



# 能動的運動により変化する外的環境が インビジブル・ボディ・イリュージョンに及ぼす影響

Effect of external environment affected by active movement on invisible body illusion

後藤 慶多<sup>1)</sup>, 森 将輝<sup>2)</sup>

Keita GOTO and Masaki MORI

1) 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 (〒 252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322, kag@sfc.keio.ac.jp)

2) 慶應義塾大学 環境情報学部 (〒 252-0882 神奈川県藤沢市遠藤 5322, morima@sfc.keio.ac.jp)

**概要:** 従来のフルボディ・イリュージョン研究では、可視身体の提示手法は多数の知見が蓄積されているが、不可視な透明身体の提示方法は未だ明らかではない。本研究は、透明身体アバタと身体運動に伴って動く物体(影、布・水面)を用いて、身体以外の要素がインビジブル・ボディ・イリュージョンに与える影響を検討した。結果として、いずれの条件も透明身体は知覚されなかったが、運動主体感は生起された。

**キーワード:** インビジブル・ボディ・イリュージョン, 能動的運動, 身体所有感, 運動主体感

## 1. 背景

人は、自己の身体を自分自身のものであると認識するだけでなく、自己の身体以外の対象を自己の身体であると認知することがある。例えば、外部の対象を自己の身体と錯覚する現象としてラバーハンド・イリュージョン [1] やフルボディ・イリュージョン [2] などがよく知られている。フルボディ・イリュージョンの研究では、頭部装着型ディスプレイを通して 200 cm 前方にアバタが提示されている場合に、体験者とアバタの背中に対して与えられる受動的な触覚刺激が時間的に非同期である条件よりも同期である条件の方が、アバタに身体所有感が生じることが報告されている [3]。フルボディ・イリュージョンを生起させるために用いられる情報は、受動的な刺激と能動的な身体運動の 2 種類に分類される。受動的な刺激では、観察者の身体と頭部装着型ディスプレイを通して観察されるアバタの両方に対して、同時かつ同位置に筆で撫でる手法がしばしば用いられている。能動的な身体運動では、観察者とアバタの身体運動をモーションキャプチャシステムなどにより同期させ、頭部装着型ディスプレイを通してアバタを視覚的に提示する手法が用いられている [4]。身体錯覚の生起には、体性感覚、身体的視覚情報、身体周辺空間、身体性に関する 4 つの制約条件が重要であることが指摘されている [5]。ただし、これら 4 つの制約は、身体部位や全身が視覚的に観察可能であることを前提としている。

近年、視覚的に観察できない身体を用いたフルボディ・イリュージョンが発見されている [7, 8]。この現象は、インビジブル・ボディ・イリュージョンや透明身体錯覚などと呼ばれる。先行研究では、観察者の身体に対する受動的な触覚刺激と、対象が全く提示されていない空間に対する視覚刺

激が提示された際、非同期である場合よりも同期している場合の方が、アバタなどの対象が一切提示されていない空間に対してインビジブル・ボディ・イリュージョンが生起することが報告されている [8]。この研究は、対象と環境の間に物理的な境界線が存在するかの検討は考慮されていないため、対象が存在しない場合のインビジブル・ボディ・イリュージョンを取り扱っていると考えられる。また、手と足以外の身体部位が不可視なアバタを用いた能動的運動を行った実験では、インビジブル・ボディ・イリュージョンが生起することが報告されている [6]。手と足のみを視認可能なアバタ、手と足以外を視認可能なアバタ、全身を視認可能なアバタを用いた研究では、身体部位の提示領域が狭くなるほど、身体錯覚の持続時間が短くなり、潜時が長くなり、身体所有感と運動主体感の主観的強度が弱くなることが報告されている [9]。近藤らの研究は、身体の一部が観察可能であるため、アバタと環境の間に物理的な境界線は存在すると考えられる。しかし、能動的運動が可能であり、身体の境界線を有するが不可視な身体であるアバタに対してインビジブル・ボディ・イリュージョンが生起するかは定かでない。

