

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26700027

研究課題名(和文)片麻痺治療などへの応用を目指したヒトの身体所有感操作に関する研究

研究課題名(英文) Manipulation of Human Body Ownership toward Applications for Treatment of Hemiplegia

研究代表者

原 正之 (HARA, Masayuki)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00596497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ロボティクス・ハプティクス・VR技術に立脚し、ヒトの身体所有感操作を簡便にするための新たな手法及び実験システムの開発を行った。開発した技術を基礎として、(1)身体所有感操作における運動主体感の影響、(2)アクティブセルフタッチを用いたFBI研究及び自他認識の操作、(3)温感ディスプレイを用いた自己身体認知・認識の操作、(4)第三者の存在に関する研究、(5)身体所有感操作の知見を利用したリハビリテーションシステムの開発、に関する5つの研究課題に取り組み、ヒトの身体認知に関わる新たな知見を得ることができた。またその知見のリハビリテーション等での応用可能性についても示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we designed and developed novel methods and experimental platforms for easily manipulating human sense of body ownership based on robotics, haptics, and virtual reality technologies. Using the new technologies, we mainly challenged research projects about (1) Relationship between senses of body ownership and agency, (2) FBI study and manipulation of self-other recognition using active self-touch, (3) Manipulation of bodily awareness by using thermal displays, (4) Study on feeling of a presence, and (5) Design of novel rehabilitation system using manipulation of sense of body ownership. The major contribution was to scientifically show some novel findings about human bodily awareness and body ownership. Additionally, we implied that the findings can be employed, for instance, to design and develop novel rehabilitation system.

研究分野：コグネティクス

キーワード：感性情報学 身体的自己意識 身体所有感 ハプティックインタフェース リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究背景

日常生活において、ヒトは特に意識することなく自己の物理的身体を認知・認識している。その物理的身体は身体図式として脳内に保持されており、視覚や聴覚、体性感覚などの入力をもとに外界と自己を識別することで、適応的な認知・行動を行うことができるものと考えられている。「自分の身体は自分のものである」という感覚、すなわち身体所有感 (sense of body ownership) は通常ロバスタな感覚であるが、近年の認知科学研究の発展・貢献により、身体という物理的制約を超えて外界の対象を自分の身体として知覚する例が報告されている。例えば、衝立などで隠された研究参加者の手と視認可能なゴム製の手に絵筆などで同時に触刺激を与えると、ゴム手の身体化 (embodiment) が生じ、ゴム手上で触刺激が知覚されるようになる (ラバーハンド錯覚: RHI) (<引用文献>①参照)。また、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 上に研究参加者自身の背中を提示し、映像の背中に与えられる触刺激の視覚情報と実際に研究参加者の背中に与えられる触刺激のタイミングを同期させると、本来は脳機能に障害のある患者や精神・神経疾患患者、瀕死/瞑想中などの特殊な状態にある者で報告される体外離脱体験に似た身体錯覚 (フルボディ錯覚: FBI) を、健常者にも実験的に体験させることができるという報告もある (<引用文献>②参照)。

これらの報告から、ヒトの脳中では「自己」と「外界」との境界は意外に曖昧なものであり、外界からのある特定の入力で身体所有感を実験的に操作することが可能であることがわかる。また身体所有感操作の知見は、例えば、幻肢痛の緩和や身体化を伴う義手の開発などにおいて重要な情報となる可能性があり、医療・健康/福祉、産業、娯楽など様々な分野で活用できるものと期待される。

(2) 解決すべき問題点

前述のように身体所有感操作技術の確立は、我々の生活の質 (QOL) を向上させる新しいアプリケーションを創出できる可能性を秘めている。しかしながら、身体所有感操作の機序は未だ完全には解明されたとは言えず、また基礎研究の成果をそのままの形で応用することができない場面も多々ある。したがって、今後のさらなる展開のためには、身体所有感操作の主要因と基本メカニズムを十分に理解した上で、基礎研究と応用研究を橋渡しするような技術・インタフェースの開発が必要不可欠であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、ロボティクス・ハプティクス・バーチャルリアリティ (VR) 技術を用いた新たな手法・実験用プラットフォームを開発し、従来とは異なる学際的な観点からヒトの身体所有感操作の基本メカニズムを明ら

