



拡張身体への応用を目指した VR 環境上の裂ける手による 自己受容感覚の変容

Modification of proprioception by virtual split hand aimed for the application of body augmentation

貝塚涼¹⁾, 繁柁博昭²⁾

Ryo KAIZUKA, Hiroaki SHIGEMASU

1) 高知工科大学大学院 工学研究科 (〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

2) 高知工科大学 情報学群 (〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185)

概要: 身体を制御する脳は生来の自己の四肢を操作するために最適化されており, 拡張身体部位を自己身体を操作するのと同じ感覚で操作することは困難である. しかし, バーチャルな手の視覚フィードバックにより自己の手を裂けたように知覚させ, その位置にロボットアームを対応付ければ, 自己の感覚を維持しながら拡張身体を操作できる可能性がある. そこで本研究では, VR 環境内で自己の手の視覚フィードバックを裂けた手に変容させ, 裂けた手の状態で数分間作業した後自己受容感覚による手の位置知覚が変化するかを検討した. その結果, 手の位置が裂けた方向に移動して知覚された.

キーワード: 拡張身体 自己受容感覚 自己所有感 自己主体感

1. はじめに

ウェアラブル・ユビキタスコンピューティングやロボティクスの発展にともない, ロボットアームなどの人工的な身体部位を拡張した自己の身体として操作することを目指す研究が数多く行われている. ロボットアームを拡張身体部位として操作することを目的とした装置としては, Sasaki et al. (2017) が開発した Meta Limbs が挙げられる [1]. この装置は, 足の運動とロボットアームの運動を対応付けることで拡張身体部位の操作を実現している. しかし, ロボットアームを腕以外の身体部位で操作するような方法は, 拡張身体部位に対して自己所有感を生じさせることや, 拡張身体部位とそれを操作している身体部位を独立して動かすことが困難であることなどの問題を生じる. 拡張身体部位の操作方法として理想的なのは, 自己身体を操作するのと同じ感覚で拡張身体部位の操作が行えるということであるが, 身体を制御する脳は生来の四肢を操作するために最適化されているため容易ではない. そこで, 生来の身体部位の一部の身体感覚を実際の位置から移動して知覚させ, 移動した位置の身体感覚に拡張身体部位を対応付けすることができれば, 自己の手としての感覚を維持しながら拡張身体部位を操作することができる可能性がある.

本研究では, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いて自己の手の視覚フィードバックを裂けた手に変容させ, 手の身体感覚を維持したまま, 裂けた方向に手の一部の身体感覚を移動したように知覚させることが可能であるかを検討するため, 裂けた手に対する自己受容感覚による自己の手の位置知覚が変化するかについて実験を行った.

1.1 ラバーハンドイリュージョン

拡張身体に関連する研究として, 偽物の手に自己所有感が生じるラバーハンドイリュージョン (Rubber Hand Illusion : RHI) が挙げられる [2]. RHI は人間の身体像が, 現実とは異なる視覚情報によって比較的容易に変容する柔軟性を持つことを明らかにし, 拡張身体の可能性を示した.

RHI が生じている際, 自己の手の主観的位置が偽物の手の方向に移動するという現象が見られる. これを自己受容感覚ドリフトといい, 偽物の手に対する自己所有感の程度を定量化する客観的な指標として多くの研究で用いられている [3-6].

RHI がバーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) 環境上において成立するかについても検討されており, 現実世界と同程度の自己受容感覚ドリフト量が得られることが示されている [7,8]. また, RHI において, 触覚刺激の代わりに, 自己の手の能動的な動きと同期した手の動きの視覚情報を与えるという手続きをとるものもある [6,9,10]. これは, ムービングラバーハンドイリュージョンと呼ばれ, RHI と同程度の自己受容感覚ドリフトが生じる.

これらの先行研究を元に, 本研究では, VR 環境上で自己の手の動きに同期して動くバーチャルハンドを用いた. また, 裂けた手として知覚しているかの指標として, 自己受容感覚ドリフトを用いた.

2. 実験方法

2.1 実験参加者

実験参加者は正常な視力 (矯正含む) を有する 19-24 歳の右利きの男性 18 名であった.

