

ラバーハンド錯覚における筋電位及び皮膚電位反応の解析

辻 琢真^{*1}, 山川 博司^{*1}, 山下 淳^{*1}, 高草木 薫^{*2}
前田 貴記^{*3}, 加藤 元一郎^{*3}, 岡 敬之^{*4}, 浅間 一^{*1}

Analysis of Electromyography and Skin Conductance Response During Rubber Hand Illusion

Takuma TSUJI^{*1}, Hiroshi YAMAKAWA^{*1}, Atsushi YAMASHITA^{*1}
Kaoru TAKAKUSAKI^{*2}, Takaki MAEDA^{*3}, Motoichiro KATO^{*3}
Hiroyuki OKA^{*4}, Hajime ASAMA^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

^{*2} Department of Physiology, Division of Neural Function, Asahikawa Medical University
2-1 Midorigaoka-Higashi, Asahikawa, Hokkaido 078-8510, Japan

^{*3} Department of Neuropsychiatry, School of Medicine, Keio University
35 Shinanomachi, Shinjuku-ku, Tokyo 160-8582, Japan

^{*4} Department of Joint Disease Research, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Recently, brain mechanism of self body recognition attracts much attention, however, most previous researches have only focused on its functional side and lacked a perspective of its modelization. Then in this research we aim at the rubber hand illusion (RHI), which is one of phenomena that the sense of ownership (SOO) expands over the external world, and analyze consciousness of humans by measuring electromyography (EMG) and skin conductance response (SCR). As a result of this research, it can be implied that RHI does not provoke expanse of self body beyond recognition and that measurement of EMG is more superior to that of SCR in the point of instancy for RHI experiment.

Key Words : Rubber Hand Illusion (RHI), Sense of Ownership (SOO), Electromyography (EMG), Skin Conductance Response (SCR), Mirror System

1. 緒 言

近年、科学技術の発展に伴い、バーチャルリアリティやハプティックデバイスに関する研究・開発が活況を呈している。将来的に、これら複合現実感システムを我々の日常により浸透させるためには、対象との優れたインタフェース設計が重要であり、且つ不可欠である。この課題を解決すべく、昨今では、ヒトの脳機能や身体機能を工学的側面からモデル化する研究が盛んに行われている。特に、自身の身体認識における脳内メカニズムは未開の領域が多く、様々な研究が行われているが、未だメカニズムの解明には至っていない。

身体認識において、自己の身体に対する認知は Jeannerod が論文内で用いた身体所有感 (SOO : Sense of ownership) に分類されており⁽¹⁾、身体に関わる複数の内部情報 (視覚・触覚等の感覚情報) が脳内で同時に結合、及び処理されることによって生じるとされる⁽²⁾。これらのメカニズムを明らかにすべく、近年では、身体所有感が外界の対象に拡張する現象の 1 つとして知られるラバーハンド錯覚に関する研究が注目を集めているが、その大部分は身体所有感が拡張する諸条件の究明に焦点を当てており、生起メカニズムのモデル化を図る研究は少ない。これまでの研究においては、筋緊張の計測に基づき、ラバーハンド錯覚の客観的な検証を試みたが⁽³⁾、本稿では、筋緊張を含む複数の生体計測に基づき、錯覚が認知のレベルに留まるのか、及び内観報告等の主観を含むと考えられる検証結果との関連性について明らかとし、身体所有感の生じる脳内メカニズムの解明を目指す。

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) tsuji@robot.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 旭川医科大学医学部脳機能工学研究センター (〒078-8510 北海道旭川市緑が丘東 2 条 1 丁目)

^{*3} 慶應義塾大学医学部精神神経科 (〒160-8582 東京都新宿区信濃町 35 番地)

^{*4} 東京大学医学部付属病院関節疾患総合講座 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

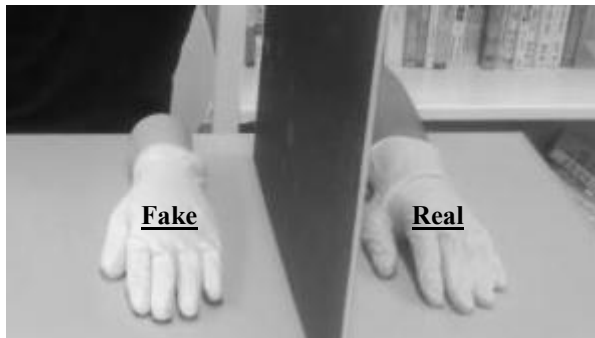


Fig. 1 Experimental condition for the RHI experiment. Left hand of the wall is fake, and right one is real.

