

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12729

研究課題名（和文）仮想身体に対する身体意識と身体モデルの変容との関係

研究課題名（英文）Bodily self-consciousness of a virtual body and transformation of an internal model of the body

研究代表者

片山 正純（Katayama, Masazumi）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：90273325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、手の身体モデルを変容させるための実験パラダイムを構築し、身体意識（運動主体感と身体所有感）と身体モデル（脳内身体表現）の変容との関係を調査した。手の身体モデルの変容度合いを評価するために提案した指標によって、仮想手が自己の手だと感じるグループでは、手の身体モデルが変容していることを明らかにした。しかし、自己の手だとは感じていないグループでは変化が見られなかった。また、外見的類似性の低い仮想手（骨格提示、光点提示）においても身体意識が成立することから、外見的類似性が必要不可欠な要因ではないことを明らかにした。さらに、対象物把持時の力覚は身体意識を促進することも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、身体所有感と手の身体モデルの変容との関係、外見的類似性と身体所有感の関係、力覚情報と身体意識との関係について報告し、さらに身体所有感が成立している場合に身体モデルが変容することを報告した。これらの結果は、身体意識の成立条件を解明する上で非常に重要であり、さらに義手などのリハビリテーションにおいて貢献できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the relationship between bodily self-consciousness (sense of agency and sense of body ownership) and the relearning of the body model (body representation in the brain), using an experimental paradigm we built. The body model of the hand revealed that the body model of the hand was relearned in the group who felt that the virtual hand was their own hand, by two performance indexes we proposed. However, no change was observed in the group that did not perceive the virtual hand as their own. In addition, bodily self-consciousness was established even with the virtual hands (a skeleton hand and a light-points hand) with low appearance similarity. This indicates that appearance similarity was not an essential factor. Furthermore, the force sensation in a grasping task activated bodily self-consciousness.

研究分野：認知科学

キーワード：身体意識 運動主体感 身体所有感 身体モデル 身体表現

### 1. 研究開始当初の背景

ゴム手錯覚 (Botvinick ら,1998) が報告されてから身体意識に関する研究が活発に行われている。ゴム手錯覚とは、自己の手が見えない状態で人工の手を見ているとき、人工の手と自己の手への同期した視触覚刺激によって人工の手が自己の手であるかのように感じる錯覚である。このような身体意識は「この運動を引き起こしているのは自分自身である」という運動主体感と「この身体は自分のものである」という身体所有感に分類される (Gallagher, 2000)。つまり、ゴム手錯覚は身体所有感の錯覚である。この観点から、人工の手に対する身体意識や VR 空間内の仮想身体に対する身体意識について様々な条件で調べられてきた (Tsakiris ら, 2005; Costantini ら, 2007; Slater ら, 2008,2009; Shimada ら, 2009; Tsakiris, 2010; Kalckert ら, 2012; Blanke, 2012;など)。

一方、我々は、手で使用する道具の認知過程を説明するための脳内シミュレーション仮説を提案し、身体モデル (脳内の身体表現) を一時的に変容させる実験パラダイムを構築し、仮説の妥当性を様々な観点から検証し、身体モデルが道具の認知過程に関与する可能性を示してきた。この実験パラダイムでは、図 1(b)のように、より大きな物が把持できるように手を變形して表示し、變形した仮想手に対応した身体



(a) 變形していない仮想手 (b) 變形した仮想手

図 1 VR 空間内の仮想手

モデルに変容したとき、道具のサイズに関する認知的判断(道具と見なすサイズ)は手の変形に対応して變化した。しかし、モニタに表示した仮想手に対する身体所有感が低い被験者グループではこのような變化は生じなかった。我々の仮説に基づいて考えれば、仮想手に対して身体所有感を感じているときには身体モデルが変容するが、感じていないときには身体モデルの変容が抑制され、この結果として道具と見なすサイズが變化しなかったと推測される。つまり、この結果は、身体所有感が身体モデルの変容過程に関与する可能性があることを示唆している。

### 2. 研究の目的

本研究では、身体意識の成立に重要となる感覚情報 (視覚と体性感覚) および運動指令の遠心性コピーに着目した様々な条件において身体意識を計測し、さらに身体モデルの変容度合いの指標を考案することによって身体意識と身体モデルの変容との関係を調査した。本研究では、以下の研究目標に関して実施した。

