

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700246

研究課題名(和文) ハプティックデバイスを用いた身体的自己意識の操作とその応用

研究課題名(英文) Manipulation of human bodily self-consciousness using haptic interface and its application

研究代表者

原 正之(Hara, Masayuki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00596497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、認知神経科学分野における主要な研究テーマの一つであるヒトの身体的自己意識の操作において、ロボティクス・ハプティクス技術を用いた新しいアプローチを提案した。特に、ラバーハンドイリュージョンとフルボディイリュージョンに注目し、アクティブセルフタッチ(実験参加者自身が仮想身体に刺激を能動的に与え、かつ、その刺激を自身の身体に受ける)というこれまでにない新しい刺激提示方法を提案し、マスタスレーブシステムと力提示技術を活用して実現した。これにより、ヒトの身体所有感と力覚・行動主体性などとの関係についての議論を可能とし、ヒトの身体的自己意識に関わる新たな知見および可能性を得た。

研究成果の概要(英文)：The major contribution of this study is to allow new approaches for the manipulation of bodily self-consciousness, which is one of the recent hottest topics in cognitive neuroscience, by applying robotics/haptics technology. In particular, a new stimulation method termed as active self-touch that allowed experimental participants to synchronously or asynchronously touch a virtual body and their own body by using a robotic master-slave system was proposed and implemented in Full Body Illusion (FBI) paradigm as well as Rubber Hand Illusion (RHI) paradigm. The new stimulation method with force display function enabled us to examine and discuss how action (the sense of agency) or force sensation affected the sense of body ownership. Also, we could obtain new findings about the human bodily self-consciousness and future possibility for cognitive neuroscience studies.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：感性情報学 身体的自己意識 身体所有感 ラバーハンド・イリュージョン ハプティックインタフェース

1. 研究開始当初の背景

ヒトの身体的自己意識に関する研究報告の一つに、ラバーハンド・イリュージョン (Rubber Hand Illusion: RHI) と呼ばれる非常に興味深い現象がある。これは、実験参加者の前に置かれたゴム手と、衝立などで隠された実験参加者自身の手が連続かつ同時に刺激されると、次第にゴム手上に触覚を感じるようになるという錯覚現象である。通常、身体あるいは身体部位は自分に属しているという感覚 (身体所有感) を私たちは持っており、この感覚はロバストであると考えられている。しかしながら、このRHIの例からわかるように刺激や環境・状況変化などがヒトの身体所有感に影響を与え得る。RHIは身体の一部で起きる現象であるが、瀕死や瞑想中など特殊な状態になると、稀に身体の外に浮かんでいる、あるいは、身体を体の外から見下ろすなどの不思議な感覚を得ることがある。この全身で生じる感覚・錯覚は体外離脱体験 (Out-of-Body Experience: OBE) と呼ばれ、脳機能に障害のある患者でも報告されることがあり、主に認知神経科学の分野でその発生メカニズムなどについて研究されてきた。

近年では技術の向上と多くの研究者の貢献により、健常者においてもこの種の特殊な体験・錯覚を擬似的に引き起こせるようになってきた。特に、BotvinickとCohenが触刺激と同期した視覚刺激でRHIを健常者に体験させるのに成功して以来、視覚刺激と触刺激が併用 (visuo-tactile stimulation) されることが多い。例えば、実験者の頭上に配置したカメラで撮影した実験参加者の身体映像をヘッドマウントディスプレイ (HMD) などで実験参加者に提示し、その状態でお互い握手すると、実験参加者はあたかも実験者の体を使って自身に触れた感覚を得るといった報告がある。また、HMDを介して実験参加者の背中が刺激されている映像を提示すると、OBEのような錯覚、すなわちフルボディイリュージョン (Full Body Illusion: FBI) が生じるという報告もある。これらの先行研究では、実験者が触刺激を手動で与えることが一般的であり、視覚刺激との空間的・時間的な一致/不一致を精確に実現することは難しく、また同じ刺激提示 (強度やタイミングなど) を別の実験参加者で再現することはほぼ不可能である。さらに先行研究では、実験参加者は刺激に対して受動的となることがほとんどである。したがって、ヒトの身体的自己意識の操作に関する研究をさらに発展させるためには、新しい刺激提示方法の提案・開発が期待される。

2. 研究の目的

本課題では、ロボティクス・ハプティクス技術を用いて、従来とは異なる観点からヒトの身体的自己意識、特に身体所有感の操作を目指す。ヒトの身体所有感に関する実験では上記技術が用いられた報告例はほとんど見られず、上記技術の適用は認知神経科学の研