かにすること主目的とする。また、開発する新たな手法により、認知科学研究に新たなアプローチ・可能性を与えるとともに、得られる知見を基礎として、身体化や人間の集中力・パフォーマンスの強化・向上、片麻痺や身体認識に関わる疾患の治療、ツール・デバイスの操作訓練、没入型のマルチメディアサービスなどにおいて新たなアプリケーションを提案・実現することを目指す。さらには本研究を通して、工学とヒトの身体認知に関わる研究分野 (例えば、認知神経科学、実験心理学、脳科学、理学療法学など) との間に新たな学際リンクを構築し、新学術領域創成のため礎を築くことに挑戦する。

3. 研究の方法

本研究では、ヒトの身体所有感操作の基本メカニズムを理解し、その知見を片麻痺治療のための新しいアプリケーション開発などに応用することを目指して、主に以下の5つの研究課題に取り組んだ。

- (1) 身体所有感操作における運動主体感の影響
- (2) アクティブセルフタッチを用いた FBI 研究及び自他認識の操作
- (3) 温感ディスプレイを用いた自己身体認知・認識の操作
- (4) 第三者の存在に関する研究
- (5) 身体所有感操作の知見を利用したリハビリテーションシステムの開発

なお、ヒトを対象とする実験を行う場合、実験プロトコルはヘルシンキ宣言の内容を遵守して作成し、東京大学大学院工学系研究科倫理委員会または埼玉大学大学院理工学研究科倫理委員会の承認を受けている。また、実験に参加する研究参加者全員からは事前にインフォームド・コンセントを得ている。

4. 研究成果

- (1) 身体所有感操作における運動主体感の影響

RHI やセルフタッチ錯覚 (<引用文献>③参照) の実験パラダイムとアクティブセルフタッチ (平成23年度採択課題: 若手研究 (B) 「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」にて提案した手法) を用いて、ヒトの身体所有感転移の主要因及び発生メカニズムについての検討を行った。その中で特筆すべき成果としては、「自分が動作を起こしているあるいは管理している」という感覚、すなわち運動主体感 (sense of agency) と身体所有感との関係について調査したものである。具体的には、図1に示すような実験システムを構築し、アクティブセルフタッチ (AST: 研究参加者自身が触刺激を管理)、パッシブセルフタッチ (PST: 実験者の動作に従って触刺激を管理)、Visuo-tactile 刺激 (CLT: 従来の RHI パラダイムと同じく、実験者が刺激を管理) の条件で、以下の3つの実験を行った。

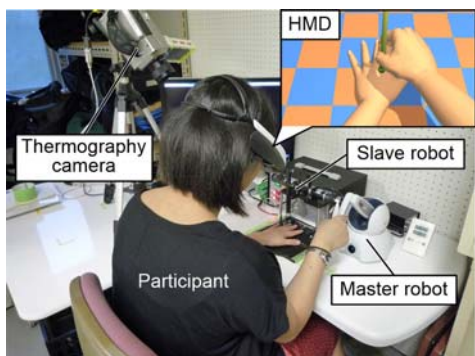


Fig. 1 Active or passive self-touch enabled RHI experimental system.

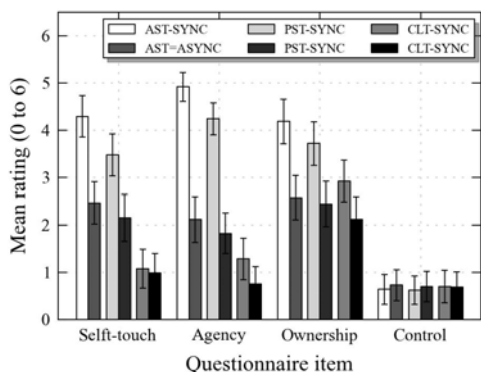


Fig. 2 Result of RHI questionnaire (in Experiment 3).

