

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00200

研究課題名(和文)手で使用する道具の認知と身体モデルの関係：脳内シミュレーション仮説の検証

研究課題名(英文)An internal simulation hypothesis to explain cognitive process of graspable tools

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：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、幾何学的に変形した手に対応した身体モデルを学習するための実験パラダイムを構築し、様々な観点から仮説の妥当性を検証した。例えば、より大きな物が把持できるように変形した手の身体モデルを学習したとき、提示した手に対する身体所有感が高いグループではより大きなサイズをその道具と見なすように変化したが、低いグループではこのような変化は生じなかった。これらの結果は仮説の妥当性を支持しており、さらに手の身体モデルの再学習において身体所有感が重要な役割を果たしていることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated a relationship between cognitive judgment of tool size and a relearned internal model of the hand. In an experimental paradigm we built, an internal model of the hand could be relearned by repeating finger movements while watching a geometrically deformed hand shape. In each training condition of the normal and deformed hand, we measured the object size that could be recognized as a tool. After the learning in the deformed hand condition of the dominant hand, the object sizes became significantly larger for tools to be mainly used in the dominant hand. These results show that the internal model affects cognitive judgment of tool sizes. Moreover, in the participants that sense of body ownership of the displayed hand was relatively low, both of the object sizes in the normal hand and transformed hand conditions were almost the same. This indicates that the sense of body ownership is important to learn the internal model of the human arm.

研究分野：認知科学

キーワード：道具 認知 身体モデル 身体所有感

1. 研究開始当初の背景

コップには、異なる形やサイズなどの多くの種類があるにもかかわらず、初めて見たコップでも迷うことなく認知することができる。このような道具の認知機構において、道具についての宣言型記憶(名称や機能など)だけでなく、道具使用の感覚運動経験が重要な役割を果たしている(Sirigu,1991; Borghi, 2005 など)。そこで、本研究では、感覚運動統合により獲得された身体モデル(身体の脳内表現)が認知過程において重要な役割を果たしていると考えており、以下の仮説を提案している。

《脳内シミュレーション仮説》

手で使用する道具の認知過程において、手の身体モデルを用いた把持運動の脳内シミュレーションによって評価された把持可能性が寄与している。

この仮説の妥当性を検証するための研究を行ってきた。これらの研究では、被験者の手・前腕の動きを計測することによりディスプレイに表示した手・前腕を動作させた。このとき、図2(b)のように被験者の手の指の一部のリンクを長くして表示した。最初は表示した対象物を正確に把持できないが、把持運動を繰り返すことにより正確に把持できるようになった(手の身体モデルの学習)。その後、同一の道具の異なるサイズの画像を1枚ずつ提示し、被験者がその道具と見なすサイズを計測した(恒常法)。変形していない手形状のときには直径が約40~80mmの物をコップと見なしたが、より大きな物が把持できるように手を変形したとき、より大きなもの(約70~130mm)をコップと見なすように変化した(道具と見なすサイズ)。これらの結果は図2(b)のような変形によって把持可能性(つかみ易さなど)が変化するため、我々の仮説の妥当性を支持している。

一方、上記の結果を最近報告されたBBR効果でも説明できてしまうという新たな課題が生じた。例えば、拡大して見えるゴーグルをかけて対象物のみを見たときと比較して、自身の手と対象物を同時に見たときの見かけのサイズ(apparent size)が小さくなり、拡大されていない実際のサイズに近くなった(Linkenaugerら,2010)。また、下肢の模型をカメラで撮影した画像をHMDで表示し、下肢の模型と被験者の足に同時に触刺激を与えた結果、下肢の模型のサイズに応じて空間内での距離知覚や物体のサイズ知覚が変化した(Hoortら,2011)。このように、自身の身体の見かけのサイズを基準(ものさし)として対象物のサイズや空間内での距離を知覚している。ここで、この効果をBBR効果(Body-based rescaling effect)と呼ぶことにする。BBR効果はディスプレイの仮想空間内に表示した仮想身体においても生じることが報告されている(Linkenaugerら,2013; Banakouら,2013)。そこで、BBR効果の観点から我々の計測結果