2. ラバーハンド錯覚

身体所有感が外界の対象に拡張する現象の顕著な例の 1 つとして、ラバーハンド錯覚（RHI : Rubber hand Illusion）と呼ばれるものがある⁽⁴⁾。これは、図 1 に示すように、自分の視界から隠された本物の手と、目の前に置かれたラバー（フェイク）ハンドに絵筆等で一定時間（約 2～20 分程度）時間的・空間的に同期した触刺激を与え続けると、ラバーハンド上に触刺激を知覚ようになる錯覚現象である。この錯覚現象は、1998 年、Botvinick と Cohen によって英国 Nature 誌で初めて発表されて以来、数多くの研究者によって、追試実験やより詳細な検証が実施されており、昨今では RHI の生起に要する条件として、本物の手とラバーハンドへの触刺激の十分な同期性、及び両者の形態的な類似性の 2 点が特に重要であることが多数の論文等で示唆されている⁽⁵⁾。また、脳波（EEG : Electroencephalogram）を指標とした研究では、RHI の生起時において、大脳皮質内の頭頂葉におけるガンマ波との相関が報告されている⁽⁶⁾。

2・1 RHI の検証方法 RHI の生起を検証する従来の代表的な手法としては、質問紙による内観報告や皮膚電位反応の測定等が挙げられる。以下、各々の概略を順に述べる。

2・1・1 内観報告 「刺激されているラバーハンドを見ていると自分の手が刺激されているように感じた」等、複数の質問に 7 件法（1：全く感じない～7：強く感じる）で回答する形式が主である。また、実験後に自分の手が置かれている位置を答え、実験前に答えた自分の手の位置との位置ドリフトを測定することで RHI の検証を行う手法も提案されており、RHI が生起していれば、実際の手の位置と比較して、ラバーハンドにより近い位置に本物の手を知覚するとされている⁽⁷⁾。

2・1・2 皮膚電位反応 本物の手には刺激を与えず、ラバーハンドにのみ刺激（指を無理やり反り返らせる等）を与えた際の、本物の手における精神性発汗による皮膚電位反応（SCR : Skin conductance response）を測定する。RHI が生起していれば、ラバーハンドにのみ与えた刺激に対する恐怖や不安に応じて、本物の手に刺激を与えた場合同様に SCR 値が優位に上昇する⁽⁸⁾。

2・2 RHI 生起に伴う身体所有感の拡張領域

RHI における脳内メカニズムを考える上で、RHI の生起時に身体所有感の拡張が認知を越えた領域にまで及ぶのかについては、極めて重要な観点となる。即ち、RHI 生起時に生じる反応は認知のレベルに留まるのか、又は脊髄反射（大脳を介さない反応）のような意識のない反応が生じるのかといった観点での検証が不可欠である。しかし、先述した従来の RHI の検証方法では、内観報告は被験者の主観に強く依存し、皮膚電位反応で測定する精神性発汗は被験者が意識的に制御できないため、これらを検証することは難しい。

そこで本稿では、筋緊張計測を用いた新たな RHI の検証方法に基づき、RHI 生起時における身体所有感の拡張が認知のレベルを超えて生じるのかについて明らかにする。

2・3 筋緊張計測に基づく RHI の測定方法

RHI 生起時における認知レベルにおける反応、及び脊髄反射の筋緊張計測に基づく検証方法について、以下、その概略を順に述べる。

2・3・1 認知レベルにおける反応の測定方法

ラバーハンドを自分の手であると認知している場合、ラバーハンドにハンマー等で強い打撃を与えようとした際、恐怖から意識的に手を引く行為が生じると考えられる。従って、手を引く際に使用する筋肉の緊張を、筋電位（EMG : Electromyography）から測定することで、RHI 生起時における認知レベルの反応を検証することが可能となる。

