

仮想空間内でのラバーハンドイリュージョンにおける空間的連続性と自己所有感

The Relationship between Spatial Continuity and Sense of Ownership on Rubber Hand Illusion in Virtual Reality

森本 崇哉[†], 工藤 卓[‡]

Takaya Morimoto, Suguru N. Kudoh

[†] 関西学院大学

Kwansei Gakuin University

hfs57900@kwansei.ac.jp

概要

近年、ラバーハンドイリュージョン (RHI) を仮想空間内で誘導するバーチャルハンドイリュージョン (VHI) の研究が進められている。本研究では身体の空間的連続性が断たれた状態を VR 上で実現し、バーチャルハンドと本身の手との空間的な関係性が自己所有感に及ぼす影響を解析した。内観報告と C3-C4 脳波同期とは強く相関し、体験的な自己所有感を評価する内観報告書の質問項目のスコアは高かった。また、より感覚的な自己所有感を問う質問項目のスコアが低かったことから、体験した自己所有感は思考的に生成されたものである可能性が示唆された。

キーワード：ラバーハンドイリュージョン, バーチャルハンドイリュージョン, 身体所有感

1. 序論

脳卒中で脳に損傷を受けた人の中には自分の手が自分のもののように感じなくなる等の身体認識の障害が生じることがある。この症状は無意識的に感じている自己所有感（自分の体が自分自身に属しているという感覚）が神経認知学的なメカニズムによって成立していることを示唆する [6]。脳神経科学の発達により、脳にダメージを受けても、リハビリテーションを集中的に行うことで、身体機能や身体感覚が回復する方向に脳の再編成が起こることが明らかになっている。ニューロリハビリテーションは、この脳の可塑性を誘導することで機能回復を促し、社会復帰を目指す概念や手続きのことである。ラバーハンドイリュージョン (Rubber Hand Illusion, RHI) は手の自己所有感に異常が生じた患者に対するニューロリハビリテーションとして注目されている (図 1)。

RHI とは、本身の手が見えない状態でゴム製の手と本物の手を同時に刺激することで、ゴム製の手を自分

の体の一部のように感じる現象であり、M. Botvinick と J. Cohen により発見された [1]。RHI の発現に伴って「自己主体感 (sense of agency)」と「自己所有感 (sense of ownership)」とが発現すると考えられている [2]。自己主体感とは、動作の主体が自分であるという感覚で、投射対象の物体 (ラバーハンドなど) についても、その行動を制御する主体が自分であると感じる感覚であり、自己所有感とは身体の一部や感情・思考が自分に所属していると感じる感覚で、投射対象の物体も自分自身に属していると感じる感覚である。これまでの研究で RHI における自己所有感の生起に主に影響する要因として、空間的連続性、肌のテクスチャ、形状、視覚-触覚間同期、視覚-運動間同期などが重要であると報告されている [4, 9]。RHI は自身の身体感覚を他の物体に寄託させるという特徴から、機械の遠隔操作などのヒューマンインターフェースへの応用にも期待されている。

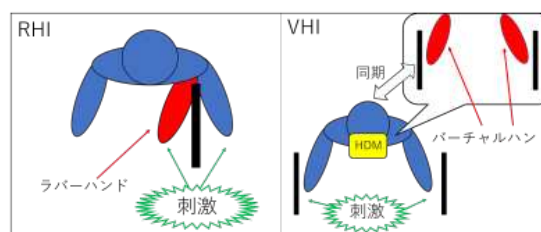


図 1 RHI と VHI の概要

コンピューター技術の急速な発達により、医療分野をはじめとした、幅広い分野で仮想現実感 (Virtual Reality, VR) の研究が行われている。近年では、RHI を VR 上で誘導するバーチャルハンドイリュージョン (Virtual Hand Illusion, VHI) の研究が進められている (図 1)。視覚だけでなく、本身の手の動きとバーチャルハンドの動きとを同期させることにより、現実

の手からのフィードバック感覚が動的なイメージと同期するため、従来の錯覚反応よりも強度が増すと考えられる。VHIの研究は多く行われており、長さ2mのバーチャルハンドに対しても本身の手のように感じる事が報告されている [10]。また、バーチャルハンドが本身の手と異なる動きをする実験では、自己主体感は誘発されたが、自己所有感は生起されなかったという報告がある [14]。VR上の手と本身の手との空間的連続性が断たれた実験では、空間的に分断された手モデルの分断面が見えないものが多かった [18]。

