

令和 2 年度
修士学位論文

VR 空間上の裂けた手に対する触覚フィードバックが自己身体感覚に及ぼす影響

Effects of haptic feedback with the virtual split hand
on self-body sensation

1235058 貝塚 涼

指導教員 繁樹 博昭

2021 年 3 月 1 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要 旨

VR 空間上の裂けた手に対する触覚フィードバックが自己身体 感覚に及ぼす影響

貝塚 涼

近年、ロボットアームを拡張された自己の身体として操作することを目指した研究が数多く行われているが、ロボットアームを 3 本目の手として自己身体と同じような感覚で操作させることは容易ではない。しかし、既存の身体部位の一部の自己受容感覚を変化させ、ロボットアームに対応付けすることができれば、ロボットアームを自己の手の一部として認識し、新たな身体部位を獲得できる可能性がある。そこで本研究では裂けた手の視覚フィードバック及び触覚フィードバックを呈示することで、自己の手の一部を裂けた手の方向に移動したように知覚させ、自己所有感や自己主体感を損なわずに裂けた手を操作することができるかについて検討した。実験の結果、裂けた手の視覚フィードバックにより一定時間操作を行うと自己受容感覚による自己の手の一部が裂けた方向に移動して知覚された。この結果から、自己の身体の一部を実際の位置から移動して知覚させ、その位置に拡張された身体部位に対応付けることで、既存の身体を制御する感覚を用いて拡張身体を操作できる可能性が示唆された。

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

Abstract

Effects of haptic feedback with the virtual split hand on self-body sensation

KAIZUKA Ryo

In recent years, various studies related to body augmentation have been conducted and showed that we are able to obtain new body parts which inherently not exist in human. However, it is difficult to make augmented limbs recognized as own actual body parts. In contrast, it might be easier to modify innate human body and adapt to augmented limbs to efficiently perceive it as own body parts and operate it naturally. In this study, we presented visual feedback of the split hand and haptic feedback to examine whether the participants could manipulate it as a split hand without losing their sense of self-ownership or self-agency. In particular, the proprioceptive drift of split hands was measured to examine whether the proprioception was modified by virtually modulated body parts. The results showed that the perceived proprioceptive position between index finger and little finger of split hand was significantly wider than normal hand. However, the addition of haptic feedback did not promote proprioceptive drift toward the split hand. This result suggests that the proprioception moved by visual feedback can be used for augmented body part.

key words body augmentation, proprioception, sense of self-ownership, sense of self-agency

目次

| | | |
|--------------|--------------------------------|-----------|
| 第 1 章 | はじめに | 1 |
| 1.1 | 背景 | 1 |
| 1.2 | 自己所有感及び自己主体感 | 3 |
| 1.3 | 自己受容感覚とラバーハンドイリュージョン | 3 |
| 1.4 | 拡張身体 | 4 |
| 1.5 | バーチャルリアリティ | 6 |
| 1.6 | 目的 | 7 |
| 第 2 章 | 実験方法 | 8 |
| 2.1 | 実験装置 | 8 |
| 2.2 | 呈示刺激 | 9 |
| 2.3 | ボタン押下課題内容 | 10 |
| 2.4 | アンケート | 12 |
| 2.5 | 実験参加者 | 13 |
| 2.6 | 実験手続き | 13 |
| 2.7 | 自己受容感覚ドリフト量の評価方法 | 16 |
| 2.8 | 精度と効率の評価方法 | 16 |
| 第 3 章 | 実験結果 | 17 |
| 3.1 | 自己受容感覚ドリフト量の結果 | 17 |
| 3.2 | 精度と効率の結果 | 19 |
| 3.3 | アンケートの結果 | 20 |
| 3.3.1 | 自己所有感の結果 | 20 |
| 3.3.2 | 自己主体感の結果 | 21 |

目次

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 3.3.3 | 手の形状の結果 | 22 |
| 3.3.4 | 手の脅威の結果 | 23 |
| 第 4 章 | 考察 | 24 |
| 4.1 | 自己受容感覚ドリフト量の考察 | 24 |
| 4.2 | 精度と効率の考察 | 26 |
| 4.3 | アンケートの考察 | 27 |
| 4.3.1 | 自己所有感の考察 | 27 |
| 4.3.2 | 自己主体感の考察 | 28 |
| 4.3.3 | 手の形状 | 28 |
| 4.3.4 | 手の脅威の考察 | 28 |
| 4.4 | 総合考察 | 29 |
| 第 5 章 | おわりに | 31 |
| | 謝辞 | 32 |
| | 参考文献 | 33 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | 脳波を用いた拡張身体部位の操作 | 2 |
| 1.2 | 他の身体部位を対応付けした拡張身体部位の操作 | 2 |
| 1.3 | 指先の位置関係を用いた拡張身体部位の操作 | 3 |
| 1.4 | RHI の手続き | 4 |
| 1.5 | パワードスーツ | 6 |
| 1.6 | 尻尾の形態の拡張身体部位 | 6 |
| | | |
| 2.1 | VIVE Pro HMD | 9 |
| 2.2 | Manus Prime II Haptic | 9 |
| 2.3 | VIVE Tracker | 9 |
| 2.4 | VIVE Controller | 9 |
| 2.5 | 正常な手 (左) 及び裂けた手 (右) | 10 |
| 2.6 | ボタン | 10 |
| 2.7 | ギロチン | 10 |
| 2.8 | ボタン出現範囲 | 11 |
| 2.9 | VR 空間上でのアンケート | 13 |
| 2.10 | 実験環境 | 15 |
| 2.11 | 実験の手続き | 15 |
| 2.12 | 自己受容感覚ドリフト量の評価方法 | 16 |
| | | |
| 3.1 | 触覚あり条件の自己受容感覚ドリフト量 (◇ : 全参加者の平均値, ○ : 各参加者の平均値) | 17 |
| 3.2 | 触覚なし条件の自己受容感覚ドリフト量 (◇ : 全参加者の平均値, ○ : 各参加者の平均値) | 17 |

図目次

| | | |
|-----|--|----|
| 3.3 | 精度 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値) | 19 |
| 3.4 | 効率 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値) | 19 |
| 3.5 | 自己所有感 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値) | 20 |
| 3.6 | 自己主体感 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値) | 21 |
| 3.7 | 手の形状 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値) | 22 |
| 3.8 | 手の脅威 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値) | 23 |
| 4.1 | 触覚あり条件での多感覚情報処理過程 | 25 |
| 4.2 | 触覚なし条件での多感覚情報処理過程 | 26 |
| 4.3 | Manus Prime II Haptic の問題点 | 27 |
| 4.4 | 裂けた手の拡張身体の実現方法 | 30 |

表目次

| | |
|------------------------|----|
| 2.1 アンケートの詳細 | 12 |
|------------------------|----|

第 1 章

はじめに

1.1 背景

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．このような，新たな身体部位の獲得を目的とした人工的な身体部位を「拡張身体部位」と呼ぶ [1]．また，新たな身体部位獲得を目指した拡張身体を「身体部位獲得の拡張身体」と呼ぶこととする．Penaloza & Nishino(2018) は，この身体部位獲得の拡張身体を目指し，ブレインマシンインターフェースから得られる脳の出力を用いて，腕の形態の拡張身体部位操作を実現した (図 1.1)[2]．佐々木ら (2017) は腕の形態の拡張身体部位を 2 本装着し，足の運動と拡張身体部位の運動を対応付けすることで，拡張身体部位を操作し (図 1.2)，タイピングと携帯通話を同時に行うなどの，正常な身体では不可能なマルチタスクの実行を実現した [3]．Prattichizzo et al. (2014) は指の形態の拡張身体部位を装着し，手の指先の位置情報を利用することで拡張身体部位の操作を行い，手の把持能力の強化を実現した (図 1.3)[4]．

身体部位獲得の拡張身体における拡張身体部位の操作方法として理想的なものは，拡張身体部位に対して自己身体と同程度の自己所有感 (Sense of Ownership) 及び自己主体感 (Sense of Agency) が生起していること，自己身体の動作とは独立して拡張身体部位の操作が行えることである．身体部位獲得の拡張身体に関する先行研究における拡張身体部位の操作方法是，脳波などの脳活動情報を用いて拡張身体部位を操作する方法と他の身体部位の位置や動作などの情報を用いて操作する方法に分けられる．しかし，既存の研究では，理想的

1.1 背景

な拡張身体部位の操作方法を実現することは困難と考えられる。佐々木らや Prattichizzo らのような、自己身体的位置や動作で拡張身体部位を操作する方法は、拡張身体部位の独立動作が困難である。Penaloza & Nishino のような、脳波などの情報を用いて拡張身体部位を操作する方法は、技術的な制約によって適切なタイミングで正確な制御が困難といった時間的精度及び空間的精度の問題があり、拡張身体部位に対して自己所有感及び自己主体感を生起させることが困難と考えられる。そこで、身体部位獲得の拡張身体ではなく、自己身体部位の一部の身体感覚を移動させ、移動した身体感覚位置に拡張身体部位を対応付けするという、新たな拡張身体を提案する。このような拡張身体を「身体部位変化の拡張身体」と呼ぶこととする。