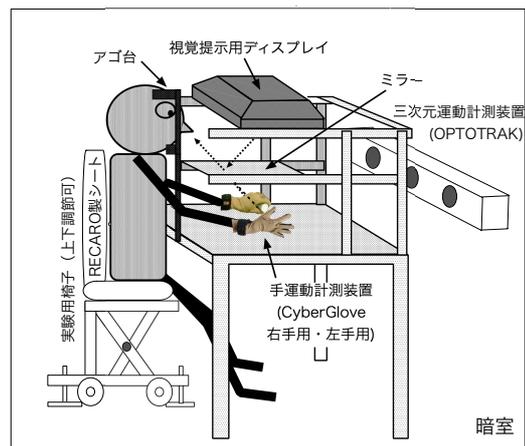
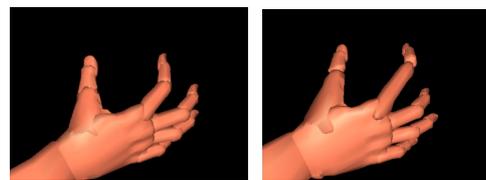


図1 実験環境



(a) 変形なし (b) 変形あり

図2 表示した手

について考えてみると、図2(b)のように手を変形したことによって、自身の手のサイズが大きくなったと感じたことによりBBR効果が生じ、この結果として道具と見なすサイズが変化した可能性がある。このため、上述のような結果が我々の仮説に基づいているのか、またはBBR効果によるものなのかを明確にする必要がある。

さらに、従来とは異なる観点から上記仮説を検証することも重要である。我々の仮説は、右手で使用する道具の認知過程には右手の身体モデルが関与し、左手で使用する道具に関しては左手の身体モデルが関与することを前提としている。この観点からも仮説の妥当性を検証することが可能となる。また、身体モデルの学習には身体意識(特に身体所有感)が関与している可能性がある。つまり、見えている手が自身の身体であると感じているときには身体モデルの学習が促進されるが、感じていないときには抑制されるべきである。この観点から、手の身体モデルの学習と身体意識との関係についても調べることが可能となる。

2. 研究の目的

(1) 平成27年度

我々の従来研究で得られた結果が我々の仮説に基づいて説明できるのか、またはBBR効果によるものなのかを明確にすることにより仮説の妥当性を検証した。

(2) 平成28年度

手の身体モデルと道具の認知過程との関係をより詳細に調べるために、利き手・非利き手と道具の種類(利き手または非利き手で使

用する道具)の観点からより詳細に調べた。

(3) 平成 29 年度

手の身体モデルの学習と身体所有感との関係、および道具のサイズに関する認知的判断と身体所有感との関係を調べた。

3. 研究の方法

図 1 に示すように、手形状計測装置 (CyberGlove, Immersion Corp.)、三次元位置方向計測装置 (FASTRAK, POLHEMUS Inc.)、三次元運動計測装置 (OPTOTRAK3020, Northern Digital Inc.)、鏡、ディスプレイ (U2711, DELL)、実験用イス (生体工学的に設計されたレカロ社製車用シート使用)、4 点式シートベルト、アゴ台を用いて実験環境を暗室内に構築した。

(1) 平成 27 年度

被験者の手の形とサイズが一致した「変形なし条件」、より大きなものが把持できるように指のリンクを長くした「変形あり条件」のそれぞれの条件での実験を下記の手順で行った。