RHIの自己所有感の寄託の有無は客観的に確認することが重要である。これまでの研究では、RHI誘導後に、M. Botvinickらが作成した内観報告書 [1] に変更を加えたものに回答してもらい、このスコアを自己所有感の寄託の指標として用いる場合が多い。RHI強度のより客観的な指標としてはポインティングタスクが挙げられ、この指標は多くの研究で使用されている [15]。VRを用いたVHIの研究でもこれを指標とした研究が報告されている。より客観的な評価指標として、脳波 (Electroencephalogram, EEG) の同期性を観測する手法がある。RHI発現中は、頭頂部付近で強い反応が見られ、国際式10-20法におけるC3, C4で計測される脳波が同期的に活動することが報告されている [8]。また、自己所有感の寄託がある時、ラバーハンドにハンマーで打撃を与える様子や針で刺す様子を見せると回避行動が誘発される。これに先立つ運動準備電位もRHIの発現の有無の確認に有用である。ただし、この指標は不快刺激時の音などに反応して緊張が生じた可能性もあることには注意すべきである。身体所有感の発現を反映しない場合もある。本研究では、内観報告書に加え、VHI誘導中の脳波を計測し、これらを錯覚強度の指標として総合的に判断した。

2. 実験材料・手法

2.1 実験タスク

本研究では、バーチャルハンドと本身の手との空間的連続性を断ち、分断された手モデルの「分断面が視認できる」状態を仮想空間内で実現し、この条件でバーチャルハンドに対しての自己所有感を検証した。バーチャルハンドは実験参加者の手の形状と大きく変わらないものにした。さらに、自己の身体部位と拡張身体部位の空間的な位置が異なる条件でも自己所有感の生起を検証し、VRと本身の手との空間的な関係性が自己所有感に及ぼす影響を解析した。仮想空間はUnity 2019. 4. 24f1で作成した。HMDはMeta Quest2 (Meta Platforms)を用いた。仮想空間内の手

モデルと本身の手との同期にはUnityのアセットとして公開されているOculus Integration 1.61 (Meta Platforms)を利用した (図2)。

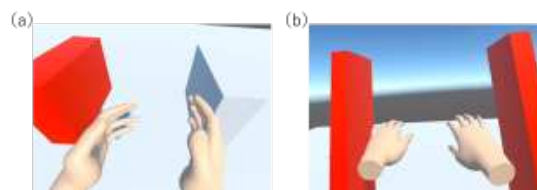


図2 本研究におけるVR空間とバーチャルハンドの装着。a) 実空間と連続している場合、b) 空間的連続性が断たれた場合のVR空間。

実験参加者に楽な姿勢で椅子に深く座り、脳波計とHMDを装着してもらい、実験に集中できる環境を整えた。触覚フィードバックを実現するために仮想空間内に2つの仕切り版のオブジェクトを用意し、現実世界にも実験参加者の前に設置した机の上に2つの仕切り版を設置して仮想空間上に置かれている仕切り版と位置座標が対応するように調整した。仮想空間上の仕切り版オブジェクトには4秒から6秒の間のランダムな時間経過で赤色に変化し、手が当たると白色に変化するプログラムを実装した。実験参加者には手を左右の赤色の板に当てるように指示し、板に当たる刺激を触覚フィードバックとした (図3)。実験開始と同時に脳波計測を開始した。計測開始時に30秒間安静状態をとってもらった。その後HMD内の分断された手イメージが映し出された映像を見ながら自身の手を動かしてもらい、3分間VHIの誘導を試みた。VHI誘導後、バーチャルハンドに刀を振り下ろすアニメーションを提示した (図4)。再び安静状態を30秒間とってもらい、内観報告書に回答してもらった。このVHI誘導タスクを現実空間とバーチャルハンドが連続している場合、バーチャルハンドと本身の手との間に空間的連続性がない場合、バーチャルハンドと本身の手との空間的連続性がなく、位置が本身の手からバーチャルハンドの10cm奥にずれている場合の3つの条件で行った。

2.2 内観報告書

内観報告書はM. BotvinickとJ. Cohenが用いたものを基を本研究に合わせた文章に一部修正して作成したものを用いた。内観報告書はフリースケール形式で回答してもらい、後で7段階に分けて評価した。質問項目を表1に示す。本研究での質問項目2, 7は、

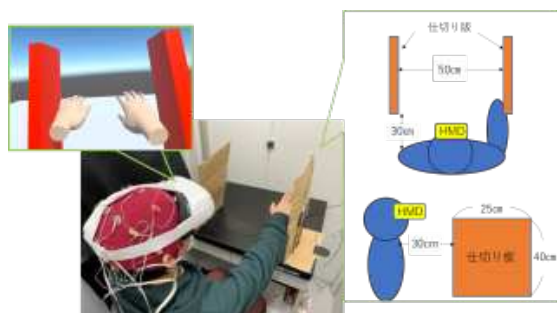


図3 触覚フィードバックを実現した実験の様子



図4 バーチャルハンドに刀が振り下ろされる様子

バーチャルハンドに対する身体所有感を評価する項目であり、質問項目3は身体感覚の分離を問う項目で、手に対する自己所有感が仮想空間の手と本身の手とに分離している度合いを評価する。質問項目1, 8は自己所有感がどの位置に寄託しているのかを評価する項目である。質問項目4は自己主体感を直接的に問う項目であるが、これはVRのプログラムの同期性を評価する項目にもなっている。また、質問項目5, 6は仮想空間にある手に対して、自己主体感を感じていない場合にスコアが高くなると考えられる項目である。