実験 1：運動主体感の影響

AST×PST, SYNC×ASYNC, 視覚情報無

実験 2：視覚情報の影響

AST×PST, SYNC×ASYNC, 視覚情報有

実験 3：実験 1 と実験 2 の要因と CLT の比較

AST×PST×CLT, SYNC×ASYNC, 視覚情報有

上述の実験において、7 項目の RHI アンケート（〔雑誌論文〕②参照）及び proprioceptive drift (PD) 測定（＜引用文献＞④参照）を実施した結果、運動主体感が強くなるにしたがって主観的（図 2）にも客観的にも RHI が強くなることが示された。この結果により、自発的な運動が身体所有感を増加させることが明らかにした。

(2) アクティブセルフタッチを用いた FBI 研究及び自他認識の操作

まず、FBI 実験のパラダイムにアクティブセルフタッチを組み込み、(1)と同様に運動主体感と身体錯覚強度の関係について調査を行った。結果、FBI では運動主体感は身体化にはそれほど影響を及ぼさないが、自己位置感覚のドリフトには有意に影響を及ぼすことが示唆された（〔学会発表〕⑩参照）。また新しい試みとして、アクティブセルフタッチを用いたヒトの自他認識操作にも挑戦した。図 3 に示すような実験システムを構築し（〔学会発表〕⑭参照）、二人称視点で HMD 上に提示された自身の身体をセルフタッチす

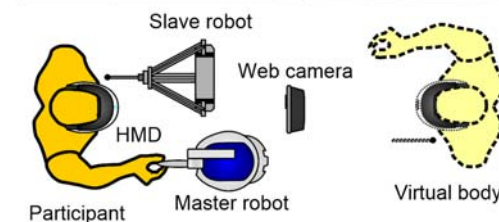


Fig. 3 Experimental system for manipulating self-other recognition.

る実験を実施した。実験条件として同期・非同期条件（画像と刺激提示に 500ms の遅れを導入）があり、本研究では同期条件で従来研究と同様に FBI やセルフタッチ錯覚が生じて映像の身体（仮想身体）を自分の身体と認識し、一方、非同期条件では映像及び触刺激のタイミングが自分の動作とは全く異なるため他者と認識するようになるという仮説を立てた。この仮説を検証するために、各条件での実験後に以下のアンケートを実施した。

- Q1 I felt as if the seen body was my own body
- Q2 It seemed as if I was touching someone's body
- Q3 It seemed as if I was touching myself
- Q4 It seemed as if someone was in front of me
- Q5 It seemed as if someone was touching me
- Q6 The touch on my body matched the movements I made with my right/left hand
- Q7 It seemed as if I might have more than one body
- Q8 It seemed as if I was in two places at the same time
- Q9 I couldn't feel my body

上記アのアンケートにおいて、Q1 から Q5 は身体認知・認識／錯覚に関する項目で、Q6 は運動主体感に関する項目である。その他は被暗示性の影響を確認するためのコントロール項目となっている。このアンケートでは、仮想身体を自分の身体と認識した場合に同期条件において Q1（仮想身体の身体化）と Q3（セルフタッチの感覚）に対するスコアが有

意に高くなり、逆に他者と認識した場合は非同期条件において Q2 (仮想身体を他者と認識), Q4 (他者の気配/存在感), Q5 (他者によるタッチの感覚) に対するスコアが有意に高くなるよう設計されている。アンケートの結果 (図 4), Q1~Q5 のスコアは同期条件と非同期条件で正負が真逆となり、仮説の妥当性が示された。また Q6 の結果から、仮想身体に対する触刺激提示の主体も同期・非同期条件で変化していることが確認できた ([学会発表] ③参照)。この成果により、ヒトの自他認識を操作するための基盤技術を確立するための橋頭堡を構築することができた。

(3) 温感ディスプレイを用いた自己身体認知・認識の操作

日常生活において無意識に知覚されていると考えられる身体特性、本研究では体温感覚に着目して、セルフタッチによるヒトの身体認知との関係について検討した。セルフタッチの際に知覚される体温と普段無意識に知覚されている体温に「ずれ」を与えると、触れているものを自分の身体と認知しなくなるという仮説を立て、ヒトの体温感覚の身体認知に対する重要性について検証した。この仮説を検証するために、温感ディスプレイとアクティブセルフタッチを基礎とした実

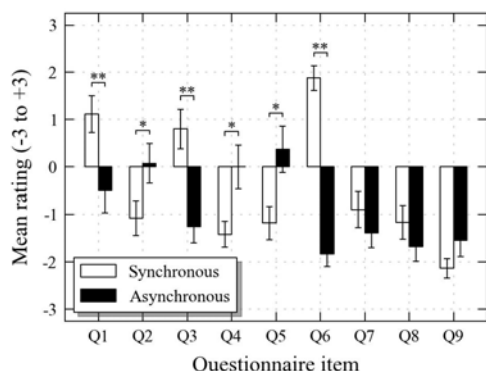


Fig. 4 Subjective evaluation by a self-other questionnaire.