本研究の目的は、能動的な身体運動により変化する外的環境がインビジブル・ボディ・イリュージョンに及ぼす影響を明らかにすることであった。Merleau-Ponty は、人間が外的環境を認識するためには自己の身体が存在する必要があることを現象学的考察に基づき指摘している [10]。この指摘を踏まえると、外的環境に対して自己の身体で働きかけることができれば、インビジブル・ボディ・イリュージョンが生起しうると考えられる。

## 2. 方法

### 2.1 実験参加者

実験参加者は、学生 16 名（男性 7 名、女性 9 名）であった。有効データは、ボディ・イリュージョンが生じなかった 2 名を除き、14 名（男性 6 名、女性 8 名）であった。年齢は、平均が 21.00 歳、SD が 3.54 であった。実験参加者は、実験開始前に実験内容や倫理的配慮に関する説明を受け、書面にて実験参加に同意していた。

### 2.2 装置

視覚刺激は、Unity を用いて制御され、頭部装着型ディスプレイ Oculus Quest 2（Oculus 製、解像度：単眼あたり 1832 × 1920、重量：503g、リフレッシュレート：90Hz）に提示された。身体運動は、床面から高さ 100 cm、実験参加者が実験開始時に立つ位置の前方 200 cm に設置されたモーションキャプチャセンサー Kinect for Windows v2（Microsoft Corp. 製、25 tracked body joints, 30 fps）を用いて計測された。モーションキャプチャセンサーを用いて取得した身体運動は、アセット Kinect v2 Examples with MS-SDK（RF solutions 製）により身体姿勢情報が推定され、Unity と同期していた。Unity 内のアバタは、Kinect v2 Examples with MS-SDK に含まれる人型アバタであり、胴体、手、上腕、前腕に接触判定装置がついていた。頭部装着型ディスプレイおよびモーションキャプチャセンサーは、PC（Dell G5 5500, Dell Technologies Inc. 製、CPU: Core i7-10870H, GPU: GeForce RTX 2060, メモリ: 16 GB）で制御された。実験参加者の胴体が移動可能な実空間の範囲は、実験参加者の初期立ち位置から前方 185 cm 以内、後方 95 cm 以内、左 115 cm 以内、右 85 cm 以内であった。

### 2.3 刺激

視覚刺激は、視環境要因 3 条件および同期性要因 2 条件の組み合わせで構成される 6 種類であった。視環境要因は、身体条件（図 1a）、影条件（図 1b）、布・水面条件（図 1c）であった。身体条件では、実験参加者は、頭部装着型ディスプレイを通して、一辺が 500 cm である正方形の床面上にアバタが観察できた。影条件では、実験参加者は、同床面上にアバタの影のみが観察できた。この影は、アバタが光源（Rotation: 50, -30, 0）からの光を遮る場合に生じるキャストシャドウであった。布・水面条件では、実験参加者は、布と水面が観察でき、アバタおよびそのキャストシャドウが観察できなかった。布と水面は、アバタが接触している場合に、形状が変化した。布は、Unity の Plane オブジェクト（200 cm × 200 cm）に Cloth コンポーネント（Stretching Stiffness: 0.8, Bending Stiffness: 0.2, Sleep Threshold: 0.1）を付与し、市松模様で作成されていた。水面は、アセット Simple Interactive Water for URP VR（simplestar-game 製）を用いて作成された。同期性要因は、同期条件、非同期条件であった。同期条件では、実験参加者の身体運動が仮想空間内において 200 cm 前方に描画された身体アバタ、透明身体アバタ、影アバタに反映されていた。非同期条件では、アセット Dance Animations