2.3 脳波計測

VHI誘導中の脳波はBIOSEMI社のActive Two Systemを用いて計測した。Active Two SystemはAD-BOX, Battery Box, USB2 Reciever, Active電極から構成される。AD-BOXを光ファイバーケーブルでUSB2Recieverに接続し、USB2 Recieverを脳波計測ができるソフトウェアであるActiveiwがインストールされた脳波計測用PCにUSBケーブルで接続した。AD-BOXは電氣的に独立した電源であるBattery Boxから電源の供給を行った。AD-BOXに接続した16chのActive電極を、国際式10-20法に基づいて設計された専用の脳波キャップの対応した位置に接続した。また、伝導性ジェルを用いて電極の頭皮

表1

質問項目

- | 質問項目 | |
|------|--|
| 1 | 仮想空間上の手がある位置に自分の手があるように感じた。 |
| 2 | 仮想空間上の手が自分の手だと感じた。 |
| 3 | 複数の手または腕を持っているかのように感じた。 |
| 4 | 仮想空間上の手の動きは、自分の意思通りに動いているように感じた。 |
| 5 | 自分の手が、仮想空間上の手の動きに制御されているように感じた。 |
| 6 | 仮想空間上の手が、意思をもって動いているように見えた。 |
| 7 | 仮想空間上の手が切れられそうになるのを見て、本身も影響を受けると感じた。 |
| 8 | 自分の手の位置が、現実と仮想空間上の手の間のどこか曖昧な位置にあるように感じた。 |

との接触面積を大きくし、電極インピーダンスの低下を図った。国際式10-20法は、国際臨床神経生理学会連合が世界標準として推奨している電極配置のことである。各電極に対応する脳の解剖学的部位が確認されていることから、多くの認知科学研究で利用されている。Active Two Systemは頭頂部付近に基準電極CMSと補正電極Driven Right Leg (DRL)を配置する。DRL電極により、CMS電極の電位をアース電位と一致させることで同相ノイズを大きく軽減させる。Active電極により計測された脳波信号はAD-BOX内のアンプで増強され、増幅された信号はA/Dコンバーターによって量子ビット24bit、サンプリング周波数2kHz (speed switch=4)でデジタル化される。デジタル化された信号は光信号に変換され、USB2 Recieverに伝送される。USB2 Recieverに伝送された信号は、バッファー/コントロール/ロジック回路により、USBケーブルを経由してコンピューターに伝送される。信号データはソフトウェアにより、フィルタ処理等の計測に必要な処理がされた後、制御コンピューターの記憶装置に保存した。(図5)

本研究では、計測した脳波データを読み込んで相互相関を計算するプログラムを作成し、これを解析に用いた。VHI発現時に頭頂付近で強い反応がみられ、同期的な活動が観察されると報告されているC3, C4の2点の脳波波形の相互相関と相関係数を出力する。



図5 脳波計システム. a) 外観, b) 接続図.

3. 結果

3.1 内観報告書の結果

22-25 歳, 右利きの男性 7 名を実験参加者として実験を行った. 連続した手に対する内観報告書の各項目のスコア平均は項目 1 で 5.86 ± 0.26 , 項目 2 で 5.00 ± 0.58 , 項目 3 で 2.43 ± 0.48 , 項目 4 で 5.71 ± 0.36 , 項目 5 で 2.43 ± 0.48 , 項目 6 で 2.42 ± 0.48 , 項目 7 で 2.71 ± 0.52 , 項目 8 で 3.29 ± 0.75 であった (平均士標準誤差, $N=7$, 図 6). 質問項目 1, 2 のスコアが高いことから, 実験参加者は自己所有感を仮想空間の手に自覚し, その位置も VR 空間上の手の位置に置いていたことが示唆された. ただし, より感覚的な自己所有感を問う質問項目 7 のスコアが低く, 自己所有感是不完全であったことが示唆される. また, 仮想空間上の手と現実の手との動きの時間的なずれは概ね 100 ms 程度あったが, 質問項目 4 が高いことから, 自己主体感は損なわれておらず, 実験プログラムが正しく動作して, 仮想空間上の手と実験参加者の手が同期して動いて感じられていたことが確認された.