究に大きなブレークスルーをもたらす可能性を秘めているものとする。

本課題では主に、新しい手法・刺激法を提案し、RHIやFBIのメカニズム・発生条件などについて更なる理解を目指す。またヒトの身体所有感の自由な操作を実現し、人間の集中力・パフォーマンス等の向上を可能にするアプリケーションを提案し、マルチメディアサービス等で応用することも考える。本課題を通して工学と認知神経科学の間の学際領域を新しく開拓するとともに、それぞれの分野への相互的な貢献を最終的な目標とする。

3. 研究の方法

ヒトの身体的自己意識 (特に身体所有感) の新しい操作方法の実現とその発生メカニズム解明を目指して、主に下記の4つの研究課題に取り組む。

- (1) 身体的自己意識操作のための新しい手法の提案
- (2) 力覚提示装置を用いた体外離脱現象の検討
- (3) fMRI 対応力提示装置の実現
- (4) fMRI による体外離脱現象時の脳活動の観測と解析

なお、上記の研究課題においてヒトを対象とする実験を行う場合、実験プロトコルは東京大学工学系研究科倫理委員会の承認を受け、ヘルシンキ宣言の内容を遵守するものとする。また、実験参加者全員からは事前にインフォームド・コンセントを得る。

4. 研究成果

- (1) アクティブセルフタッチの提案

①動機と概要

RHI や FBI を誘起させる際、従来手法では実験者が手動で実験参加者の身体と仮想身体 (ゴム手など) に触刺激を与えるのが一般的であり、実験参加者は刺激に対して受動的となる。これに対して、マスタスレーブシステムを用いて実験参加者自身が仮想身体へ刺激提示を行い、かつ、その刺激を同期/非同期で自身の身体と同じ部位に受けるといった新しいアプローチ (アクティブセルフタッチ) を実現し、その有効性について検証した。

②アクティブセルフタッチ可能な RHI 実験

RHI パラダイムにおいてアクティブセルフタッチを実現するために、図1に示すような2自由度のマスタスレーブシステムを開発した。マスタデバイスにはGeomagic, SensAble社製の PAHNTom Omni を採用し、様々な力提示を可能とした。まず、アクティブセルフタッチにより RHI が誘起されるかどうかを Botvinick と Cohen らが用いた手法を参考にして検証した。十分な裸眼視力あるいは矯正視力を持つ12人の実験参加者 (右利き、女性3名、平均年齢26歳) に、マスタデバイスに取り付けた絵筆を右手で操作して、実験参加者の左手から175mm右に置かれたフェイクハンド (木製のモデルハンドにゴム手袋と

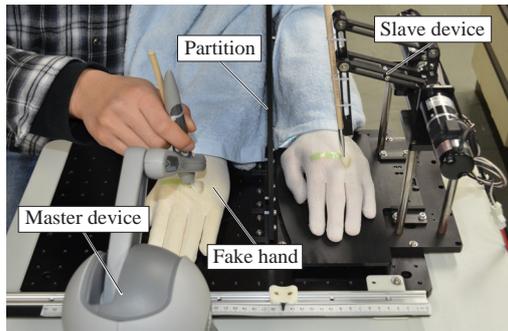
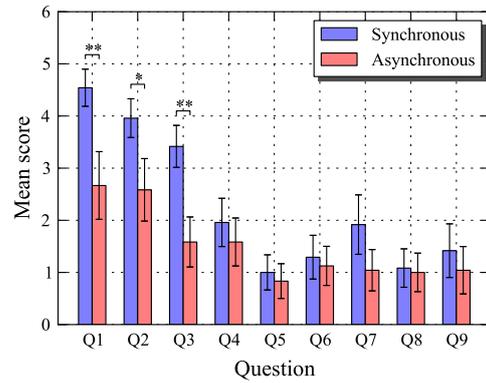


Fig.1 2-DOF master slave system and classic RHI experiment under active self-touch.

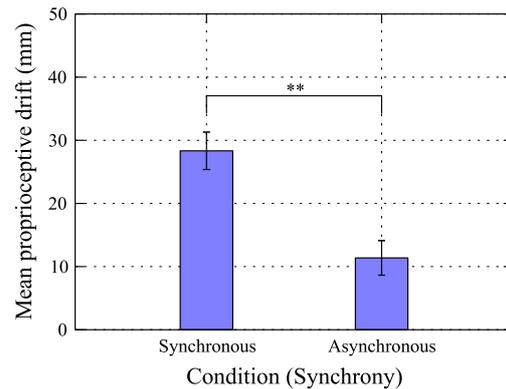
メッシュ手袋を重ねて装着している)の甲を水平方向にブラッシングするように指示した。この時、スレーブデバイスは、先端に取り付けられた絵筆でパーティションにより隠された実験参加者の左手の同じ部位を刺激した。刺激提示は同期条件/非同期条件(コントロール条件)で行い、非同期条件では500msの定常遅れをスレーブデバイスの動作に与えた。本実験では、同期条件と非同期条件をそれぞれランダムに2回ずつ提示し、実験参加者は各条件において3分間のブラッシングをフェイクハンドと自身の手に対して行った。本実験ではRHI発生の有無を、従来手法でも用いられるRHIアンケート(Q1:It seemed as if I were feeling the touch of the paintbrush in the location where I saw the rubber hand touched, Q2: It seemed as though the touch I felt was caused by the paintbrush touching the rubber hand, Q3: I felt as if the rubber hand were my hand, Q4: It felt as if my (real) hand were drifting towards the right (towards the rubber hand), Q5: It seemed as if I might have more than one left hand or arm, Q6: It seemed as if the touch I was feeling came from somewhere between my own hand and the rubber hand, Q7: It felt as if my (real) hand were turning 'rubbery', Q8: It appeared (visually) as if the rubber hand were drifting towards the left (towards my hand), Q9: The rubber hand began to resemble my own (real) hand, in terms of shape, size or some other visual feature)と刺激前後での実験参加者の左手の自己位置感覚のずれ(Proprioceptive Drift: PD)の測定により評価した。

③実験結果と結論

RHIアンケートとPD測定の結果を図2に示す。まず、RHIアンケート結果(7段階リッカート尺度で評価: 0: "I strongly disagree with the statement", 6: "I strongly agree with the statement")について、Q1, Q2, Q3のみがRHIに関わる質問と設定されており、これらの質問に対する平均スコアは他の質問に対する平均スコアに比べて有意的に高い数値であることが多重比較検定により示



(a) RHI questionnaire



(b) Measurement of proprioceptive drift

Fig.2 Results of classic RHI experiment. Bar charts and error bars show mean values and the SEMs (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$).

された (all $p < 0.05$). また図 2(a)に示すように、Q1, Q2, Q3における同期条件と非同期条件の比較では、両側t検定により同期時に平均スコアが有意的に高くなっていることが示された。これらは先行研究の結果と同じであり、フェイクハンド上への身体所有感の転移が生じていたことを確認できた。次にPD測定結果について、図 2(b)に示すように同期・非同期条件において有意なPDが得られた(1サンプルtテストの結果、両条件共に $p < 0.01$)。さらに両側t検定の結果、同期条件と非同期条件の間に有意差があることが検出された。すなわち、同期条件において左手の自己位置の感覚がフェイクハンド方向に大きくシフトしていることが確認できた。

以上の結果から、アクティブセルフタッチ条件においてもRHIを体験させることができることが示された。また、開発したマスタスレーブシステムがヒトの身体所有感操作に有効であることを確認できた。

(2) 力感覚と身体所有感の関係についての検討

①動機と概要

開発したマスタスレーブシステムを用いてアクティブセルフタッチのRHI実験への可能性を確認できたことを踏まえて、新しい試みとしてマスタデバイスの力提示機能を用いたRHI実験を行った。具体的には、刺激を

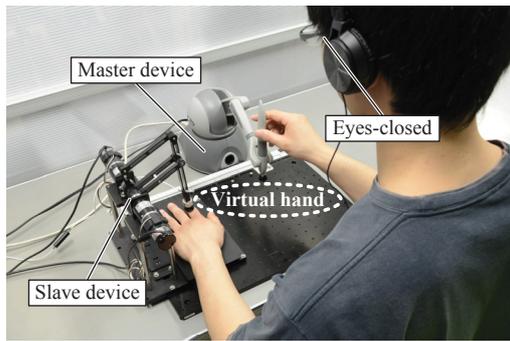


Fig.3 TRHI experiment under active self-touch with various force feedback.