本研究では、身体部位変化の拡張身体の実現を目指した基礎的研究として、裂けた手の視覚フィードバックによって自己身体感覚が裂けた手の形態へ変化するか検討することを目的とした。また、視覚と同期した触覚フィードバックが裂けた手の自己所有感や自己主体感、操作精度や効率に及ぼす影響についても検討した。



図 1.1 脳波を用いた拡張身体部位の操作



図 1.2 他の身体部位を対応付けした拡張身体部位の操作

1.2 自己所有感及び自己主体感



図 1.3 指先の位置関係を用いた拡張身体部位の操作

1.2 自己所有感及び自己主体感

自己身体を自己身体たらしめる要素として，Gallagher は自己所有感 (Sense of Ownership) 及び自己主体感 (Sense of Agency) を提唱した [5]．自己所有感とは，ある対象を自己身体の一部であると認識する感覚であり，自己身体以外の物体にも生じるような柔軟性を持つことが知られている [6]．自己所有感は視覚や体性感覚といった多感覚の統合によって生じると考えられている [6]．拡張身体部位に対する自己所有感については様々な検討がなされており [7, 8]，拡張身体部位を自己身体として受け入れているかを判断するための基準として広く用いられている．自己主体感とは，ある行為によって生じた結果を自身が行っていると認識する感覚であり [5]，行為とその結果生じる視覚フィードバックの時間的一致が必要であることが示されている [9]．拡張身体部位に対する自己主体感については，動作遅延によって自己主体感及び操作精度が低下することから [9, 10]，動作遅延を少なくすることが好ましいと考えられる．

1.3 自己受容感覚とラバーハンドイルリュージョン

自己受容感覚 (Proprioception) とは，筋，腱，関節の状態を知覚できる感覚である．視覚情報に頼らずとも自己身体の位置や形態を認識できるのは自己受容感覚が存在するためである．自己受容感覚は自己身体の形態と完全に一致しているわけではなく，ある程度の柔軟

1.4 拡張身体

性を持つことが、ラバーハンドイリュージョン (Rubber Hand Illusion : RHI) に関する研究から示されている。RHI は、自己の手と偽物の手を平行に置き、自己の手を仕切りなどで隠し、偽物の手のみが見える状態で、両方の手に視覚と同期した触覚刺激を呈示する (図 1.4)。以上の手続きを行うことで、偽物の手への自己受容感覚の移動や自己所有感及び自己主体感が生起するといった現象が見られる。

自己受容感覚位置と自己身体位置のズレは自己受容感覚ドリフトと呼ばれている。松井らは拡張身体部位の独立動作において、拡張身体部位の初期位置や初期速度、初期化速度の知覚によって運動計画を形成することの必要性を述べており、そのためには拡張身体部位に対する自己受容感覚ドリフトが必要であると述べている [1]。そこで、本研究では裂けた手の視覚フィードバックを一定時間操作することで、裂けた手の形態に自己受容感覚ドリフトが生じるかについて検討した。



図 1.4 RHI の手続き

1.4 拡張身体

ロボティクスなどの技術を使用し、人間の能力を拡張することを目指した技術は人間拡張もしくは拡張身体とも呼ばれている [11]。近年では、拡張身体の実現を目指した研究が盛んに行われており、パワードスーツを身体に装着することで限界以上の重量を持ち上げる拡張身体や (図 1.5)、尻尾を装着することでバランス感覚を強化する拡張身体 (図 1.6) など様々

1.4 拡張身体

な拡張身体が提案されている。その中でも、腕を獲得する拡張身体は、既存の身体では不可能なマルチタスクを実現させるなど、人々の生活を劇的に変化させると考えられる。

腕は複雑かつ緻密な動作が可能な身体部位である。そのため、単純にロボットアームなどの拡張身体部位を身体に装着し操作したとしても、自己身体の腕のように直感的に動作させることは困難だと考えられる。これは、拡張身体部位を自己身体としてではなく、ラジコンや車などの物として操作してしまうためである。腕の拡張身体部位を自己身体の腕のように直感的に操作することができれば、自己身体と変わらない複雑かつ緻密な動作が可能になると考えられる。そのためには、拡張身体に対して自己所有感及び自己主体感 [5]、体性感覚が生起している必要がある。体性感覚は触覚などの皮膚感覚と、筋、腱、関節の状態を知覚する自己受容感覚に分けられている。よって、拡張身体部位に対して自己所有感及び自己主体感を生起させ、視覚フィードバックに対応した触覚フィードバックを呈示し、拡張身体部位に自己受容感覚を移動させることができれば、自己身体と同様の感覚で拡張身体が操作が可能になると考えられる。

第3の腕を獲得するような拡張身体においては、拡張身体部位に新たな自己受容感覚を生起させることは困難と考えられる。これは Mhering et al. (2019) による6本の指を持つ人の研究からも示されているように [12]、大脳皮質の第一次運動野や第一次体性感覚野では生得的な身体部位が脳内で再現され [13]、自己の持つ身体部位を操作するために最適化されており、生得的でない位置に新たな体性感覚を生起させることが困難であると考えられるためである。そこで本研究では、新たな自己受容感覚を生起させるのではなく、元々備わっている身体部位の自己受容感覚の一部を移動させ、その位置に拡張身体部位を対応付けすることで、新たな形態の身体部位を獲得する拡張身体を目指し、検討する実験を行った。

1.5 バーチャルリアリティ



図 1.5 パワードスーツ

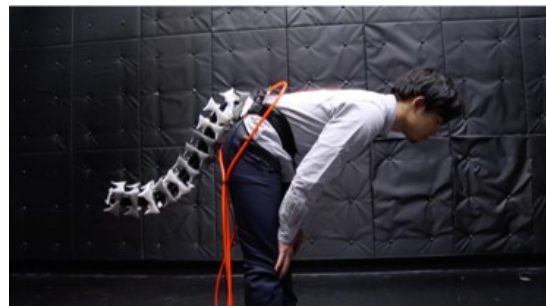


図 1.6 尻尾の形態の拡張身体部位

1.5 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) とは、厳密には現実でないが本質的には現実である空間を体験させるシステムである [14]。VR を構成するためには最低でも 3 つの要素を持つ必要がある。1 つは 3 次元空間性であり、人間にとって自然な矛盾のない 3 次元空間を構成している必要がある。もう 1 つは実時間相互作用性であり、物体への干渉が可能であるなどの、自己の行為がリアルタイムでフィードバックされる必要がある。最後は自己投射性であり、3 次元空間性や実時間相互作用性を満たすことで、あたかもその空間に入り込んだような感覚が生じている必要がある。

近年では、VR 技術の発展にともない、現実では技術的、資金的制約で実現困難な刺激を容易に呈示することが可能であるなどの利点から、拡張身体に関する様々な研究に用いられている [15, 16]。本研究では、現実空間での裂けた手の呈示が困難であるため、VR 技術によって裂けた手を操作する視覚フィードバックを呈示し、実験を行った。

1.6 目的

本研究では，身体部位変化の拡張身体の実現を目指した基礎的研究として，ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display : HMD) を用いて手の視覚フィードバックを裂けた手の形態に変化させ，一定時間の操作を行い，その操作に応じた視覚及び触覚フィードバックを呈示することで，裂けた手に対する自己受容感覚ドリフト，自己所有感，自己主体感，操作精度，操作効率を検討することを目的とした．また，RHI に関する研究で広く用いられている偽物の手に脅威を呈示する手続きとして，バーチャルなギロチンを用いてバーチャルな手に脅威を与えた．実験後にはアンケートによる主観的評価によって自己の手及びバーチャルな手の評価を行った．

第 2 章

実験方法

2.1 実験装置

視覚刺激の作成には Unity 2019.4.9f1 及び Blender2.90 を使用した。視覚刺激の呈示には HTC 社の VIVE Pro HMD を使用した (図 2.1)。HMD と顔の間に隙間が生じ、外界が見えてしまう参加者については、その隙間に詰め物をし、外界の情報を遮断した。バーチャルな手と実際の手の動作の同期及び触覚フィードバックの呈示には MANUS 社の Manus Prime II Haptic を使用した (図 2.2)。Manus Prime II Haptic は各指に装着してある振動デバイスが個別に振動することで、触覚フィードバックを呈示することが可能であった。また、装置の遅延は 5 ms 以下であった。バーチャルな手と実際の手の位置の同期には HTC 社の VIVE Tracker (図 2.3) を手の甲及び手首に装着することで行った。VR 空間上の刺激の操作や選択には HTC 社の VIVE Controller を使用した (図 2.4)。実験結果として得られたデータは R .3.5.1 及び R で動作する分散分析関数である anovakun 4.8.2 を用いて解析した [17]。