① 手の身体モデルの学習: まず図 2 のように手・前腕と 2 点を表示して、各点に指先を合わせる課題を繰り返し行った。

② 学習の確認: 2 点のみを表示し、課題を実行したときの手形状を生成し、学習の終了条件を満たすまで①と②を繰り返した。

③ 計測: 学習後に下記のように計測した。

我々の従来研究と同様に道具と見なすサイズを計測した。さらに、Linkenauer ら (2010) と同様に 1 円玉の直径を 0、DVD の直径を 10 として、見かけのサイズを計測した。

さらに、上記と異なる観点から仮説を検証した。変形していない手形状と比較して精密把持 (指先でつまむ) で把持したときの指先幅が常に一致し、握力把持 (掌でにぎる) で把持したときにはより大きな対象物が把持できるように手形状を変形した (特殊変形条件)。この特殊変形条件においても上記同様に学習と計測を行った。使用した道具は、精密把持で使用する道具と握力把持で使用する道具を選定した。特殊変形条件において、計測時に BBR 効果が生じているならば、両カテゴリの道具とも学習後に計測した道具と見なすサイズが変化することになる。この観点からも BBR 効果が生じていたかどうかを検証することが可能となる。

(2) 平成 28 年度

本研究では、右手だけでなく左手でも学習し、道具の種類 (右手で使用する道具と左手で使用する道具) の観点から道具のサイズに関する認知過程について調べ、道具の把持可能性 (つかみ易さ) との関係についても調べた。また、本実験パラダイムにおける計測時に BBR

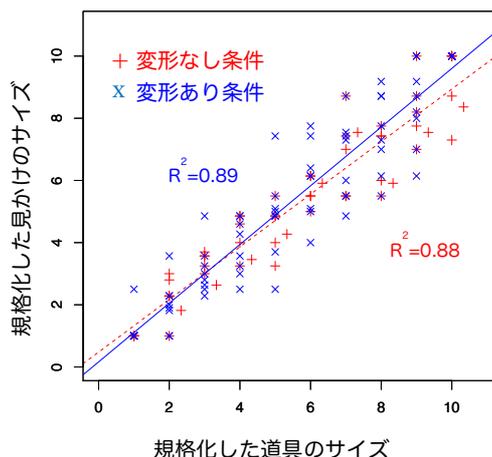


図 3 道具のサイズと見かけのサイズの関係

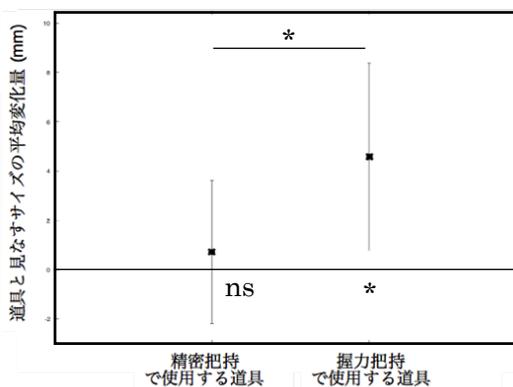


図 4 道具と見なすサイズ

効果が生じていたならば、計測結果は両カテゴリの道具とも手形状の変形の影響を受けることになる。

さらに、上記の仮説では対象物の把持可能性 (つかみ易さ) に基づいて道具を認知していると仮定しているため、道具のサイズに関する「つかみ易さ」と「道具らしさ」の間には強い相関関係が存在することになる。この観点から、同道具の異なるサイズに対する「つかみ易さ (一対比較法)」と「道具らしさ (一対比較法)」についても計測した。

平成 29 年度

身体モデルの学習と身体意識 (運動主体感、身体所有感) との関係について調査した。まず、上述の従来研究と同様の実験において、変形した手の学習課題終了後に、身体意識に関するアンケート調査を実施した。アンケートは 7 段階リッカード尺度を採用した (+3 は強く感じる、0 はどちらとも言えない、-3 は全く感じない)。

上記の仮説は、右手の変形した手の身体モデルを学習したとき、右手で使用する道具の認知過程 (道具と見なすサイズ) に影響を及ぼすが、左手で使用する道具に関しては影響しないことを予測する。一方、左手の変形し

