

ラバーハンド錯覚中の触覚時間順序判断： 主観的同時点と時間分解能の異なる変調

Tactile Temporal Order Judgment during Rubber Hand Illusion

渋谷 賢[†], 大曾根 裕樹[‡], 大木 紫[†]
Satoshi Shibuya, Hiroki Oosone, Yukari Ohki

[†]杏林大学 医学部 統合生理学, [‡]千葉みなとリハビリテーション病院
Kyorin University, Chiba Minato Rehabilitation Hospital
shibuyas@ks.kyorin-u.ac.jp

概要

ラバーハンド錯覚 (RHI) は, 手の所有感と知覚される位置の変容を引き起こす. RHI と両手の触覚時間順序判断 (TOJ) は共通プロセス (手の多感覚表象) を有する. 本研究は, 錯覚誘発時 (RHI 条件) と非誘発時 (non-RHI 条件) の触覚 TOJ を調べた. non-RHI 条件の TOJ の時間分解能 (TR: 判断の正確性) は, RHI 条件比べて低下し, 手の知覚される位置の移動と関連した. 他方, RHI 条件の主観的同時点 (PSS: 左右の手の触覚入力への重み付け) は手の所有感の変容と関連した. この結果は, 触覚 TOJ の PSS と TR が手の自己帰属と自己位置に関連する可能性を示唆する.

キーワード: 身体所有感, ラバーハンド錯覚, 触覚時間順序判断, 時間分解能, 主観的同時点

1. 研究目的

“私の身体は自己に属している” と感じる主観的感覚は身体所有感 (sense of body ownership) と呼ばれ, 自己意識の基盤を成す [1]. ラバーハンド錯覚 (rubber hand illusion, RHI) は, 私たちの直感に反して身体所有感が柔軟に変化しうることを示す [2]. RHI とは, 被験者の眼前に置いた人工手 (視覚) と視覚遮断した本人の手 (触覚) をブラシで同時刺激すると, 触覚の位置が人工手に移動するとともに, 人工手が自己の手のように感じる錯覚である. 非同期な視覚触覚刺激では錯覚が誘発しないことから, 多感覚 (視覚・触覚・固有感覚) の統合プロセスが錯覚誘発に必要な条件であると言える [2]. 従来, RHI は質問紙調査と固有感覚ドリフト (proprioceptive drift, PD) によって定量的に評価されてきた. PD とは, 固有感覚に基づく自己の手の判断位置が錯覚後に人工手の方へ移動する現象である. しかし, 近年の研究は, 手の所有感と PD が異なる中枢プロセスを有する可能性を示している [3-5].

触覚の認知プロセスを調べる手法の一つとして, 両手の触覚時間順序判断 (temporal order judgment, TOJ)

がある. 被験者は短い刺激間隔 (stimulus onset latency, SOA) で左右の手に1回ずつ触覚刺激を受けた後, どちらの手が先 (あるいは後) に刺激されたかの時間順序を判断する. TOJ の判断確率は正規分布の累積分布関数により良好にフィッティング可能である. このとき, 標準偏差 (σ) は判断精度である時間分解能 (temporal resolution, TR) を反映する. 触覚 TOJ の TR は両手の姿勢 (crossed vs. uncrossed arms) [6] や距離に依存することが知られている [7]. この事実は, TR が手の多感覚表象に基づいて, 触覚刺激を外部空間に位置づけるプロセスを反映することを示唆している.

累積分布関数の平均は, 主観的同時点 (point of subjective simultaneity, PSS) を示す. すなわち, 被験者が左右の手の触覚刺激を間接的に同時と知覚する点である. 実際の同時点 (SOA = 0) からの PSS のずれは, 左右の手の触覚入力に対する相対的な重み付けの指標となる. Moseley et al. (2008) は RHI と触覚 TOJ (PSS) を組み合わせた実験により, 錯覚手に対する触覚刺激の処理が非錯覚手よりも遅くなること, さらに PSS と錯覚量に相関が認められたことを報告している [8]. しかしながら, Moseley et al. (2008) の研究は TR や PD を評価していなかった.