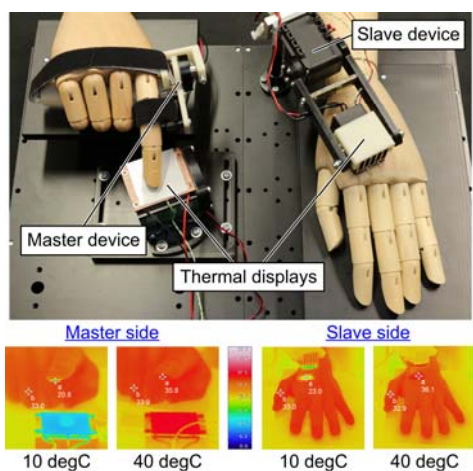


Fig. 5 1st prototype for manipulating sense of body temperature.

験システム (図 5) を構築した。このシステムは、右手人差指の上下運動により研究参加者が自身の左手および人工/仮想身体に疑似的にセルフタッチすることを想定しており、マスタ側とスレーブ側に搭載した温感ディスプレイによってセルフタッチ時の接触温度を様々に制御できるようになっている。本研究では、この実験システムをセルフタッチ錯覚の実験パラダイムに組み込み、セルフタッチ錯覚の有無/強度を調べるを行った。結果、マスタ側とスレーブ側両方の温感ディスプレイの温度を研究参加者の皮膚温度と同じに設定した場合、有意にセルフタッチ錯覚が生じることを明らかにした ([学会発表] ⑥参照)。また、温感ディスプレイの温度を 10degC あるいは 40degC と体温とは異なる値に設定すると、とたんに錯覚が生じなくなることが示唆された ([学会発表] ②参照)。この結果から、ヒトがセルフタッチによって自分の身体を認知・認識するためには、無意識に持つ体温感覚と実際に知覚される体温がある程度一致しなければならないことが言える。したがって、セルフタッチによるヒトの身体認知において、触覚フィードバックの重要性が示唆された。

(4) 第三者の存在に関する研究

ヒトが極限状態にある時 (例えば、視界が悪い中、登山家がヒマラヤ山脈から酸素不足・疲労困憊の状態下山するときなど) やパーキンソン病などの精神疾患患者で報告される第三者の存在/気配 (feeling of a presence : FoP) について、スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) の認知神経科学研究グループと共同で、その主要因及び発生メカニズムについて調査した。まず EPFL の認知神経科学研究グループが、FoP 体験を報告する患者の脳を MRI でスキャンし、感覚運動や自他認識に関わる脳部位 (前頭頂皮質, 側頭頂皮質, 島皮質など) で皮質障害があることを確認した。そこで、アクティブセルフタッチによりこれらの感覚を混乱させる実験 (図 6) を行った結果、健常者において実験的に FoP を体験させることに世界で初めて成功した ([雑誌論文] ③参照)。この成果及び開発したロボットは、Nature News や BBC News など多数の海外メディアで特集された。

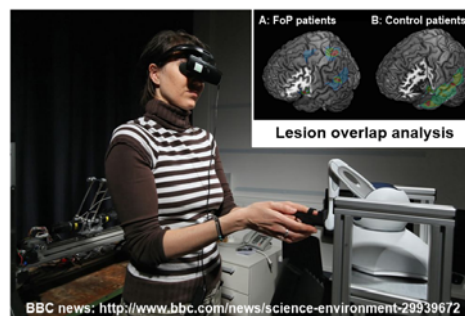


Fig. 6 World's first test of inducing the FoP in healthy people.

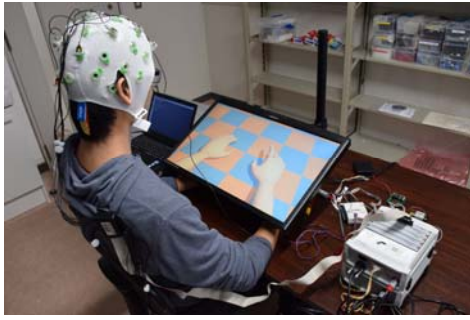


Fig. 7 EEG measurement during an RHI experiment for both hands.