2.2 呈示刺激



図 2.1 VIVE Pro HMD



図 2.2 Manus Prime II Haptic



図 2.3 VIVE Tracker



図 2.4 VIVE Controller

2.2 呈示刺激

VR 空間上の手の視覚フィードバックとして、正常な左手と裂けた左手を用いた (図 2.5). 裂けた手は示指側が正常な手の位置よりも右方向に約 12 cm 移動しており、肘における裂けた角度は 15 deg であった. 実際の手に呈示する触覚フィードバックとして、Manus Prime II Haptic の指先に装着してある振動デバイスを用いた. バーチャルな手の操作精度や効率を計測するため、バーチャルなボタンを用いた (図 2.6). ボタンは直径が約 8.3 cm であり、ボタンの中心には約 0.5 cm の赤色の小球が存在し、ボタン上部には示指、中指、薬指、小指のいずれかのテキストが表示された. バーチャルな手に脅威を与えるため、バーチャルなギロチンを用いた (図 2.7). ギロチンは横約 10 cm, 縦約 32 cm であり、ギロチンの刃の稼

2.3 ボタン押下課題内容

働時には効果音を呈示した。

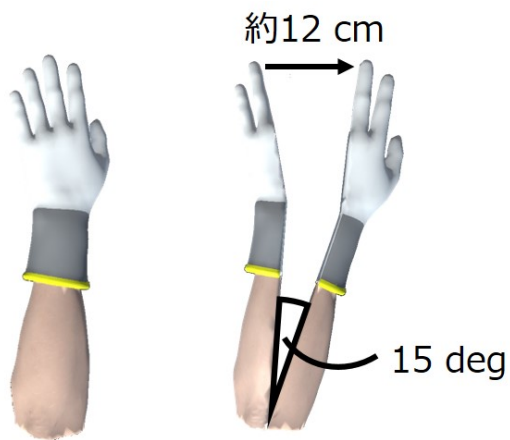


図 2.5 正常な手 (左) 及び裂けた手 (右)



図 2.6 ボタン

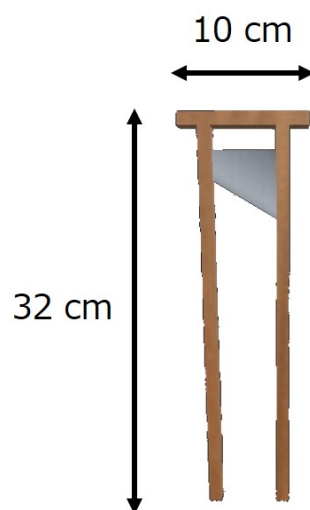


図 2.7 ギロチン

2.3 ボタン押下課題内容

バーチャルな手の操作精度や効率を計測するために、ボタン上部に表示されたテキストによって指定された指で、ボタン中心の赤い点を、なるべく素早く正確に押すという課題を行った。ボタン押しの回数は指の種類 4 本で、それぞれ 20 回の合計 80 回であった。ボタンは同時に 2 つまで出現し、その範囲は床から 70 cm 上を基準に、横 70 cm、縦 46 cm、奥

2.3 ボタン押下課題内容

行き 70 cm の直方体の、奥面、底面、左右面に内側を向くようにランダムに出現した (図 2.8). 触覚あり条件では, ボタンに接触している指に触覚フィードバックを呈示した. ボタンは指定された指以外でも押すことが可能であり, 間違った指で押した場合はその指に触覚フィードバックが与えられた.

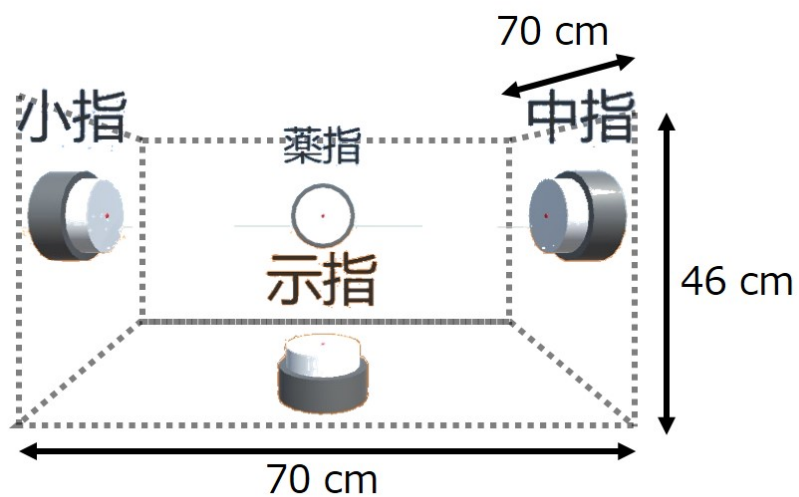


図 2.8 ボタン出現範囲

2.4 アンケート

表 2.1 アンケートの詳細

| | | |
|-------|-----|---|
| 自己所有感 | Q1 | バーチャルな左手が私の左手であるかのように感じた |
| | Q2 | バーチャルな左手が他の誰かの左手であるかのように感じた |
| | Q3 | 私の左手が複数に増えたかのように感じた |
| 自己主体感 | Q4 | バーチャルな左手を自分の左手のように操作できると感じた |
| | Q5 | バーチャルな左手の動きは私の左手の動きによって生じていると感じた |
| | Q6 | バーチャルな左手の動きが 私の左手の動きに影響を与えているかのように感じた |
| | Q7 | バーチャルな左手が勝手に動いているかのように感じた |
| 手の形状 | Q8 | 私の左手がバーチャルな左手になっているかのように感じた |
| | Q9 | ある時点で私の左手の形状が バーチャルな左手の形状に変化したかのように感じた |
| | Q10 | ある時点でバーチャルな左手の形状や肌の色や その他視覚的特徴が私の左手に似ていると感じた |
| 手の脅威 | Q11 | 私の左手がバーチャルなギロチンの影響を受けるかもしれないと感じた |
| | Q12 | バーチャルなギロチンを見て私の左手に脅威を感じた |
| | Q13 | バーチャルなギロチンによる左手の切断が起きたとき 私の左手を避けたいと感じた |
| | Q14 | バーチャルなギロチンによる左手の切断が起きたとき 私の左手が痛くなったように感じた |

VR 空間内のアバターに生じる感覚に対するアンケートの一般化を目的とした先行研究 [18] を参考に、Q1 から Q14 までの質問文を作成した (表 2.1)。質問文は Q1 から Q3 が自己所有感、Q4 から Q7 が自己主体感、Q8 から Q10 が手の形状、Q11 から Q14 が手の脅威を回答する内容であった。アンケートの評価点は-3(強く反対)、-2(反対)、-1(やや反対)、

2.5 実験参加者

0(どちらでもない), 1(やや同意), 2(同意), 3(強く同意) の 7 段階であった。アンケートの評価方法は, 自己所有感を $Q1 - Q2 - Q3$, 自己主体感を $Q4 + Q5 + Q6 - Q7$, 手の形状を $Q8 + Q9 + Q10$, 手の脅威を $Q11 + Q12 + Q13 + Q14$ としてそれぞれ計算し, 指標とした。また, アンケートの質問文の順序はランダムであり, 紙面ではなく, VR 空間上のテキストによって回答を行った (図 2.9)。

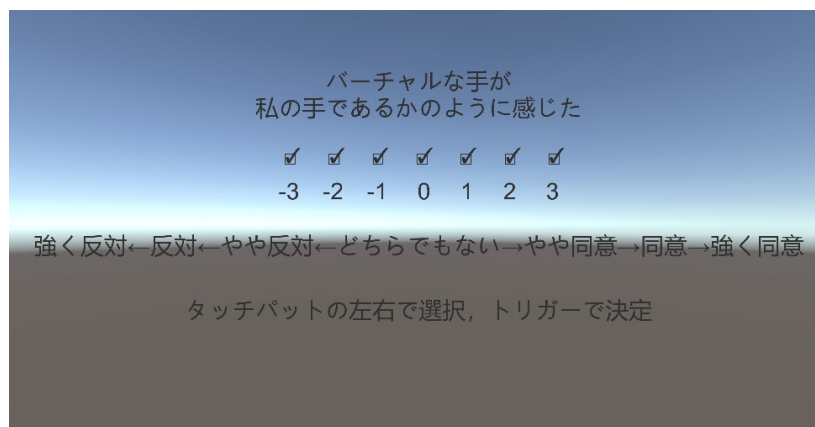


図 2.9 VR 空間上でのアンケート

2.5 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 から 24 歳の右利きの学生 36 名であった。

