018.852	< .001***	.989	0.892	.365	.075	0.478	.504	.042
身体所有感	17.769	.001**	.618	0.138	.717	.012	0.529	.482	.046
運動錯覚	6.605	.026*	.375	0.047	.832	.004	0.361	.560	.032

る順番はランダムとし、カウンターバランスをとった。最後に、実験の感想についての簡単なインタビューを行った。

3.4 質問紙

身体所有感を測る指標として、Kalckert et al. が用いた質問紙を参考に、“自分の身体を見ているかのように感じましたか? ”、“アバターの身体が自分の身体であるかのように感じましたか?” の 2 項目を評価した [12]。各項目に対して、7 件法 (-3: 全くそう思わない - +3: とてもそう思う) で回答させ、その平均を身体所有感の得点とした。また、運動錯覚を測る指標として、Nojima et al. が用いた質問紙を参考に“自分の身体が動いているかのように感じましたか?” という 1 項目を評価した [3]。この指標は、11 件法 (0: 全くそう思わない - 10: とてもそう思う) で回答させた。なお、本システムは全身運動をしているアバターの映像を被験者に提示するため、アバターの身体の上に表示される円錐型オブジェクトの移動による視覚刺激と、モータの振動による触覚刺激のタイミングが同期しているか否かが、被験者にとって認知し辛い恐れがある。そのため、提示された視覚・触覚刺激がどの程度同期されているように感じたかを評価した。この指標を本研究では、同期の認知度と呼ぶ。同期の認知度では、“円錐状の物体がアバターの身体に触れたタイミングで、モータが振動したように感じましたか?” という質問に 7 件法 (1: 全く感じなかった - 7: とても感じた) で回答させた。

4. 結果

図 3 と表 1 に、質問紙の結果を示す。同期の認知度、身体所有感、運動錯覚のそれぞれに対して、2 要因分散分析

を行った。その結果、全ての指標において、視覚・触覚刺激の同期の主効果が認められた一方で、視覚・触覚刺激の個数と位置の主効果は認められず、また同期の有無との交互作用も認められなかった。

5. 考察

同期の認知度において視覚・触覚刺激の同期条件の主効果が認められたことから、本実験の設定で 2 つの刺激の同期・非同期条件間の違いは被験者が十分に認識できるものであったことが確認された。

身体所有感、運動錯覚においても同期条件の主効果が認められたことから、観察者が直立した状態で、全身運動するアバターを観察した場合でも、本システムの視覚・触覚刺激の同期によってアバターに対して身体所有感、運動錯覚が誘発されることが確認された。同期条件における身体所有感を測る質問項目への回答の平均値は、背中 1 か所、背中 5 か所、全身 5 か所の各条件でそれぞれ、-0.458, -0.291, -0.458 であった。Kalckert et al. の実験においては、身体所有感を測る質問項目への回答の平均値が 1 以上であることを身体所有感が生じている基準とし、実験では平均値が 1 を超える結果を得ている。アバターへの身体所有感が減退する要因として、視覚的に知覚されるアバターの姿勢と、観察者の姿勢の相違が指摘されており [7]、本実験の回答の平均値が Kalckert et al. の結果よりも低い結果となった要因として、観察するアバターが後半に全身運動を行うことによる影響が考えられる。

以上より、視覚・触覚刺激の同期によって全身運動をしているアバターに対して身体所有感と運動錯覚を誘発する効果を確認できたが、身体所有感に関しては静止したアバ

ターに対して誘発されるものよりは低下することが分かった。この結果から、全身運動するアバターに対して身体所有感と運動錯覚が生じることによって、アバターの全身運動から観察者がその運動を学習する効果を促進できることが期待できる。