現在は、新たに開発した fMRI 環境で使用可能な実験システムを用いて、脳機能との関係についてさらなる調査を進めている。

(5) 身体所有感操作の知見を利用したリハビリテーションシステムの開発

まず初めに、運動とヒトの身体認知・身体所有感について、身体の一部の運動が他の動いていない身体部位の身体所有感に及ぼす影響について検証した。RHI 実験のパラダイムとバーチャルハンドを用いて、利き手人差指の上下動作により運動しない非利き手において RHI が生じるかどうかの検証を行った。結果、利き手と同様に非利き手においても RHI が体験されることを RHI アンケートと CCE (cross-modal congruency) テスト (<引用文献>⑤参照) により示した ([学会発表]⑨参照)。また興味深いことに、主観評価において動作を全くしない非利き手の運動主体感も向上するという結果が得られた。もし本当に利き手の動作に引きずられて非利き手の運動主体感も変化したのであれば、脳活動に何らかの変化が起きているものと考え、EEG を用いたさらなる実験も行った。具体的には、前述の実験と同様に同期/非同期条件で右手人差指とバーチャルハンドの右手人差指を上限運動させ、その後、バーチャルハンドの左手人差指を一瞬だけ上下に動かすという操作を繰り返し行った。この時、EEG を用いて事象関連非同期の観測を特に右側前頭部 (F4) に注目して行った (図 7)。結果、同期条件において若干の ERD 傾向が表れた。現在、基礎理学療法学及び保健学を専門とする研究者と共同で脳活動の観点からさらなる検証を行っており、また上肢片麻痺患者のリハビリ応用についても議論している。

<引用文献>

- ① Matthew Botvinick and Jonathan Cohen, Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see, *Nature*, Vol. 391, 1998, pp. 756
- ② Bigna Lenggenhager, Teji Tadi, Thomas Metzinger, and Olaf Blanke, Video ergo sum: manipulating bodily self-consciousness, *Science*, No. 317, 2007, pp. 1096-1099

- ③ H. Henrik Ehrsson, Nicholas P. Holmes, and Richard E. Passingham, Touching a rubber hand: feeling of body ownership is associated with activity in multisensory brain areas, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 25, No. 45, 2005, pp. 10564-10573
- ④ Manos Tsakiris and Patrick Haggard, The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 31, No. 1, 2005, pp. 80-91
- ⑤ Francesco Pavani, Charles Spence, Jon Driver, Visual capture of touch: out-of-the-body experiences with rubber gloves, *Psychological Science*, Vol. 11, No. 5, 2000, pp. 353-359

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Masayuki Hara, Hiroyuki Nabae, Akio Yamaamoto, and Toshiro Higuchi, A Novel Rubber Hand Illusion Paradigm Allowing Active Self-Touch with Variable Force Feedback Controlled by a Haptic Device, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 査読有, Vol. 46, No. 1, 2015, pp. 78-87
DOI:10.1109/THMS.2015.2487499
- ② Masayuki Hara, Polona Pozeg, Giulio Rognini, Takahiro Higuchi, Kazunobu Fukuhara, Akio Yamamoto, Toshiro Higuchi, Roy Salomon, and Olaf Blanke, Voluntary self-touch increases body ownership, *Frontiers in Psychology*, 査読有, Vol. 6, Article 1509, 2015, pp. 1-12 201510
DOI:10.3389/fpsyg.2015.01509
- ③ Olaf Blanke, Polona Pozeg, Masayuki Hara, Lukas Heydrich, Andrea Serino, Akio Yamamoto, Toshiro Higuchi, Roy Solomon, Margitta Seeck, Theodor Landis, Shahar Arzy, Bruno Herbelin, Hannes Bleuler, and Giulio Rognini, Neurological and robot-controlled induction of an apparition, *Current Biology*, 査読有, Vol. 24, No. 22, 2014, pp. 2681-2686
DOI:10.1016/j.cub.2014.09.049

[学会発表] (計 17 件)