2・3・2 脊髄反射の測定方法 認知を越えてラバーハンドへ身体所有感が拡張している場合、実際の手への刺激が無くては生じないはずの脊髄反射が、ラバーハンドのみへの刺激に応じて生じると考えられる。従って、脊髄反射を伴う特定の刺激を用いて、反射によって生じる筋肉の緊張を、筋電位から測定することで、RHI 生起時における脊髄反射を検証することが可能となる。

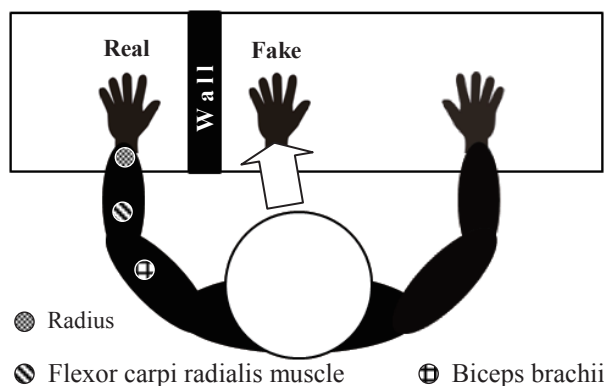


Fig. 2 Overview of the RHI experiment. Subject's own hand is set at the left side of the wall, and a fake one is set at the right side, and subject can't see an own hand. Red marker shows radius, blue one shows flexor carpi radialis muscle and green one shows biceps brachii.

3. 実験概要

実験を俯瞰した様子を図 2 に示す。衝立の左側に被験者の左手を、右側にフェイクハンドを本物の手と同姿勢で設置し、被験者が本物の手を見ることができない環境を作る。被験者がフェイクハンドのみに視線を集中させている間、実験者が絵筆を用いて本物の手とフェイクハンドに同期した触刺激を一定時間与え続け、被験者に RHI を生起させた後に、先述した 2 つの RHI 測定を実施する。また、被験者にはヘッドホンを通してホワイトノイズを提示し続けることで、実験中の外界音を遮断する。以下、実験の詳細について述べる。

3・1 筋緊張の測定部位 筋緊張の測定部位は、目的に応じて異なる 2 か所に定める。認知レベルにおける反応では橈側手根屈筋を、脊髄反射では上腕二頭筋を用いる（図 2）。橈側手根屈筋は肘関節の屈筋補助を行う筋肉であり、今回の実験においては、手を引く際に必然的に肘関節の屈曲が生じるため測定に適している。脊髄反射では、橈骨への適度な打撃に伴う腕橈骨筋反射を測定する。橈骨への刺激が上腕二頭筋に伝わり、筋緊張が生じるため測定に適している。尚、利き手の違いによる RHI への影響はないという報告から⁽⁹⁾、今回の実験では左手による測定に統制した。

いずれも筋緊張は筋電位を計測することで測定を行う。筋電位の導出は双極導出法を用いて、電極間距離を 2cm とする。各筋における電極は、橈側手根屈筋は後肘部下方 1cm の部位に、上腕二頭筋は後肘部上方 1cm の部位に貼付する。筋電位の計測には PowerLab, Bio Amp（バイオリサーチ社）を使用し、サンプリング周波数は 1,000Hz とする。

Table 1 Questionnaires of introspection report.

1.	It seems as if I were feeling the touch of the paintbrush in the location where I saw the rubber hand touched.
2.	It seemed as though the touch I felt was caused by the paintbrush touching the rubber hand.
3.	I felt as if the rubber hand were my hand.
4.	It seemed as if my (real) hand were drifting towards the right (towards the rubber hand).
5.	It seemed as if I might have more than one hand or arm.
6.	It seemed as if the touch I was feeling came from somewhere between my own hand and the rubber hand.
7.	It felt as if my (real) hand were turning 'rubbery'.
8.	It appeared (visually) as if the rubber hand were drifting towards the left (towards my hand).
9.	The rubber hand began to resemble my own (real) hand, in terms of shape, skin tone, freckles or some other visual feature.