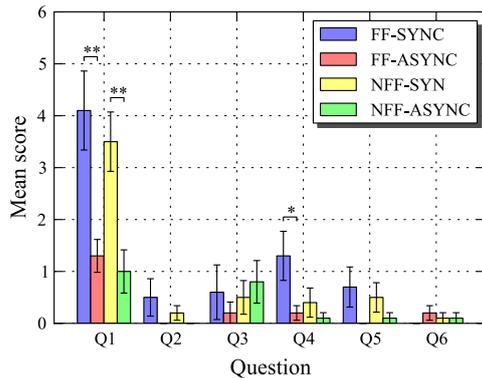


Fig.4 Result of TRHI questionnaire in a dynamic task. Bar charts and error bars show mean scores and the SEMs (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$).

与える側の手へのカフィードバックを様々に変化させ、そのときの身体所有感への影響を調査した。

②力提示の有無が身体所有感に及ぼす影響

力感覚の身体所有感への影響を調べるために、Ehrsson らが用いた視覚情報を用いない体性感覚による RHI (Tactile RHI: TRHI) パラダイムにアクティブセルフタッチを組み込んで実験を行った。目を閉じた 10 人の実験参加者 (右利き男性, 平均年齢 24 歳) にマスタデバイスでバーチャルハンドをタッピングさせ、スレーブデバイスを介して 200mm 左側に置かれた左手に 60 秒間刺激を与え続けるように指示した (図 3 参照)。マスタデバイスにインピーダンス制御を実装することでバーチャルハンド (剛性は 1.0N/mm と設定) からのカフィードバックを実現した。実験参加者には 4 つの条件 (FF: 同期モードでカフィードバックあり, FFD: 非同期モードでカフィードバックあり, NFF: 同期モードでカフィードバックなし, NFFD: 非同期モードでカフィードバックなし) をランダムに提示した。各試行終了後には、7 段階リッカート尺度を用いて TRHI アンケート (Q1: I felt as if I was tapping my left hand with a stick, Q2: I felt as if I had more than one left hand, Q3: I felt as if my left hand was becoming bigger, Q4: I felt as if my left hand was moving to right hand, Q5: I felt as if my right hand was moving to

left hand, Q6: I could not feel my left hand) に答えるよう指示した。

図 4 に TRHI アンケート結果を示す。本実験で用いた TRHI アンケートでは、Q1 のみが TRHI (すなわち illusory self-touch) に関わる質問で、他は被暗示性を回避するための質問となっている。まず同期時の Q1 に対する平均スコアと他の質問に対する平均スコアを多重比較検定で解析した結果、カフィードバックの有無にかかわらず Q1 に対する平均スコアが有意に高くなっていることが分かった。次に、同期性とカフィードバックの有無を要因に繰返しのある 2 元配置の分散分析を Q1 に対して行った結果、主効果が同期性 ($F(1, 9) = 17.8$, $p < 0.01$) で得られたがカフィードバックの有無では得られず ($F(1, 9) = 1.87$, $p > 0.10$), また交互作用も現れなかった ($F(1, 9) = 0.448$, $p > 0.10$)。

以上の結果から、カフィードバックの有無は TRHI の発生には影響しないという結果が示唆された。

③準静的な動作時にカフィードバックの変化が身体所有感に及ぼす影響

バーチャルハンドからのカフィードバックがない場合、左手に刺激が与えられても右手側に接触 (あるいは衝突) 感覚は生じないので実験参加者は奇妙な感覚を得ることになり、結果として TRHI は生じないものと考えていた。しかしながら、TRHI を引き起こすのにカフィードバックが必ずしも必要ではないという結果はこの予想に反するものである。これについて、実験参加者の動作に着目すると、カフィードバックがなくてもスレーブデバイスが実験参加者の左手に接触した直後に右手のタッピング動作が急停止していることが分かった。このことから、動作の急停止の際に生じる上肢筋肉の緊張あるいは関節部の振動によって擬似的な接触感が深部感覚で生じ、カフィードバックなしでも TRHI が誘起されたのではないかと考えた。そこで動作を動的なものから静的あるいは準静的なものに変更すれば、この深部感覚の影響を小さくでき、カフィードバックの大きさがヒトの身体所有感へ及ぼす影響は顕著になるのではないかと考えた。