本研究の目的は, 手の所有感 (質問紙) と位置判断 (PD) と触覚 TOJ (PSS および TR) の関係性をより詳細に明らかにすることであった. 触覚 TOJ や RHI に関する脳研究は, 共通する脳領域の関与を報告している. RHI 中, 運動前野 (premotor cortex, PM) や後頭頂皮質 (posterior parietal cortex, PCC) などの多感覚領域の活性が報告されている [9]. 同様に, 触覚 TOJ における PM や PCC の関与も報告されてきた [10-11]. 実際, PCC の経頭蓋磁気刺激は, RHI の PD [12] や TOJ の TR [13] を低下させることが報告されている. これらの共通性は, 手の多感覚表象と密接に関連するであろう. したがって, 本研究は TR と PD が相互作用するのに対し, PSS は手の所有感と関連すると予想した.

2. 方法

被験者

健常被験者 30 名が参加した。

実験装置

座位の被験者の眼前に人工手 (右手) が置かれた (図 1)。被験者の両手は人工手を挟んで置かれ (各距離 20cm), それらの視覚入力はボードにより遮断された。振動刺激装置が被験者の両手示指 (内側) に付着された。時間順序の回答のため, 被験者の左右の爪先の下にフットスイッチが設置された。振動刺激音をマスクするため, 実験中はホワイトノイズがヘッドホーンを通して呈示された。

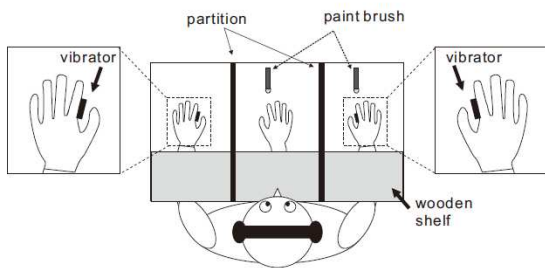


図 1 実験装置

手続き

被験者は 4 つの実験セッションを行った: 2 回の RHI (条件) セッションと 2 回の non-RHI (条件) セッション。各セッションは, 錯覚期とそれに続く TOJ 期から成っていた。錯覚期において, 実験者は被験者の右手と人工手の示指を同時 (RHI 条件) もしくは交互 (non-RHI 条件) にブラシによって 1 分間撫でた (周期 0.5Hz)。続いて, 実験者が被験者の手と人工手を 2 回撫でた後, 振動子が左右の手を 1 回ずつ刺激した (duration: 10ms)。両手の刺激間隔 (SOA) は, -240, -120, -60, -30, -15, 15, 30, 60, 120, 240ms (+: 右手先行, -: 左手先行) の 10 パターンからランダムに選択された。その後, 被験者はどちらの手が後に刺激されたかをフットスイッチを用いて強制選択した。ブラシによる視触覚刺激 (2 回) と振動子による両手の振動刺激 (TOJ) の組み合わせが 60 試行繰り返された (1 セッション)。各セッション前後に, 被験者は右上に設置された黒のボード上のルーラーにより, 固有感覚に基づく手の位置判断 (左右方向) を行った。各セッション終了後, 被験者はラバーハンド錯覚に関する質問紙調査に 7 件法 (-3: 全くそう思わない~+3: 強くそう思う) で回答した。質問紙は 7 項

目から成っていた。うち 3 項目が RHI を調べる標的項目 (Q1: ラバーハンドが触れられている位置で触覚を感じていたように思えた。Q2: 私が感じた触覚は, ラバーハンドを撫でているブラシによって引き起こされたかのように思えた。Q3: ラバーハンドが私の手であるかのように感じた。) であり, 4 項目 (Q4: 2 本の右手もしくは右腕を所有していたように感じた。Q5: 私が感じた触覚は実際の手とラバーハンドの間から生じたかのように思えた。Q6: 私の手がゴムのように変わってしまったように感じた。Q7: ラバーハンドが私の実際の手の方向へ移動したように見えた) はコントロール項目であった。TOJ は各条件 120 試行 (各 SOA=12 試行ずつ) 行われた。

時間順序判断の解析

各被験者において, TOJ の反応データは (120 試行: 10SOAs × 12 試行) 右手が先に刺激された判断確率を計算するために SOA によりソートされた。判断確率は正規分布の累積分布関数によりフィッティングされた。

$$p(t) = (p_{\max} - p_{\min}) \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\tau-d)^2}{2\sigma^2}\right) d\tau + p_{\min}$$

$t, d, \sigma, p_{\max}, p_{\min}$ は SOA, PSS, 時間分解能 (TR), 上下漸近線を表す。MATLAB (optimization toolbox) を用いて最小二乗フィッティングを行った。

3. 結果

1) 質問紙調査

RHI 条件の標的項目 (Q1-3) のスコアは, コントロール項目 (Q4-7) よりも有意に大きかった ($p < 0.001$; 図 2)。また, RHI 条件の標的項目のスコアは, non-RHI 条件のそれらよりも有意に高かった ($p < 0.01$)。

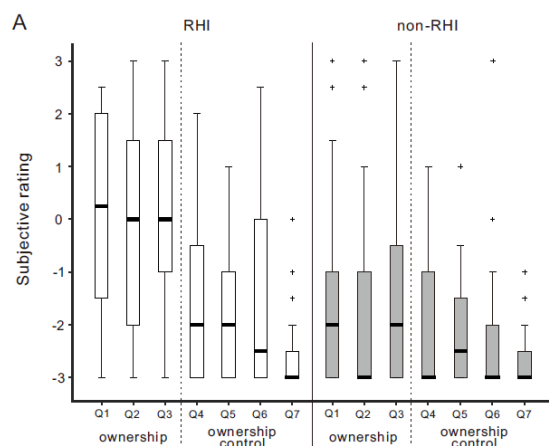


図 2 質問紙スコア

2) 固有感覚ドリフト

RHI 条件の固有感覚ドリフトは、non-RHI 条件よりも有意に大きかった ($p < 0.01$; 図3).

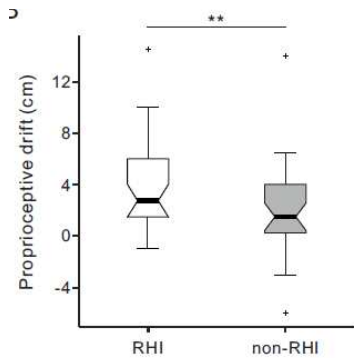


図3 固有感覚ドリフト (PD)

3) 時間順序判断

判断確率 (右手が先に刺激されたと判断する確率) は、累積分布関数により良好に近似された ($n=30$; 図4).

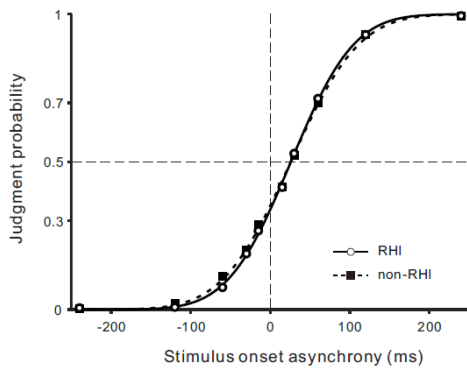


図4 TOJ 課題の判断確率

両条件の PSS (d) は有意にプラス方向へ偏向していた ($ps < 0.01$; one-sample t-test; 図5). すなわち、右手が左手よりも約 26ms 先行して刺激されたとき、被験者は2つの刺激を同時と知覚した. しかしながら、両条件の PSS に有意差は認めなかった ($p > 0.8$).

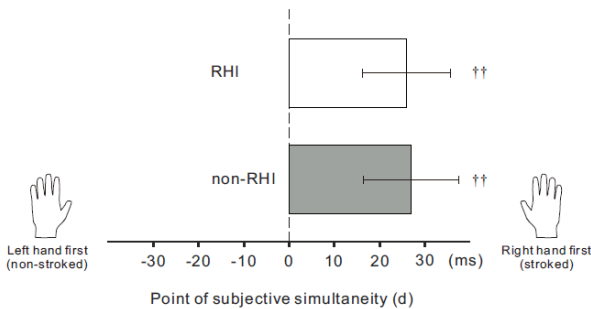


図5 主観的同時点 (PSS)

TR (σ) は RHI 条件よりも non-RHI 条件の方が大きい傾向を示した ($p=0.06$).

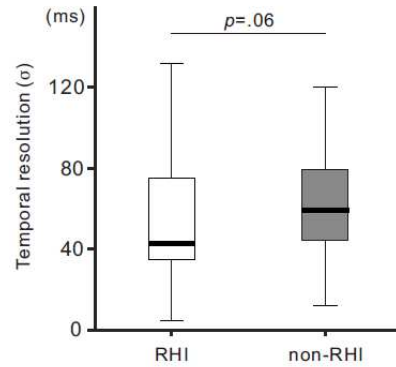


図6 時間分解能 (TR)

4) 相関分析

RHI (質問紙・PD) と触覚 TOJ (PSS・TR) の関連性を調べるため、各条件で相関分析を実施した. RHI 条件において、PSS はいずれの標的項目 (Q1-3) との間に有意な相関を示した ($r = 0.42-0.47$; $ps < 0.05$; 図7).

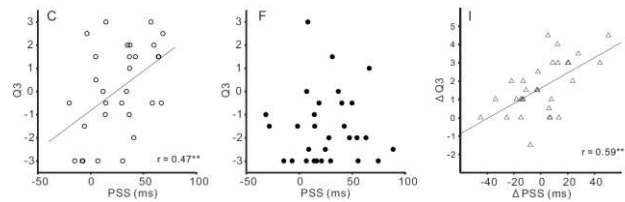


図7 PSS と質問項目 (Q3) との散布図 (左: RHI 条件; 中央: non-RHI 条件)

PSS とは異なり、TR は標的項目との間に有意な相関を認めなかった ($r = -0.04$ to -0.3 ; $ps > 0.1$). しかしながら、non-RHI 条件においてのみ、TR は PD との間に有意な負の相関を示した ($r = -0.40$; $p < 0.03$; 図8).

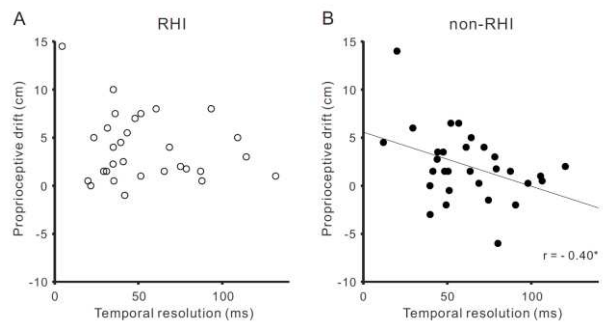


図8 時間分解能とドリフトの相関 (左: RHI 条件; 右: non-RHI 条件)

4. 考察

本研究は、両手の触覚時間順序判断 (TOJ) の時間分解能 (TR) が身体錯覚に影響を受けることを発見した。すなわち、1) ブラシによる非同期刺激は TR を低下させる傾向を示し (図 6)、2) non-RHI 条件においてのみ TR と固有感覚ドリフト (PD) に有意な相関を認めた (図 8)。これらの結果は、TR の条件間の差が視覚固有感覚統合に基づく手の表象プロセスにおける非同期刺激の干渉効果から生じた可能性を示唆する。

Makin et al. (2008) の提唱する RHI の生起モデルでは、最初に人工手からの視覚情報と実際の手からの固有感覚情報が手の位置を計算するために統合される (視覚固有感覚統合) [14]。次に、ブラシによる視覚同期入力にポジティブ・フィードバックとして働き、実際の手の見え位置を人工手へさらにシフトすると考える (固有感覚ドリフト)。他方、Rohde et al. (2011) はブラシによる視覚同期刺激がネガティブ・フィードバックとして働き、手の視覚固有感覚統合に干渉すると主張する (固有感覚ドリフトの抑制) [15]。

ヒトの脳研究は、後頭頂皮質 (posterior parietal cortex; PCC) や運動前野 (premotor cortex; PM) の多感覚領域が手の視覚固有感覚統合に寄与していることを示唆している [16]。これらの領域の活性化は、RHI 中にも観察される [9]。特に、PCC は手の位置の再較正 (recalibration) に関連するのに対し、PM は手の所有感と関連することが知られている。実際、PCC に対する経頭蓋磁気刺激 (TMS) は PD を低下させるが、所有感には影響を与えない [12]。RHI と同様に、触覚 TOJ の認知プロセスにおいても手の位置計算は重要な要素の一つである。触覚 TOJ に関する脳研究においても、PCC や PM の活性化が報告されている [10-11]。さらに、PCC に対する TMS は、触覚 TOJ の正確性 (TR) を低下させる [13]。上記のように、RHI と触覚 TOJ の共通した脳活動を考慮すると、非同期刺激がそれらの領域の活性化を抑制し、その結果として TR の低下 (σ の増加) および PD の抑制を生じさせたのかもしれない。

本研究は、non-RHI 条件において PD と TR の間に負の相関を明らかにした。この結果は、高い TR パフォーマンスを有する被験者が非同期刺激の干渉に対して耐性があることを示しているのかもしれない。手の多感覚表象を用いて触覚刺激を外部空間へ位置づける能力は、高い TR パフォーマンスの基盤であろう。それゆ

え、TR パフォーマンスの高い被験者は手の多感覚表象の優れた処理プロセスと非同期刺激を無視できた可能性がある。

先行研究 [8] と異なり、PSS の値は条件間に差を示さなかった (図 5)。実際、両条件の PSS はプラス方向に有意に偏向していた。この結果は、右手が左手よりも先行して刺激されたとき、被験者は左右の手が同時に刺激されたことと知覚したことを意味する。さらに、RHI 条件において PSS の大きさと質問紙スコア (Q1-Q3) に有意な相関が認められた。これらの結果に対する一つの解釈は、錯覚の影響を受けた手 (右手) の触覚処理スピードが影響を受けない手 (左手) よりも遅れた可能性である。この解釈は、RHI 中に一次体性感覚野の活動が減衰するという報告と一致する [17-18]。しかし、この解釈は条件間で PSS の差が認められなかった、という今回の結果と矛盾する。別の解釈は、実験条件に関わらず、PSS の偏向の個人差が触覚 TOJ における視覚 (人工手) のクロスモーダルな効果と関連していることである。すなわち、より大きくプラス方向へ偏向した被験者は人工手の視覚入力の影響を強く受けていた可能性である。例えば、人工手 (右手) の視覚刺激は、実際の右手に対するトップダウンの注意の配分を減少させ [19]、このことがクロスモーダルに右手からの触覚入力の重み付けを下げたのかもしれない。我々は、このような手に特異的なクロスモーダル効果の個人差が RHI に必要な多感覚統合の個人差を反映していると推測する。今後は、人工手の左右差や配置を変えることにより、これらの可能性を調べる必要があると考える。まとめると、本研究の結果は、触覚 TOJ の PSS と TR が手の自己帰属と自己位置にそれぞれ関連する可能性を示唆する。

文献

- [1] Gallagher, S. (2000). "Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science" Trends in Cognitive Sciences, Vol. 4, No. 1, pp. 14-21.
- [2] Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). "Rubber hands 'feel' touch that eyes see" Nature, 391(6669), pp. 756.
- [3] Abdulkarim, Z., & Ehrsson, H. H. (2016). "No causal link between changes in hand position sense and feeling of limb ownership in the rubber hand illusion" Attention Perception Psychophysics, 78(2), pp. 707-720.
- [4] S. Shibuya, S. Unenaka, Y. Ohki, (2021) "Predictability of delayed visual feedback under rubber hand illusion modulates localization but not ownership of the hand" Frontiers in Psychology, 12, 771284.
- [5] S. Shibuya, S. Unenaka, S. Shimada, Y. Ohki, (2021) "Distinct modulation of mu and beta rhythm desynchronization during observation of embodied fake hand rotation" 159 (2021) 107952

- [6] Yamamoto, S., & Kitazawa, S. (2001). "Reversal of subjective temporal order due to arm crossing" *Nature Neuroscience*, 4, pp. 759-765.
- [7] Shore, D. I., Gray, K., Spry, E., & Spence, C. (2005). "Spatial modulation of tactile temporal-order judgments" *Perception*, 34(10), pp. 1251-1262.
- [8] Moseley, G. L., Olthof, N., Venema, A., Don, S., Wijers, M., Gallace, A., & Spence, C. (2008). "Psychologically induced cooling of a specific body part caused by the illusory ownership of an artificial counterpart" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(35), pp. 13169-13173.
- [9] Ehrsson, H. H., Spence, C., & Passingham, R. E. (2004). "That's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb" *Science*, 305(5685), pp. 875-877.
- [10] Miyazaki, M., Kadota, H., Matsuzaki, K. S., Takeuchi, S., Sekiguchi, H., Aoyama, T., & Kochiyama, T. (2016). "Dissociating the neural correlates of tactile temporal order and simultaneity judgements" *Scientific Reports*, 6, 23323.
- [11] Takahashi, T., Kansaku, K., Wada, M., Shibuya, S., & Kitazawa, S. (2013). "Neural correlates of tactile temporal-order judgment in humans: an fMRI study" *Cerebral Cortex*, 23(8), pp. 1952-1964.
- [12] Kammers, M. P., Verhagen, L., Dijkerman, H. C., Hogendoorn, H., De Vignemont, F., & Schutter, D. J. (2009). "Is this hand for real? Attenuation of the rubber hand illusion by transcranial magnetic stimulation over the inferior parietal lobule" *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(7), pp. 1311-1320.
- [13] Ritterband-Rosenbaum, A., Hermosillo, R., Kroliczak, G., & Van Donkelaar, P. (2014). "Hand position-dependent modulation of errors in vibrotactile temporal order judgments: the effects of transcranial magnetic stimulation to the human posterior parietal cortex" *Experimental Brain Research*, 232(6), pp. 1689-1698.
- [14] Makin, T. R., Holmes, N. P., & Ehrsson, H. H. (2008). "On the other hand: dummy hands and peripersonal space" *Behavioural Brain Research*, 191, pp. 1-10.
- [15] Rohde, M., Di Luca, M., & Ernst, M. O. (2011). "The rubber hand illusion: Feeling of ownership and proprioceptive drift do not go hand in hand" *PLoS One*, 6(6), e21659.
- [16] Limanowski, J., & Blankenburg, F. (2016). "Integration of visual and proprioceptive limb position information in human posterior parietal, premotor, and extrastriate cortex" *The Journal of Neuroscience*, 36(9), 2582-2589.
- [17] Zeller, D., Litvak, V., Friston, K. J., & Classen, J. (2015). "Sensory processing and the rubber hand illusion-an evoked potentials study" *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(3), pp. 573-582.
- [18] Sakamoto, M., & Ifuku, H. (2021). "Attenuation of sensory processing in the primary somatosensory cortex during rubber hand illusion" *Scientific Reports*, 11, 7329.
- [19] Reed, C. L., Grubb, J. D., & Steele, C. (2006). "Hands up: attentional prioritization of space near the hand" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(1), pp. 166-177.