3・2 皮膚電位反応の測定方法 複数の指標で得られる RHI の検証結果を比較するため、本実験では皮膚電位反応から精神性発汗の計測を併せて行う。計測部位は精神性発汗部位であり、本実験に支障を来さない右手の指先とする。皮膚電位の導出は通電法を用いて、電極を示指（人差し指）と中指の腹に貼付する。皮膚電位反応の測定には PowerLab, Bio Amp（バイオリサーチ社）を使用し、サンプリング周波数は 1,000Hz とする。

3・3 測定の流れ 同期した触刺激を与える前に、被験者にフェイクハンドが自分の手でないことを十分に確認してもらう。その上でフェイクハンドの甲への強い打撃、及び橈骨への連続した適度な打撃が与えられる様子を観察してもらい、観察時の各筋における筋電位、及び発汗を計測する。

次に、10 分間絵筆で同期した 1Hz 程度の触刺激を本物の手とフェイクハンドに与えた後、フェイクハンドにのみ強い打撃を与え、その際の橈側手根屈筋における筋電位、及び発汗を計測する。

その後、更に 10 分間絵筆で同期した 1Hz 程度の触刺激を与えた後、フェイクハンドの橈骨に 1～2Hz 程度の 10 回の連続した適度な打撃を与え（但し、本物の手の橈骨には 5 回目と 7 回目を除いてフェイクハンドと同期した打撃を与えるものとする）、その際の上腕二頭筋の筋電位を計測する。

全ての実験後には、Botvinick と Cohen が実験にて用いた計 9 個の質問事項で構成される内観報告書⁽⁴⁾を日本語で訳したものに、YES / NO の二択形式で回答してもらう（表 1）。

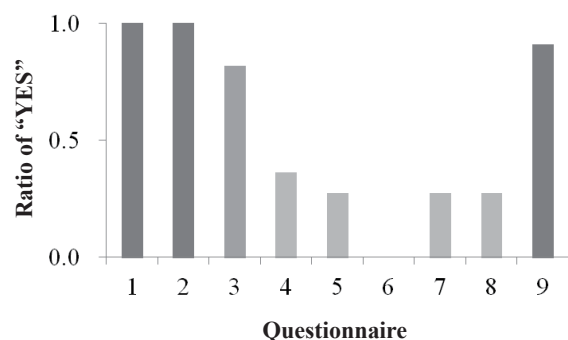


Fig. 3 Result of introspection report. Vertical axis indicates the ratio of subjects who answered "YES" at each question.

4. 実験結果

被験者は東京都内の大学、又は大学院に在籍中の健常な学生 11 名（平均年齢 22.5 歳，レンジ 20 - 24 歳，男性 7 名，女性 4 名）で，実験目的に関して事前知識を有さなかった．尚，本実験は東京大学医学部倫理委員会の承認を得ており，被験者全員からインフォームドコンセントを得ている．以下，内観報告，橈側手根屈筋，上腕二頭筋の筋緊張，及び皮膚電位反応について順に結果を述べる．

4・1 内観報告結果 被験者全員の内観報告結果を図 3 にまとめて示す．尚，1～9 の質問番号に対応する各々の質問事項は，表 1 の通りである．

質問番号 1, 2, 3, 9 に YES と答えた被験者の割合が他と比較して高い傾向は，Botvinick と Cohen が行った実験や他の報告等でも同様であり，被験者に十分な RHI が生起していること，及び本実験環境の妥当性が示された．また，フェイクハンドを「自分の手である」と認知している傾向は，質問番号 3 の「フェイクハンドがあたかも自分の手のように感じた」の質問事項から大凡推測できると考え得るが，11 名中 9 名から YES の回答を得た．

4・2 橈側手根屈筋の筋緊張計測結果 被験者全員の測定結果を図 4 にまとめて示す．フェイクハンドへの強い打撃時に，周辺ノイズ最大振幅の 5 倍を超える振幅を計測した打撃を筋緊張が生じたものと定め，同期した触刺激を与える前後において，筋緊張が生じた打撃の割合を比較している．

同期した触刺激を与える前には全く筋緊張が生じていないのに対し，同期した刺激を与えた後では 8 割以上の打撃で筋緊張が生じており，打撃を避けるべく，意識的に手を引いていることが示された．この結果から，RHI の生起時において，認知レベルの反応が生じることが示唆される．

