



多数の手との運動同期における身体認知の検証

増山由輝¹⁾, 福岡正彬¹⁾, Theophilus Teo¹⁾, 近藤亮太¹⁾, 杉本麻樹¹⁾

Yuki MASHIYAMA, Masaaki FUKUOKA, Theophilus TEO, Ryota KONDO and Maki SUGIMOTO

1) 慶應義塾大学 (〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

概要: ヒトが複数の身体を得た場合の身体認知の検証は、全身に対する研究が行われている。本研究では、バーチャル環境上で多数の部分身体を同期して動かした際に、身体所有感と行為主体感がどのように変化するか調査した。実験参加者は Electromyography (EMG) センサを腕に装着し、バーチャル環境に提示された 1 本の手または 9 本の手を用いて、2 分 30 秒間の到達運動を行った。到達運動後に脅威刺激が与えられ、そのときの EMG を身体所有感の客観的指標として計測した。最後にアンケートを実施し、主観的な身体所有感と行為主体感の強さを調査した。その結果、ユーザは複数の手を注意の切り替えによって操作していることが示唆された。

キーワード: 身体所有感, 行為主体感, 複数身体, 部分身体

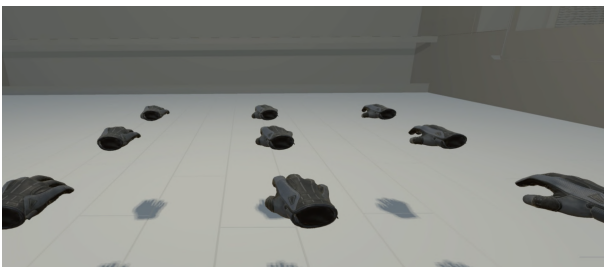


図 1: 実験参加者に提示した 9 本の手

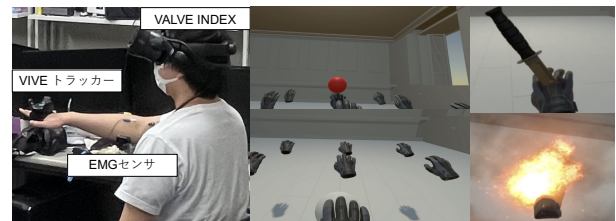


図 2: 実験環境

1. はじめに

ヒトは生得的ではないバーチャル身体に対しても視覚情報や身体運動の同期を行うことで身体所有感と行為主体感を感じることが可能である [1]。このことから、バーチャル環境を用いることで、現実世界では実装が難しい条件やありえない条件における身体認知を調査することが可能である。その一例として、複数の身体を用いた研究が行われている [2, 3]。これらの複数身体に関する研究では、全身に対する所有感に関しては調査がされているが、手などの一部の身体部位に対する部分所有感に関しては調査がされていない。

本研究では、部分身体である手を複数用いた場合に、通常の 1 本の手を用いた場合と比較して、身体所有感と行為主体感がどのように変化するかを調査した。実験では、身体条件を手が 1 本の場合と 9 本の場合として到達運動を行い、脅威刺激を対象の手やタイミングを変化させて与えることで、驚愕反応に変化が現れるか検証した。そして、驚愕反応による腕の筋電位の変化を計測すると共に、身体認知に関してアンケートを行い、複数の手を用いた場合における身体認知を調査した。

2. 関連研究

2.1 バーチャル身体と認知

身体認知に関する研究の代表的なものとして、ラバーハンド錯覚がある [4]。これは、被験者の本物の手を隠して、自然に見える位置にゴム製の手を配置し、本物の手とゴム製の手に対して同時に同様な触覚刺激を与えると、ゴム製の手があたかも自分の手であるように感じる錯覚のことである。このゴム製の手に、脅威刺激を与えることで、生体信号の値に変化が生じる [5]。そして、バーチャル環境においても、ラバーハンド錯覚と同様の方法でバーチャルハンドに所有感が誘発されることが報告されている [6]。また、視覚情報と身体運動の同期を行うことでも、バーチャル身体に所有感が誘発されることがわかっている [1]。

2.2 複数身体と身体認知

複数身体に対する身体認知の研究では、ラバーハンド錯覚と同様の方法で、ゴム製の手に対して錯覚的な身体所有感が生じているときに、現実の手にも同時に身体所有感が生じた [7]。

バーチャル環境を利用して、身体を複数に増やす研究も行われている。1 人称視点から 2 つの身体が隣り合い横たわった状態を提示した研究では、視覚触覚同期刺激を与えることで、2 つの全身を所有している錯覚が生じた [2]。最大 4 つの複数身体を制御する研究では、4 つの身体に対し

て同等の身体所有感と行為主体感が生じ、これらの身体間への注意を切り替えることで操作しているということが示された [3]。これらのバーチャル環境を利用した研究は、複数の全身を扱うものであった。複数の部分身体を扱った研究として、手を立方体状に複数配置した実験が行われている [8]。この研究では、現実の手の移動距離が短縮できることが示されたが、身体認知に関する報告はされていない。

3. 複数の手

複数の手への身体認知の調査を行うために、一人称視点から 1 本の右手の運動を 9 本のバーチャルな手の運動へと同期した。9 本の手を操作する場合は、最も手前の中心にある手が現実における手の位置と同じ位置に配置されるようにした。また、全ての手が一様に見渡せるように、同一空間上の水平な面に正方形に手を 9 本配置した。

4. 実装

環境: ヘッドマウントディスプレイに VALVE INDEX¹ を使用し、バーチャル環境の構築に Unity² を使用した。Unity 上では、10m × 5m × 10m 部屋を用意し、白い球と赤い球が到達運動中に現れるように配置した。

手の運動の同期: 手の運動を計測する機器として、VIVE トラッカー³ を使用した。トラッカーは、ベルトを用いて手の甲に取り付け、右手をハンズフリーで動けるようにした。

脅威刺激: 驚愕反応を調査するために、2 種類の脅威刺激を用意した。それぞれの脅威刺激は、手に対してナイフが刺さり出血するものと手に対して爆発が起きるものとした。

EMG センサ: EMG センサは、Delsys 社の Trigno Quattro Sensor⁴ を使用し、右腕の腕橈骨筋、尺側手根伸筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋周辺に装着して、4 箇所 EMG を計測した。

実験参加者に各条件による到達運動を行う前に、筋肉に力を入れた状態の最大随意収縮と脱力した状態の随意収縮を測定し、キャリブレーションを行った。驚愕反応に対する EMG のデータは、脅威刺激から 2 秒間の EMG の最大値と実験を通して計測された最小値を使用した。

5. 実験

5.1 到達運動

複数の手の運動に慣れるために、白い球と赤い球への 2.5 分間の到達運動を実装した。白い球は、9 本の手の場合では最も手前の列の中心の手が触れるように手の原点として配置し、赤い球は手の可動範囲でランダムな位置に生成した。

表 1: 質問項目

質問 1	常に 1 本の手は自分の手であるかのように感じた
質問 2	時々 1 本の手は自分の手であるかのように感じた
質問 3	常にいくつかの手は自分の手であるかのように感じた
質問 4	時々いくつかの手は自分の手であるかのように感じた
質問 5	常に全ての手は自分の手であるかのように感じた
質問 6	時々全ての手は自分の手であるかのように感じた
質問 7	自分は常に 1 本の手を動かしているように感じた
質問 8	自分は時々 1 本の手を動かしているように感じた
質問 9	自分は常にいくつかの手を動かしているように感じた
質問 10	自分は時々いくつかの手を動かしているように感じた
質問 11	自分は常に全ての手を動かしているように感じた
質問 12	自分は時々全ての手を動かしているように感じた
質問 13	常に自分の手は、1 本の大きな手であるかのように感じた
質問 14	時々自分の手は、1 本の大きな手であるかのように感じた
質問 15	自分の手は、複数の場所に同時に存在しているように感じた
質問 16	複数ある手の内 1 本の手に危険が及んでいるように感じた
質問 17	複数ある手の内いくつかの手に危険が及んでいるように感じた
質問 18	複数ある手の内全ての手に危険が及んでいるように感じた

5.2 実験 1

5.2.1 実験条件

2.5 分経過後に手と赤い球が触れた瞬間、つまりタスク中に脅威刺激を与える実験を行った。実験条件は、脅威刺激の対象が 1 本の手の場合、9 本の手で脅威刺激が球と触れた最後に到達運動を行った 1 本の手に対する場合、9 本の手で球と触れていない最後に到達運動を行っていない 1 本の手に対する場合、9 本全てに対する場合に対して、それぞれナイフと爆発を用いた場合の 4 × 2 の計 8 条件とした。この 8 条件はラテン方格法に基づいて、実験参加者によってランダムな順番で実施した。実験には 8 名 (男性 8 名, Mean = 22.88 歳, SD = 1.166 歳) が参加し、参加者の利き手は 8 名とも右手であった。また、各実験条件が終了する度にアンケートを行った。アンケートは表 1 のように、身体所有感に関する質問が 6 つ、行為主体感に対する質問が 6 つ、複数の手に対する認知の質問が 3 つ、脅威刺激に関する質問が 3 つあり、計 18 つの質問を行った。アンケートは、それぞれ 3 (強くそう思わない) から 3 (強くそう思う) までの 7 段階のリッカート尺度による評価を求めた。