FREE（Kevin Iglesias 製）によって身体アバタ、透明身体アバタ、影アバタが動いていた。

### 2.4 手続き

実験参加者は、頭部装着型ディスプレイを装着した状態で 5 分間自由に体を動かしながら、6 種類の視覚刺激のうちいずれか 1 つを観察した。5 分経過後、頭部装着型ディスプレイを着脱した状態で質問紙への回答を求めた。質問紙 10 項目は、先行研究 [1, 6] を改変し、身体の有存在の知覚に関する項目（項目 1. 目の前に人間が存在するように感じた）、身体所有感に関する 4 項目（項目 2. 人間が自分の身体であるように感じた；項目 3. 体がまるで 2 つ以上あるように感じた；項目 4. 自分の体を後ろから俯瞰しているように感じた；項目 5. 手と足以外の身体部位も存在しているように感じた）、運動主体感に関する 1 項目（項目 6. 人間は自分の意思に従って動いているように感じた）、自己位置感覚のドリフトに関する 1 項目（項目 9. 自分の本物の体が人間の方に吸い寄せられていると感じる瞬間があった）、没入感に関する 1 項目（項目 10. VR 空間上の出来事が本当に起きている出来事であるように感じた）に加え、本研究で作成された、外的環境に対する運動主体感に関する 2 項目（項目 7. 布の動きは自分が引き起こしているように感じた；項目 8. 水の動きは自分が引き起こしているように感じた）が用いられた。各項目は、7 件法（1: まったくあてはまらない, 2: ほとんどあてはまらない, 3: あまりあてはまらない, 4: どちらともいえない, 5: ややあてはまる, 6: かなりあてはまる, 7: 非常に当てはまる）で評定された。ただし、布や水が存在しない身体条件および影条件では、項目 7 および項目 8 で 1（まったくあてはまらない）と回答することが求められた。実験は、6 条件が各 1 試行ずつ行われた。条件の順序は、実験参加者間でカウンターバランスがとられていた。

## 3. 結果

視環境および同期性がインビジブル・ボディ・イリュージョンに及ぼす影響を明らかにするため、先行研究で用いられていた 8 項目に対する回答データについて、視環境要因（身体条件、影条件、布・水面条件）と同期性要因（同期条件、非同期条件）に関して対応のある二要因分散分析を行った（有意水準 5%；図 2）。項目 1 は、視環境要因の主効果が有意であり（ $F(2, 26) = 19.98, p < .001, \eta_p^2 = .606$ ）、同期性要因の主効果および交互作用が有意でなかった（順に、 $F(1, 13) = 0.043, p = .840, \eta_p^2 = .003$ ； $F(2, 26) = 0.709, p = .709, \eta_p^2 = .501$ ）。ボンフェローニ法による多重比較の結果、同期条件では、身体条件と影条件、身体条件と布・水面条件の間に有意差あり、非同期条件では、身体条件と影条件、身体条件と布・水面条件の間に有意差があった。項目 2 は、同期性要因の主効果と交互作用が有意であり（順に、 $F(1, 13) = 51.7, p < .001, \eta_p^2 = .799$ ； $F(2, 26) = 7.071, p < .001, \eta_p^2 = .352$ ）、視環境要因の主効果が有意でなかった（ $F(2, 26) = .867, p = .432, \eta_p^2 = .062$ ）。多重比較の結果、身体条件および影条件では、同期条件と非同期条件の

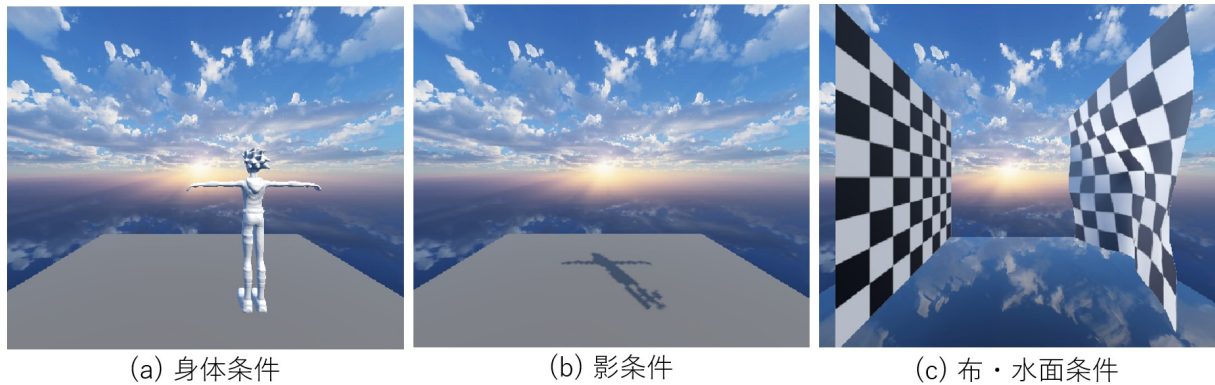


図 1: 実験で使用された頭部装着型ディスプレイ内の視環境。アバタの位置が右に 60 cm ずれている場合を示す。

間に有意差があった。項目 3 は、同期性要因の主効果が有意であり ( $F(1, 13) = 12.28, p = .004, \eta_p^2 = .486$ ), 視環境要因の主効果および交互作用が有意でなかった (順に,  $F(2, 26) = 2.429, p = .099, \eta_p^2 = .163$ ;  $F(2, 26) = .455, p = .640, \eta_p^2 = .034$ )。多重比較の結果, いずれの条件間にも有意差がなかった。項目 4 は、視環境要因の主効果, 同期性要因の主効果と交互作用が有意であった (順に,  $F(2, 26) = 6.702, p = .004, \eta_p^2 = .340$ ,  $F(1, 13) = 7.161, p = .019, \eta_p^2 = .816$ ,  $F(2, 26) = 9.61, p < .001, \eta_p^2 = .425$ )。多重比較の結果, 身体条件および布・水面条件では, 同期条件と非同期条件の間に有意差があり, 同期条件では, 身体条件と布・水面条件の間に有意差があった。項目 5 は、同期性要因の主効果が有意であり ( $F(1, 13) = 7.601, p = .016, \eta_p^2 = .376$ ), 視環境要因および交互作用が有意でなかった (順に,  $F(2, 26) = 1.141, p = .335, \eta_p^2 = .081$ ;  $F(2, 26) = .731, p = .491, \eta_p^2 = .053$ )。多重比較の結果, いずれの条件間にも有意差がなかった。項目 6 は、同期性要因の主効果, 交互作用が有意であり (順に,  $F(1, 13) = 157.9, p < .001, \eta_p^2 = .924$ ,  $F(2, 26) = 9.406, p < .001, \eta_p^2 = .420$ ), 視環境要因の主効果が有意でなかった ( $F(2, 26) = 1.784, p = .188, \eta_p^2 = .121$ )。多重比較の結果, 身体条件および影条件では, 同期条件と非同期条件の間に有意差があり, 同期条件では, 身体条件と布・水面条件の間に有意差があった。項目 9 は、同期性要因の主効果が有意であり ( $F(1, 13) = 7.601, p = .016, \eta_p^2 = .355$ ), 視環境要因の主効果および交互作用が有意でなかった (順に,  $F(2, 26) = .296, p = .746, \eta_p^2 = .022$ ;  $F(2, 26) = 2.398, p = .111, \eta_p^2 = .156$ )。多重比較の結果, いずれの条件間にも有意差がなかった。項目 10 は、視環境要因の主効果同期性要因の主効果および交互作用も有意でなかった (順に,  $f(2, 26) = .764, p = .476, \eta_p^2 = .056$ ;  $F(1, 13) = 1.759, p = .208, \eta_p^2 = .119$ ;  $F(2, 26) = 2.026, p = .152, \eta_p^2 = .135$ )。

本研究で作成された項目 7 および 8 は、布や水面が存在する場合のみ回答可能であった。そこで、同期性がインビジブル・ボディ・イリュージョンに及ぼす影響を明らかにするため、これらの 2 項目に対する回答データについて、同期条件と非同期条件の間に対応のある t 検定を行った。項目 7 および項目 8 は、いずれも有意差があり、非同期条件よりも同期