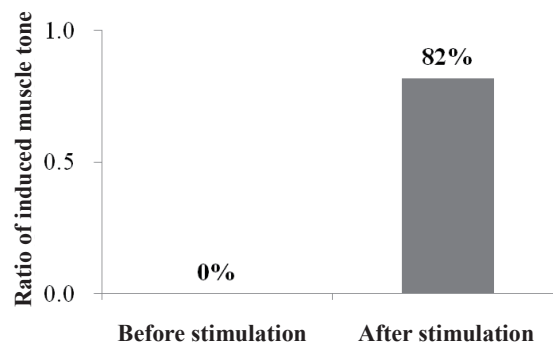


Fig. 4 Result of flexor carpi radialis muscle electromyography (EMG). Vertical axis indicates the ratio of subjects who pulled a hand before or after stimulation.

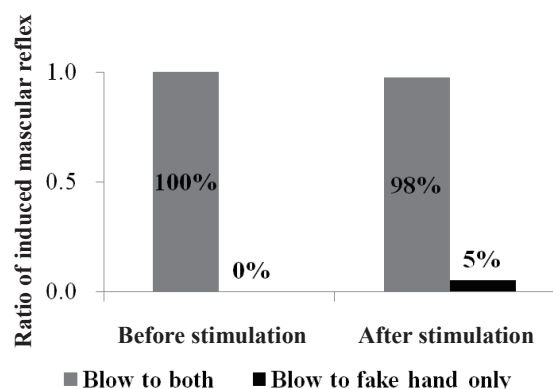


Fig. 5 Result of biceps brachii electromyography (EMG). Vertical axis indicates the ratio of blows which induced a muscular reflex to a subject before or after stimulation. Green bar shows the result of the blow to both a real hand and a fake one, and red one shows the result of the blow to a fake hand only.

4・3 上腕二頭筋の筋緊張計測結果 被験者全員の測定結果を図 5 にまとめて示す．フェイクハンドの橈骨への打撃時に，周辺ノイズ最大振幅の 5 倍を超える振幅を計測した打撃を筋反射が生じたものと定め，同期した触刺激を与える前後において，双方の橈骨への打撃，及びフェイクハンドの橈骨のみへの打撃に対して，筋反射が生じた打撃の割合を比較している．

同期した触刺激を与える前後の双方において，本物の手とフェイクハンドの橈骨に打撃を与えている場合には極めて高い割合で筋反射が生じているのに対して，フェイクハンドの橈骨にのみ打撃を与えた場合には筋反射がほとんど生じておらず，本物の手の橈骨に打撃を与えることなく，フェイクハンドの橈骨のみへの打撃に応じた筋反射は生じていないことが示された．この結果から，RHI の生起時において，先の実験で示されたように認知レベルにおける反応は生じる一方で，脊髄反射は生じないことが示唆される．

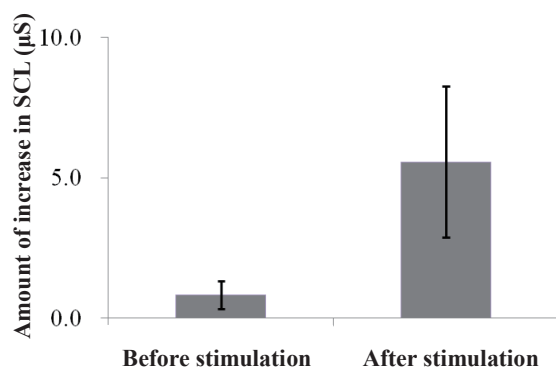


Fig. 6 Result of skin conductance response (SCR). Vertical axis indicates the amount of increase in skin conductance level (SCL). Error bars show standard error of the mean (SEM).