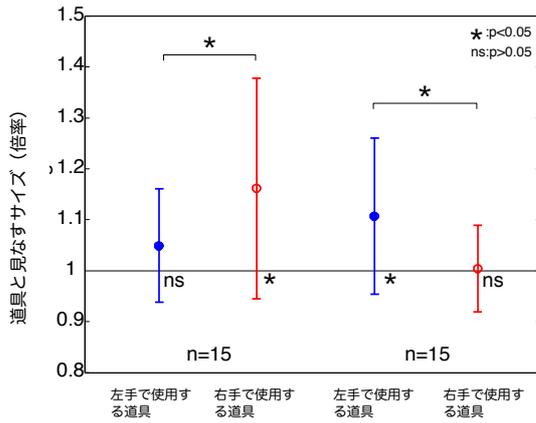


図5 道具と見なすサイズ

た手の身体モデルを学習したときには逆の傾向を示すことを予測する。この観点から、本研究では、実験前に被験者毎に道具に関するアンケート調査を行い、主に右手で使用する道具と主に左手で使用する道具を選定し、これらの道具に対する道具と見なすサイズを計測した。

さらに、表示した手に対する身体意識を操作するために、被験者の手と異なる方向に表示する条件（方向条件）と時間的に遅延させて表示する条件（遅延条件）を用いた。方向条件では、被験者自身の手・前腕と同じ方向である0度、60度、90度の方向で表示した。遅延条件では、被験者の手の動きを基準として0msec、100msec、200msec、300msec、400msec、600msec、800msec 遅延させて手・前腕を表示した。

4. 研究成果

(1) 平成27年度

変形した右手に関して学習した後に計測した道具と見なすサイズは従来研究と同様に変化した。つまり、より大きな物が把持できるように手を变形して学習したとき、学習後にはより大きなサイズをその道具として見なすように変化した。また、手の变形なし条件と变形あり条件のそれぞれの学習後に計測した見かけのサイズを図3に示す。この結果では、道具のサイズ、および計測した見かけのサイズを規格化した。2本の直線は变形なし条件と变形あり条件における回帰直線である。变形あり条件の計測時にBBR効果が生じていた場合、变形あり条件における回帰直線の切片が小さくなる。しかし、図3の結果では、2本の回帰直線には有意差が認められなかった（共分散分析：平均値 $p > 0.05$ 、傾き $p > 0.05$ ）。従って、この結果は、我々の実験パラダイムにおける計測時にBBR効果が生じていなかったことを示している。