2.6 実験手続き

参加者は VIVE Pro HMD, VIVE Tracker, Manus Prime II Haptic を装着し, 右手で VIVE Controller を持ち, 椅子に着席した状態で実験を開始した (図 2.10)。実験開始後, 参加者は左手の各指を隙間なく密着させ, 真っすぐに伸ばした状態で机の上に置き, 自己受容感覚の判断終了まで左手を動かさないよう指示された。その後, 一様な黒色の空間に直径 1 cm の白色の小球が 1 つ出現した。参加者はこの小球の左右位置を VIVE Controller を用いて右手で操作し, 自己受容感覚から判断した示指の位置に移動させた。その後, 小球が消失し 5 s のブランクを挟んで, 小球がもう一度表示された。参加者は先ほどと同様の手順で小

2.6 実験手続き

球を小指の位置に移動させた。示指及び小指の自己受容感覚位置の判断終了後、黒色の空間及び小球が消失し、左手及びボタンが出現した。参加者は、表示されている左手を操作し、ボタン上部のテキストで指定された指で、ボタン中心の赤い点をなるべく素早く正確に押す課題の説明を受けた。ボタンは押下にともない消失し、新しいボタンがランダムな場所に出現した。この、ボタン押下後、消失しランダムな場所に出現するまでの流れを1試行とし、参加者は8試行(示指から小指までの各指4本×2試行)の練習試行を行った。その後、上部にテキストがないボタンが1つ出現し、参加者はこのボタンを押すことで本試行を開始した。本試行開始後、ボタンがランダムな位置に2つ同時に出現し、参加者はこのボタンを練習試行と同様の条件で押下した。本試行は各指ごとに20試行の計80試行であった。ボタン押下課題の終了後、参加者は左手を机の上に置き左手を見続けるよう指示された。その後、ギロチンが出現し、刃がバーチャルな左手の示指と小指を切断するような動作をするとともに効果音を呈示した。左手に脅威を与えた後、ボタン押下課題の直前に行った自己受容感覚の判断と同様の手続きを行い、示指と小指の位置を回答した。その後、黒色の空間及び小球が消失し、左手及びアンケートの質問文が表示され、参加者はアンケートに回答した。

参加者は以上の手続きを正常な手及び裂けた手の両条件で行った。条件の順序はカウンターバランスをとった。また、学習効果による影響を避けるため、触覚の有無条件(触覚あり/触覚なし)で参加者をそれぞれ18人に分けて参加者間計画として実験を行った(図2.11)。実験条件は触覚の有無条件及び手の違い条件(正常な手/裂けた手)の2要因各2水準とした。

2.6 実験手続き



図 2.10 実験環境

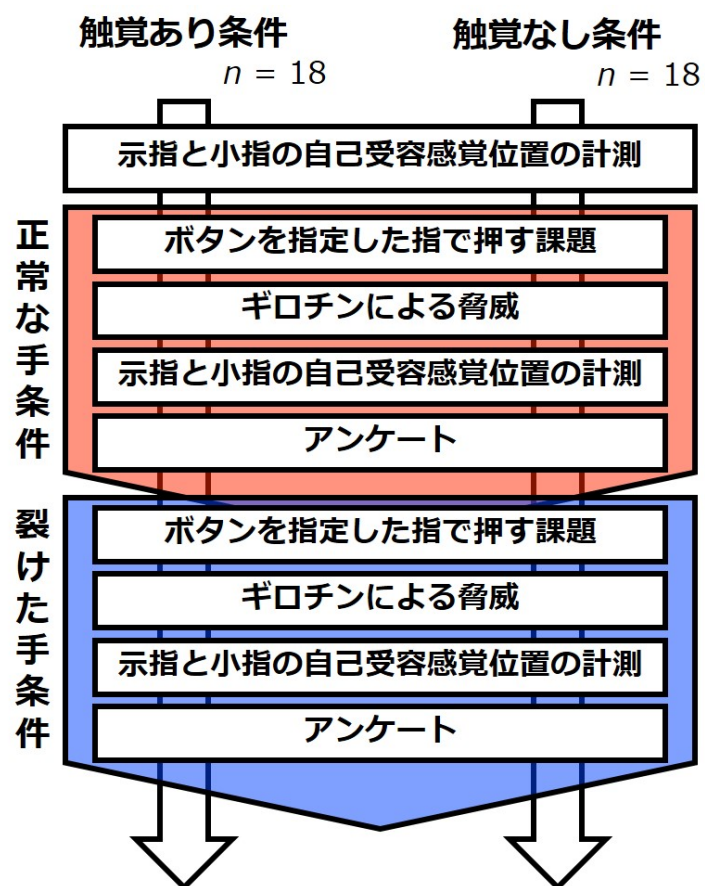


図 2.11 実験の手続き

2.7 自己受容感覚ドリフト量の評価方法

2.7 自己受容感覚ドリフト量の評価方法

自己受容感覚ドリフト量の指標として、実験開始直後に判断した示指と小指の自己受容感覚位置とボタン押下課題後に行った示指と小指の自己受容感覚位置の差を用いた (図 2.12). また、参加者から見て右方向を正、左方向を負として計算を行った.

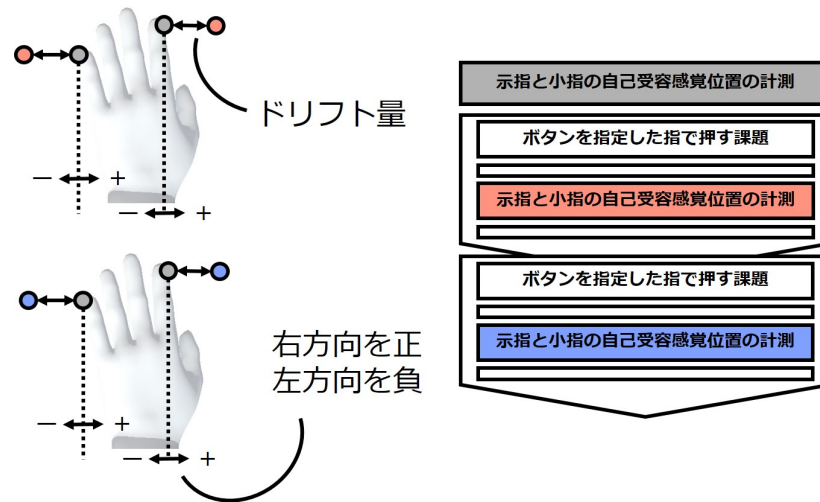


図 2.12 自己受容感覚ドリフト量の評価方法

2.8 精度と効率の評価方法

手の精度を検討するための指標として、ボタン中心の赤い点と指定された指の指先までの距離を用いた. 手の効率を検討するための指標として、ボタン押下課題の達成時間を用いた.

第 3 章

実験結果

3.1 自己受容感覚ドリフト量の結果

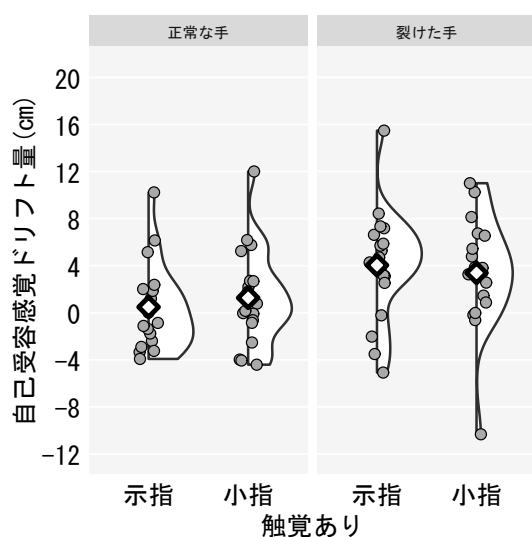


図 3.1 触覚あり条件の自己受容感覚ドリフト量 (◇：全参加者の平均値，○：各参加者の平均値)

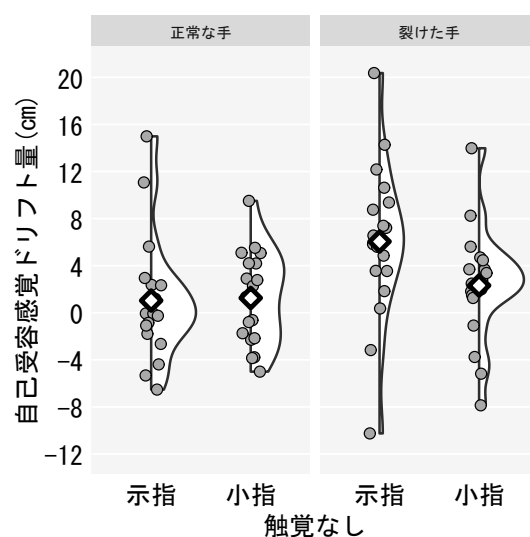


図 3.2 触覚なし条件の自己受容感覚ドリフト量 (◇：全参加者の平均値，○：各参加者の平均値)

触覚の有無 (触覚あり/触覚なし) 条件について、手の違い (正常な手/裂けた手) 条件の示指及び小指の自己受容感覚ドリフト量の平均値 (菱形) 及び各参加者のデータの平均値 (丸形) を図 3.1, 3.2 に示す。触覚の有無条件ごとに、自己受容感覚ドリフト量について正常な手/裂けた手及び示指/小指の 2 要因参加者内分散分析を行った。その結果、触覚あり条件では、手の違いの主効果が有意であったが ($F(1,17) = 10.40$, $p = .01$, $\eta_G^2 = 0.01$), 指の違い (示指/小指) の主効果及び交互作用は見られなかった ($F(1,17) = 0.00$, $p = .95$,

3.1 自己受容感覚ドリフト量の結果

$\eta_G^2 = 0.00$; $F(1, 17) = 1.00$, $p = .32$, $\eta_G^2 = 0.00$). 触覚なし条件では, 手の違いの主効果及び交互作用が有意であったが ($F(1, 17) = 10.90$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.01$; $F(1, 17) = 12.44$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.03$), 指の違いの主効果は見られなかった ($F(1, 17) = 2.93$, $p = .11$, $\eta_G^2 = 0.03$). また, 単純主効果検定の結果, 手の違いの主効果は示指においてのみ有意であり ($F(1, 17) = 14.99$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.15$; $F(1, 17) = 1.74$, $p = .20$, $\eta_G^2 = 0.01$), 指の違いの主効果は裂けた手においてのみ有意であった ($F(1, 17) = 6.99$, $p = .02$, $\eta_G^2 = 0.10$; $F(1, 17) = 0.07$, $p = .80$, $\eta_G^2 = 0.00$).

検定の結果, 触覚あり条件では, 正常な手よりも裂けた手の自己受容感覚ドリフト量が大きいたことが示された. また, 正常な手及び裂けた手の示指及び小指の自己受容感覚ドリフト量に差がないことが示された. 触覚なし条件では, 正常な手よりも裂けた手の自己受容感覚ドリフト量が大きいたことが示された. また, 正常な手では示指及び小指の自己受容感覚ドリフト量に差がなく, 裂けた手では小指よりも示指の自己受容感覚ドリフト量が大きいたことが示された. 以上の結果から, 触覚なし条件における裂けた手の示指の自己受容感覚のみが裂けた手の方向へドリフトしていた. しかし, そのドリフト量は約 6.05 cm であり, 裂けた手の示指の位置である約 12 cm には及ばないことが示された.

3.2 精度と効率の結果

3.2 精度と効率の結果

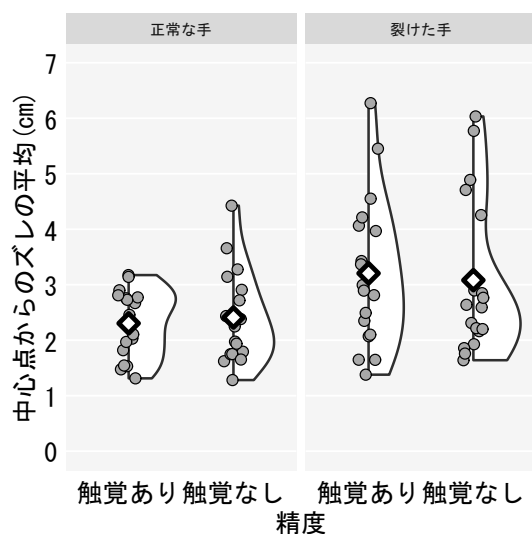


図 3.3 精度 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値)

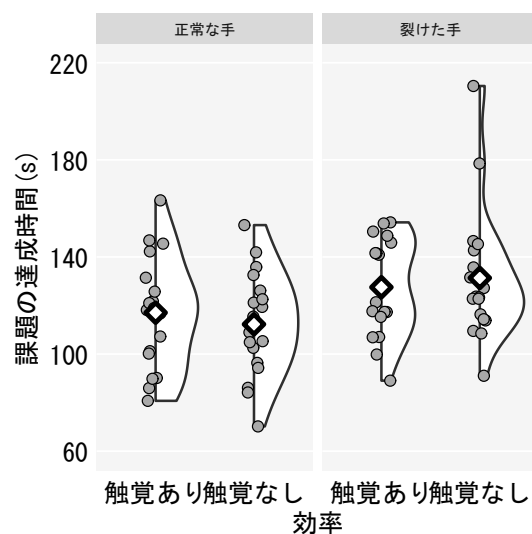


図 3.4 効率 (◇：全参加者の平均値, ○：各参加者の平均値)

課題に対するバーチャルな手の精度及び効率について、触覚の有無条件に対する手の違いのスコアの平均値 (菱形) 及び各参加者のデータの平均値 (丸形) を図 3.3, 3.4 に示す。触覚の有無条件を参加者間、手の違い条件を参加者内とし、精度及び効率のスコアに対して 2 要因混合分散分析を行った。その結果、精度では、手の違いの主効果が有意であったが ($F(1, 34) = 26.30, p = .00, \eta_G^2 = 0.12$), 触覚の有無の主効果及び交互作用は見られなかった ($F(1, 34) = 0.00, p = .98, \eta_G^2 = 0.00$; $F(1, 34) = 0.55, p = .46, \eta_G^2 = 0.00$)。効率では、手の違いの主効果が有意であったが ($F(1, 34) = 28.48, p = .00, \eta_G^2 = 0.10$), 触覚の有無の主効果及び交互作用は見られなかった ($F(1, 34) = 0.00, p = .95, \eta_G^2 = 0.00$; $F(1, 34) = 2.40, p = .13, \eta_G^2 = 0.01$)。

検定の結果、バーチャルな手の精度では、裂けた手よりも正常な手の精度が良く、触覚の有無で正常な手及び裂けた手の精度に差がないことが示された。バーチャルな手の効率では、裂けた手よりも正常な手の効率が良く、触覚の有無で正常な手及び裂けた手の効率に差がないことが示された。

3.3 アンケートの結果

3.3 アンケートの結果

アンケートの評価項目である自己所有感，自己主体感，手の形状，手の脅威の各評価項目について，触覚の有無条件を参加者間，手の違い条件を参加者内とし，2 要因混合分散分析を行った．

3.3.1 自己所有感の結果

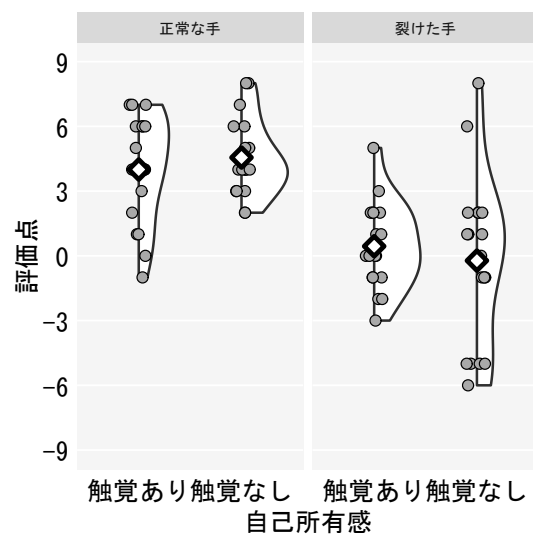


図 3.5 自己所有感 (◇：全参加者の平均値，○：各参加者の平均値)

触覚の有無条件に対する手の違いの評価点の平均値 (菱形) 及び各参加者のデータの平均値 (丸形) を図 3.5 に示す．自己所有感の評価点に対する検定の結果，手の違いの主効果が有意であったが ($F(1, 34) = 59.10$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.39$)，触覚の有無の主効果及び交互作用は見られなかった ($F(1, 34) = 0.01$, $p = .94$, $\eta_G^2 = 0.00$; $F(1, 34) = 1.27$, $p = .27$, $\eta_G^2 = 0.01$)．以上の結果から，自己所有感では，裂けた手よりも正常な手の自己所有感が高く，触覚の有無で差がないことが示された．

3.3 アンケートの結果

3.3.2 自己主体感の結果

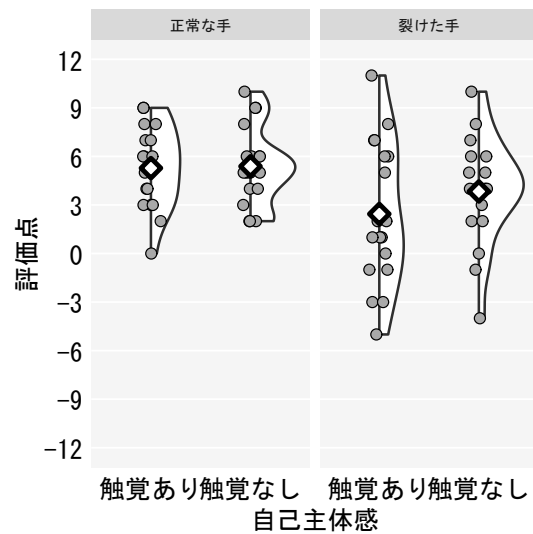


図 3.6 自己主体感 (◇：全参加者の平均値，○：各参加者の平均値)