- 研究目標(1) 異なる方向に手を表示したときの身体意識を計測し、身体意識と身体モデルの変容との関係を明らかにする。
- 研究目標(2) 異なる運動条件 (能動運動条件, 受動運動条件) における身体意識を計測し、身体意識と身体モデルの変容との関係を明らかにする。
- 研究目標(3) 様々な手の視覚提示 (皮膚表面のテクスチャ, 骨格表示, 指先・関節部の点表示) における身体意識を計測し、身体意識と身体モデルの変容との関係を明らかにする。
- 研究目標(4) 対象物把持における体性感覚情報 (触覚・力覚) を付加したときの身体意識を計測し、身体意識と身体モデルの変容との関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、HMD(Oculus Rift CV2)、力覚提示装置 (PHANTOM, 2 台)、手・指運動計測装置 (CyberGlove, Fastrak)、三次元運動計測装置 (OPTOTRAK3020)、生体工学的にデザインされた実験用椅子を用いて実験環境を構築した (図 2)。被験者の手・前腕の運動を計測し、手・前腕の仮想手と対象物を HMD に表示した。

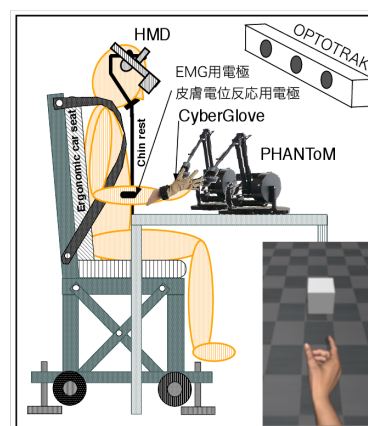


図 2 実験環境

#### 3.1 研究目標(1)

本研究では、身体所有感と手の身体モデルの変容との関係を調べるために、運動主体感をできる限り低下させないで、身体所有感のみを操作するために、図 3 のように手の方向を回転させた仮想手を HMD に表示した。仮想手の變形なし条件では被験者の手方向と仮想手の手方向の角度差を 0 度とし、變形あり条件では角度差を 0 度, 60 度, 90 度とした。手形状の變形は、図 3 のように、指の第 2 関節と第 3 関節のリンク長を 1.5 倍にし、より大きな物が把持できるようにした。実験手順は、まず仮想手の變形なし条件で学習課題を繰り返し実行し、その後計測した。

次に、変形あり条件で同様に学習課題と計測を行った。学習課題は、図2の画面のように仮想手と物体を表示し、様々なサイズの対象物を親指と指示指で精密把持する課題とした。また、変形あり条件では、角度差を被験者毎に変えてカウンターバランスをとった。計測は、

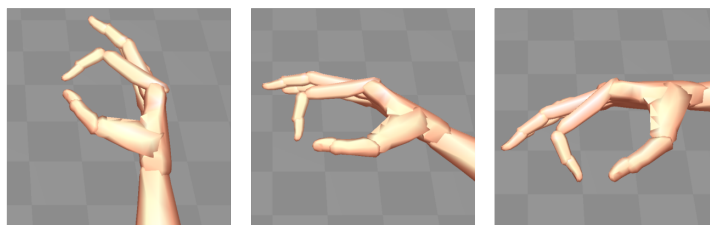


図3 HMDに提示した仮想手（角度差は左から0度、60度、90度）

身体意識に関するアンケート調査、最大指先幅と最大把持サイズを計測した。本研究において、手の身体モデルの変容度合いを調べるための指標として最大指先幅と最大把持サイズを提案した。図1(b)や図3のように変形した仮想手に対応した身体モデルに変容したときには、被験者自身の最大指先幅は変形なし条件と比較して小さくなり、最大把持サイズは大きくなることになる。

### 3.2 研究目標(2)

本研究では、運動主体感と手の身体モデルの変容との関係を調べるために、身体所有感をできる限り低下させないで、運動主体感のみを操作するために運動を意図して実行する能動条件と自身の意図とは関係なく手・指が他動的に動作する受動条件で上記と同様の学習と計測を行った。この実験では、力覚提示装置の指サックを親指と指示指の各指先に装着し、受動条件において学習課題が成功するようにこの装置を駆動することにより指先を動作させた。手順としては、まず仮想手を変形しない状態での能動条件で学習と計測を行い、次に仮想手を変形して提示して能動条件と受動条件で学習と計測を実施した。研究目標(1)と同じ学習課題と計測とした。

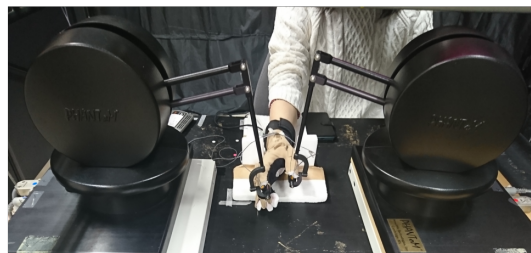
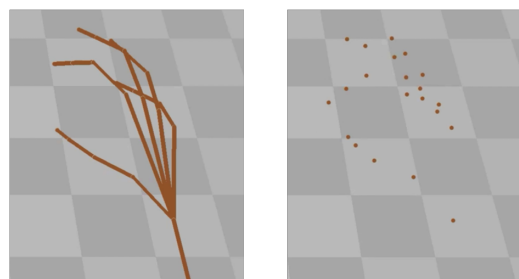


図4 実験環境

### 3.3 研究目標(3)

身体意識の成立には、意図した運動や感覚情報などの時間的同期性や空間的一致性が重要であり、さらに形態的類似性に関しても調べられている。しかし、従来研究における形態的類似性の研究（例えば、Tsakirisら、2010；Tieriら、2015）では、手の身体的構造や外見などの要因が含まれており、系統的に調べられていませんでした。そこで、本研究では、形態的類似性を構造的類似性と外見的類似性に分類することを提案しました。構造的類似性とは、身体の運動学的な構造（関節の配置や関節数やリンク長など）に関する内的要因の類似性であり、外見的類似性とは皮膚表面の色やテクスチャや立体的特徴などの外的要因に関する類似性です。

本研究では、まず構造的類似性は満たしているが、外見的類似性が極めて低い仮想手（骨格提示と光点提示）を用いて、外見的類似性が身体意識にとって必要不可欠な要因であるかどうかについて調査した。運動課題として、2つの小円盤の各位置に仮想手の親指と人差し指の指先を合わせる試行を繰り返し実行した（20試行を1セットとして3セット実施）。各セットの終了後に身体意識（運動主体感と身体所有感）に関するアンケート調査を行った。この手順を骨格提示と光点提示のそれぞれに関して実施した。



(a) 骨格提示

(b) 光点提示

図5 外見的類似性の極めて低い仮想手

### 3.4 研究目標(4)

本研究では、仮想環境内での対象物操作時において、対象物との力覚・触覚が身体意識に及ぼす影響について調査した。まず運動課題を繰り返し実施し、その後に身体意識（運動主体感と身体所有感）に関するアンケート調査を行った。運動課題は、表示された対象物（立方体）を親指と指示指の指先で精密把持して、右側の目標円内に移動させる運動とした。この手順で力覚なし条件と力覚あり条件のそれぞれの条件で実施した。力覚あり条件では、力覚提示装置（PHANTOM, 2台）を用いて、各指先が対象物に触れたときに力覚を指先に提示した。本実験は被験者内計画とし、力覚なし条件と力覚あり条件の順番は被験者間でカウンターバランスをとった。

## 4. 研究成果

### 4.1 研究目標(1)



まず学習課題の精度に関して、すべての指先での誤差が条件間で有意差は認められなかったため ( $p>0.05$ )、すべての条件において同程度の精度で学習課題の実行が可能となっていた。

図6に示す身体意識のように、仮想手に対する運動主体感はすべての条件で非常に高く、条件間で有意差は認められなかったが ( $p>0.05$ )、身体所有感では条件間に有意差が認められた ( $p<0.05$ )。身体所有感の評定値に関する度数分布では高群と低群の2極化が認められたため、被験者グループを身体所有感の高群と低群に分類して評価した。最大指先幅 (図7) と最大把持サイズ (図8) において、両者とも低群においてはほとんど変化していないが、高群においては有意に変化している ( $p<0.05$ )。

つまり、これらの結果は、仮想手を自身の手であると感じている被験者群では最大指先幅と最大把持サイズとも変化しているため、手の身体モデルが変容していることを示唆している。しかし、自身の手であると感じていない被験者群では両者ともほとんど変化していないため、手の身体モデルは変容していないを示唆している。一方、運動主体感に関してはこのような傾向は見られなかった。

以上より、身体所有感は手の身体モデルの変容に関与することを明らかにした。

#### 4.2 研究目標(2)

図9の身体意識において、身体所有感は能動条件と受動条件においても比較的高い評定値となっており、条件間で有意な差は認められなかった ( $p>0.05$ )。運動主体感では能動条件では高い評定値となっているが、受動条件では極めて低くなっている ( $p<0.05$ )。そこで、上記と同様に、被験者グループを身体所有感の高群と低群に分類して評価した。最大指先幅 (図10) と最大把持サイズ (図11) において、両者とも低群においてはほとんど変化していないが、高群においては有意に変化している ( $p<0.05$ )。つまり、これらの結果は、仮想手を自身の手であると感じている被験者群では最大指先幅と最大把持サイズとも変化しているため、手の身体モデルが変容していることを示唆している。しかし、自身の手であると感じていない被験者群では両者ともほとんど変化していないため、手の身体モデルは変容していないを示唆している。一方、運動主体感に関してはこのような傾向は見られなかった。

以上より、能動条件と受動条件において、身体所有感は手の身体モデルの変容に関与することを明らかにすることができた。

#### 4.3 研究目標(3)

骨格提示と光点提示における身体所有感の評定値の度数分布を図12と図13に示す。両者とも身体所有感の高群と低群に2極化しているため、被験者グループを身体所有感の高群と低

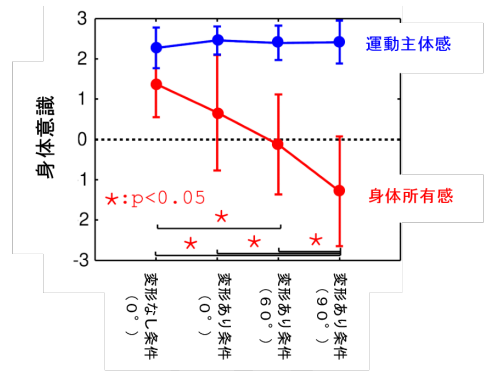


図6 身体意識

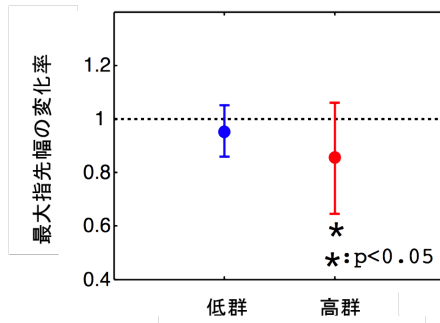


図7 最大指先幅

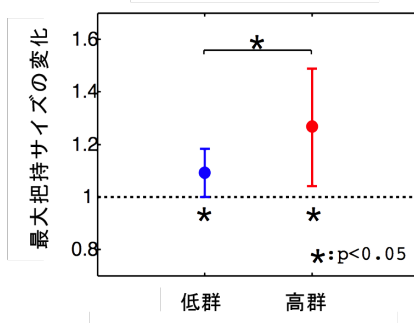


図8 最大把持サイズ

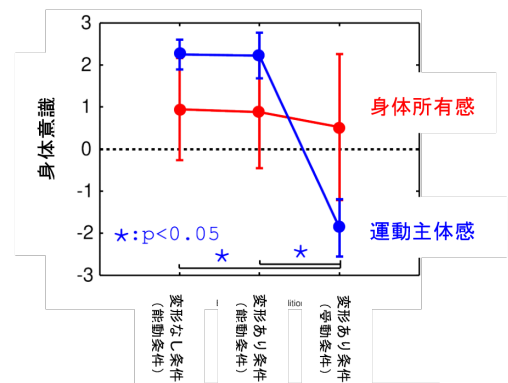


図9 身体意識

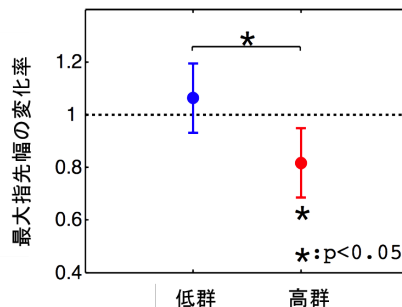


図10 最大指先幅

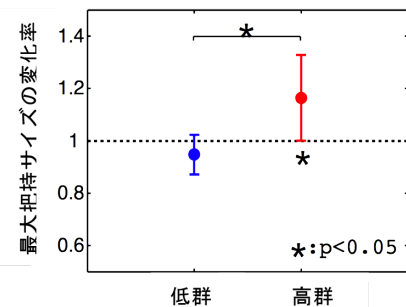


図11 最大把持サイズ



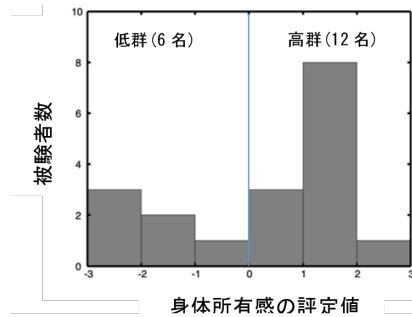


図 1 2 身体所有感の分布 (骨格提示)

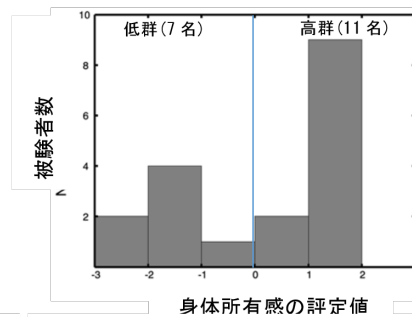


図 1 3 身体所有感の分布 (光点提示)

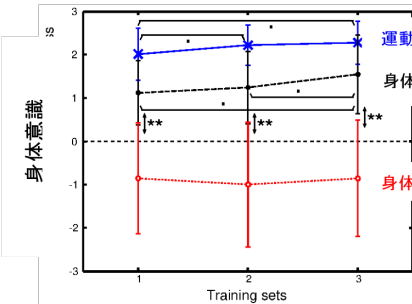


図 1 4 身体意識 (骨格提示)

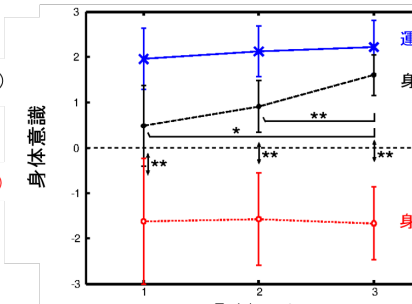


図 1 5 身体意識 (光点提示)

群に分類して評価した。セットの終了時の身体意識の評定値を図 1 4 と図 1 5 に示す。運動主体感に関しては骨格提示と光点提示とも高い評定値となっている。身体所有感の低群では、非常に低い評定値となっている。骨格提示における身体所有感の高群では、第 1 セットから身体所有感は比較的高い評定値となっており、セット毎に少しずつではあるが上昇傾向を示している ( $p < 0.1$ )。一方、光点提示における身体所有感の高群では、第 1 セットで評定値が 0 (どちらとも言えない) 付近になっているが、セット毎に上昇し ( $p < 0.05$ )、第 3 セットでは骨格提示と同程度まで上昇している。また、骨格提示と光点提示における身体所有感の高群の第 3 セットでの身体所有感の評定値は研究目標(1)(2)における変形なし条件と同程度になっており、骨格提示と光点提示の仮想手に対しても身体所有感が成立することを示している。以上より、外見的類似性の極めて低い仮想手においても運動主体感と身体所有感が成立するため、必ずしも外見的類似性が必要不可欠な要因ではないことを示唆している。

さらに、被験者自身の手の方向を基準として仮想手の方向を左側に回転させて表示することにより、自己受容感覚ドリフトを計測した。この結果、運動主体感は上記と同様に高い評定値を示したが、身体所有感の評定値は有意に 0 より低くなり、運動課題を繰り返し行っても上昇する傾向は見られなかった。このような状態においても自己受容感覚ドリフトは生じていた。ゴム手錯覚などの従来研究では、身体所有感の錯覚量として自己受容感覚ドリフトは広く使用されてきた。しかしながら、Longo ら(2008)なども本研究と同様の結果を報告しているため、自己受容感覚ドリフトを身体所有感の錯覚量と対応づけて議論すべきではないかもしれない。

#### 4.4 研究目標(4)

本研究では、仮想環境内での対象物操作時において、対象物との力覚が身体意識に及ぼす影響について調査した。力覚あり条件では、右図のように力覚提示装置 (PHANTOM, 2 台) を用いて、各指先が対象物に触れたときに力覚を指先に提示した。身体意識の評定値を図 1 6 と図 1 7 に示す。運動主体感では、力覚なし条件と力覚あり条件ともに比較的高い評定値となっており、条件間に有意な差が認められた ( $p < 0.05$ )。身体所有感では、力覚なし条件では非常に低い評定値となっているが、力覚あり条件では比較的高い評定値となっており、条件間で有意さが認められた ( $p < 0.05$ )。従って、仮想空間内での対象物操作における力覚は運動主体感と身体所有感の両感覚に影響することが明らかになった。

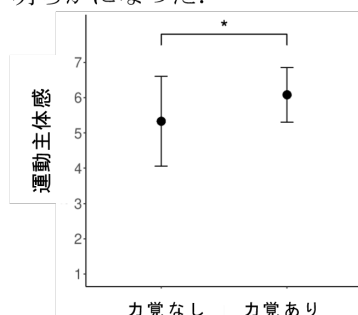


図 1 6 運動主体感

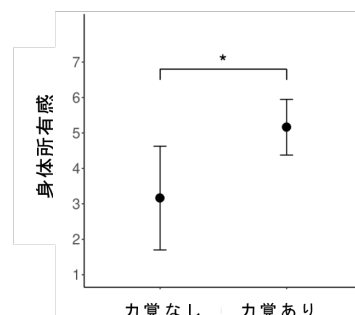


図 1 7 身体所有感

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中山友瑛, 片山正純	4. 巻 27
2. 論文標題 VR空間における仮想手の光点提示に対する身体所有感	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 認知科学	6. 最初と最後の頁 567-579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11225/cs.2020.04	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masazumi Katayama, Yusuke Akimaru
2. 発表標題 Body ownership affects body model learning of the Human Hand
3. 学会等名 The 32nd International Congress of Psychology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田航季, 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 VR空間内の仮想手における把持可能性と身体所有感
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 外見的類似性の低い仮想手に対する身体意識と身体定位
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山正純, 澤田桂舟, 中山友瑛
2. 発表標題 手運動に関する運動イメージと映像観察による仮想身体への身体意識
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 外見的類似性は身体所有感の成立に必要なか？
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西川文崇, 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 VR空間内の仮想身体に対する身体意識と把持運動の意図の関係
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野琢斗, 片山正純
2. 発表標題 異なる課題要求を持つ把持位置選択課題における視線移動
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 澤田桂舟, 片山正純, 中山友瑛
2. 発表標題 運動イメージは仮想身体に対する身体意識を促進するのか？
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 VR空間における仮想手の光点提示に対する身体所有感
3. 学会等名 日本認知心理学会発表論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 仮想空間内における仮想手の光点提示に対する身体所有感および自己受容感覚ドリフト
3. 学会等名 「注意と認知」第19回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masazumi katayama, Yusuke Akimaru
2. 発表標題 道具の認知過程を説明する脳内シミュレーション仮説：身体モデルの学習と身体意識の関係
3. 学会等名 日本神経科学大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 仮想空間内の手の光点提示に対する身体意識
3. 学会等名 日本認知心理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山友瑛, 片山正純
2. 発表標題 仮想空間内の仮想手の光点提示に対する身体意識
3. 学会等名 多感覚研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐匠, 西川文崇, 片山正純
2. 発表標題 VR空間内の仮想身体に対する身体意識における運動意図の影響
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 牧野晴太, 澤田桂舟, 片山正純
2. 発表標題 仮想空間の仮想身体における運動映像の観察と運動イメージが身体意識に及ぼす影響
3. 学会等名 電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中山 友瑛 (Nakayama Tomoaki)	福井大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	秋丸 雄祐 (Akimaru Yusuke)	福井大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	澤田 桂舟 (Sawada Keisyu)	福井大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	西川 文崇 (Nishikawa Fumitaka)	福井大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	五十嵐 匠 (Igarashi Takumi)	福井大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	牧野 晴太 (Makino Haruta)	福井大学・大学院工学研究科・大学院生	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------