特殊変形条件において、上記同様に道具と見なすサイズを計測した。BBR効果が生じてい

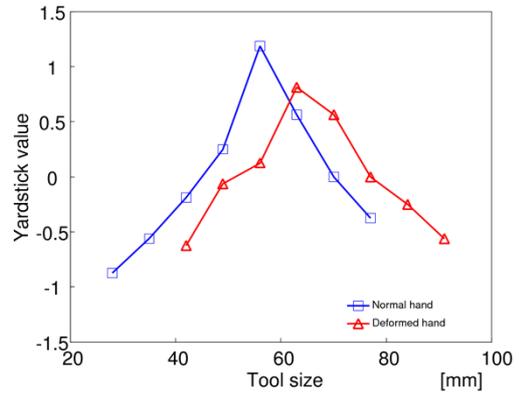


図6 つかみ易さ

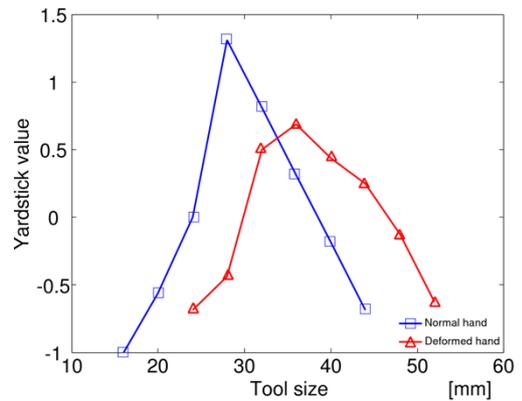


図7 道具らしさ

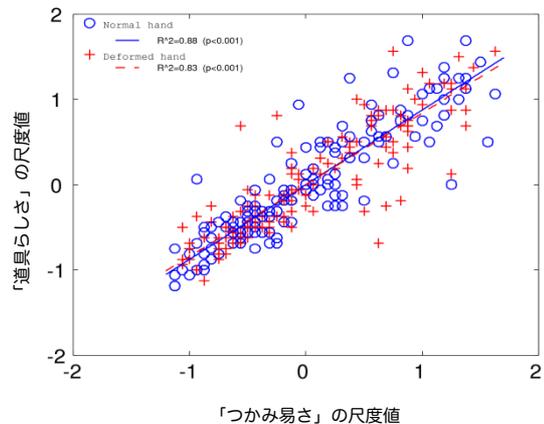


図8 つかみ易さと道具らしさの関係

たならば、両道具とも計測結果が変化することになる。しかし、図4に示すように握力把持で使用する道具ではより大きなサイズをその道具と見なすように変化した。精密把持で使用する道具ではこのような変化は見られなかった。これらの結果においても、計測時にBBR効果が生じていなかったことを示している。従って、これらの結果も我々の仮説の妥当性を支持している。

(2) 平成28年度

図5に道具と見なすサイズ（倍率）を示す。この結果は、变形あり条件での計測値を变形なし条件における計測値で割った値である。

変形した右手に関して学習を行った場合、右

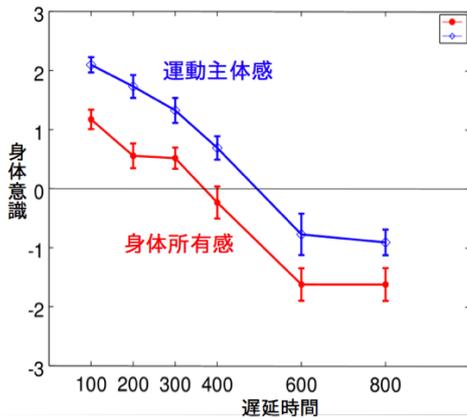


図9 遅延条件における身体意識

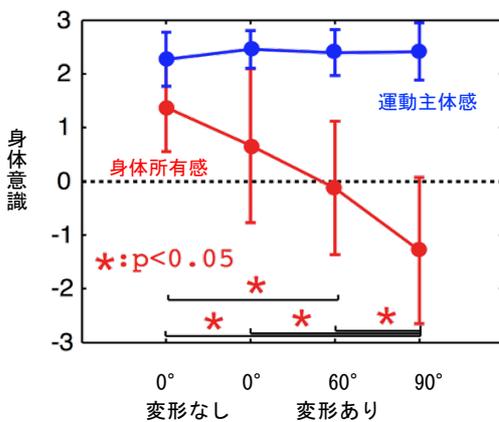


図10 方向条件における身体意識

手で使用する道具では約 1.2 倍大きなサイズをその道具と見なすように変化しているが、左手で使用する道具では変化していない。一方、変形した左手に関して学習を行った後では、右手で使用する道具では変化していないのに対して、左手で使用する道具では約 1.1 倍大きなサイズをその道具と見なすように変化した。つまり、上述の観点から、上記計測時においても BBR 効果が生じていなかったことになる。

我々の仮説では、右手で使用する道具に関しては右手の身体モデルを用いた脳内シミュレーションが活性化し、左手で使用する道具に関しては左手の身体モデルを用いた脳内シミュレーションが活性化することになる。このため、変形した手と同じ側の手で使用する道具に対しては道具のサイズに関する認知過程に影響し、反対側の手で使用する道具には影響しなかったと考えられる。従って、上記の結果においても我々の仮説からの予測と一致する傾向を示している。