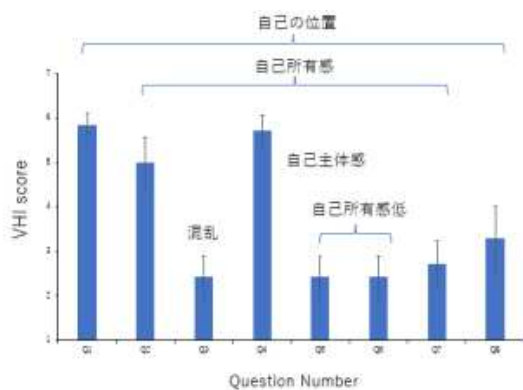


図6 連続した手の場合における内観報告スコアの平均値

空間的連続性が断たれた手に対する内観報告書の各項目のスコア平均は項目 1 で 6.14 ± 0.26 , 項目 2 で 5.57 ± 0.65 , 項目 3 で 2.28 ± 0.29 , 項目 4 で 5.14 ± 0.34 , 項目 5 で 2.42 ± 0.20 , 項目 6 で 2.14 ± 0.34 ,

項目 7 で 2.43 ± 0.37 , 項目 8 で 2.71 ± 0.47 であった (平均士標準誤差, $N=7$, 図 7). 連続した手の場合と同様に, 質問項目 1, 2 のスコアが高いことから, 切断面が見えた状態で本身の手との空間的連続性が断たれた状態であっても, 仮想空間の手に対して自己所有感があったと内観的には自覚しており, また, 感覚的な手の位置も VR 空間上の手の位置に置いていたことが示唆された. ただし, より直観的な自己所有感を示すと考えられる質問項目 7 のスコアは低かった. また, 質問項目 4 が連続した手の場合と比べて若干低かったが, 自己主体感は発現していたと考えられ, 仮想空間上の手と実験参加者の手と同期して動いて感じられていたことが確認された.

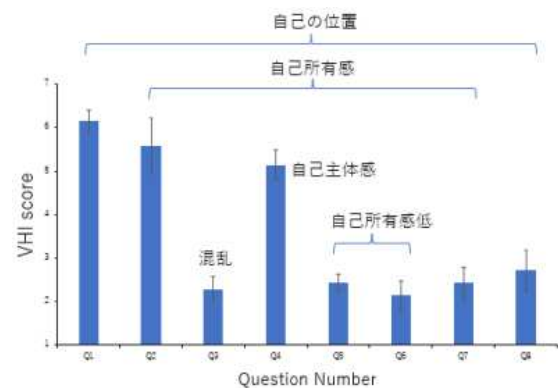


図7 空間的連続性が断たれた手の場合における内観報告スコアの平均値

空間的連続性が断たれた, さらに本身の手と仮想空間上の手の位置がずれた条件との内観報告書の各項目のスコア平均は項目 1 で 5.43 ± 0.48 , 項目 2 で 4.57 ± 0.69 , 項目 3 で 2.57 ± 0.81 , 項目 4 で 6.14 ± 0.26 , 項目 5 で 1.28 ± 0.18 , 項目 6 で 1.29 ± 0.18 , 項目 7 で 2.86 ± 0.59 , 項目 8 で 3.86 ± 0.77 であった (平均士標準誤差, $N=7$, 図 8). 質問項目 1, 2 のスコアが高いことから, 実験参加者は仮想空間内の手に自己所有感を内観的に自覚し, その位置も仮想空間内の手の位置と一致して実感したことが示唆された. ただし, より直観的な自己所有感を示す質問項目 7 のスコアは低かった. 質問項目 4 のスコアはかえって高く, また, 質問項目 5, 6 のスコアが低いことから, 仮想空間にある手に対して自己主体感を強く感じていたことが示唆された.

自己所有感を反映する質問項目 2, 7 の平均と自己主体感を示す質問項目 4, 自己主体感の消失を示す質問項目 5, 6 の平均, 及び身体感覚の分離性を示す質問項目 3 のスコアを実験条件ごとに比較した (Fig.9).

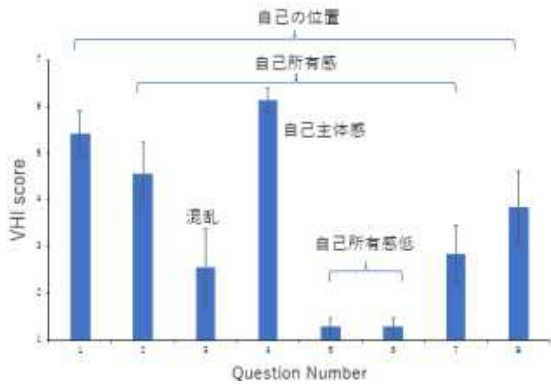


図 8 現実と仮想空間上の手の位置がずれている場合の内観報告スコアの平均値。

どの実験においても、内観的には自己所有感はやや低く、自己主体感は高い傾向があった。このことから不完全ながらも VHI を自覚していたと考えられる。自己主体感は、切断条件で相対的に低く、切断・位置ずれ条件では連続条件より高かった。逆に、自己主体感の消失を示す質問項目 5 と 6 の合計は切断・位置ずれ条件で特に低かった。

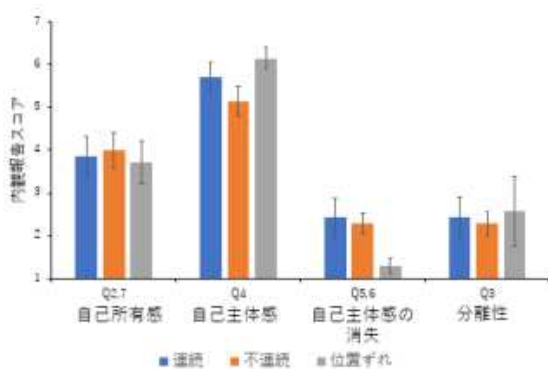


図 9 実験条件ごとの内観報告スコア

3.2 脳波計測による VHI の評価

安静状態を除く VHI 誘導 3 分間の C3-C4 の脳波の相関を比較した。空間的連続性が確保されている場合、空間的連続性が断たれている場合、空間的連続性が断たれている状態で本身の手と仮想空間上の手の位置が一致しない場合でそれぞれ比較した (図 10)。空間的連続性が確保されている場合の C3-C4 相関係数は 0.55 ± 0.15 、空間的連続性が断たれている場合は 0.31 ± 0.26 、空間的連続性が断たれていて位置ずれがある場合は 0.80 ± 0.05 であった (平均±標準誤差, $N=7$, 図.11)。

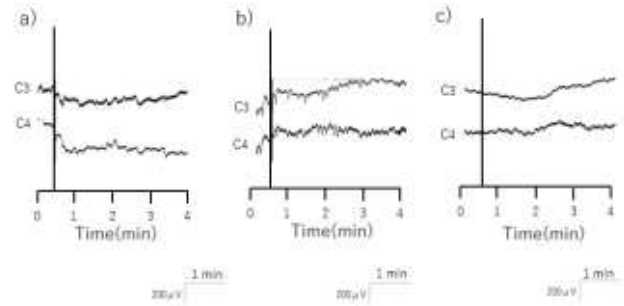


図 10 脳波計測の例 a) 連続した手の場合, b) 断絶された手の場合, c) 断絶され且つ位置がずれている場合 (22 歳の男性)

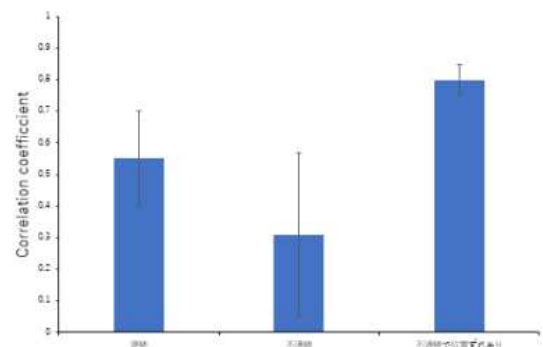


図 11 空間的連続性の状態による相関係数の平均値 (21-25 歳の男性, $N=7$)。

また、脳波計測 4 分間のうち、実験タスク前後の安静状態 30 秒間と実験タスク開始から 1 分間毎の時間窓における相関係数を求めた。本身の手と仮想空間内の手とが連続している場合の C3-C4 相関係数の平均は、実験タスク前の安静状態では 0.54 ± 0.11 、実験タスク開始後 0-60 秒では 0.61 ± 0.21 、60-120 秒では 0.47 ± 0.18 、120-180 秒では 0.49 ± 0.14 、実験タスク後の安静状態では 0.36 ± 0.19 であった (平均±標準誤差, $N=7$, 図.12)。C3-C4 相関は VHI 誘導中、時間経過に従ってゆっくりと微減する傾向があった。

空間的連続性が断たれている場合の C3-C4 相関係数の平均は、実験タスク前の安静状態では 0.68 ± 0.18 、実験タスク開始から 0-60 秒では 0.53 ± 0.15 、60-120 秒では 0.28 ± 0.18 、120-180 秒では 0.20 ± 0.24 、実験タスク後の安静状態では 0.27 ± 0.18 であった (平均±標準誤差, $N=7$, 図.13)。この場合も C3-C4 相関は VHI 誘導中に減少する傾向があった。

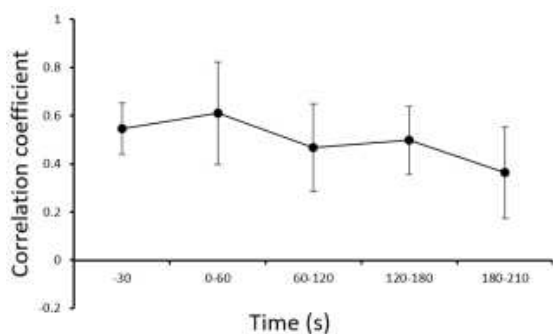


図 12 連続した手の場合の C3-C4 相関係数の時間推移の例 (21-25 歳の男性, N=7, 平均±標準誤差)

