VR 環境下でのフルボディ錯覚における 遅延視覚フィードバックの影響†

大塚 一輝*¹・嶋田 総太郎*²

フルボディ錯覚は自分のものではない人工的な身体をあたかも自分の身体であるかのように感じる錯覚である。本稿では VR 空間上の人型のアバターに対するフルボディ錯覚について調査した。被験者はアバターが街中を前に進む VR 映像を見ながら、その場で足踏みを行った。その際、アバターと被験者が同じ視点である 1 人称視点とやや後上方からアバターを見る 3 人称視点、アバターの身体の動きと被験者の動きが一致している同期条件とアバターの動きが被験者より 400 ms または 700 ms 遅れる非同期条件、それぞれの組み合わせ（視点×同期条件）で実験を行った。その結果、視点に関わらず動きが同期していれば運動主体感が生起したが、身体所有感は 1 人称視点で同期しているときにのみ生起した。この結果は、VR を用いて自己投射を行うアプリケーションに対して重要な知見を与えるものであるといえる。

キーワード：身体所有感、運動主体感、フルボディ錯覚

1. はじめに

「自己感」の最小の構成要素として身体所有感と運動主体感が提唱されている [1]。身体所有感とはこの身体は自分自身の身体であると感じる感覚であり、運動主体感とはこの運動を引き起こしたのは自分自身であると感じる感覚である。

この自己感は自分の身体以外にも感じられる場合があることが知られており、その一例がラバーハンド錯覚（Rubber Hand Illusion：RHI）である。RHI とは、自分の手と偽物の手（ラバーハンド）が同時に刺激されること（筆で同時に撫でられるなど）によってラバーハンドに対して身体所有感を抱く錯覚現象である [2]。RHI は視覚刺激と触覚刺激に 200–300 ms 以上の時間的なずれがあると起きにくくなる [3]。また、ラバーハンドと実際の手の距離を離すと身体所有感が低下するという結果も報告されている [4, 5]。このことから RHI が生起するためには視覚情報と触覚情報の時空間的整合性が重要であると考えられる。

RHI では被験者は手を動かさないため身体所有感のみ感じられる。一方、偽物の手を自らの手の動きに合わせて動かせるロボットハンド錯覚（Robot Hand Illusion：RoHI）についても報告されている [6, 7]。RoHI では偽物の手を動かすことができるため身体所有感だけでなく運動主体感も抱くことができる。Ismail らは本物の手より偽物の手動きが 290 ms 以上遅れることで身体所有感を抱かなくなり、590 ms 以上遅れることで運動主体感を抱かなくなると報告している [6]。このこと

は、運動主体感が時間的整合性に関して身体所有感よりも寛容であることを示している。また、自分の手と逆向きの偽物の手を動かす場合でも身体所有感は減衰するが運動主体感は感じられることが報告されている [8]。これは、運動主体感が空間的整合性についても寛容であることを示している。

一方で近年では、これらの錯覚現象を全身に適用したフルボディ錯覚（Full Body Illusion：FBI）についても研究が行われている。RHI は仮想の手に対して錯覚を起こす現象であったが、FBI は仮想の身体（全身アバター）に対して錯覚を起こす現象である。FBI は被験者から見た視点によって二つの種類に分けることができる。一つがアバターと同じ視点の 1 人称視点（First person perspective：1pp）で世界を眺める「身体スワップ型」、もう一つがアバターとは別の 3 人称視点（Third person perspective：3pp）からアバターを眺める「体外離脱型」である。身体スワップ型の FBI では、被験者の HMD にアバター視点の映像を表示する。その際、身体を見下ろすような視点で自身の身体とアバターが同時に筆などで刺激されることでアバターに対して身体所有感を抱くことが報告されている [9, 10]。すなわち、視覚と触覚情報が時空間的に一致していることでアバターに対して身体所有感を抱くといえる。一方、体外離脱型の FBI は自己の位置が実際とは異なる位置に感じられるのが特徴である。例としては、被験者の後ろ姿を 2 m 後方からビデオカメラで撮影して HMD に提示しながら、被験者の背中を実験者が筆などで刺激することで、自分の身体を離れたところから見ていているという体外離脱錯覚が起こることが報告されている [11]。体外離脱型の FBI は RHI や身体スワップ型の FBI とは異なり、自己位置の感覚が変容するなど特異な認知メカニズムが関わっていることが議論されている [12]。

過去の FBI の例は身体スワップ型、体外離脱型ともにマネキンや自分の身体の映像を被験者の HMD に映す実験が多かったが、最近では VR 技術の発展により VR を用いた FBI の研究もいくつか報告されている。例として、VR 空間内の鏡を用いて、自身とは別の子どもの身体 [13, 14] やアインシュタインの

† The Effect of Delayed Visual Feedback on the Full Body Illusion Using VR

Itsuki OHTSUKA and Sotaro SHIMADA

*¹ 明治大学 大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meiji University

*² 明治大学 理工学部 電気電子生命科学科
Department of Electronics and Bioinformatics, School of Science and Technology, Meiji University

身体 [15], 黒人の身体 [16] 等に錯覚を起こさせる研究などがある。例えば, Tajadura-Jiménez ら [14] は子どもの身体に FBI を起こさせると成人の身体に FBI を起こさせたときよりも VR 空間内の物体を大きく感じることや, 子どもの身体に FBI を起こさせた状態で自分の声が 4 半音高い子どもの声としてフィードバックされると実験後の発声音の周波数が高くなることを報告している。また, Banakou ら [15] はアインシュタインの身体に錯覚を起こすと老人への差別意識が減り, 認知タスクのパフォーマンスが良くなることを報告している。これらは, 自分とは外見が異なる身体に FBI を引き起こせることだけでなく, アバターの外見や特徴などが逆に被験者の認知に影響を与えることを示している。

Debarba ら [17] は, アバターが 1pp または 3pp で被験者の動きと同期して動く条件と非同期に動く条件を設けて実験を行った。その結果, どちらの視点においても同期条件より非同期条件で運動主体感が低下することが示されている。しかし, Ismail らの RoHI 実験 [6, 7] とは異なり, 非同期条件は事前に動きを記録した VR 映像を用いており, どれくらいの遅延で運動主体感が低下するかは検討されていない（これはタスクが高所から下を覗くというものだったため, 遅延映像では遂行が難しかったためと考えられる）。他の FBI 実験でも 500 ms 以上の遅延を入れた条件を非同期条件とするなど [18], FBI において被験者に対するアバターの動きの遅延が自己感へ与える影響についてはまだ十分には調べられていない。

そこで本稿では, モーションキャプチャデバイスによってアバターを操作できる VR 環境下での FBI について, アバターを 1pp または 3pp で呈示したときにアバターの動きが同期している場合と遅延している場合に錯覚の強度にどのような違いが生じるのかを調べる。先行研究 [6, 7] から, RoHI 錯覚が同期, 300 ms 以上, 600 ms 以上の 3 段階で減衰することが示されているので, 本研究でもそれに倣って 3 条件を設け, それぞれ同期 (100 ms 遅延), 400 ms 遅延条件, 700 ms 遅延条件とした。これによって VR 環境下におけるアバターに対する自己感が視覚フィードバックの遅延によってどのように減衰するかについて検討を行う。

2. フルボディ錯覚実験

2.1 被験者

21 名の健康な男性が実験に参加した (年齢 21.7 ± 0.15 歳, 平均 $\pm$ 標準偏差)。被験者には実験前に実験内容や安全性についての説明を行い, 書面にて実験参加の同意を得た。

2.2 実験環境

被験者はモーションキャプチャデバイス (Perception Neuron, Noitom) とヘッドマウントディスプレイ (HMD) (Oculus rift, Oculus) を装着した。HMD は視野角が約 110° , 解像度が 1080×1200 , リフレッシュレートが 90 Hz であった。

モーションキャプチャデバイスのセンサは磁気の影響を受けやすいため磁場シールド (アンティエミ 4010T, 東京計器ピエーション) の中に入り, 磁場の影響を極力少なくし実験を行った。また, モーションキャプチャデバイスのセンサは計

A. 1人称視点

B. 3人称視点

図 1 実験風景

12 個を用いた。センサの位置は腰・背中・肩・腕・手首・腿・脛 (腰と背中以外は左右両方) であり, Perception Neuron 専用のソフトウェアである AXIS NEURON を用いて全身の動きをアバターに反映させた。

VR 空間の街中の映像は Unity (Unity Technologies) を用いて作成した。

モーションキャプチャデバイスによって取得した実際の被験者の動きから VR 空間のアバターに動きが反映されるまでの遅延時間はハイスピードカメラ (EX-F1, CASIO) で測定したところ約 100 ms であった。Ismail ら [6] において約 190 ms 以内の遅延では身体所有感に影響を与えないことが示されているため, 今回の内在遅延は実験に影響を及ぼさないと判断した。

2.3 実験手順

実験では, 被験者に 1.0 m/s で街中を前に進む VR 映像を見せながらその場で 60 秒間足踏みを行わせた (図 1)。足踏みについては, 実験者が手本を示しながら「通常歩くスピードより遅めに, 一定のペースで腿をしっかりと上げ, その場から動かないようにすること。首を動かせる範囲は前方 180° 以内であり, 後ろを見ないこと。もし移動していると思ったら足踏みしながら元の位置であろう場所に戻ること。」と教示した。歩く速度が速すぎると腿が上がり切らず, アバターの動きが小さくなってしまうことが起こりうる。そのため, 少し遅めに腿をしっかりと上げて歩くように教示した。また, 真っ直ぐ前を向いた状態であるとアバターの一部が映らない。そのため, 20 秒ごとに約 5 秒間アバターの足元を見るように教示することで全身を視界に入れ, 錯覚の生起を促した。

本実験前, VR 空間とアバターの動きに慣れるため, VR 空間内に設置された鏡に映った像を見ながらアバターの動きを確かめる動作をするよう被験者に教示した。この時, アバターの顔は映らないようにした。同時に, 教示した足踏みの練習を行ってもらうことで VR 酔いや機器の不具合がないか等を確認した。

その後, 本実験を行った。錯覚を変化させる要因として視点 (1pp, 3pp), アバターと被験者の動きに遅延が入るか (同期, 遅延 400 ms, 遅延 700 ms) の二つの要因を設け, 2×3 の 6 条件で本実験を行った。3pp では 2 m 後方からアバターを見る視点を設定した。同期条件では, 約 100 ms の内在遅延があった (2.2 節)。遅延条件の遅延時間 (400 ms, 700 ms) はこの内在遅延を含めた時間である。被験者が足踏みを開始して 1 分間経過すると自動的に VR 画面が切り替わり, VR 画面上に「実験終了です。目を閉じ, 両足を閉じた状態でお待ちください。」

表 1 FBI アンケート

項目	アンケートの内容
身体所有感	1. 自分の身体を見ているかのように感じた
	2. アバターの身体が自分の身体であるかのように感じた
身体所有感 ダミー	3. 自分の身体がアバターに変わったかのように感じた
	4. 二つ以上の身体を持っているかのように感じた
運動主体感	5. アバターの身体は、私の意思に従うように、思った通りに動いた
	6. アバターの身体の動きを私がコントロールしているかのように感じた
運動主体感 ダミー	7. アバターの身体が私の意志をコントロールしているかのように感じた
	8. アバターの身体が私の動きをコントロールしているかのように感じた

とメッセージが呈示され、その 3 秒後に画面が暗くなり実験終了となる。その後、主観評価アンケート（2.4 節参照）に答えてもらった。被験者はそれぞれの実験条件につき 1 試行ずつ実験を行った。実験ごとに休憩を設け、VR 酔いや疲労などがなければ確認をした。休憩時間は被験者に委ねたが最低でも 2 分は実験間隔を空けた。順序効果を避けるため六つの実験条件の呈示順序は被験者間でカウンターバランスを取った。

2.4 主観評価アンケート

被験者は各条件が終わるごとにアンケート（主観評価）に答えた。アンケートは Kalckert ら [8] の実験で用いられたものを今回の実験に合わせた内容に変更し日本語に翻訳したものを使用した（表 1）。身体所有感と運動主体感およびそのダミー項目の全 8 項目について「とても思う (+3)」から「まったく思わない (-3)」までの 7 段階リッカート尺度を用いて回答させた。2 項目は身体所有感に関するもの、2 項目は運動主体感に関するもの、残りの 4 項目は身体所有感及び運動主体感のダミーの質問であった。それぞれ身体所有感、運動主体感に関する 2 項目ずつを被験者ごとに平均をとることでその被験者の身体所有感及び運動主体感のアンケートスコアとした。

身体所有感、運動主体感それぞれのアンケートスコアが 0 よりも有意に高い場合 (t 検定, 有意水準 5%), アバターに対して身体所有感、運動主体感を抱いたと定義した。

3. 実験結果

図 2 に身体所有感・運動主体感についての各条件におけるアンケート結果、図 3 にダミー項目のアンケート結果を示す。値は全被験者におけるアンケートスコアの平均値を示しており、エラーバーは標準誤差である。

各条件において 0 との t 検定を行ったところ、身体所有感では 1pp の同期条件において有意に高いアンケートスコアが見られ ($t(20) = 2.12, p < 0.05$)、運動主体感では 1pp の同期条件 ($t(20) = 4.01, p < 0.001$) 及び 3pp の同期条件

図 2 各条件における身体所有感と運動主体感

図 3 各条件におけるダミー項目のアンケートスコア

($t(20) = 6.30, p < 0.001$) において有意に高いアンケートスコアが見られた。それ以外の条件およびダミー項目ではすべて負の値となった。

条件間の差を詳しく見るため、視点 [1pp, 3pp] と遅延 [同期, 遅延 400 ms, 遅延 700 ms] を独立変数, 自己感 [身体所有感, 運動主体感] を従属変数とする, Wilks のラムダを用いた多変量分散分析 (MANOVA) を行った。MANOVA を用いることによって、視点と遅延の違いが身体所有感と運動主体感にどのように影響を与えるかを一度に調べることができ、身体所有感と運動主体感別々に ANOVA を行うよりも第一種過誤の増大を防ぐことができる。MANOVA の結果、自己感、視点、遅延のすべてにおいて主効果がみられた (自己感, $F(1, 20) = 14.2, p < 0.005$; 視点, $F(1, 20) = 4.38, p < 0.05$; 遅延, $F(2, 19) = 15.0, p < 0.001$)。また、自己感と視点 ($F(1, 20) = 8.02, p < 0.05$) および自己感と遅延 ($F(2, 19) = 3.58, p < 0.05$) に交互作用が見られた。それ以外の交互作用は見られなかった ($p > 0.1$)。

自己感と視点の交互作用について下位検定を行ったところ、身体所有感における 1pp と 3pp の間 ($F(1, 20) = 8.28, p < 0.01$)、および 3pp における身体所有感と運動主体感の間 ($F(1, 20) = 28.0, p < 0.001$) で有意なアンケートスコアの差が見られた (図 4)。

同様に、自己感と遅延の交互作用について下位検定を行っ

図4 自己感と視点の交互作用

図5 自己感と遅延の交互作用

たところ、同期条件及び遅延 400 ms 条件において身体所有感と運動主体感のアンケートスコアの間に有意な差があることが分かった（同期, $F(1, 20) = 27.5$, $p < 0.001$; 遅延 400 ms, $F(1, 20) = 6.42$, $p < 0.05$). また、身体所有感と運動主体感どちらにおいても遅延の単純主効果が見られたため、多重比較（テューキーの HSD 検定）を行った。その結果、身体所有感において同期条件と遅延 400 ms 条件の間（ $HSD = 1.20$, $p < 0.001$ ）および同期条件と遅延 700 ms 条件の間（ $HSD = 1.03$, $p < 0.005$ ）に有意なアンケートスコアの差が見られた。同様に、運動主体感においても同期条件と遅延 400 ms 条件の間（ $HSD = 1.20$, $p < 0.001$ ）および同期条件と遅延 700 ms 条件の間（ $HSD = 1.20$, $p < 0.001$ ）に有意なアンケートスコアの差が見られた（図 5）。

4. 考察

今回の実験では、VR 環境において自分の身体の動きをアバターに投射した際の視点とアバターの動きの遅れによる錯覚の違いを調べた。その結果、身体所有感は 1pp の同期条件のみにおいて生起し、運動主体感は 1pp 及び 3pp の同期条件で生起した。自己感と視点の交互作用の下位検定の結果から、3pp における身体所有感が 1pp での身体所有感や 3pp での運動主体感よりも有意に低いことが示された。また、自己感と遅延の交互作用の下位検定の結果から、身体所有感と運動主体感のいずれもが遅延 400 ms 条件と遅延 700 ms 条件よりも同期条件に

おいて有意に高いことが示された。加えて、同期条件では、身体所有感よりも運動主体感が有意に高いことが示された。これらの結果は、VR 環境下での FBI では、運動主体感が生起するためには運動と視覚フィードバックの時間的整合性が、身体所有感が生起するためにはそれに加えて空間的整合性が重要であることが示された。

1pp の同期条件では身体所有感と運動主体感がともに生起するという結果が得られた。これは 1 節でも紹介した Tajadura-Jiménez ら [14] の VR の子供の身体に FBI を起こす実験や Banakou ら [15] のアインシュタインの身体に FBI を起こす実験の結果とも一致している。また、Debarba ら [17] は VR 空間上にマーカーを設置し、そのマーカーを自分の動きが反映されたアバターの足や手でタッチするタスクを行うことで FBI を起こした。これらの実験と同様に、我々の実験においては VR 空間内を歩くことでアバターに対して錯覚を引き起こせたといえる。

視点による効果を詳しく見ていくと同期条件の 3pp においては身体所有感を抱いていなかった。加えて、自己感と視点による交互作用の結果においても 3pp では身体所有感が大きく減少することがわかった。これは Petkova ら [9] のマネキンの身体を 1pp または 3pp で HMD に映して、マネキンの腹部と被験者の腹部を同時に筆で撫でたとき、1pp でのみ身体所有感を抱いた結果や、Maseli ら [19] の VR 空間のアバターの足と被験者の足に同時に棒状のもので刺激を与えた際、1pp のみで身体所有感を抱いた結果と一致する。

ただし、これら二つの実験において 1pp は我々の実験と似たような視点であったが 3pp はアバターを対面から見る視点や斜めの角度から見る視点であった。一方で、我々の実験と同様に身体を動かすことができる FBI 実験を行った Debarba ら [17] は、アバターを後ろから見ている 3pp においても身体所有感が生起したと報告している。我々の実験との違いとして、Debarba らの実験では足もとに VR 空間と一致した段差が存在し、実験中に足で段差の角を被験者が確かめていることである。すなわち、視覚と運動の一致だけでなく足の裏からの触覚情報が同期していた。これらのことを踏まえると空間的整合性の取れていない 3pp においてはどのような方向からアバターを見たとしても身体所有感を減少させる要因になるが、複数の感覚刺激が同期して入力されることによって 3pp でも身体所有感が生起する可能性はあるといえる。

運動主体感は同期条件の 3pp においても生起することが示された。Kondo らは我々と同様に後ろからの視点の 3pp を用いた FBI 実験において、アバターの身体の手と足以外が透明な場合にも自己感が生起するかを調べている [20]。その結果、身体が透明であるかに関わりなく 3pp でも運動主体感が生起したと報告されており、我々の結果と一致している。

今回の実験においては、1pp と 3pp における運動主体感には差がないことが示された。このことは、手の向きを 180° 変えても運動主体感が生起した Kalckert ら [8] の RoHi 実験の結果と同様に、FBI においても運動主体感が空間的整合性に対して寛容であることを示唆している。ただし、Kalckert らの実験では手が逆向き（ 180° ）のときよりも通常の向きのときのほうが

運動主体感を強く生じたことを報告しているが、本研究ではそのような違いは見られなかった。これは我々の実験の 3pp 条件では、位置の整合性は取れていないものの向きの整合性は取れていた（どちらも前向き）ことから、1pp との差が見られなかったのではないかと考えられる。

今回の実験では、身体所有感と運動主体感どちらにおいても同期条件と遅延 400 ms 条件、同期条件と遅延 700 ms 条件の間に有意差が見られた。このことから、自分とアバターの身体の動きの間に少なくとも 400 ms のずれが入るとアバターに対する身体所有感と運動主体感が低下すると考えられる。Nakul ら [18] は VR 空間上のアバターの背中を被験者が見る視点において、モーショントラッキングができるコントローラーでアバターの背中と被験者の背中を同時または非同期で撫でる実験を行った。その際、500 ms の遅延が入った非同期条件よりも同期条件で身体所有感が有意に高いと報告している。今回の我々の実験では VR 空間上アバターの運動に 400 ms 以上の遅延を入れることで身体所有感だけでなく運動主体感の減衰も起こることが示された。

我々の今回の実験における遅延による身体所有感と運動主体感の減衰は Ismail らの RoHI の結果とよく似ている [6, 7]。すなわち、RoHI だけでなく、FBI においても視覚情報と運動情報の時間的整合性が身体所有感、運動主体感を抱くために重要であるといえる。ただし、Ismail らは 290 ms 以上の遅延で身体所有感が生じなくなり、590 ms 以上の遅延で運動主体感も生じなくなると報告している [6, 7]。一方、今回の FBI 実験では 400 ms 以上の遅延で身体所有感も運動主体感も生じていない。これは、FBI では RoHI よりも時間的整合性に関して寛容ではないことを示唆している。これは、被験者の見ている対象が RoHI では手のみ（身体の一部）であるのに対して FBI は全身であることが原因として考えられるかもしれない。動きが一致していない身体の範囲が広がることで、錯覚が起こるために必要な感覚間の時間的整合性がより鋭敏になることが示唆される。

5. むすび

本研究では、VR 空間上の人型アバターに対して、視覚情報と運動情報の統合から生じられる FBI について調査した。その際にアバターを見る視点と被験者の動きがアバターに反映されるまでの遅延時間による FBI の変化を調べた。その結果、1pp の同期条件では身体所有感と運動主体感の両方が生じたが、3pp の同期条件では身体所有感が生じないことがわかった。また遅延条件（400 ms、700 ms）ではどちらの自己感も生じなかった。これらの結果はアバターに対して身体所有感を抱くためには少なくとも 300 ms 程度以内の時間的整合性と視点の空間的一致が重要であるが、運動主体感の場合は空間的整合性については比較的寛容であることを示している。身体所有感や運動主体感を高めることは、VR 空間での経験をより現実の経験に近づけることに繋がると考えられる。本研究の結果は、モーションキャプチャデバイス等によってアバターを操作する VR アプリケーションの開発に重要な知見を与えるものであるといえる。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 20H04057、21H03785 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Gallagher: "Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science," *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.4, No.1, pp. 14-21, 2000.
- [2] M. Botvinick and J. Cohen: "Rubber hands 'feel' touch that eyes see," *Nature*, Vol.391, No.6669, Article No.756, 1998.
- [3] S. Shimada, T. Suzuki, N. Yoda, and T. Hayashi: "Relationship between sensitivity to visuotactile temporal discrepancy and the rubber hand illusion," *Neuroscience Research*, Vol.85, pp. 33-38, 2014.
- [4] D. M. Lloyd: "Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand," *Brain and Cognition*, Vol.64, No.1, pp. 104-109, 2007.
- [5] A. Kalckert, A. T. Perera, Y. Ganesan, and E. Tan: "Rubber hands in space: the role of distance and relative position in the rubber hand illusion," *Experimental Brain Research*, Vol.237, No.7, pp. 1821-1832, 2019.
- [6] M. A. F. Ismail and S. Shimada: "'Robot' hand illusion under delayed visual feedback: Relationship between the senses of ownership and agency," *PLoS One*, Vol.11, No.7, e0159619, 2016.
- [7] M. A. F. Ismail and S. Shimada: "Activity of the inferior parietal cortex is modulated by visual feedback delay in the robot hand illusion," *Scientific Reports*, Vol.9, No.1, Article No.10030, 2019.
- [8] A. Kalckert and H. H. Ehrsson: "Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency," *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.6, Article No.40, 2012.
- [9] V. I. Petkova, M. Khoshnevis, and H. H. Ehrsson: "The perspective matters! Multisensory integration in ego-centric reference frames determines full-body ownership," *Frontiers in Psychology*, Vol.2, Article No.35, 2011.
- [10] A. Guterstam, Z. Abdulkarim, and H. H. Ehrsson: "Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses," *Scientific Reports*, Vol.5, Article No.9831, 2015.
- [11] B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger, and O. Blanke: "Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness," *Science*, Vol.317, No.5841, pp. 1096-1099, 2007.
- [12] A. Serino, A. Alsmith, M. Costantini, A. Mandrigin, A. Tajadura-Jimenez, and C. Lopez: "Bodily ownership and self-location: components of bodily self-consciousness," *Consciousness and Cognition*, Vol.22, No.4, pp. 1239-1252, 2013.
- [13] D. Banakou, R. Groten, and M. Slater: "Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes," *Proc. of the National Academy of Sciences*, Vol.110, No.31, pp. 12846-12851, 2013.
- [14] A. Tajadura-Jimenez, D. Banakou, N. Bianchi-Berthouze, and M. Slater: "Embodiment in a Child-Like Talking Virtual Body Influences Object Size Perception, Self-Identification, and Subsequent Real Speaking," *Scientific Reports*, Vol.7, Article No.9637, 2017.
- [15] D. Banakou, S. Kishore, and M. Slater: "Virtually Being Einstein Results in an Improvement in Cognitive Task Performance and a Decrease in Age Bias," *Frontiers in Psychology*, Vol.9, Article No.917, 2018.
- [16] D. Banakou, P. D. Hanumanth, and M. Slater: "Virtual Embodiment of White People in a Black Virtual Body Leads to a Sustained Reduction in Their Implicit Racial Bias," *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.10, Article No.601, 2016.
- [17] H. G. Debarba, S. Bovet, R. Salomon, O. Blanke, B. Herbelin, and R. Boulic: "Characterizing first and third person viewpoints

and their alternation for embodied interaction in virtual reality,” *PLoS one*, Vol.12, No.12, e0190109, 2017.

- [18] E. Nakul, N. Orlando-Dessaints, B. Lenggenhager, and C. Lopez: “Measuring perceived self-location in virtual reality,” *Scientific Reports*, Vol.10, No.1, Article No.6802, 2020.
- [19] A. Maselli and M. Slater: “Sliding perspectives: dissociating ownership from self-location during full body illusions in virtual reality,” *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.8, Article No.693, 2014.
- [20] R. Kondo, M. Sugimoto, K. Minamizawa, T. Hoshi, M. Inami, and M. Kitazaki: “Illusory body ownership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity,” *Scientific Reports*, Vol.8, Article No.7541, 2018.

(2020年8月18日 受付)
(2020年11月27日 採録)

[問い合わせ先]

〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

明治大学 理工学部 電気電子生命学科

嶋田 総太郎

TEL: 044-934-7291

E-mail: sshimada@meiji.ac.jp

—— 著 者 紹 介 ——

おおつか いつき
大塚 一輝 [非会員]

2019年明治大学理工学部電気電子生命学科卒業。現在、明治大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程在学中。主にVR技術を用いたフルボディ錯覚の研究に従事。

しまだ そうたろう
嶋田 総太郎 [非会員]

2001年慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻博士後期課程修了。博士（工学）。東京大学大学院総合文化研究科にて日本学術振興会特別研究員（PD）等を経て、2006年から明治大学理工学部専任講師。現在、同教授。脳機能イメージングおよび行動実験の手法を用いて、身体性と社会性の認知脳科学研究に従事。日本認知科学会、人工知能学会、Society for Neuroscience、他各会員。

The Effect of Delayed Visual Feedback on the Full Body Illusion Using VR

by

Itsuki OHTSUKA and Sotaro SHIMADA

Abstract:

The full body illusion (FBI) is an illusion of the self-ownership and self-agency towards an avatar that moves synchronously with one's own body movement. Here we investigated the FBI using an avatar that moves with a short delay from the participant's movement. Participants made their steps on the spot while watching a VR scene as if the avatar walked in a street either synchronously (100-ms delay) or asynchronously (400- or 700-ms delay) with their steps. The avatar was presented in either 1st-person or 3rd-person perspective. The result showed that the participants felt the sense of ownership only toward the avatar that moved synchronously in the 1st-person perspectives. Our results suggest that our body image can be projected on the avatar that is presented in the 1st-person perspective and moves synchronously with one's own body.

Keywords: sense of ownership, sense of agency, full body illusion

Contact Address: **Sotaro SHIMADA**

Department of Electronics and Bioinformatics, School of Science and Technology, Meiji University

1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 214-8571, Japan

TEL: +81-44-934-7291

E-mail: sshimada@meiji.ac.jp