次に、図6と図7につかみ易さと道具らしさのそれぞれの尺度値を示す。両結果とも変形あり条件では右側にシフトしており、より大きなサイズをつかみ易いまたは道具らしいと回答している。図8につかみ易さと道具らしさの関係を示す。2本の直線は変形なし条件と変形あり条件での結果に対する回帰直線で

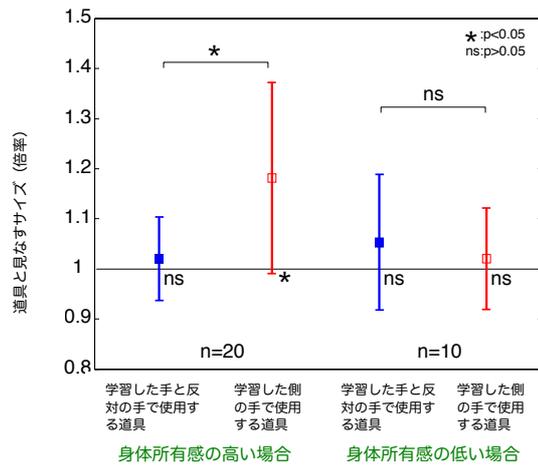


図11 道具と見なすサイズと身体所有感

あり、有意差は認められなかった(共分散分析: 平均値 $p > 0.05$, 傾き $p > 0.05$)。決定係数はそれぞれ 0.88 と 0.83 となり、つかみ易さと道具らしさの間には非常に強い相関関係が認められた。この結果は、我々の仮説からの予測と一致する傾向を示しており、仮説の妥当性を示している。

(3) 平成 29 年度

図9に遅延条件における身体意識の評定値を示し、図10に方向条件における身体意識の評定値を示す。遅延条件においては、遅延が 100msec では運動主体感と身体所有感ともに高くなっているが、遅延時間が大きくなるにつれてそれぞれの意識が低下し、600msec 以上の遅延で身体意識はほぼ感じられなくなっている。また、両意識とも並行して変化しているのが特徴的である。一方、方向条件において、運動主体感は表示した手・前腕の方向に関係なく全ての条件で高くなっているが、身体所有感は角度差が大きくなるにつれて低下している。また、角度差 0° において変形なし条件と比較して変形あり条件では若干低下する傾向を示した。変形あり条件において、身体所有感は角度差が大きくなるにつれて低下し、60° で「どちらとも言えない」となり、90° で感じられなくなっている。

次に、方向条件において、変形なし条件と変形あり条件のそれぞれの条件で学習した後計測した道具と見なすサイズを図11に示す。この結果では、身体所有感の高い場合と低い場合に分け、さらに道具に関して学習した手と同じ手で使用する道具と反対側の手で使用する道具に分けてまとめている。身体所有感が高い場合、学習した手と同じ側の手で使用する道具では変形なし条件と比較して変形あり条件では約 1.2 倍大きなサイズをその道具と見なすように変化しているが、反対側の手で使用する道具では変化していない。これらの傾向は従来研究と同様の傾向である。しかし、身体所有感が低い場合では、道具の種類に関係無くこのような変化は見られなかった。これらの結果には身体所有感が関与し