2.2 実験装置

視覚刺激の呈示にはHMD(HTC VIVE)を用いた。視覚刺激の作成にはUnity 2017.3.1f1 (64bit)およびBlender2.79bを用いた。VR環境上の手と実際の手との同期にはVIVE Tracker, VIVE base station, Manus VR Glovesを用いた。

手の初期位置は机の上に置いた状態であり、実物の机と同じ位置にバーチャルな机を呈示した。

2.3 呈示刺激

VR環境上の手の視覚フィードバックとして、図1で示すような通常の右手と裂けた右手を用いた。裂けた手は、示指側が実際の位置より約12.0 cm左方向に移動しており、肘における裂けた角度は15 degであった。

バーチャルな手に自己主体感および自己所有感を生じさせる手続きにおいて、バーチャルなボタンおよび立方体を用いた。立方体は1辺8cmであり、バーチャルな手の動作によって自由に把持、移動させることが可能であった。

自己受容感覚による身体位置の判断にはバーチャルな白色の小球を用いた。小球の位置はVIVE Controllerのタッチパッドを左手で操作することで左右にのみ移動した。

バーチャルな手に対する自己所有感を検討するためバーチャルなナイフにより脅威を与える手続きを行った。ナイフはVIVE Controllerの動きと同期していた。

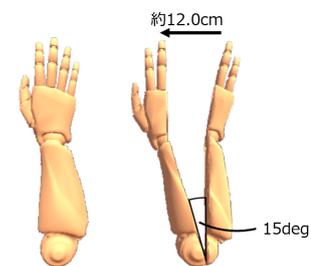


図1: 正常な手および裂けた手

2.4 アンケート

自己の手およびバーチャルな手に対する主観的経験を分析するため、試行後にアンケートを実施した。アンケートは、Q1からQ10までの質問項目からなり、参加者は「まったくそう思わない」を0、「とてもそう思う」を6とした7段階で回答を行った。Q9およびQ10は裂けた手条件の試行後にのみ回答した。アンケートの質問文を表1に示す。Q1, 2は手に感じられた触覚の程度、Q3, 4は手の自己所有感の程度、Q5, 6は手に感じられた脅威の程度、Q7, 8は自己の手とバーチャルな手の不一致度、Q9, 10は裂けた手として知覚されているかを問うた質問項目であった。

2.5 実験手続き

参加者は椅子に着席した状態で実験を開始した。参加者はManus VR Glovesを装着し、手首にVIVE Trackerを装着した。装置の装着後、バーチャルな手と参加者の手のサイズを適合させるため、垂直に立てた手と机が接する位置を実世界と合わせることで調節した。その後、バーチャルな手に自己主体感および自己所有感を生じさせる課題として、ボタンを押して出現する立方体を積み上げるという課

表1: アンケート項目

Q1	バーチャルな手に触覚が感じられた
Q2	あなたの手に触覚が感じられた
Q3	バーチャルな手があなたの手であるように感じた
Q4	あなたの手があなたの手であるように感じた
Q5	ナイフを近づけたとき、バーチャルな手に脅威を感じた
Q6	ナイフを近づけたとき、あなたの手に脅威を感じた
Q7	あなたの実際の手の位置とバーチャルな手の位置がずれていた
Q8	あなたの実際の手の大きさとバーチャルな手の大きさがずれていた
Q9	あなたの手が裂けて左右に広がっているように感じた
Q10	バーチャルな手の裂けている部分にあなたの手をいれたとき裂けている部分にあなたの手がないように感じた

題を4分間行った。裂けた手の条件では、示指側の部分と小指側の部分を交互に用いて立方体を積み上げた。

課題の後、参加者は左手でVIVE Controllerを持ち、右手の指先を伸ばした状態で机の上に手を置いた。その後、バーチャルな手が消失し、黒色の背景に小球が1つランダムな場所に表示された。参加者はVIVE Controllerを用いて小球を左右に移動させ、自己受容感覚から判断した右手の小指の位置に調整した。小指の推定の後、小球が消失し、ブランクを挟んで再び小球が表示され、同様の手続きで示指の推定を行った。その後、小球が消失し、手およびナイフが表示された。参加者はVR環境内でVIVE Controllerの動きと同期したナイフを左手で持ち、その左手を実験者が動かして右手の示指から小指を切り裂くように左右に5往復移動させた。