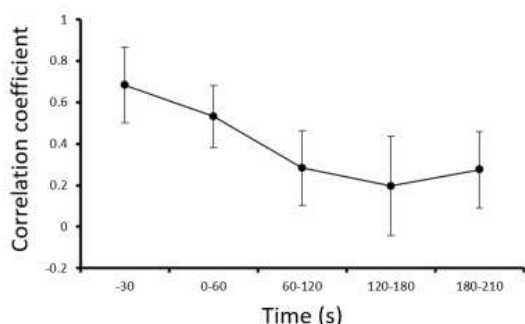


図 13 空間的連続性の断たれている場合の C3-C4 脳波の相関係数の時間推移の例 (21-25 歳の男性, N=7, 平均±標準誤差)。

空間的連続性が断たれていて位置ずれがある場合の C3-C4 相関係数の平均は、実験タスク前の安静状態では 0.41 ± 0.27 、実験タスク開始から 0-60 秒では 0.51 ± 0.15 、60-120 秒では 0.66 ± 0.12 、120-180 秒では 0.41 ± 0.28 、実験タスク後の安静状態では 0.35 ± 0.26 であった (平均±標準誤差, N=7, 図 14)。この条件では VHI 誘導前半に C3-C4 相関が増加するが、その後減少に転じた。

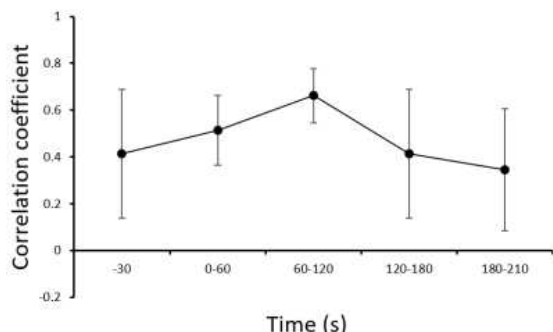


図 14 空間的に断絶し、かつ現実と仮想空間内の手の位置がずれている場合の C3-C4 相関係数の時間推移の例 (21-25 歳の男性, N=7, 平均±標準誤差)

3.3 内観報告スコアと脳波相関

空間的連続性の有無と空間的連続性が無く位置ずれのある場合で自己所有感の寄託を表す指標である質問項目 2, 7 の内観報告スコアと VHI 誘導中の脳波 C3-C4 相関係数との関係を概観すると、空間的連続性の断たれた手の場合では正の相関が見られ、空間的連続性がない手と位置ずれのある手では相関は見られなかった (図 15)。

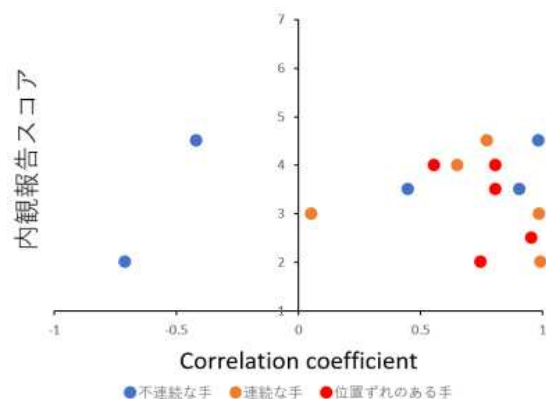


図 15 質問項目 2, 7 の平均スコアと VHI 誘導中の C3-C4 相関同期との相関性 (21-25 歳の男性, N=7)

また、空間的連続性の有無と空間的連続性が無く位置ずれのある場合とで、自己主体感を表す指標である質問項目 4 の内観報告スコアと VHI 誘導中の脳波 C3-C4 の相関を概観すると、空間的連続性のない手では正の相関が見られたが、連続した手と位置ずれのある手では見られなかった (図 16)。

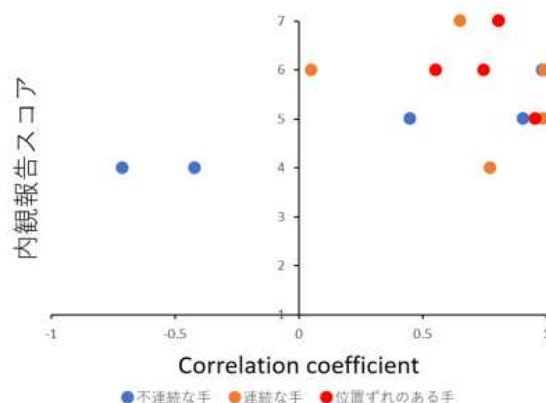


図 16 質問項目 4 の平均スコアと VHI 誘導中の C3-C4 相関同期との相関性 (21-25 歳の男性, N=7)

4. 考察

連続した手、空間的連続性が断たれた手、空間的連続性が断たれて且つ現実空間との位置がずれている手

のいずれにおいても、質問項目 1, 2 のスコアが特に全体的に高かったことから、実験参加者は内観的に自己所有感を仮想空間内の手に自覚していたことが示唆された (図 6, 7, 8)。自己主体感を直接的に問う質問項目 4 も概して 7 段階の 5 以上であったことから (図 6, 7, 8)、自己主体感も自覚していたと考えられる。また、質問項目 4 は VR プログラムにおける本身の手と仮想空間上の手の同期性を評価する質問項目にもなっており、これが全体的に高かったことからプログラムが正しく実装され、本身の手と仮想空間内の手の同期感が高かったといえる。