- ① Masayuki Hara, How Can We Apply Our Haptic Technologies to Scientific Studies?, The 4th IEEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2018), Tokyo, Mar. 2018, IS2-3 (招待講演)
- ② 水垂宏介, 原正之, 金山範明, 山口大介,

- 石野裕二、高崎正也、水野毅、認知神経科学研究のための温感ディスプレイと身体錯覚を利用した実験システムの開発、第18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(SI2017)、仙台、Dec. 2017、3D3-06
- ③ 原正之、金山範明、高崎正也、ロボティクス・ハプティクス技術による錯覚提示、第九回多感覚研究会、熊本、Dec. 2017、28
- ④ 原正之、コグネティクス研究の推進-工学面からのアプローチ-(コグネティクス：工学研究者とのコラボによる新しい心理学・脳科学の可能性)、日本心理学会第81回大会、久留米、Sep. 2017、SS-028 (招待講演)
- ⑤ 原正之、身体認知研究のための温感ディスプレイを用いた実験用プラットフォームの開発、第2回基礎理学療法学夏の学校、長崎、Aug. 2017、C-6
- ⑥ 原正之、高橋弘享、山口大介、石野裕二、高崎正也、水野毅、温感ディスプレイを用いたヒトの身体所有感操作に関する研究、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017(ROBOMECH2017)、福島、May. 2017、2P1-L07
- ⑦ 原正之、コグネティクス：工学と認知神経科学のインタラクション、人工知能学会、2017年度人工知能学会全国大会(第31回)、名古屋、May. 2017、1G1-0S-21a-4 (招待講演)
- ⑧ 清水親、原正之、山口大介、石野裕二、高崎正也、水野毅、二人称視点での自己インタラクション時におけるヒトの身体認識、計測自動制御学会、第17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(SI2016)、札幌、Dec. 2016、3B2-2
- ⑨ Masayuki Hara、Noriaki Kanayama、Daisuke Yamaguchi、Yuji Ishino、Masaya Takasaki、and Takeshi Mizuno、A Simple Action of Right Index Finger Induces Rubber Hand Illusion to Static Left Hand、The 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2016)、Budapest、Oct. 2016、pp. 737-742
- ⑩ 原正之、コグネティクス：ロボティクス・ハプティクス技術を用いたヒトの身体錯覚研究、第1回基礎理学療法学夏の学校、新潟、Aug. 2016、0-1-4
- ⑪ 清水親、原正之、山口大介、石野裕二、高崎正也、水野毅、二人称視点での自己インタラクションに関する検討、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016(ROBOMECH2016)、横浜、Jun 2016、1P1-11b6
- ⑫ 原正之、松下光次郎、鈴木雄大、藤森勇佑、山口大介、石野裕二、佐々木実、高崎正也、水野毅、運動とヒトの身体認知

の関係についての検討、第16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(SI2015)、名古屋、Dec. 2015、3L2-2

- ⑬ 原正之、山口大介、石野裕二、高崎正也、水野毅、ロボット技術を用いたRHI実験システム、第七回多感覚研究会、東京、Nov. 2015、44
- ⑭ 原正之、難波江裕之、山口大介、石野裕二、高崎正也、水野毅、ロボットによる刺激提示を用いたFull Body Illusionの研究、第33回日本ロボット学会学術講演会、東京、Sep. 2015、RSJ2015AC2L2-05 (日本ロボット学会第31回研究奨励賞受賞)
- ⑮ 原正之、山口大介、石野裕二、高崎正也、水野毅、ヒトの行動主体性と身体所有感の関係についての検討、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2015(ROBOMECH2015)、京都、May. 2015、1P2-J02 (ROBOMECH2015 ベストプレゼンテーション表彰受賞)
- ⑯ 原正之、難波江裕之、山本晃生、樋口俊郎、能動的な自己触刺激がヒトの身体所有感に及ぼす影響、第15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(SI2014)、東京、Dec. 2014、pp. 1559-1562
- ⑰ 原正之、難波江裕之、山本晃生、樋口俊郎、ヒトの身体所有感操作時における体温変化についての検討、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2014(ROBOMECH2014)、富山、May. 2014、3P2-001

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://measurement.mech.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 正之 (HARA, Masayuki)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00596497

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし