

筋緊張計測を用いたラバーハンド錯覚の測定

○辻 琢真（東大）， 山川 博司（東大）， 山下 淳（東大）， 高草木 薫（旭川医科大）
前田貴記（慶應大）， 加藤 元一郎（慶應大）， 岡 敬之（東大）， 浅間 一（東大）

Measurement of Rubber Hand Illusion Based on Gauging of Muscle Tone

○Takuma TSUJI (The University of Tokyo), Hiroshi YAMAKAWA (The University of Tokyo)
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), Kaoru TAKAKUSAKI (Asahikawa Medical University)
Takaki MAEDA (Keio University), Motoichiro KATO (Keio University)
Hiroyuki OKA (The University of Tokyo), and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract: Recently, brain mechanism of self body recognition attracts much attention, but 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 muscle tone. As a result of this research, it can be implied that RHI does not provoke expanse of self body beyond recognition.

1. 緒言

近年，科学技術の著しい発展に伴い，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ー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．

身体の認識は，Jeannerod が論文内で用いた身体（自己）所有感（SOO : Sense of (body) ownership）と運動主体感（SOA : Sense of agency）に大きく二分されて知られるが[1]，この内，前者は身体に関わる複数の内部情報（視覚・触覚等の自己受容感覚情報）が脳内で同時に結合・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，身体所有感が外界の対象へ拡張する現象に関する研究が近年増加傾向にあるが，その大半が身体所有感の機能的な側面に焦点を当てており，モデル化を図る研究は極めて少ない．

そこで，本研究においては，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（RHI : Rubber hand illusion）に着目し，筋緊張の計測から，ヒトの意志を客観的に指標とする従来に無いアプローチで身体所有感の生じる脳内メカニズムのモデル化を目指す．



Fig. 1 Experimental condition for the RHI experiment

2. ラバーハンド錯覚

身体所有感が外界に拡張する現象の顕著な例の 1 つとして，ラバーハンド錯覚と呼ばれるものがある[3]．これは，Fig. 1 に示すように，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）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する錯覚現象である．この錯覚現象は，1998 年，Botvinick と Cohen によって英国 Nature 誌に発表されて以来，数多くの研究者によって追試実験やより詳細な検証が行われており，昨今では RHI の生起条件として，触刺激の同期性，及びラバーハンドと本物の手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されている[4]．また，脳波（EEG : Electroencephalogram）を指標とした研究では，RHI 生起時において，頭頂葉におけるガンマ波（周波数 30Hz 以上）との強い相関が報告されている[5]．

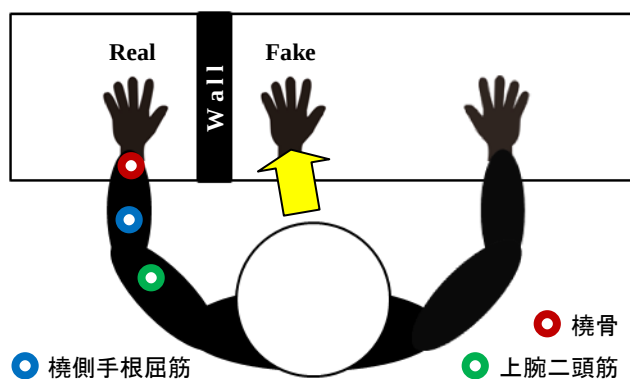


Fig. 2 Overview of the RHI experiment

2.1 RHI の測定方法

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射の測定等が挙げられる。以下、そ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 YES / NO で回答する形式や、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、実験前との位置ドリフトを測定する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[6]。

2.1.2 皮膚電位反応

ラバーハンドに刺激（指を反り返らせる等）を与えた場合の、本物の手における精神性発汗による電気抵抗値（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刺激を与えた際に、本物の手に刺激を与えた場合と同様に SCR 値が優位に上昇する[7]。但し、RHI が生起していない場合には、SCR 値が上昇しないという前提に基づいている。

2.2 ラバーハンド錯覚と随意運動・不随意反射

ラバーハンド錯覚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 生起時に随意運動（脳を介した刺激に対する反応）、又は不随意反射（脳を介さない刺激に対する反応）が生じるのかについての検証が不可欠である。しかし、先述した従来の RHI の測定方法では、認知の面において客観的な明確化はし難い。何故なら、内観報告で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からである。

そこで本研究では、ラバーハンド錯覚における身体認知を客観的な指標とすべく、筋緊張計測を用いた新たな RHI の測定方法について提言する。

2.3 筋緊張計測に基づく RHI の測定方法

RHI 生起時における随意運動、及び不随意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 随意運動の測定方法

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、打撃を避けるべく意識的に手を引く行為が生じるはずである。従って、手を引く際に使用する筋肉の緊張を、筋電位から測定することで、RHI 生起時における随意運動の成立を客観的に測定することが可能となる。

2.3.2 不随意反射の測定方法

認知を越えてラバーハンドへ身体が拡張している場合、ラバーハンドのみへの刺激に対して、本物の手へ刺激を与えた際と同様の反応が生じるはずである。従って、筋反射を伴う特定の刺激を用いて、筋反射に伴う筋肉の緊張を、筋電位から測定することで、RHI 生起時における不随意反射の成立を客観的に測定することが可能となる。

3. 実験概要

Fig. 2 に示すように、衝立の左側に被験者の左手を、右側にフェイクハンドを置き、被験者は実際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に視線を集中させている間、実際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 を生起させた後にフェイクハンドへの強い打撃と筋反射の測定を行う。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することで、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。随意運動の検証では橈側手根屈筋を、筋反射の測定では上腕二頭筋を用いる（Fig. 2）。

橈側手根屈筋は肘関節の屈筋の補助を行う筋肉であり、今回の実験環境下においては、手を引く際に肘関節の屈曲が生じるため測定に適している。

筋反射では、桡骨（Fig. 2）への刺激に伴う腕橈骨筋反射を測定する。頸髄（脊髄）損傷がある場合、反射亢進が生じて前膊（前腕）に屈曲が生じるが、特に損傷が無い場合には上腕二頭筋に刺激が伝わり、筋緊張が起こるため測定に適している。

Table 1 Questionnaires of introspection report

1.	刺激されているフェイク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
2.	フェイクハンドに触っている筆が自分の手を感じているように感じた
3.	フェイクハンドがあたかも自分の手のように感じた
4.	本当の左手がフェイクハンド側にあるように感じた
5.	左手がもう一本存在しているかのように感じた
6.	自分の手とフェイクハンドの間のどこから触られているように感じた
7.	自分の手がフェイクハンドと同じ素材でできているように感じた
8.	フェイクハンドがまるで自分の手の側にあるように感じた
9.	フェイクハンドの形や色などの特徴が自分に似ているように感じた

いずれも筋緊張の導出は双極導出法とし、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。

3.2 測定の流れ

同期した触刺激を与える前に、被験者には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と橈骨への打撃を観察してもらい、観察時の各筋における筋緊張を測定する。

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緊張を測定する。

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へ 1~2Hz 程度の 10 回の打撃を与え（但し、本物の手の橈骨には 5 回目と 7 回目を除いて同期した打撃を与える）、その際の上腕二頭筋の筋緊張を測定する。

実験後には、Botvinick と Cohen が用いた 9 個の質問で構成される内観報告書を日本語訳したものに YES / NO の二択で記入してもらう (Table 1)。