ていることを示している。

これらの結果を仮説に基づいて考察する。我々の仮説では、学習した手の身体モデルを使用した脳内シミュレーションによって把持可能性(つかみ易さなど)を判断し、把持可能性が道具の認知過程に寄与していることを仮定している。このため、身体所有感が高い場合には自身の手の身体モデルの学習が促進され、その結果として道具のサイズに関する認知過程(道具と見なすサイズ)に影響したものと考えられる。一方、身体所有感が低い場合、つまり自身の手と感じられない場合には自身の手の身体モデルの学習を抑制した結果、道具のサイズに関する認知過程が変化しなかったものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Takahiro Komatsu, Masazumi Katayama: A dissociation of vision and action for selecting grasp positions in different task demands, *An International Interdisciplinary Journal*, Vol.20, No.4(A), pp. 2445-2454 (2017) (査読有)
- ② Takahiro Komatsu, Takeshi Nakayama, Masazumi Katayama: Grasp position selection based on task demand for lifting up target objects, *An International Interdisciplinary Journal*, Vol.20, Num.4(A), pp. 2609-2616 (2017) (査読有)
- ③ Masazumi Katayama, Yusuke Akimaru: An internal model of the human hand affects recognition of graspable tools. *Neural Information Processing of Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9950, pp. 199-207 (2016) (査読有)

[学会発表] (計 12 件)

- ① 片山正純, 秋丸雄祐: 手で使用する道具の認知過程を説明する脳内シミュレーション仮説: つかみ易さと道具らしさの関係, 日本認知心理学会第 15 回大会 (2017) (査読有)
- ② Masazumi Katayama, Yusuke Akimaru: An internal simulation hypothesis to explain cognitive process of graspable tools. *The 13th International Conference for Cognitive Neuroscience*, Amsterdam (2017) (査読有)
- ③ 秋丸雄祐, 片山正純: 手で使用する道具の認知過程を説明する脳内シミュレーション仮説の検証: 道具の認知過程と身体所有感との関係. 第 11 回モーターコントロール研究会 (2017) (査読有)
- ④ 金谷峻, 片山正純: 水平面内到達運動中の 3 関節腕姿勢の特徴を再現する計算モデル 第 11 回モーターコントロール研究会 (2017) (査読有)

- ⑤ Yuusuke Akimaru, Masazumi Katayama: An internal simulation hypothesis to explain a cognitive process of graspable tools: A relationship between an internal model of the dominant/nondominant hand and cognitive judgment of tool sizes. 第 39 回日本神経科学大会 (2016) (査読有)
- ⑥ Masazumi Katayama, Keiji Yamauchi: Computational models to select human arm postures during planar reaching movements. 第 39 回日本神経科学大会 (2016) (査読有)
- ⑦ 秋丸雄祐, 片山正純: 手で使用する道具の認知過程を説明する脳内シミュレーション仮説の検証: 身体モデルの学習と身体所有感との関係, 日本認知心理学会第 14 回大会 (2016) (査読有)
- ⑧ Masazumi Katayama and Yusuke Akimaru: An internal model of the human hand affects recognition of graspable tools. *The 23rd International Conference on Neural Information Processing* (2016) (査読有)
- ⑨ 片山正純: 手で使用する道具の認知過程を説明する脳内シミュレーション仮説, SICE ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016 (2016) (査読有)
- ⑩ Masazumi Katayama, Syuhei Uno and Syunsuke Suzuki: Internal simulation hypothesis to explain a cognitive process of graspable tools: A relationship between cognitive judgment of tool size and dominant/nondominant hand. 第 38 回日本神経科学大会 (2015) (査読有)
- ⑪ 片山正純, 宇野修平, 鈴木駿介: 手で使用する道具の認知過程を説明する脳内シミュレーション仮説の検証, 日本認知心理学会第 13 回大会 (2015) (査読有)
- ⑫ 片山正純, 宇野修平, 鈴木駿介: 再学習した手の身体モデルが道具のサイズに関する認知的判断に及ぼす影響, 第 25 回日本神経回路学会 全国大会 (JNS2015) (2015) (査読有)

[図書] (計 1 件)

- ① 片山正純 (分担執筆): 手・腕の運動学, 手の百科事典, 朝倉書店 (2017)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究協力者

秋丸 雄祐 (Akimaru Yusuke)
鈴木 駿介 (Suzuki Syunsuke)
宇野 修平 (Uno Syuhei)
金谷 峻 (Kanaya Syun)