本実験では視覚・触覚刺激の個数と位置の違いによる身体所有感および運動錯覚への有意な影響は確認されなかった。実験後に行ったインタビューでは各条件について、「全身5か所に刺激がある場合は振動を敏感に感じられた」という回答があった一方、「刺激が5か所にあると注意が分散した」という回答も見られた。被験者によって各条件に対して真逆の印象を与えていることが、視覚・触覚刺激の個数と位置の違いによる差が見られなかった原因であると考えられる。よって、視覚・触覚刺激の個数と位置による影響について、全被験者に一貫した印象を与えられるような条件設定において追加の調査を行う必要がある。本実験を行った背景には、スポーツ動作の観察学習をより効果的なものにするという目的があり、そのために我々は身体所有感や運動錯覚を用いた方法を検討している。その方法においては、どのフェーズにおいて錯覚が誘発されたかは問題ではなく、アバター動作フェーズにおいて錯覚が誘発されている状態であることが重要な要素となる。したがって、今回我々が提案したシステムを用いることで、錯覚を誘発し運動学習の効果を高められることが期待される。一方で本研究は、観察者が静止した状態で、運動するアバターに対して誘発される身体所有感および運動錯覚を調査することが目的であった。しかし本実験では被験者がアバター静止フェーズとアバター運動フェーズの両方を観察した後にアンケートに回答しているため、アバター静止フェーズで誘発された身体所有感と運動錯覚が、アバター運動フェーズでどのように変化するかは調査できていない。今後は、各フェーズにおける身体所有感と運動錯覚を調査することで、アバター運動フェーズが与える影響を評価することも検討している。

6. 結論

本研究では、身体所有感および運動錯覚を誘発させることで全身運動の観察学習効果が向上するという考えのもと、HMDと振動モータを用いた観察学習システムを開発し、被験者実験を通して、どのような視覚・触覚刺激を与えることでこれらの錯覚が効果的に誘発されるかを検証した。その結果、観察者が直立した状態で全身運動をするアバターを観察した場合でも、視覚・触覚刺激が同期することで身体所有感および運動錯覚が誘発されることが確認された。その一方で、本実験では、視覚・触覚刺激の個数と位置の違いがこれらの錯覚の度合いに与える影響までは確認できなかったため、刺激の個数と位置の条件を増やした追実験を行う必要がある。今後は、被験者実験を再度行い、

本システムが全身運動の観察学習効果を向上させられるかを検証する予定である。

謝辞 本研究は、文部科学省博士課程教育リーディングプログラムの補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Bandura, A.: *Observational Learning*, John Wiley and Sons, Ltd (2008).
- [2] 仁科繁明, 石井孝洋: 身体感覚錯覚下での運動学習の促進, 日本知能情報フジ学会フジシステムシンポジウム講演論文集, Vol. 30, pp. 666-669 (2014).
- [3] Nojima, I., Koganemaru, S., Kawamata, T., Fukuyama, H. and Mima, T.: Action observation with kinesthetic illusion can produce human motor plasticity, *European Journal of Neuroscience*, Vol. 41, No. 12, pp. 1614-1623 (2015).
- [4] 大内田裕, 須藤珠水, 出江紳一: リハビリテーションにおける脳内身体表現と評価指標, 計測と制御, Vol. 56, No. 3, pp. 181-186 (2017).
- [5] 金子文成, 稲田 亨, 松田直樹, 小山 聡, 柴田恵理子: 四肢の視覚誘導性自己運動錯覚に係る生理学的機序とリハビリテーションへの応用, バイオメカニズム, Vol. 23, pp. 97-106 (2016).
- [6] Lenggenhager, B., Tadi, T., Metzinger, T. and Blanke, O.: Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness, *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1096-1099 (2007).
- [7] Banakou, D. and Slater, M.: Embodiment in a virtual body that speaks produces agency over the speaking but does not necessarily influence subsequent real speaking, *Scientific Reports*, Vol. 7 (2017).
- [8] Tsakiris, M. and Haggard, P.: The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution., *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 31, No. 1, pp. 80-91 (2005).
- [9] Kaneko, F., Yasojima, T. and Kizuka, T.: Kinesthetic illusory feeling induced by a finger movement movie effects on corticomotor excitability, *Neuroscience*, Vol. 149, No. 4, pp. 976-984 (2007).
- [10] 酒井克也, 池田由美, 山中誠一郎, 野口隆太郎: 視覚誘導性自己運動錯覚が脳卒中片麻痺患者の足関節背屈運動機能障害に与える即時効果の検討, 理学療法科学, Vol. 33, No. 2, pp. 277-280 (2018).
- [11] 加藤淳史, 青山敏之, 河野 豊, 富田和秀, 渡邊信也, 遠藤悠介, 金子文成: 上肢感覚性運動失調を併発した脳卒中片麻痺患者に対する視覚誘導性自己運動錯覚の即時的効果, 理学療法学 Supplement, Vol. 46S1 (2019).
- [12] Kalckert, A. and Ehrsson, H.: Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own: A Dissociation of Ownership and Agency, *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 6, p. 40 (2012).