4. 実験結果

被験者は東京都内の大学、または大学院に在籍中の健常な学生 10 名（平均年齢 22.7 歳、レンジ 20 - 24 歳、男性 7 名、女性 3 名）である。

以下、内観報告、橈側手根屈筋の筋緊張、及び上腕二頭筋の筋緊張について、順に各々の結果を述べる。

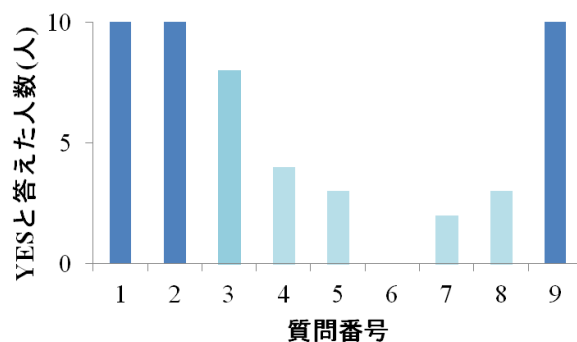


Fig. 3 Result of introspection report

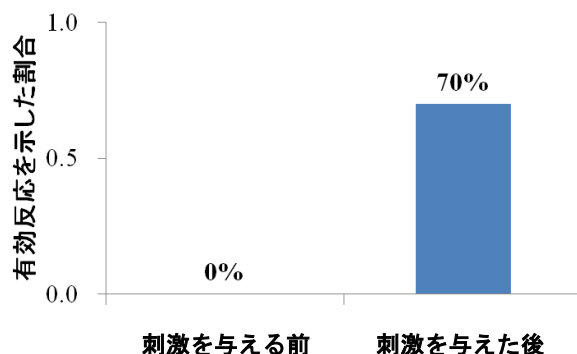


Fig. 4 Result of flexor carpi radialis muscle EMG

4.1 内観報告結果

被験者全員の内観報告結果を Fig. 3 にまとめて示す。尚、質問番号に対応する各々の質問事項は Table 1 の通りである。

質問番号 1, 2, 3, 9 における質問項目に YES と答えた被験者の割合が他の質問項目と比較して高い傾向は、Botvinick と Cohen が行った実験や他の報告でも同様であり、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 における「フェイクハンドがあたかも自分の手のように感じた」の質問事項から推測することができるが、10 名中 8 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 Fig. 4 にまとめて示す。フェイクハンドの甲への強い打撃時に、周辺ノイズ最大振幅の 5 倍を超える振幅を計測した筋電位を筋緊張の有効反応と定め、同期した触刺激を与える前後において、有効反応を示した被験者の割合を比較している。

同期した刺激を与える前には被験者全員が有効反応を示していないのに対し、同期した刺激を与えた後では被験者の 7 割が有効反応を示しており、打撃を避けるべく、意識的に手を引いていることがわかる。この結果から、RHI の生起時において随意運動が生じることが示された。

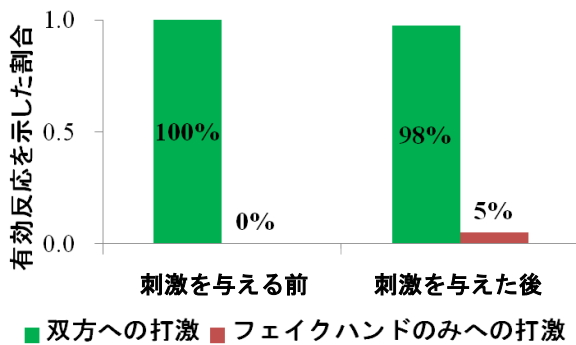


Fig. 5 Result of biceps brachii EMG

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 Fig. 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筋電位を筋緊張の有効反応と定め、同期した触刺激を与える前後で、本物の手の橈骨への打撃の有無が及ぼす有効反応を示した被験者の割合を比較している。

刺激を与える前後双方において、本物の手の橈骨へ打撃を与えない場合には有効反応がほとんど得られておらず、打撃に応じた筋反射が生じていないことがわかる。この結果から、RHI の生起時において、随意運動は生じる一方で、不随意反射は生じないことが示された。

5. 考察

RHI の生起時において、身体所有感の拡張が認知を越えた領域にまで及ぶか否かに関して、今回の筋緊張計測を用いた実験において、フェイクハンドの甲への強い打撃に応じて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同期した打撃を与えた際にのみ筋反射が得られた結果から、認知を越えた身体拡張は生じないことが示された。即ち、RHI 生起時における身体拡張は、不随意反射に代表されるような、脳を介さない反応には有効でないことが示唆される。

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[8]。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ものであると予想されるが、両者の決定的な差異について、ミラーシステムにおいては、ラバーハンドを「自分の手である」と認知していない点であると考えられる。

6. 結言

身体所有感における脳内メカニズムに関する研究は、本稿の冒頭で述べたように、工学的な側面のみならず、昨今では、医学分野や心理・哲学分野等の他分野からの注目も非常に多く、極めて幅広い応用性を持つ研究対象である。

本稿では、筋緊張の計測に基づき、新たにヒトの意志を定性的に測定する RHI の測定方法を用いることで、RHI 生起時における認知を越えた身体拡張について言及した。また、従来の皮膚電位反応を指標とする RHI の測定方法と比較して、より即時性に優れる計測が可能となった。今後の本研究においては、引き続き RHI 生起時における脳内メカニズムのモデル化を目指し、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*, 142, 1-15, 2003.
- [2] Gallagher, S., Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Science*, 4, 14-21, 2000.
- [3] Botvinick, M. & Cohen, J., Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391, 756, 1998.
- [4] Kammers, M.P.M., de Vignemont, F., Verhagen, L. & Dijkerman, H.C., The rubber hand illusion in action. *Neuropsychologia*, 47, 204-211, 2009.
- [5] Kanayama, N., Sato, A. & Ohira, H., The role of gamma band oscillations and synchrony on rubber hand illusion and crossmodal integration. *Brain and Cognition*, 69, 19-29, 2009.
- [6] Tsakiris, M. & Haggard, P., The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 31(1), 80-91, 2005.
- [7] Armel, K. C. & Ramachandran, V. S., Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences*, 270, 1499-1506, 2003.
- [8] Keysers, 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*, 42, 2, 335-346, 2004.