4・4 皮膚電位反応の測定結果 被験者全員の測定結果の平均を図 6 にまとめて示す。同期した触刺激を与える前後において、フェイクハンドの甲への強い打撃時における皮膚電気伝導水準 (SCL : Skin conductance level) の上昇量を比較している。尚、図 6 の垂直軸における単位は国際単位系 (SI) で定められた [S] (ジーメンズ : $1\text{S} = 1\text{mho} = 1\Omega^{-1}$) を用いており、グラフ上のエラー・バーは平均値からの標準偏差 (SEM) を示す。SCL 値は、打撃の直前から打撃後の数秒間に渡り変化が生じるため、打撃前の基準となる SCL 値を打撃以前 30 秒における平均値、打撃後に基準値から比較する SCL 値を打撃以降 10 秒以内における最大値と定めて評価を行っている。

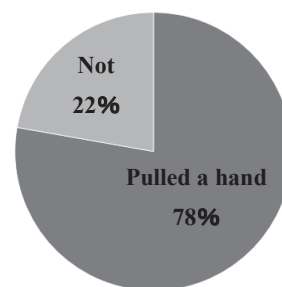
同期した触刺激を与える前後において、SCL の上昇量が約 6.6 倍増加しており、フェイクハンドへの打撃に対して発汗が生じていることがわかる。この結果から、皮膚電位反応の計測による RHI の検証が妥当性を持つことが示唆される。

5. 考察

先の実験結果から得られた知見を基に、内観報告、筋緊張、及び皮膚電位反応の計測に基づく RHI の検証方法について、また、認知を越えた身体所有感の拡張についての考察を行う。以下、各々の考察について順に述べる。

5.1 RHI の測定方法について 本実験では、内観報告、橈側手根屈筋の筋緊張、及び皮膚電位反応の計測に基づいて、RHI の検証、即ちヒトの自己身体に対する認知の測定を試みたが、これらの内、内観報告では主観的に、筋緊張、及び皮膚電位反応の生体計測では客観的に認知が測定されているものと考えられる。

Carpi radialis muscle
electromyography (EMG)



Skin conductance response (SCR)

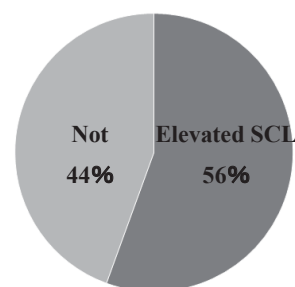


Fig. 7 Ratio of subjects who pulled a hand in carpi radialis muscle EMG experiment and who elevated SCL in SCR experiment, among nine subjects who answered “YES” at the questionnaire No. 3 of the introspection report, “I felt as if the rubber hand were my hand”. Blue area shows the ratio of subjects who pulled a hand or elevated SCL, and red one shows the ratio of subjects who did not.

しかし、これら主観的測定と客観的測定が異なる結果を示すならば、どちらか一方が正しい測定方法であるとは言い切れない。そこで、内観報告に用いた質問事項の内、最も自己身体に対する認知を客観的に示すと考えられる質問番号 3 に対して YES と答えた被験者 9 名が、フェイクハンドへの打撃時に筋緊張が生じたか、及び発汗が 5 倍以上に上昇したかを調査することでこれを評価する。

質問番号 3 に対して YES と答えた被験者 9 名の筋緊張、及び皮膚電位反応の測定結果を図 7 に示す。筋緊張計測では 78% の被験者が、皮膚電位反応計測では 56% の被験者が内観報告と同様にフェイクハンドを自分の手であると認知していることが示された。従って、筋緊張計測の方が、皮膚電位反応計測と比較して、より主観的測定の結果を同様に再現する可能性が示唆される。

また、刺激から反応までにかかる時間を考慮すると、皮膚電位反応計測は発汗が生じるまでに数秒の時間がかかるのに対し、筋緊張計測は瞬間的な測定が可能であり、即時性に優れる利点を持つ。

5.2 認知を越えた身体所有感の拡張について

RHI の生起時において、今回の筋緊張計測を用いた実験から、フェイクハンドの甲への強い打撃に応じて 8 割以上の被験者が意識的に手を引いた結果、及びフェイクハンドと本物の手の橈骨双方へ打撃を与えた際にのみ筋反射が得られた結果から、身体所有感の拡張は認知のレベルに留まる可能性が示唆された。即ち、RHI 生起時における身体拡張は、脊髓反射に代表されるような、大脳を介さない反応には有効ではなく、脊髓より高次のレベルで生じていることが示唆される。これは、ラバーハンド錯覚を始めとする、身体所有感が外界へ拡張する際における脳内メカニズムを解明する上で、極めて重要な観点であると考えられる。

また、今回の一連の実験において、一部の被験者においては、内観報告では RHI の生起を示していない(質問番号 3 に対して NO と回答している)にもかかわらず、フェイクハンドへの強い打撃に応じて筋緊張が生じた例や、発汗が上昇した例が確認された。即ち、内観報告の結果を鑑みると、自身では RHI の生起を意識していないことが示されるが、生体計測で有効反応を示した結果を考慮すれば、本人の意識の外で RHI が生起している可能性が示唆される。

一方で、今後の本研究の課題として、ラバーハンド錯覚とミラーシステム (Mirror system) との関連性を明らかにすることが挙げられる。ミラーシステムとは、他者行為の観察時、脳内で自身が他者と同一の行為を行っている時と同様の反応を示す現象を指す⁽¹⁰⁾。こうした観点からラバーハンド錯覚を鑑みると、ラバーハンド上に触刺激を知覚する現象は、ミラーシステムと極めて類似すると考えられるが、これまでのところ両者の関連は解明されていない。

6. 結 言

本稿では、筋緊張の計測を含む複数の生体計測を用いた RHI の検証方法に基づき、RHI 生起時における身体所有感の拡張領域について言及した。その結果、身体所有感の拡張領域は、認知のレベルに留まる可能性を示した。

また、皮膚電位反応の計測に基づく RHI の検証方法と比較して、筋緊張の計測に基づく RHI の検証方法は、より内観報告と同様の結果を示す可能性があること、及び測定において即時性に優れる利点を持つことが示唆された。

身体所有感における脳内メカニズムに関する研究は、先に述べたように、工学的な側面のみならず、医学分野や心理・哲学分野等の他分野からの注目も多く、幅広い応用性を有する。今後の本研究においては、引き続きラバーハンド錯覚における脳内メカニズムのモデル化を目指し、ヒトの身体認識に関わる脳機能解明の一助としたい。

謝 辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」、および科研費基盤研究(B)24300198 の一部として実施されたものである。

参 考 文 献

- (1) Jeannerod, M., "The mechanism of self recognition in humans", *Behavioural Brain Research*, Vol. 142, (2003), pp. 1-15
- (2) Gallagher, S., "Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science", *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 4, No. 1, (2000), pp. 14-21.
- (3) 辻 琢真, 山川 博司, 山下 淳, 高草木 薫, 前田 貴記, 加藤 元一郎, 岡 敬之, 浅間 一, "筋緊張計測を用いたラバーハンド錯覚の測定", 第 13 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 (SI2012) 論文集, (2012), pp. 363-366.
- (4) Botvinick, M. & Cohen, J., "Rubber hands 'feel' touch that eyes see", *Nature*, Vol. 391, (1998), pp. 756.
- (5) Kammers, M. P. M., de Vignemont, F., Verhagen, L. & Dijkerman, H. C., "The rubber hand illusion in action", *Neuropsychologia*, Vol. 47, (2009), pp. 204-211.
- (6) Kanayama, N., Sato, A. & Ohira, H., "The role of gamma band oscillations and synchrony on rubber hand illusion and crossmodal integration", *Brain and Cognition*, Vol. 69, (2009), pp. 19-29.
- (7) Tsakiris, M. & Haggard, P., "The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution", *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 31, No. 1, (2005), pp. 80-91.
- (8) Armel, K. C. & Ramachandran, V. S., "Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response", *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences*, Vol. 270, (2003), pp. 1499-1506.
- (9) Haans, A., IJsselstein, W. A., & de Kort, Y. A. W., "The effect of similarities in skin texture and hand shape on perceived ownership of a fake limb", *Body Image*, Vol. 5, No. 4, (2008), pp. 389-394
- (10) Keyersers, C., Wincker, B., Gazzola, V., Jean-Luc, A., Fogassi, L. & Gallese, V., "A Touching Sight: SII/PV Activation during the Observation and Experience of Touch", *Neuron*, Vol. 42, No. 2, (2004), pp. 335-346.