自己の手が裂けた手として知覚されているか検討するために、裂けた手条件の場合のみ、ナイフを用いて脅威を与えた後、左手を指差しの形にして右手の裂けている部分にゆっくりと近づける手続きを行った。裂けている部分は実際には参加者の右手の親指から中指までの部分の位置のため、左手の示指は右手に触れることになった。

その後、参加者はHMDを外し、アンケートに回答した。ここまでの手続きを1試行とし、参加者は、両条件について1試行ずつ計2試行を行った。条件の順序は参加者ごとにカウンターバランスをとった。

2.6 手の左右の広がり自己受容感覚ドリフト量の評価方法

自己受容感覚による示指と小指の主観的位置と、実際の手の示指と小指の位置の間のズレを、示指側は左方向を正、小指側は右方向を正としてそれぞれ算出し、その和を手の左右の広がり自己受容感覚ドリフト量の指標とした(図2)。

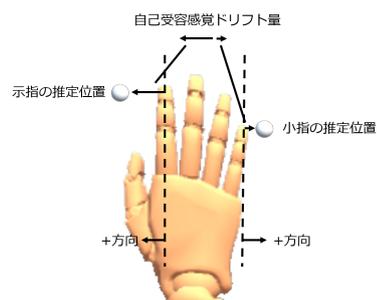


図2: 自己受容感覚ドリフト量の評価方法

3. 実験結果と考察

3.1 手の左右の広がり自己受容感覚ドリフト量の結果と考察

正常な手と裂けた手の左右の広がり自己受容感覚ドリフト量の平均値を図3に示す(エラーバーは標準誤差)。裂けた手のドリフト量は正常な手のドリフト量よりも約7.5 cm大きかった。両条件の自己受容感覚ドリフト量に対して、対応あり t 検定を行った結果、有意な差が認められ、正常な手よりも裂けた手のほうが手の左右の広がり自己受容感覚ドリフト量が有意に大きかった ($t(17) = 3.89, p < .05, d = 0.92$)。したがって、自己の手の視覚フィードバックを裂けた手に変容させ、一定時間その手を用いて操作を行うことで、自己受容感覚による自己の手の知覚位置を裂けた手の方向に移動させることが可能であることが示された。この結果から、VRや拡張現実などの技術を用いて、自己受容感覚による自己身体の一部の知覚位置を移動させ、そこに拡張身体部位を対応付けることで、既存の身体を制御する感覚を用いて拡張身体部位を操作できる可能性が示唆された。

また、これまでのRHIの研究では、偽物の手の方向に自己受容感覚ドリフトが生じることが報告されてきたが、本研究では、左右に裂けた手の視覚フィードバックを呈示すると自己受容感覚による手の位置の知覚が左右の方向に広がることを示した。

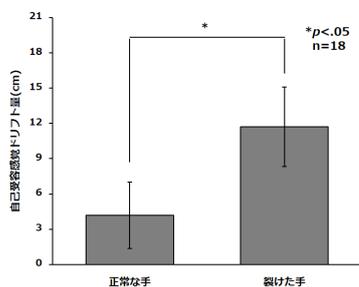


図3: 手の左右の広がり自己受容感覚ドリフト量

3.2 アンケートの結果

「まったくそう思わない」を0、「とてもそう思う」を6とした各質問項目の平均の値を図4-8に示す(エラーバーは標準誤差)。手に触覚が感じられていたかについて(Q1, 2)、バーチャルな手/自己の手と、正常な手/裂けた手の2要因参加者内分散分析を行った結果、主効果はそれぞれ有意であったが ($F(1, 17) = 8.26, p = .05, \eta_G^2 = 0.08$; $F(1, 17) = 4.64, p = .01, \eta_G^2 = 0.04$)、交互作用は有意ではなかった ($F(1, 17) = 0.02, p = 0.90, \eta_G^2 = 0.00$) (図4)。手の自己所有感について(Q3, 4)、同様の検定を行った結果、主効果はそれぞれ有意であったが ($F(1, 17) = 9.00, p = .00, \eta_G^2 = 0.13$; $F(1, 17) = 5.78, p = .03, \eta_G^2 = 0.07$)、交互作用は有意ではなかった ($F(1, 17) = 1.89, p = 0.19, \eta_G^2 = 0.02$) (図5)。これらの結果から、バーチャルな手の触覚および自己所有感が自己の手と比べて小さく、また裂けた手の触覚および自己所有感が正常な手と比べて小さいことが示され、裂けた手のような視覚フィードバックは自己の手に対する触覚や自己所有感を低下させることが示唆さ

れた。

手に脅威が感じられているかについて(Q5, 6)、同様の検定を行った結果、それぞれの主効果は有意ではなく ($F(1, 17) = 0.34, p = 0.57, \eta_G^2 = 0.00$; $F(1, 17) = 0.22, p = 0.64, \eta_G^2 = 0.00$)、交互作用も有意ではなかった ($F(1, 17) = 0.92, p = 0.35, \eta_G^2 = 0.00$) (図6)。これらの結果から、バーチャルな手/自己の手と正常な手/裂けた手は、手の脅威の感覚量に有意な影響をおよぼさないことが示された。また、手に脅威が感じられたかの評価(Q5, 6)の平均値はすべて2以下であり、本研究の手続きでは大きな脅威は得られなかったと考えられる。しかし、裂けた手と正常な手の間に差が見られなかったことは、裂けた手に対しても正常な手と変わらない自己身体としての知覚が生じていた可能性がある。

自己の手とバーチャルな手との間の不一致度について(Q7, Q8)、手の位置/手のサイズと、正常な手/裂けた手の2要因参加者内分散分析を行った結果、主効果はそれぞれ有意であったが ($F(1, 17) = 6.95, p = .02, \eta_G^2 = 0.07$; $F(1, 17) = 10.62, p = .00, \eta_G^2 = 0.10$)、交互作用は有意ではなかった ($F(1, 17) = 1.96, p = 0.18, \eta_G^2 = 0.01$) (図7)。この結果から、バーチャルな手と自己の手のサイズの一致度が位置の不一致度より高く、裂けた手の不一致度が正常な手の不一致度より高いことが示された。これらの自己の手とバーチャルな手の不一致という要因が触覚や自己所有感の感覚を低下させていた可能性を示唆する。特にQ7, 8の平均値が中央の3を超える被験者(3名)については左右の広がり自己受容感覚ドリフト量は約1.8 cmと小さく、裂けた手のような特殊な視覚フィードバックに対して自己の手との間の乖離を大きく感じる人は特に裂けた手による自己受容感覚ドリフトの効果が生じにくい可能性がある。

また、裂けた手として知覚されているかについて(Q9, 10)、それぞれの質問項目について0より大きいかの1サンプル t 検定を行った結果、両質問項目とも0より有意に大きいことが示された ($t(17) = 7.28, p = .00, d = 1.72$; $t(17) = 5.39, p = .00, d = 1.27$, Bonferroniの補正済) (図8)。この結果から、各質問項目(Q9, 10)の評価値の平均は中央の3以下の値(3.00, 2.89)であったが、「まったくそう思わない」の0よりは有意に高いということが示された。また、Q10の結果より、裂けている部分に自分の手がないようにある程度までは感じられていたということは、自己受容感覚ドリフトによって手の位置の感覚が左右に広がり、かつ裂けた領域に自己身体がないように感じられていたことを示唆する。

4. おわりに

本研究では、拡張身体部位を自己身体を動かす感覚と同じ感覚で操作する方法を実現するために、HMDを用いて自己の手の視覚フィードバックを裂けた手の状態に変容させ、手の一部の自己受容感覚が裂けた手の方向にドリフトしたように知覚させることが可能であるか検討する実験を行った。実験の結果、正常な手と比べ、裂けた手のほうが手の左

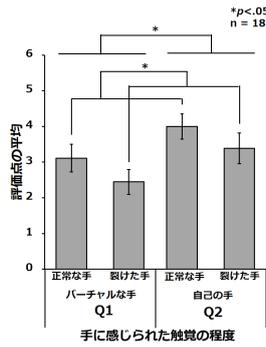


図 4: Q1, 2 の結果

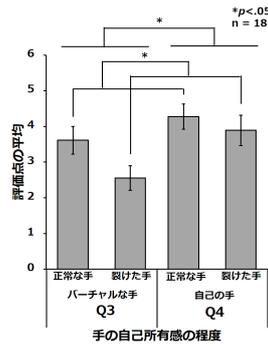


図 5: Q3, 4 の結果

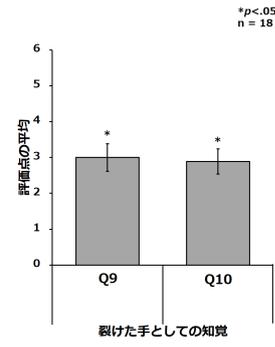


図 8: Q9, 10 の結果

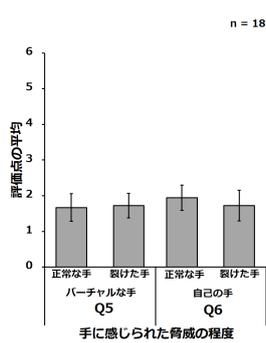


図 6: Q5, 6 の結果

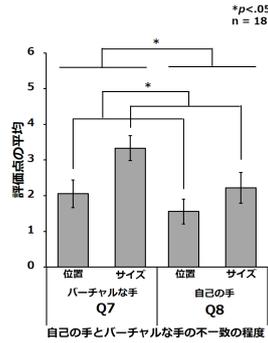


図 7: Q7, 8 の結果

右の広がり自己受容感覚ドリフト量が有意に大きかった。この結果から、自己身体の一部の感覚を移動して知覚させ、その位置に拡張身体部位を対応付けることで既存の身体を制御する感覚を用いて拡張身体部位を操作できる可能性を示唆した。

本研究では、バーチャルな手の触覚や自己所有感の主観評価は裂けた手で減少したが、RHIの研究で用いられるような視覚と同期した触覚フィードバックを与える手続きを加えれば [11], 正常な身体を操作するのとより近い身体感覚で操作することが可能となるかもしれない。また、バーチャルな手の左右に裂ける度合いは 15 deg に固定していたが、裂けた手の親指・示指・中指と、薬指・小指の部分それぞれ別に動かすことで独立に操作し、別の腕として機能させることが可能である。これらの手続きによって、拡張身体をより自然で自由に操作できるようになると考えられる。

謝辞 本研究は科研費 (16K00211) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Sasaki, T., Saraiji, M. Y., Fernando, C. L., Minamizawa, K., Inami, M., "MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism", ACM SIGGRAPH 2017 Technologies, 30, Article number a16, 2017.
- [2] Botvinick, M., Cohen, J., "Rubber hands 'feel' touch that eyes see", Nature, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998.
- [3] Tsakiris, M., Haggard, P., "The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution", Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 31, No. 1, p. 80-91, 2005.
- [4] Tsakiris, M., Prabhu, G., Haggard, P., "Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership", Consciousness and Cognition, Vol. 15, Issue 2, p. 423-432, 2006.
- [5] Tsakiris, M., "My body in the brain: A neurocognitive model of body", Neuropsychologia, Vol 48, Issue 3, p. 703-712, 2010.
- [6] Kalckert, A., Henrik Ehrsson, H., "Moving a rubber hand that feel like your own: A dissociation of ownership and agency", Frontiers in Human Neuroscience, Article number 40, 2012.
- [7] Yuan, Y., Steed, A., "Is the rubber hand illusion induced by immersive virtual reality?", Proceedings - IEEE Virtual Reality, Article number 5444807, p. 95-102, 2010.
- [8] Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H., Sanchez-Vives, M. V., "Towards a digital body: The virtual arm illusion", Frontiers in Human Neuroscience, Vol2, Article number 6, 2008.
- [9] 内田 裕基, 繁樹 博昭, "バーチャルな身体の運動方向, 偏位方向およびサイズが自己受容感覚ドリフトに及ぼす影響", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(1), pp. 61-67, 2019.
- [10] 川村 卓也, 繁樹 博昭, "自己受容感覚における身体の奥行き位置および能動的運動の視覚情報の効果", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(1), pp. 141-147, 2016.
- [11] Rohde, M., Luca, M., Ernst, M. O., "The Rubber Hand Illusion: Feeling of Ownership and Proprioceptive Drift Do Not Go Hand in Hand", PLoS ONE, Vol. 6, No. 6, Article number e21659, 2011.