条件の方が主観的強度が高かった (順に,  $t(13) = 5.421, p < .001, d = 2.769$ ,  $t(13) = 5.056, p < .001, d = 3.060$ )。

#### 4. 考察

本研究の目的は、実験参加者の身体運動により変化が生じる視環境がインビジブル・ボディ・イリュージョンに及ぼす影響を明らかにすることであった。結果から、頭部装着型ディスプレイを通して観察される身体や影の動きが身体運動と同期して変化する場合、同期していない場合よりもフルボディ・イリュージョンの主観的強度が高い傾向が窺える。布と水面の形状が身体運動と同期して変化する場合は、同期していない場合とフルボディ・イリュージョンの程度が変わらなかった。

項目 2, 4, 6 では、身体条件において非同期条件よりも同期条件の方が主観的強度が高かった。本研究で構成された実験環境が可視身体によるフルボディ・イリュージョンを生起させていたことが窺える。同期性がフルボディ・イリュージョンに及ぼす影響は、先行研究で繰り返し報告されている知見である [3, 8, 11]。

本研究は、影を用いた場合に能動的運動がインビジブル・ボディ・イリュージョンを生起しうが、布および水面を用いた場合に能動的運動がインビジブル・ボディ・イリュージョンを生起しないことを見いだした。両者で異なる結果が得られた原因として、人型アバタが観察できるかどうか起因していた可能性が考えられる。近藤らは、インビジブル・ボディ・イリュージョンを探究する際、身体の一部が観察できる実験環境を構築している [6, 9, 12]。この実験環境は、アバタの人らしさが視認できる点において、本研究において影を用いた実験環境と共有している。しかし、布および水面を用いた場合には、人らしさを観察することができない。以上の研究から、インビジブル・ボディ・イリュージョンの生起には、人らしさが視覚情報として含まれる必要がある可能性が示唆された。

本研究は、いくつかの課題が残されている。第一に、布と水面が身体運動以外の要因 (例えば、風) により変化する可能性があることである。先行研究では、自分自身以外に行動を引き起こす他者や装置が存在する状況下である場合、

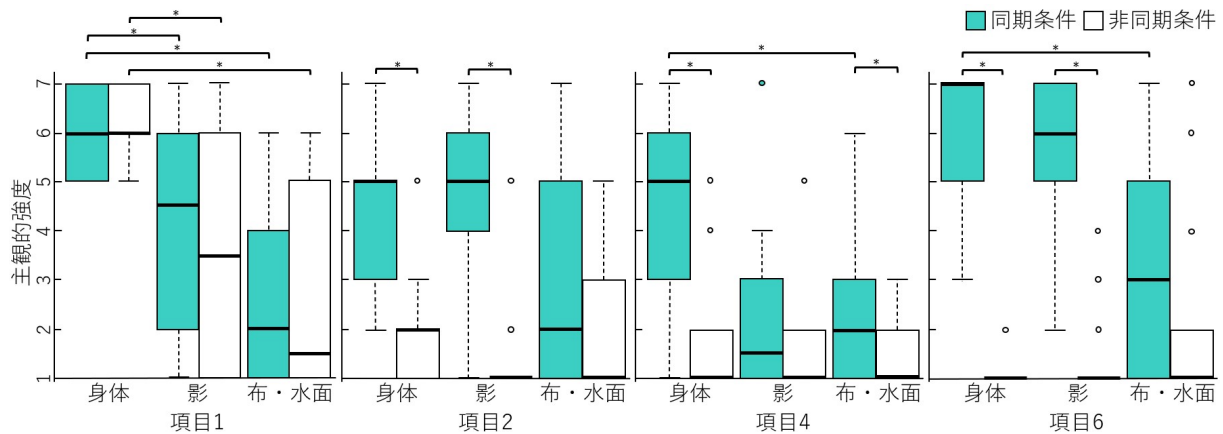


図2: 項目1, 2, 4, 6における主観的強度の結果。身体は身体条件, 影は影条件, 布・水面は布・水面条件を示す。

他者や装置が運動していない条件において自分自身の運動主体感が低下し, 他者の行為であるとしばしば錯覚することが報告されている [13, 14]。外的環境がインビジブル・ボディ・イリュージョンに及ぼす影響をより明確に解明するには, 身体運動のみにより変化が生じる物体 (例えば, タッチパネル) である場合に, インビジブル・ボディ・イリュージョンが生じるかどうかを探究する必要があるだろう。第二に, インビジブル・ボディを後方から三人称視点で観察する実験環境であったことが挙げられる。先行研究では, 一人称視点である場合に, 受動的な視覚・触覚情報がインビジブル・ボディ・イリュージョンを生起することが報告されている [8]。今後, 一人称視点で, 能動的運動を行った場合に外的環境がインビジブル・ボディ・イリュージョンを生起しうるかを確かめることが必要である。

**謝辞** 本研究は, 森泰吉郎記念研究振興基金 2022 年度研究者育成費の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] Botvinick, M. & Cohen, J.: Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see, *Nature*, Vol. 391, p. 756, 1998
- [2] Petkova, V. I., & Ehrsson, H. H.: If I were you: perceptual illusion of body swapping, *PLoS ONE*, Vol. 3, No. 12, Article. e3832, 2008
- [3] Lenggenhager, B., Tadi, T., Metzinger, T., & Blanke, O.: Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness, *Science*, Vol. 317, No. 5841, pp. 1096–1099, 2007
- [4] 石本 浩気・加藤 優貴・北崎 充晃: バーチャルリアリティソーシャルネットワークサービス VRChat における身体所有感実験環境の構築と検証, *基礎心理学研究*. Vol. 40, No. 2, pp. 121–134, 2022
- [5] Blanke, O., Slater, M., & Serino, A.: Behavioral, neural, and computational principles of bodily self-consciousness, *Neuron*, Vol. 88, No. 1, pp. 145–166, 2015
- [6] Kondo, R., Sugimoto, M., Minamizawa, K., Hoshi, T., Inami, M., & Kitazaki, M.: Illusory body own-

ership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity, *Scientific Reports*, Vol. 8, Article. 7541, 2018

- [7] Kondo, R., Tani, Y., Sugimoto, M., Inami, M., & Kitazaki, M.: Scrambled body differentiates body part ownership from the full body illusion, *Scientific Reports*, Vol. 10, Article. 5274, 2020
- [8] Guterstam, A., Abdulkarim, Z., & Ehrsson, H. H.: Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses, *Scientific Reports*, Vol. 5, Article. 9831, 2015
- [9] Kondo, R. & Sugimoto, M.: Effects of virtual hands and feet on the onset time and duration of illusory body ownership, *Scientific Reports*, Vol. 12, Article. 11802, 2022
- [10] メルロ＝ポンティ, M. (著), 竹内 芳郎, 木田 元, 宮本 忠雄 (訳): 知覚の現象学 2, みすず書房, 1974
- [11] 小柳 陽光, 鳴海 拓志, 大村 廉: ソーシャル VR コンテンツにおける普段使いのアバタによる身体所有感と体験の質の向上, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 25, No. 1, pp. 50–59, 2020
- [12] 近藤 亮太, 上田 祥代, 杉本 麻樹, 南澤 孝太, 稲見 昌彦, 北崎 充晃: 見えない長い腕—四肢先端の視覚運動同期による四肢伸張透明身体への所有感生成と行動変容—, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 24, No. 4, pp. 351–360, 2019
- [13] Kalckert, A. & Ehrsson, H. H.: The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership, *Consciousness and Cognition*, Vol. 26, pp. 117–132, 2014
- [14] Wegner, D. M., Fuller, V. A., & Sparrow, B.: Clever Hands: uncontrolled intelligence in facilitated communication, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 85, No. 1, pp. 5–19, 2003