本実験で用いた内観報告書の 2, 7 は身体所有感の寄託に携わるものである。内観報告書の質問項目 2, 7 のスコアの平均値が現実空間と仮想空間上の手が連続している場合で 3.86、現実と仮想空間上の手の空間的連続性が断たれている場で 4.00、空間的連続性が断たれていて現実と仮想空間上の手の位置がずれている場で 3.71 であり、身体所有感の寄託が充分発現していないことが示唆される。また、これは質問項目 7 (仮想空間上の手が切れそうになるのを見て、自分も影響を受けると感じた) のスコアが低く、より直観的な自己所有感の発現は低かったと考えられる (図 9)。小鷹らは自己主体感と自己所有感の特性について、詳細な論考を行っている [16]。小鷹らは、自己所有感の特性のうち、(投射対象において起こる出来事)の <直接性> を強調しており、投射対象と自己との間に強い連続性があることを自己所有感発現の要件に挙げている。他方で、自己主体感はそこで起こる出来事と自己との時間的同期があれば、投射対象と自己が離れていることは問題にならず、空間的には自由度が高いため、比較的誘導が容易であると報告している。本研究においても、内観報告書からはどの条件においても自己主体感が強く誘導され、自己所有感の誘導は不完全であった。自己主体感については、小鷹らの論考と一致して、空間的連続性が損なわれていても問題なく発現し、むしろ空間的断絶と位置ずれがある条件の方が強く発現した (図 6, 7, 8)。

C3-C4 脳波の相関については、連続した手の場合と比して空間的連続性が断たれた手の場合の方が VHI 誘導中の脳波の C3-C4 の相関係数が低くなったが、空間的に連続した条件と空間的連続性が断たれて、且つ現実空間との位置ずれがある条件における相関係数は、連続した手の条件の方がわずかに低かった。空間的連続性が断たれた条件の相関係数には大きなばらつきがあったが、空間的な連続性が VHI 発現時に見られる脳波の相関を小さくするという従来の研究の結果

と一致した (図 10, 11)。また、誘導時間が長くなるに連れて C3-C4 間の相関係数が高くなるという傾向が空間的連続性が断たれて且つ位置がずれている場合のみに観察されたが、空間的連続性が断たれた手の場合にはむしろ相関は時間経過とともに減少した (図 12, 13, 14)。空間的連続性が断たれた手に対しては VHI 発現中にみられる脳波の特徴が確認されなかったにも関わらず、内観報告書の質問項目 2 のスコアは高く、一定の自己所有感を自覚しているという結果であった。さらに、内観報告書の直観的・思考的な自己所有感を平均した質問項目 2, 7 の平均値と VHI 誘導中の脳波の C3-C4 の相関係数との相関は、空間的連続性が断たれた手の場合において正の相関が確認され、VHI を自覚している人の脳波の C3-C4 の相関係数が増加することが示された。また、自己主体感を示す質問項目 4 と VHI 誘導中の脳波の C3-C4 間の相関係数との相関も、空間的連続性が断たれた手の場合においてのみ正の相関が確認され、仮想空間内の手の時間的な同期性が身体所有感の生起に大きく影響するという従来の研究の結果と一致した (図 15, 16)。これらのことを統合して、以下のように考える。

まず、VHI と C3-C4 脳波相関とは従来研究の報告のように強く相関し、特に自己主体感と C3-C4 脳波相関とが強く相関すると考えられる。脳波相関の結果から、本研究においては自己所有感はいずれの条件においても発現が弱かったと考えるべきである。しかしながら、質問項目 2 のスコアは高く、これは「仮想空間上の手が自分の手だと感じた」という質問で、判断を伴う宣言的思考を含む感覚を問うているものと考えられる。対して同じく自己所有感に関すると考えられる質問項目 7 については、どの条件も低く、こちらは「仮想空間上の手が切られるのを見て、本身も影響を受けると感じた」というもので、より直観的な反射動作に関わる質問項目である。従って、項目 2 のスコアが高く、7 のスコアが低いということは、思考的な自己所有感を感じていたが、より直観的な自己所有感が発現せず、それが脳波相関に反映されたと考えるべきである。

自己主体感は比較的誘導されやすいと指摘されているのは、現代に生きる我々が、遠隔操作的なものに慣れているからである可能性がある。人間の身体感覚も慣れや学習・習慣によって影響を受けるものであるとするならば、離れた物体に対する操作の自己主体感を感じる場面は多い。また、自己所有感についても、ゲームや VR におけるアバターなど、自己の一部ないし拡張したオブジェクトを空間的に断絶し、且つ自己

の身体位置と関係性が希薄な状況で体験する機会は増えている。すなわち、身体的連続性が断絶し、且つ空間的位置関係も現実と乖離している状況は、アバターのような自己の分身像を意識させ、故に本研究におけるレポートブルな内観報告においては、より思考的・経験的な感覚として身体の自己所有感を報告したのではないかと考える。空間的に断絶し、且つ位置ずれがある条件において、自己所有感を示す項目4が特に高かったのは、仮想空間の手をアバターとして扱い、経験による信念でより思考的な要素の強い感覚を、自己所有感と回答したことによるものと推測する。