5.2.2 結果

主観評価に関する結果は図 3 である。これらの結果に対して Steel-Dwass 検定による多重比較を行った。その結果、行為主体感に関する質問 7 で、1 本の手でナイフの条件と

¹VALVE INDEX. <https://store.steampowered.com/valveindex>. 2022 年 7 月 16 日閲覧。

²Unity. <https://unity.com/>. 2022 年 7 月 13 日閲覧。

³Vive トラッカー. <https://htcvive.jp/item/99HANL005-00.html>. 2022 年 7 月 13 日閲覧。

⁴Trigno Quattro Sensor. <https://delsys.com/trigno-quattro/>. 2022 年 7 月 13 日閲覧。

9本の手でタスクを行った手への爆発の条件, 9本の手でタスクを行っていない手へのナイフの条件の間に有意差が認められた ($p < 0.05$). 複数の手に関する質問 15 で, 1本の手でナイフの条件と 9本の手でタスクを行っていない手への爆発の条件の間と 1本の手で爆発の条件と 9本の手でタスクを行った手へのナイフの条件, 9本の手でタスクを行った手への爆発の条件, 9本の手でタスクを行っていない手へのナイフの条件, 9本の手でタスクを行っていない手への爆発の条件, 9本の手で全ての手へのナイフの条件, 9本の手で全ての手への爆発の条件の間に有意差が認められた ($p < 0.05$). 驚愕反応に関する質問 18 で, 9本の手で全ての手へのナイフの条件と 9本の手でタスクを行った手へのナイフの条件, 9本の手でタスクを行っていない手へのナイフの条件の間と 9本の手で全ての手への爆発の条件と 9本の手でタスクを行った手へのナイフの条件, 9本の手でタスクを行っていない手へのナイフの条件の間に有意差が認められた ($p < 0.05$).

脅威刺激に対する驚愕反応による, 正規化された EMG の最大値と最小値の差に対し, Holm 法で補正した対応のある t 検定による多重比較を行った結果, 手の本数や脅威刺激の対象や種類の条件による有意差は認められなかった.

5.3 実験 2

5.3.1 実験条件

2.5 分経過後の任意のタイミング, つまりタスクが終わった後に脅威刺激を与える実験を行った. この条件の目的は, タスク後の安静状態に脅威刺激を与えること, 脅威刺激のタイミングを予測させないことである. 脅威刺激のタイミング以外の条件は実験 1 と同様のものとした.

5.3.2 結果

主観評価に関する結果は図 4 である. これらの結果に対して Steel-Dwass 法による多重比較を行った. その結果, 行為主体感に関する質問 7 で, 手の本数が 1 本の場合と 9 本の場合の全ての条件の間に有意差が認められた ($p < 0.05$). 複数の手に関する質問 15 で, 1本の手でナイフの条件と 9本の手でタスクを行った手へのナイフの条件, 9本の手でタスクを行った手への爆発の条件, 9本の手でタスクを行っていない手へのナイフの条件, 9本の手で全ての手へのナイフの条件, 9本の手で全ての手への爆発の条件の間と 1本の手で爆発の条件と 9本の手でタスクを行った手へのナイフの条件, 9本の手でタスクを行った手への爆発の条件, 9本の手でタスクを行っていない手へのナイフの条件, 9本の手で全ての手へのナイフの条件, 9本の手で全ての手への爆発の条件の間に有意差が認められた ($p < 0.05$). 驚愕反応に関する質問 18 で, 手の本数が 9 本の場合において, 脅威刺激を与える対象の手が 1 本に対する場合と 9 本に対する場合の全ての条件間に有意差が認められた ($p < 0.05$).

脅威刺激に対する驚愕反応による, 正規化された EMG の最大値と最小値の差に対し, Holm 法で補正した対応のある t 検定による多重比較を行った結果, 手の本数や脅威刺激の対象や種類の条件による有意差は認められなかった.

6. 考察

実験 1, 2 を通した身体所有感に関する主観評価で, 実験条件間の有意差は認められなかった. しかし, 自由記述のコメントでは, 身体所有感を感じる対象が切り替わっていたと報告した実験参加者が複数確認された. これは, 到達目標が複数の手の間にある場合, どの手で到達するかを考えることでいくつかの手に身体所有感が生じ, それが到達対象の位置によって切り替わっていたと考えられる. つまり, 9本の手全てに対して身体所有感を得るよりも, 9本のうち視界に入っているいくつかの手に身体所有感を得ていることが推測され, 身体所有感はタスク中に切り替わっていることが考えられる.

行為主体感に関する主観評価の結果では, 手が 9 本の場合に 1 本の手を操作した感覚が失われていた. また, 9 本の手を操作した場合, いくつかの手または全ての手を動かしているように感じたという質問に対し, 主観評価が高いことが読み取れる. 9 本の手を操作した場合, 複数の手に対して行為主体感を得られたと言える.

複数の手の認識に関する主観評価の結果では, 手が 9 本の場合に手が複数の場所に存在していると認識し, 1 つの大きな手とは認識していなかった. 一定の間隔で配置された複数の手を個々の手として認識していることが示された.

驚愕反応に対するアンケートの結果では, 9 本の手全てに脅威刺激が与えられる場合, 9 本の手のうち 1 本の手に脅威刺激を与えられるよりも全ての手に危険が及んでいるように感じていた. 脅威刺激が与えられた手に対して所有感が生じていることが考えられる.

驚愕反応によって計測された EMG の結果では, それぞれの条件において有意差は認められなかったため, 脅威刺激に対して手を避けるような運動をした場合の運動の大きさには差がなかったことが考えられる.

7. 結論

本研究では, 複数の手に対する身体認知をアンケートによる主観評価と EMG の計測による驚愕反応の結果から調べた. 複数の部分身体の上肢の操作において, 身体所有感はタスク中の動きによって切り替わり, 行為主体感は複数の手のいずれか, または全てに対して感じていることが示唆された. また, 一定の間隔で配置された複数の手は個々の手として認識していることが示された. 驚愕反応では, EMG は手の本数や脅威刺激の種類や対象に依らず一様に生じ, 手が避けるような動作の大きさに変化がないことが考えられた. しかし, 脅威刺激は全ての手に対して与えることで, 全ての手に危険を感じる傾向があり, 脅威刺激の対象の手に対して所有感が生じていることが示唆された.

今後, 手の間隔や本数といった条件を変更することや一部の手に対して遅延または不自然な移動を与えることが身体認知にどのように影響を及ぼすか調べたい.

謝辞 本研究は, JST ERATO (JPMJER1701) の助成を受けて行われた.

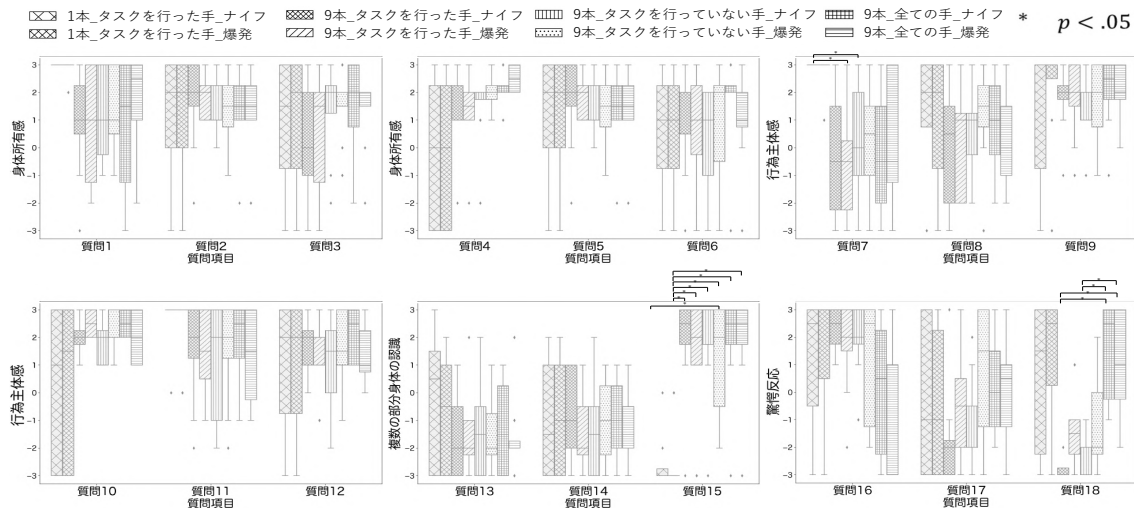


図 3: 実験 1 の実験結果

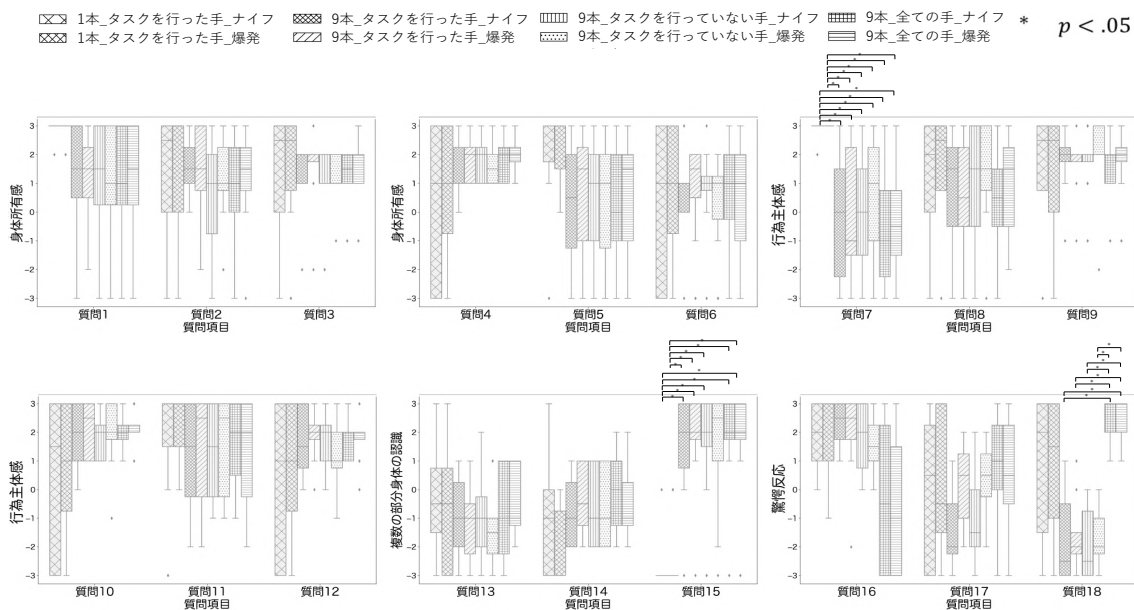


図 4: 実験 2 の実験結果

参考文献

[1] Maria V. Sanchez-Vives, Bernhard Spanlang, Antonio Frisoli, Massimo Bergamasco, Mel Slater: Virtual hand illusion induced by visuomotor correlation, PLOS ONE, Vol. 5, No. 4, pp.1-6, 2010.

[2] Arvid Guterstam, Dennis E. O. Larsson, Joanna Szotka, H. Henrik Ehrsson: Duplication of the bodily self: a perceptual illusion of dual full-body ownership and dual self-location, Royal Society open science, Vol.7, No. 12, pp.201911, 2020.

[3] Reiji Miura, Shunichi Kasahara, Michiteru Kitazaki, Adrien Verhulst, Masahiko Inami, Maki Sugimoto: MultiSoma: Distributed Embodiment with Synchronized Behavior and Perception, Augmented Humans Conference 2021, pp. 1-9, 2021.

[4] Matthew Botvinick, Jonathan Cohen: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, Nature, Vol. 391, No. 6669, pp. 756, 1998.

[5] Takuma Tsuji, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, Kaoru Takakusaki, Takaki Maeda, Motoichiro Kato, Hiroyuki Oka, Hajime Asama: Analysis of electromyography and skin conductance response during rubber hand illusion, 2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, pp.88-93, 2013

[6] Mel Slater, Daniel Perez-Marcos, H. Henrik Ehrsson, Maria V. Sanchez-Vives: Towards a digital body: the virtual arm illusion, Frontiers in human neuroscience, Vol. 7, pp. 6, 2008.

[7] Arvid Guterstam, Valeria I Petkova, H Henrik Ehrsson: The illusion of owning a third arm, PLOS ONE, 2011.

[8] Jonas Schjerlund, Kasper Hornbæk, Joanna Bergström: Ninja Hands: Using Many Hands to Improve Target Selection in VR, Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-14, 2021.