触覚の有無条件に対する手の違いの評価点の平均値 (菱形) 及び各参加者のデータの平均値 (丸形) を図 3.6 に示す。自己主体感の評価点に対する検定の結果，手の違いの主効果が有意であったが ($F(1, 34) = 13.13$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.11$)，触覚の有無の主効果及び交互作用は見られなかった ($F(1, 34) = 0.69$, $p = .41$, $\eta_G^2 = 0.01$; $F(1, 34) = 1.11$, $p = .30$, $\eta_G^2 = 0.01$)。以上の結果から，自己主体感では，裂けた手よりも正常な手の自己主体感が高く，触覚の有無で差がないことが示された。

3.3 アンケートの結果

3.3.3 手の形状の結果

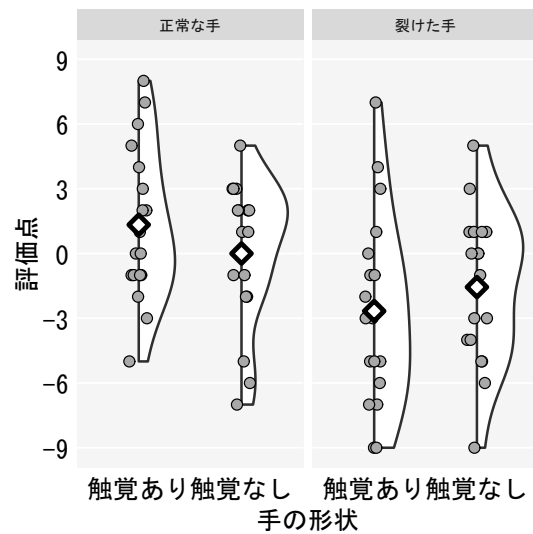


図 3.7 手の形状 (◇：全参加者の平均値，○：各参加者の平均値)

触覚の有無条件に対する手の違いの評価点の平均値 (菱形) 及び各参加者のデータの平均値 (丸形) を図 3.7 に示す。手の形状の評価点に対する検定の結果、手の違いの主効果及び交互作用が有意であったが ($F(1, 34) = 26.10$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.13$; $F(1, 34) = 5.04$, $p = .03$, $\eta_G^2 = 0.03$), 触覚の有無の主効果は見られなかった ($F(1, 34) = 0.01$, $p = .92$, $\eta_G^2 = 0.00$)。単純主効果検定の結果、触覚の有無の主効果は正常な手及び裂けた手で有意でなく ($F(1, 34) = 1.33$, $p = .26$, $\eta_G^2 = 0.04$; $F(1, 34) = 0.68$, $p = .41$, $\eta_G^2 = 0.02$), 手の違いの主効果は触覚あり及び触覚なしで有意であった ($F(1, 34) = 22.67$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.20$; $F(1, 34) = 5.06$, $p = .04$, $\eta_G^2 = 0.05$)。以上の結果から、手の形状では、裂けた手よりも正常な手の形状が強く知覚されており、触覚の有無で差がないことが示された。

3.3 アンケートの結果

3.3.4 手の脅威の結果

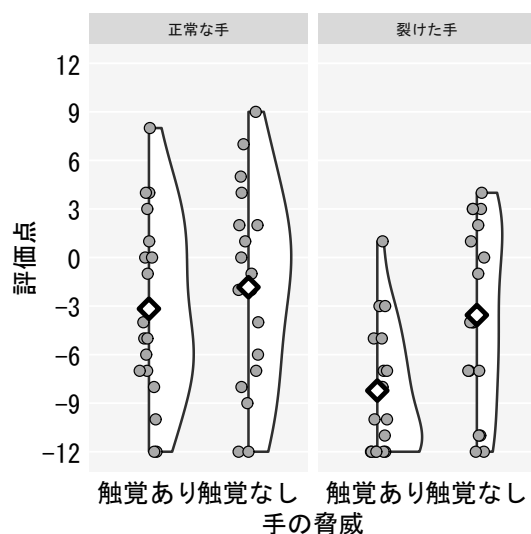


図 3.8 手の脅威 (◇：全参加者の平均値，○：各参加者の平均値)

触覚の有無条件に対する手の違いの評価点の平均値 (菱形) 及び各参加者のデータの平均値 (丸形) を図 3.8 に示す. 手の脅威の評価点に対する検定の結果, 手の違いの主効果及び交互作用が有意であったが ($F(1, 34) = 17.69$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.09$; $F(1, 34) = 4.28$, $p = .05$, $\eta_G^2 = 0.02$), 触覚の有無の主効果は見られなかった ($F(1, 34) = 3.33$, $p = .08$, $\eta_G^2 = 0.07$). 単純主効果検定の結果, 触覚の有無の主効果は裂けた手においてのみ有意であり ($F(1, 34) = 8.23$, $p = .01$, $\eta_G^2 = 0.19$; $F(1, 34) = 0.44$, $p = .51$, $\eta_G^2 = 0.01$), 手の違いの主効果は触覚あり及び触覚なしで有意であった ($F(1, 34) = 12.93$, $p = .00$, $\eta_G^2 = 0.21$; $F(1, 34) = 4.79$, $p = .04$, $\eta_G^2 = 0.02$). 以上の結果から, 手の脅威では, 裂けた手よりも正常な手の評価点が高く, 裂けた手で触覚あり条件よりも触覚なし条件の評価点が高いことが示された.

第 4 章

考察

4.1 自己受容感覚ドリフト量の考察

触覚あり条件では，正常な手よりも裂けた手の自己受容感覚ドリフト量が大きく，裂けた手の示指及び小指のドリフト量に差がないことから，手全体が右方向に移動していたことを示唆する．また，触覚なし条件では，正常な手よりも裂けた手の自己受容感覚ドリフト量が大きく，裂けた手で小指よりも示指の自己受容感覚ドリフト量が大きいことから，裂けた手として知覚されていたことを示唆する．しかし，示指のドリフト量の平均値が約 6.05 cm と，裂けた手の示指の位置である約 12 cm に及ばないことから，視覚フィードバックと一致した形態に自己受容感覚が変化していたとは言えないことが示唆された．

触覚あり条件の裂けた手で正常な手としての形態が全体的に右方向へ移動して知覚されており，触覚なし条件の裂けた手で裂けた手としての形態が知覚されていた．このことから視覚情報及び触覚情報が手の自己受容感覚に影響を及ぼした可能性がある．Rohde et al. (2011) は RHI において，自己の手の能動的な動きと同期した偽物の手の動きの視覚情報を呈示する手続きを取るムービングラバーハンドイリュージョン (Moving Rubber Hand Illusion : MRHI)[19, 20] において，触覚の有無によって自己受容感覚ドリフト量に差がないことを示したが [21]，この結果は本研究結果と矛盾している．しかし，手の位置と手の形態の 2 つに分けて自己受容感覚を考えると，MRHI では触覚情報は手の位置の自己受容感覚に影響を及ぼさないことが示され，本研究においては触覚情報が手の形態の自己受容感覚に影響を及ぼすことを示した．これらの結果から，視覚情報と体性感覚である自己受容感覚及び触覚情報を統合することで手を知覚していると考えられる．触覚あり条件の裂けた手で

4.1 自己受容感覚ドリフト量の考察

は、視覚情報が手の位置と形態の自己受容感覚に及ぼす影響によって生じた裂けた手の知覚と、触覚情報が手の形態の自己受容感覚に及ぼす影響によって生じた正常な手の知覚が統合されることによって、正常な手として右方向へ移動して知覚された可能性がある (図 4.1). また、触覚なし条件の裂けた手では、触覚情報による影響が存在しないことにより、視覚情報が手の位置と形態の自己受容感覚に及ぼす影響が相対的に大きくなり、裂けた手が知覚された可能性がある (図 4.2). このことから、視覚情報は手の位置と形態の自己受容感覚に影響を及ぼし、触覚情報は手の形態の自己受容感覚に影響を及ぼすことが示唆された. また、触覚情報による手の形態の自己受容感覚への影響は、視覚情報による手の形態の自己受容感覚の影響よりも大きいことが示された.

本実験の自己受容感覚ドリフト量の計測方法では視覚情報及び触覚情報が存在しないにもかかわらず、触覚なし条件の裂けた手で示指の位置が右方向に移動していたことから、視覚情報が呈示されている状態では裂けた手に一致した自己受容感覚変化が生じているかもしれない. また、これまでの RHI の先行研究では、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の影響を受け、自己受容感覚による示指の位置のみが裂けた手の示指の方向に移動するという新たな自己受容感覚ドリフトが生じることを示した.

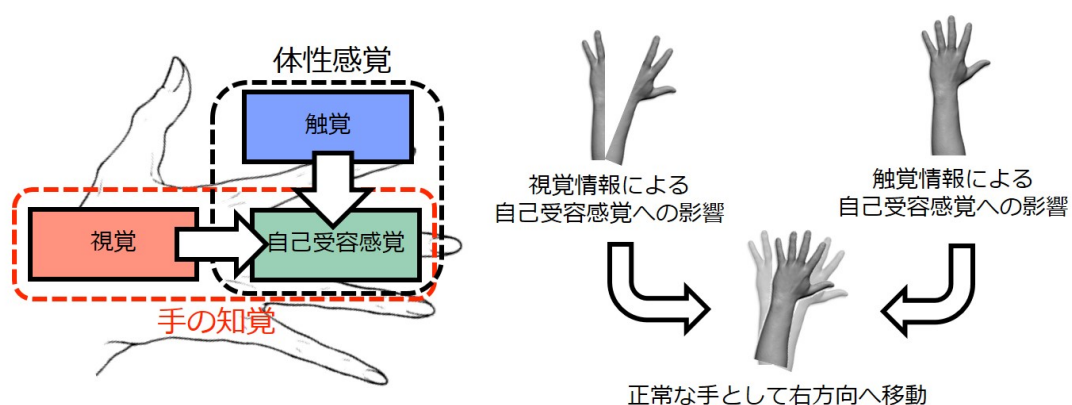


図 4.1 触覚あり条件での多感覚情報処理過程

4.2 精度と効率の考察

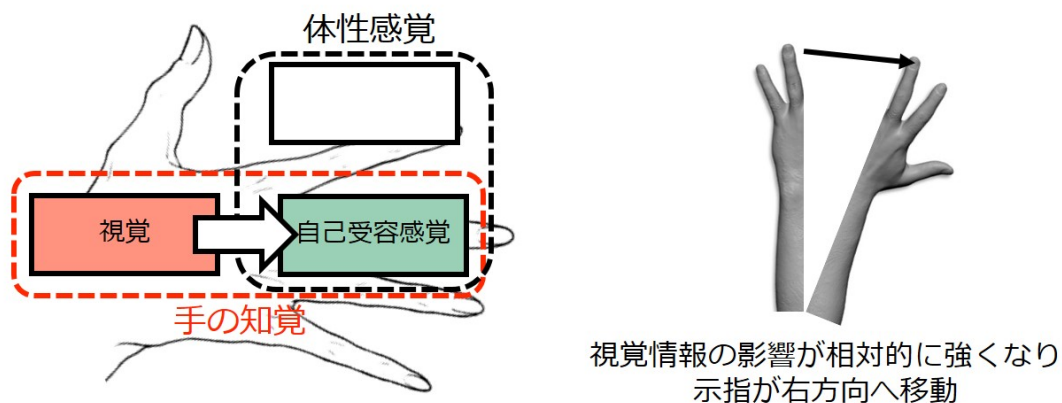


図 4.2 触覚なし条件での多感覚情報処理過程

4.2 精度と効率の考察

精度について、正常な手よりも裂けた手の方がボタンの中心位置からのズレが大きいという結果が得られた。裂けた手の精度において、ボタンの半径である約 4.2 cm よりズレの平均値が高い参加者が多く、別の指でボタンを押すことが多発した可能性があり、裂けた手の指の位置を直感的に理解できなかったと考えられる。また、触覚の有無による精度の差が無かったことから、触覚の有無はボタン押しの精度に影響を及ぼさないことが示された。効率についても、正常な手よりも裂けた手の方が課題の達成時間が長いという結果が得られた。これは、裂けた手の指の位置を直感的に理解できなかったため、ボタン押しを慎重に行う必要があったためだと考えられる。また、触覚の有無による効率の差が無かったことから、触覚の有無はボタン押しの効率に影響を及ぼさないことが示された。

裂けた手の精度と効率が正常な手よりも低いという結果が得られた。しかし、それぞれの値の逆数を取り、正常な手の値を 100 % として計算すると、裂けた手の精度においては約 74.96 % の精度であり、効率においては約 88.59 % の効率であった。この結果から、拡張身体部位を他の身体部位で操作する方法や脳波などを用いて操作する方法と比べ、高い精度

4.3 アンケートの考察

と効率が短時間で得られた可能性がある。また、裂けた手における課題の平均達成時間は129.44 s と短時間であることから、より長時間裂けた手を操作することで、指の位置を直感的に理解することができ、正常な手と同程度の精度と効率を期待できるかもしれない。

4.3 アンケートの考察

4.3.1 自己所有感の考察

自己所有感について、触覚の有無で自己所有感に差がないという結果が得られた。この結果は、RHI の知見と矛盾しており、本研究の装置では適切な触覚情報を呈示することが出来なかった可能性を示唆する。RHI においては視覚刺激と触覚刺激が非同期の場合に自己所有感が低下する。本研究装置では遅延が5 ms 以下であったため時間的同期はされていたと考えられるが、触覚刺激が指の爪の部分の振動という呈示方法であり(図 4.3)、空間的同期ができなかった可能性がある。この触覚刺激の時間的同期と空間的非同期が統合された結果、触覚の有無で差が得られなかったと考えられる。また、裂けた手の自己所有感が低く、正常な手と比べると自己所有感が生起しにくいという結果が得られた。

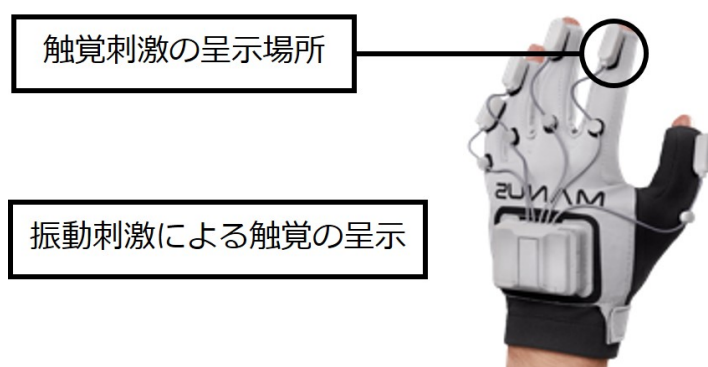


図 4.3 Manus Prime II Haptic の問題点

4.3 アンケートの考察

4.3.2 自己主体感の考察

自己主体感について、触覚の有無で自己主体感に差がないという結果が得られた。この結果から、触覚刺激の呈示は自己主体感を向上させるわけではないということが示された。また、裂けた手の自己主体感が低く、正常な手と比べると自己主体感が生起しにくいという結果が得られた。このことから、裂けた手では、正常な手を操作するような直感的な操作ができなかったことが示唆された。

4.3.3 手の形状

手の形状について、裂けた手における触覚の有無で差がないという結果が得られた。この結果は、自己受容感覚ドリフト量の結果と矛盾しており、触覚の有無は手の形状のアンケートにおける主観的評価に影響を与えないという結果が得られた。また、正常な手よりも裂けた手の評価点が低いという結果が得られた。この結果から、ボタン押しという課題内容では、正常な手と比べ裂けた手の形状を知覚することができなかったと考えられる。これらの結果から、自己の手の指の位置などを小球を操作することによって回答する方法と、アンケートによる手の形状の主観的評価方法では、その解答結果に乖離が生じることが示された。

4.3.4 手の脅威の考察

手の脅威について、裂けた手における触覚なし条件の評価点が高いという結果が得られた。この結果と自己受容感覚ドリフト量の結果から、触覚あり条件では触覚情報と視覚情報の影響によって、ギロチン位置と自己受容感覚位置が不一致となったことで脅威の評価点が低くなり、触覚なし条件では視覚情報の影響を強く受け、ギロチン位置と自己受容感覚位置が一致したことで脅威の評価点が高くなった可能性が示唆された。また、示指の自己受容感覚位置が裂けた手の示指の位置と一致していないにも関わらず、触覚なし条件の裂けた手で脅威の評価点が高かったことから、裂けた手の視覚情報が呈示されている状態では、裂けた手の示指の位置に自己受容感覚が移動していた可能性がある。

4.4 総合考察

また、手の脅威の評価点の平均値はいずれも 0 以下であり、本実験の実験装置では十分な脅威を与えることができなかった可能性がある。さらに、データの分散が大きく、アンケートによる主観的評価では、脅威に対する正しい評価を得ることができない可能性がある。この問題が VR の影響による自己所有感及び現実感の減少による影響であるかは検証がなされていないが、より厳密な実験結果を得るためには皮膚電位反応 (Skin Conductance Response : SCR) を計測するなどの手続き [22] を取る必要があると考えられる。

4.4 総合考察

触覚あり条件における裂けた手の自己受容感覚ドリフト量が示指及び小指で差がなく正常な手として知覚されており、触覚情報が正常な手の形態の自己受容感覚を促進したと考えられる。しかし、自己所有感のアンケートにおいて、触覚の有無によって差がないことから、触覚刺激が正確に呈示できなかった可能性がある。これらの結果から、正確でない触覚情報によって正常な手の形態への自己受容感覚変化を促進したことが示唆される。しかし、より正確な触覚情報を呈示することができれば、裂けた手の自己所有感が向上し、裂けた手の形態への自己受容感覚変化を促進する可能性がある。また、ボタン押しの課題の平均達成時間が約 2 分と短く、課題自体も裂けた手としての新しい機能を用いる内容ではなかった。このことから、より裂けた手としての機能を用いるような、示指側と小指側を同時に使用する課題や物をつかむ動作などを長時間行うことで、裂けた手を直感的に操作することが可能になると考えられ、自己受容感覚ドリフトの変化や精度と効率、自己所有感、自己主体感を促進する可能性がある。これらの問題点を改善し、裂けた手の自己受容感覚ドリフトを一致させ、自己所有感や自己主体感を向上させることができれば、AR やビデオシースルーによる技術を用いて自己の手に裂けた手を重畳し、移動した手の自己受容感覚位置に拡張身体部位を対応付けすることで (図 4.4)、既存の身体を操作するのと同じ感覚で自己の手の一部と拡張身体部位を操作できるかもしれない。

4.4 総合考察

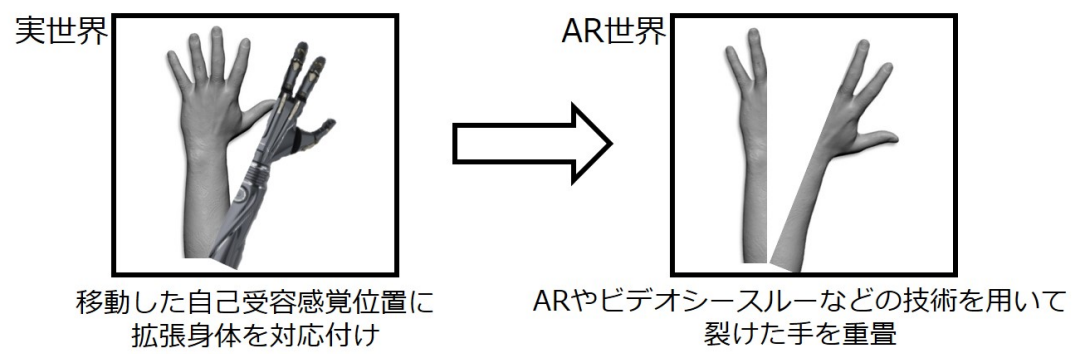


図 4.4 裂けた手の拡張身体の実現方法

第 5 章

おわりに

本研究では，既存の身体部位の一部を移動して知覚させ，移動した位置に拡張身体を対応付けすることで，拡張身体の実現可能かを検討する基礎的研究として，裂けた手の視覚フィードバック及び触覚フィードバックによって，自己受容感覚，自己所有感及び自己主体感，操作精度や効率に及ぼす影響について検討する実験を行った．実験の結果，裂けた手の視覚フィードバックによって，手の一部の自己受容感覚位置を裂けた手の方向へ移動して知覚されていた．このことにより，移動した自己受容感覚位置に拡張身体部位を対応付けすることで，既存の身体を制御する感覚を用いて，裂けた手の形態を操作できる可能性が示唆された．

本実験結果では，触覚フィードバックは裂けた手への自己受容感覚変化を促進するわけではないことが示された．また，自己所有感及び自己主体感，操作精度や効率は裂けた手で減少した．これは，装置の触覚呈示方法の問題や裂けた手の操作内容，課題時間の問題などによって生じた可能性がある．そのため，より正確な触覚フィードバックの呈示や裂けた手の示指側と小指側で別のタスクを行うといった操作を行うことで，自己受容感覚の変化や自己所有感及び自己主体感の生起が促進され，操作精度や効率が向上すると考えられる．

謝辞

本研究の指導教員であり，客観的な視点から適格なご指導ご指摘を頂いた高知工科大学情報学群繁柵博昭教授に深く感謝を申し上げます．また，本論文の副査を引き受けてくださった篠森敬三教授，門田宏准教授に感謝いたします．そして，実験に参加してくださった，高知工科大学に所属する計 36 名の皆様，ご協力いただきありがとうございました．

参考文献

- [1] 松井 和輝, 古川 正紘, 安藤 英由樹, 前田 太郎, “生得的でない身体部位追加のための身体像の伸展”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol 20, No.3, pp.243-252, 2015.
- [2] Penalzoza, C. I., Nishino, S., “BMI control of a third arm for multitasking”, Science Robotics, Vol 3, Issue 20, eaat1228, 2018.
- [3] Sasaki, T., Saraiji, M. Y., Fernando, C. L., Minamizawa, K., Inami, M., “MetaLimbs: Multiple arms interaction metamorphism”, ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, SIGGRAPH 2017 a16, 2017.
- [4] Prattichizzo, D., Malvezzi, M., Hussain, I. Salvietti, G., “The Sixth-Finger: A modular extra-finger to enhance human hand capabilities”, IEEE RO-MAN 2014 - 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication: Human-Robot Co-Existence: Adaptive Interfaces and Systems for Daily Life, p993-998, 2014.
- [5] Gallagher, S., “Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science”, Trends in Cognitive Sciences, Issue 1, p14-21, 2000.
- [6] Botvinick, M., Cohen, J., “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see”, Nature, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998.
- [7] Steptoe, W., Steed, A., Slater, M., “Human tails: Ownership and control of extended humanoid avatars”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume 19, Issue 4, April 2013, Article number 6479185, Pages 583-590.
- [8] Hoyet, L., Argelaguet, F., Nicole, C., Lecuyer, A., ““Wow! i have six fingers!”: Would you accept structural changes of your hand in VR?”, Frontiers Robotics AI,

- Volume 3, Issue MAY, 1 May 2016, Article number 27.
- [9] Maeda, T., Takahata, K., Muramatsu, T., Okimura, T., Koreki, A., Iwashita, S., Mimura, M., Kato, M., “Reduced sense of agency in chronic schizophrenia with predominant negative symptoms” , Psychiatry Research, Volume 209, Issue 3, 30 October 2013, Pages 386-392.
- [10] 金川 将成, 清川 清, 竹村 治雄, 横矢 直和, “手の動作計測遅延が仮想物体の操作性に与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol 4, No. 3, p.563-572, 1999.
- [11] 稲見 昌彦, 北崎 充晃, 宮脇 陽一, ゴウリシャンカー・ガネッシュ, 岩田 浩康, 杉本 麻樹, 笹原 俊一, 瓜生 大輔, “自在化身体論 超感覚・超身体・変身・分身・合体が織りなす人類の未来”, 株式会社エヌ・ティー・エス, 2021.
- [12] Mehring, C. Akselrod, M. Bashford, L. Mace, M. Choi, H. Blüher, M. Buschhoff, A. -S. Pistohl, T. Salomon, R. Cheah, A. Blanke, O. Serino, A. Burdet, E. , “Augmented manipulation ability in humans with six-fingered hands”, Nature Communications, Volume 10, Issue 1, 1 December 2019, Article number 2401.
- [13] Penfield, W. , Boldrey, E. , “Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation” , Brain, Volume 60, Issue 4, December 1937, Pages 389-443.
- [14] 舘 障, 佐藤 誠, 廣瀬 通孝, “バーチャルリアリティ学”, コロナ社, 2011.
- [15] Fukuoka, M., Verhulst, A., Nakamura, F., Takizawa, R., Masai, K., Sugimoto, M., “FaceDrive: Facial expression driven operation to control virtual supernumerary robotic arms” , SIGGRAPH Asia 2019 XR - International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Page 9-10, 2019.
- [16] 小柳 陽光, 大村 廉, “飛行体験における没入感向上のための鳥アバタへの身体所有感の生起可能性の検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No 4, pp. 513-522, 2017.

参考文献

- [17] Iseki, R : ANOVA 君 ; <http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?FrontPage>,
(最終閲覧日 : 2021/02/13) .
- [18] Gonzalez-Franco, M., Peck, T. C., “Avatar Embodiment. Towards a Standardized Questionnaire”, *Frontiers Robotics AI*, Vol 5, Issue JUN, 2018.
- [19] Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T., Moore, C., “Movement and the rubber hand illusion”, *Perception*, Volume 38, Pages 271-280, 2009.
- [20] 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.
- [21] 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*, Volume 6, 2011.
- [22] Armel, K. C., Ramachandran, V. S. “Projecting sensations to external objects : Evidence from skin conductance response”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol 270, Pages 1499-1506, 2003.