新たに 16 人の実験参加者 (右利き, 女性 3 名, 平均年齢 25 歳) を募り、タッピング動作をプッシング動作に変更 (TRHI アンケートにおいて、Q1 の “tapping” を “pushing” と変更) して、非同期条件を省いた TRHI 実験を同じ実験手順・条件で再度行った。スレーブデバイスが実験参加者の左手に接触した際の力をロードセルにより計測し、それにゲイン ($\times 0.0$, $\times 0.1$, $\times 0.5$, $\times 1.0$, $\times 2.0$, $\times 5.0$) をかけてマスタデバイスで増幅した力を実験参加者にランダムに提示した。準静的な動作に変更したことによってカフィードバックの身体所有感への効果が顕著になった場合、 $\times 1.0$ をピークとした逆 U 字型の結果が Q1 に対する平均スコアにおいて得ら

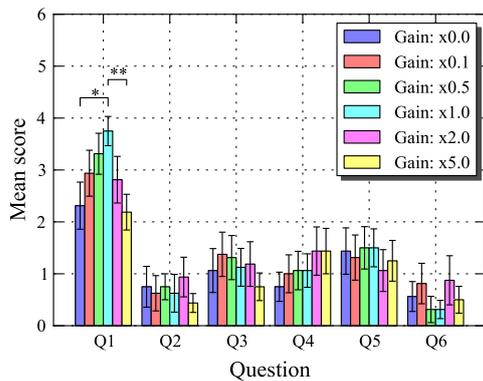


Fig.5 Result of TRHI questionnaire in a quasi-static task. Bar charts and error bars show mean scores and the SEMs (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$).

れるものと考えられる。

TRHI アンケート結果を図 5 に示す。まず、多重比較検定の結果、全てのゲインにおいて Q1 に対する平均スコアが他の質問に対する平均スコアよりも有意に高いことが示された (all $p < 0.05$)。次に、Q1 においてゲイン間の有意差を多重比較検定により解析した結果、 $\times 0.0$ と $\times 1.0$ および $\times 5.0$ と $\times 1.0$ の比較において 1%あるいは 5%の有意差があることを確認した。

以上の結果から、刺激を与える動作が静的あるいは準静的になると、力フィードバックの身体所有感への影響が顕著になることが示唆された。

(3) fMRI 対応 FBI 実験用プラットフォーム

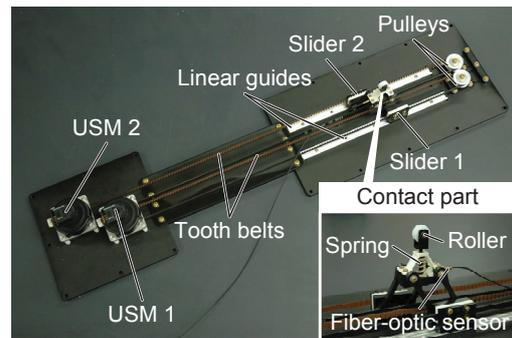
① 動機と概要

近年の身体的自己意識研究では、脳活動や脳機能との関係についても言及されるようになり、脳波 (electroencephalogram : EEG) や機能的核磁気共鳴画像 (functional magnetic resonance imaging : fMRI) を用いた解析も行われている。EEG や fMRI を用いた脳計測は非常にセンシティブであり、従来の機器・装置をそのまま使用することができない場合が多々ある。本研究課題では、MRI 環境下での FBI 実験に焦点を当て、アクティブセルフタッチ可能な FBI 実験を実現するためのプラットフォームの開発を行った。

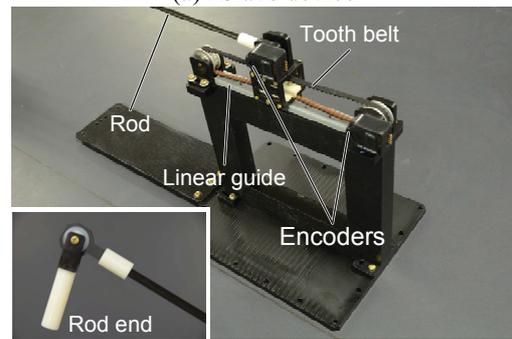
② fMRI 対応マスタスレーブシステムの開発

従来の FBI 実験では、実験参加者の背中に実験者が絵筆やスティックなどを用いてタッピング刺激やストロッキング刺激を与えるのが一般的である。そこで、MRI 室のベッドに仰向けで横たわる実験参加者の背中に対して、水平方向にストロッキング、垂直方向にタッピングを行う装置の設計・試作を行った。図 6 に試作機の外観を示す。

まず、スレーブデバイスについて、2 台の超音波モータを用いて歯付ベルトとアルミ製のリニアガイドにより 2 つのスライダを直動駆動する構成とした。この 2 つのスライダはパラレルリンク機構により拘束されてお



(a) Slave device



(b) Master device

Fig.6 Prototype of fMRI-compatible 2-DOF master-slave system.