5. 結論

本研究では、高いハンドトラッキング機能を持つHMDを用いて実験参加者の動きと同期して動くバーチャルハンドを表現し、さらに触覚を現実と同期して、より現実に近い仮想空間上で空間的連続性が身体所有感の寄託に及ぼす影響を解析した。内観報告書とC3-C4脳波相関解析の結果から、自己所有感の仮想空間への手への寄託は、空間的連続性が断たれた状態でも不完全ながら発現されることが示唆された。また、時間的同期性が空間的連続性よりも優位に自己主体感の寄託に影響することが示唆された。さらに、内観報告書の質問によっては、実際に感覚的に感じている自己所有感よりも、経験的な信念によるより思考的な自己所有感が回答される可能性があり、自己所有感には、認知感覚的な要素と経験的信念の要素が存在している可能性があること示唆された。

文献

- [1] M. Botvinick and J. Cohen, (1998) "Rubber hands 'feel' touch that eyes see.", *Nature*, 391(6669):756-756.
- [2] N. Braun, S. Debener, N. Spychala, E. Bongartz, P. Sörös, H. H. Müller, and A. Philipsen, (2018) "The senses of agency and ownership: a review.", *Frontiers in psychology*, 9:535.
- [3] E. A. Caspar, A. Cleeremans, and P. Haggard, (2015) "The relationship between human agency and embodiment.", *Consciousness and cognition*, 33:226-236.
- [4] 藤澤岳暁, 音納陸, 佐々木卓也, 宮崎滉己, 磯山直也, 内山英昭, 清川清, (2019) "FinGun", 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文.
- [5] A. Guterstam, G. Gentile, and H. H. Ehrsson, (2013) "The invisible hand illusion: multisensory integration leads to the embodiment of a discrete volume of empty space." *Journal of cognitive neuroscience*, 25(7):1078-1099.
- [6] P. M. Jenkinson, C. Papadaki, S. Besharati, V. Moro, V. Gobetto, L. Crucianelli, L. P. Kirsch, R. Avesani, N. S. Ward, and A. Fotopoulou, (2020) "Welcoming back my arm: affective touch increases body ownership following right-hemisphere stroke.", *Brain Communications*, 2(1), 03 fcaa034.
- [7] A. Kalckert and H. H. Ehrsson, (2012) "Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency.", *Frontiers in human neuroscience*, 6:40.
- [8] N. Kanayama, A. Sato, and H. Ohira, (2009) "The role of gamma band oscillations and synchrony on rubber hand illusion and crossmodal integration." *Brain and cognition*, 69(1):19-29.
- [9] A. Keizer, A. van Elburg, R. Helms, and H. C. Dijkerman, (2016) "A virtual reality full body illusion improves body image disturbance in anorexia nervosa." *PloS one*, 11(10):e0163921.
- [10] K. Kilteni, J.-M. Normand, M. V. Sanchez-Vives, and M. Slater, (2012) "Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion." *PloS one*, 7(7):e40867.
- [11] B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger, and O. Blanke, (2007) "Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness." *Science*, 317(5841):1096-1099.
- [12] K. Okanoya, (2010) "A biological scenario for the emergence of language." *Japanese Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1):1-8.
- [13] D. Perez-Marcos, M. V. Sanchez-Vives, and M. Slater, (2012) "Is my hand connected to my body? the impact of body continuity and arm alignment on the virtual hand illusion." *Cognitive neurodynamics*, 6(4):295-305.
- [14] A. M. Soccini, M. Grangetto, T. Inamura, and S. Shimada, (2019) "Virtual hand illusion: The alien finger motion experiment." In 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pages 1165-1166. IEEE.
- [15] T. Tsuji, H. Yamakawa, A. Yamashita, K. Takakusaki, T. Maeda, M. Kato, H. Oka, and H. Asama, (2013) "Analysis of electromyography and skin conductance response during rubber hand illusion." In 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, pages 88-93. IEEE.
- [16] 小鷹研理. (os 招待講演), (2018) "hmdによる構成的空間を舞台とした「三人称的自己」の顕在化.", 人工知能学会全国大会論文集 第32回, pages 3D1OS7a04-3D1OS7a04. 一般社団法人人工知能学会.
- [17] 中山友瑛, 片山正純, (2020) "Vr空間における仮想手の光点提示に対する身体所有感." *認知科学*, 27(4):567-579.
- [18] 渡邊翔太, 川合伸幸, (2017) "前腕cgモデルと実際の行為が質的に異なっても運動主体感は誘発されるが身体所有感の生成には完全な一致が必要." *認知科学*, 24(2):185-195.
- [19] 齊藤寛人, 福地健太郎, (2017) "視覚的運動の予測可能性が自己帰属感の生起過程に及ぼす影響の調査." *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 20(3):301-310.