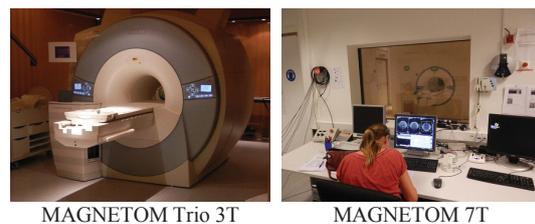
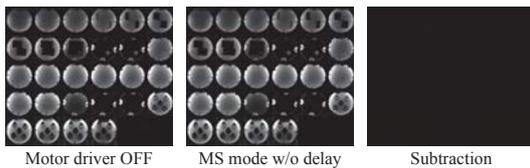


Fig.7 MRI scanners (produced by Siemens)

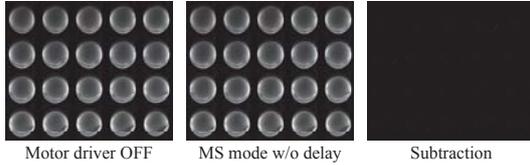
り、同方向に駆動することで水平方向に、逆方向に駆動することで垂直方向に接触部を動かすことができる。また、同方向に動く 2 つのスライダに速度差を与えることで、接触部を両方向に同時に動かすことも可能となる。接触部先端には本課題で開発した光学式力センサが取り付けられており、実験参加者の背中との接触力を測定できるようになっている。一方、マスタデバイスでは、エンコーダと歯付きベルト・プーリーにより実験参加者の水平および垂直方向の動作を取得できるようになっており、それぞれの方向の動作をスレーブデバイスに伝える装置として働く。実際に MRI 環境で使用するには、これらのデバイスはベッド上で中央にスリットを入れたウレタンマットレスで覆われ、実験参加者はその上に横たわる。

③ EPI を用いた fMRI 対応テスト

スイスの研究機関にある 3T と 7T の MRI スキャナ (図 7 参照) を用いて、開発したデバイスの fMRI 対応性を調査した。超高速核磁気共鳴画像法の一つであり脳活動の撮像に使用されるエコープランナー法 (echo planar imaging : EPI) を用いて、様々な条件 (デバ



(a) 3T MRI scanner



(b) 7T MRI scanner

Fig.8 Representative images of vendor-supplied spherical phantoms (Siemens).

イス ON/OFF, オートモード, マスタスレーブモード, など) で SN 比や画像のゆがみ (図 8 参照) などを検証し, 開発したデバイスが fMRI 対応性を持つことを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① Masayuki Hara, Roy Salomon, Giulio Rognini, Hiroyuki Nabae, Akio Yamamoto, Olaf Blanke, Toshiro Higuchi, A Novel manipulation method of human body ownership using an fMRI-compatible master-slave system, Journal of Neuroscience Method, 査読有り (掲載予定)

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① 原正之, 難波江裕之, 山本晃生, 樋口俊郎, 行動主体性がヒトの身体所有感に及ぼす影響, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), pp. 1559-1562, 2013 年 12 月 19 日, 兵庫県・神戸.
- ② Masayuki Hara, Hiroyuki Nabae, Akio Yamamoto, Toshiro Higuchi, Effect of Force Feedback on Rubber Hand Illusion, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC' 13), pp. 536-541, Oct. 14th, 2013, UK・Manchester.
- ③ 原正之, 難波江裕之, 山本晃生, 樋口俊郎, fMRI 対応マスタスレーブシステムを用いた体外離脱体験への誘導, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (ROBOMECH' 13), 2P1-G10, 2013 年 5 月 24 日, 茨城県・筑波.
- ④ 原正之, 山本晃生, 樋口俊郎, MRI 環境下におけるヒトの身体的自己意識操作のためのタッピング/ストロッキングデバイスの開発, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2012AC4E2-6, 2012 年 9 月 20 日, 北海道・札幌市.

- ⑤ 原正之, 山本晃生, 樋口俊郎, アクティブセルフタッチ可能なラバーハンド・イリュージョンを利用したヒトの身体所有感の検討, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH' 12), A2-B05, 2012 年 5 月 29 日, 静岡県・浜松.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.aml.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 正之 (HARA, Masayuki)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 00596497

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし