

身体的制約がラバーハンドイリュージョンに及ぼす効果

立教大学大学院現代心理学研究科 井手 正和

立教大学現代心理学部 長田 佳久

Effects of physical constraint on the rubber hand illusion

Masakazu Ide (Graduate School of Contemporary Psychology, Rikkyo University), and
Yoshihisa Osada (College of Contemporary Psychology, Rikkyo University)

The Rubber hand illusion (RHI) is a phenomenon in which subjects mislocate tactile sensations arising from their real hand (which is hidden from view) to a fake hand (which is in view), when the real and fake hands are stimulated in synchrony. Although it was believed that the angle of the rubber hand had an effect on the illusion, the effects of physical constraint (e.g., the range of motion of the elbow) have not been examined yet. In this study, a rubber left hand produced using 3D computer graphics was presented at eight different angles. Our results showed low strength of the RHI when the rubber hand was rotated at 180°, 225°, and 270°; these rotations are difficult to perform with one's actual left hand. The time taken to elicit the RHI was delayed when the rubber hand was rotated at 225°. The magnitude of proprioceptive drift correlated positively with the strength of the RHI. These results suggest that the RHI is intimately linked to the physical constraint of one's own body.

Key words: rubber hand illusion, physical constraint, spatial condition, body image

はじめに

ラバーハンドイリュージョン (Rubber Hand Illusion: 以後 RHI と略記) では目の前に置かれたラバーハンドと直接見ることができない実際の手に同時に触れることで、触られている感覚がラバーハンド側から生じているように感じる (Botvinick & Cohen, 1998)。RHI の生起を示す指標は錯覚に関する参加者の主観的な経験だけではない。行動的指標として、RHI 生起後に触れられていたのは反対側の手で触れられていた側の実際の手の位置を指差しすると、ラバーハンド側にずれた反応を示す (Proprioceptive Drift: Botvinick & Cohen, 1998; Tsakiris & Haggard, 2005; Kammers, Vignemont, Verhagen, & Dijkerman, 2009)。また、生理

学的指標として、ラバーハンドを針で指すなどといった刺激を与えると情動的活動を意味する皮膚抵抗反応 (skin conductance response) が生じる (Armel & Ramachandran, 2003)。

この現象には視覚と自己受容感覚 (proprioception: 運動, 姿勢, 抵抗などの感覚) の間で生じるモダリティ間相互作用が関係していると考えられ、視覚情報の諸条件を操作することで感覚の変化を検討してきた。ラバーハンドの空間的条件もその一つである。Ehrsson, Spence, & Passingham (2004) は実際の手に対してラバーハンドを時計回りに180°回転させたところ RHI の感覚が減少した。この効果はラバーハンドを時計回りに270°回転した場合でも同様であることが報告されている (Tsakiris & Haggard, 2005)。一方、Honma,

Koyama, & Osada (2009) では、ラバーハンドは手の甲を上にし、実際の手は手の平を上にした状態で、ラバーハンドに一点のライトを照射した。その結果、ラバーハンド上でライトが照射されているのと身体的に一致する実際の手の位置（手の甲）と空間的に一致する実際の手の位置（手の平）の両方に触られている感覚が生じた。以上のことは、単純にラバーハンドと実際の手の空間的な不一致の増大だけで RHI が生じるか否かが決定されるのではない可能性を示唆する。

視覚的に呈示された手の角度が参加者の反応に与える影響に関しては Sekiyama (1982) がある。この実験では左右の手の線画をそれぞれ時計回りに 0° から 315° まで 8 段階で回転し、それが左右どちらの手であるかを解答させた。その結果、左手に関する反応時間は 225° で最も遅延し、右手では 135° で最も遅延し、左右の手の反応時間を示すグラフは対照的な関数となった。これは左右どちらの手かという判断の際、身体的制約によって再現困難な角度の手では、自身との比較照合も困難であることを示唆する。

身体的制約の逸脱が観察者の反応に与える影響は、手だけでなく全身の様々な部位に関して報告されている。井上・北崎 (2010) は CG で作成した全身の画像の肘や膝の向きが解剖学的に可能か不可能かを操作し、正面を向いた画像と角度を変えた画像の異同を判断させた。その結果、肘や膝が不可能な向きの画像の判断には可能な向きの画像より時間を要した。Slobounov, Tutwiler, Slobounova, Rearick, & Ray (2000) は足首関節を中心に全身が前方あるいは後方に（不可能な程度）傾いていく CG 動画を呈示し EEG を測定したところ、前頭中心部と頭頂葉で $35-45\text{Hz}$ のガンマ帯活動が見られた。また、この活動は同じ動きをする CG の振り子を観察した時には生じず、不可能な姿勢の身体を観察した時に特有の反応である。同様のガンマ帯活動は、生後平均 8 ヶ月の幼児が不可能な角度に首が曲がる成人の CG 動画を観察させた場合でも見られ (Reid, Belsky, & Johnson, 2005), 生態学的に可能な動作に関する

神経学的検出器が存在するとしている。

このように視覚呈示された身体の画像が身体的制約を逸脱した時、そうでない時とは異なる反応や神経活動が生じるが、この制約が RHI に及ぼす効果は不明である。RHI に関する先行研究ではラバーハンドの角度が実際の手と異なっていた時、RHI が生起するか否かについて相反する報告がある。RHI が生起しないとした研究 (Ehrsson et al., 2004, Tsakiris & Haggard, 2005) では、左手のラバーハンドが時計回りに 180° および 270° 回転しており、これは実際の左手で再現することが困難な角度である。一方、RHI が生起するとした研究 (Honma et al., 2009) では、ラバーハンド（右手のラバーハンドを鏡に投影して左手と重なるようにしている）は手の甲、実際の左手は手の平をそれぞれ上にしており、このラバーハンドの見えを実際の左手で再現することは比較的容易である。したがって、ラバーハンドの角度が RHI に及ぼす効果は、それが実際に自己の身体で再現することの容易さによって決定されている可能性がある。もし、こうした身体的制約が RHI に関係しているのであれば、RHI の生起過程にはラバーハンドと自己の身体像 (body image: Schilder, 1935) との比較照合の過程が含まれていると考えられる。本研究では時計回りに $0^{\circ}-315^{\circ}$ の間の 8 つの角度で左手のラバーハンドを回転し、各角度での RHI の強さ、RHI 生起までの時間、実際の手の感じられる位置のずれの大きさについて検討する。左手は肘関節の身体的制約により、時計回りに $180^{\circ}-270^{\circ}$ に回転することが特に困難である。もし、身体的制約が RHI に影響するのであれば、この範囲内で回転したラバーハンドでは RHI が減少することが予測される。

方法

実験参加者 参加同意書に署名した成人 23 名（男性 6 名・女性 17 名）であった。利き手は右利きが 20 名、左利きが 3 名であった。実験は立教大学現代心理学部研究倫理委員会の承認を得て行った。

実験装置 本実験で使用した装置は Figure 1 の通りである。装置の上部に取り付けた 3D モニタ (SA2311W, PLANAR) の映像をマジックミラーに投影し、これを 3D メガネ (3D Vision, NVI-DIA) で観察した。アームの動きをバーチャル空間でリアルタイムに再現する 3 次元力覚装置 (PHANTOM Omni, Sensable Technology) を用い、アーム先端で実際の左手の中指を刺激し、完全に同期して CG のペンでラバーハンドを刺激した。実験中、自分の手はマジックミラーによって遮蔽されていたため直接見る事ができず、CG のペンによる刺激を受けるラバーハンドだけを観察した。実験場所は暗室であった。

刺激 刺激は CG グラフィック作成用ソフトウェア (Light Wave, D-STROM) を用いて作成し、これをバーチャル空間構築用アプリケーション (Omega Space, ソリッドレイ研究所) で 3D 呈示した。

Figure 2 で示すように CG のラバーハンドを 8 段階の角度で呈示した。角度は時計回りに 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° であった。ラバーハンドの呈示位置は実際の手のおよそ 15cm 上にあると見えるように奥行きと大きさを設定した。これを CG で作成した一般的な形状のペンで刺激した。

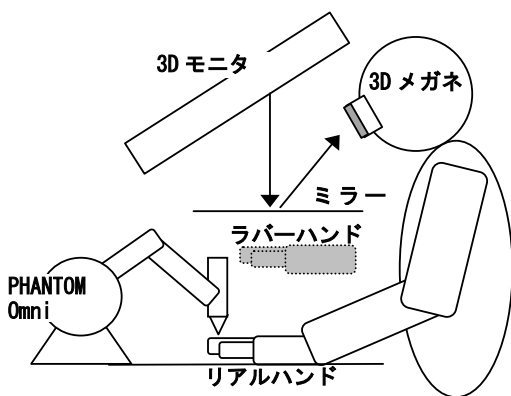


Figure 1. 実験装置

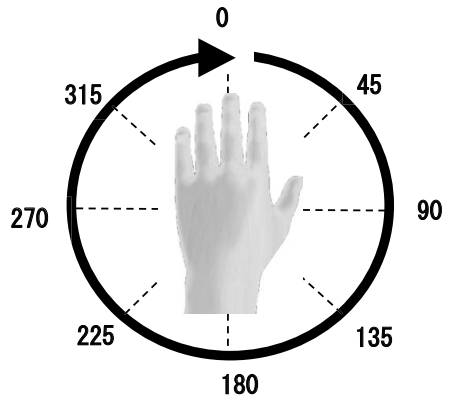


Figure 2. 実験条件

手続き マジックミラーの下に取り付けたライトを点けてミラーを半透明にした状態で、台の上の参加者の左手とラバーハンドの位置を調整した。右手は台の上に設置したテンキー上に置いた。ライトを消してミラーを不透明にし、黒い背景の画面を呈示した (Figure 3, 画面 1)。参加者が右手でテンキーの“1”を押すとラバーハンドが現れた (Figure 3, 画面 2)。この状態で実験者は PHANTOM で実際の手とラバーハンドを刺激し、参加者はペンによる刺激を受けるラバーハンドを観察した。参加者は“触られている感覚が画面上の手に触られることで起こっているように感じた”時にテンキーの“2”を押して反応時間を取得し、再び黒い背景画面に戻った (Figure 3, 画面 3)。反応を求めた感覚は Botvinick & Cohen (1998) で RHI の程度を測定するために用いた項目の中で最も顕著な反応が見られた項目であり、本研究に適した言葉に修正した。また、この項目を初めて RHI 生起までの経過時間取得に用いた Lloyd (2006) の手続きに倣い、キー押しによる反応が無い場合も 3 分が経過した場合にも黒い背景画面に戻った (ただし Lloyd (2006) では 1 試行は 1 分で終了している)。次に自分の左手があると感じる高さがどの程度ラバーハンド側にずれたかを測定した (Proprioceptive Drift)。開始地点として

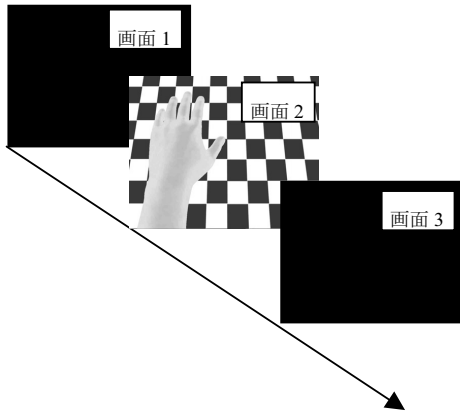


Figure 3. 実験手続きの流れ

“触られている感覚が画面上の手に触られることで起こっているように感じた”時にキーを押し反応時間を取得した

参加者の右手を左手より30cm 高いか低い位置に試行ごとにランダムに移動させ、目を瞑りながら左手があると感じる高さまで移動させた。移動軌跡はモーションキャプチャ (ProReflex MCU120, Qualisys) で記録し、あらかじめ実験前に RHI が生じていない時に測定した高さとの差分を Proprioceptive Drift の指標として用いた。最後に上記のテンキー押しで反応を求めた項目に関して、その感覚がどの程度の強さであったかを Visual Analogue Scale (VAS) で測定した。10cm のラインの左端を“全く感じなかった”右端を“非常に強く感じた”とし、最も当てはまると感じる位置に縦の線を引くことで答えた。この位置をミリメートル単位で測定し、RHI の強さの指標として用いた。以上を1 試行とし、ランダムに8 段階の角度をそれぞれ1 回ずつ実施した。

結果

RHI の強さ キー押しによる RHI 生起の反応を全ての角度で行わず、実験後に“何も感じなかった”と報告した2名の参加者を RHI の強さ、RHI 生起までの時間、Proprioceptive Drift、各指標間の相関に関する全ての分析から除外した。各条件の RHI の強さを比較するため、残り21名の VAS

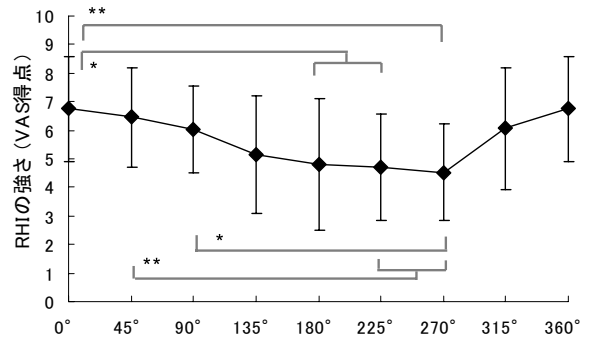


Figure 4. 各角度条件における RHI の強さ (角度は時計回りの値)

** $p < .01$, * $p < .05$, エラーバーは標準偏差

の得点について繰り返しのある一要因分散分析を行った。Figure 4 に各角度の VAS 得点を示す。なお、ラバーハンドの回転による RHI の強さの連続的な変化を分かりやすくするため、0°における得点と同じ値を Figure 4 の右端に360°として呈示する。以下で検討する RHI 生起までの時間、Proprioceptive Drift の図においても同様に360°を加える。Figure 4 に示すようにラバーハンドの角度の主効果が見られた ($F(7,140) = 6.073$, $p < .001$)。多重比較 (Bonferroni) を行ったところ、0°は270°と1%水準で有意差が見られ、180°および225°と5%水準で有意差が見られた。45°は225°および270°と1%水準で有意差が見られた。90°は270°と5%水準で有意差が見られた。したがって、左手のラバーハンドの角度が時計回りに回転した時、180°から270°の間で RHI が弱まり、特に270°で最も RHI は低下する。また、270°は0°から反時計回りに90°回転させた状態であるため、本研究における90°条件と実質的な回転角度は同じであるにも関わらず、両者には5%水準で有意差が見られている。

RHI 生起までの時間 2名の参加者が装置の不備で記録に失敗し、9名の参加者が1つ以上の条件で1試行の上限である3分が経過してもキー押

しなかったため、反応時間の分析から除外した。また、2人の参加者がそれぞれ1つの条件で全ての条件の平均値より2SDを超える反応時間を示し、全体的傾向に大きな影響を与えていたため、そのデータは該当条件の平均反応時間で置き換えた。11名のRHI生起によるキー押しまでの反応時間について繰り返しのある一要因分散分析を行った。Figure 5に示すようにラバーハンドの角度の主効果が見られた ($F(7, 70) = 3.821, p < .001$)。多重比較 (Bonferroni) を行ったところ、 0° と 225° 、 45° と 225° の間に5%水準で有意差が見られた。

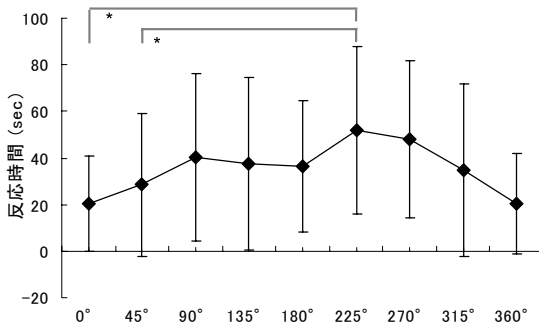


Figure 5. 各角度条件におけるRHI生起までの時間 (角度は時計回りの値)

* $p < .05$, エラーバーは標準偏差

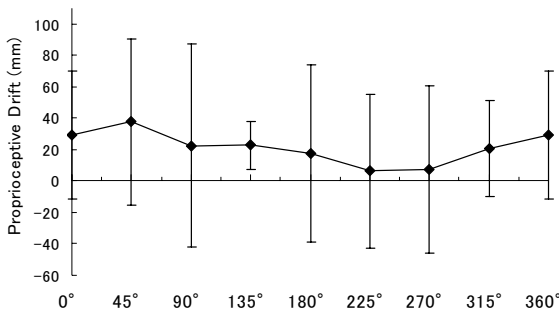


Figure 6. 各角度条件における左手位置のラバーハンドへの感覚的なずれの量 (角度は時計回りの値)

** $p < .01$, * $p < .05$, エラーバーは標準偏差

Proprioceptive Drift RHIの強さに関するVAS得点が 180° 、 225° 、 270° のいずれかの角度で最も低く、キー押し反応を全ての角度で3分以内に行い、最も典型的な反応が生じていると考えられる9名の参加者を抽出した。自分の左手があると感じる高さを右手で指差しする動作に関し、移動量が一定の範囲 (1秒につき10mm以内) に収まった5秒間のデータを平均し、実験前に測定した基準値と各試行後に測定した値の差 (Proprioceptive Drift) を分析に用いた。Figure 6に示すようにラバーハンドの角度の主効果、多重比較 (Bonferroni) ともに有意ではなかった ($F(7, 56) = 1.286, n.s.$)。

各指標間の相関 21名について8段階の角度条件におけるRHIの強さに関するVAS得点とRHIの生起までの反応時間の平均値を表す散布図をFigure 7に示す。相関を分析した結果、5%水準で有意な負の相関が見られた ($\gamma = -.832$)。つまり、RHIが強く生じるラバーハンドの角度ではRHI生起の反応が早まり、RHIが弱く生じるラバーハンドの角度ではRHI生起の反応が遅くなる。RHIの強さの平均とProprioceptive Driftの平均の散布図をFigure 8に示す。分析の結果、1%水準で有意な正の相関が見られた ($\gamma = .849$)。RHIが強く生じるラバーハンドの角度では、左手があ

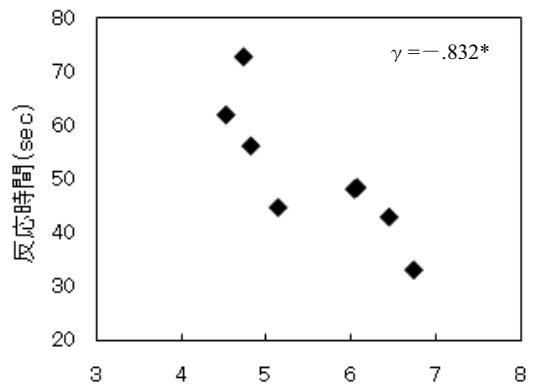


Figure 7. 散布図 (RHIの強さ×反応時間)

* $p < .05$

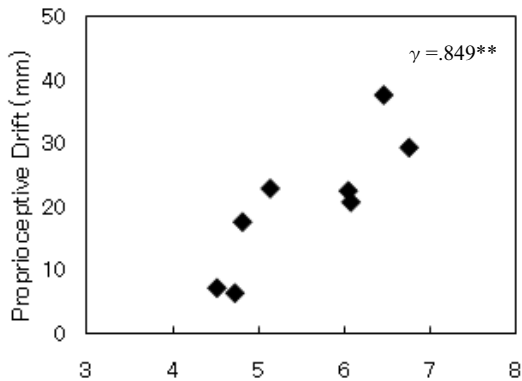


Figure 8. 散布図 (RHI の強さ×Proprioceptive Drift)

** $p < .01$

ると感じられる位置がラバーハンド側に大きくずれ、RHI が生じにくいラバーハンドの角度でずれはそれほど大きくないと考えられる。

考 察

本研究ではラバーハンドの角度が RHI に及ぼす効果が、単純に実際の手とラバーハンドの角度の不一致の増大だけでなく、肘関節の可動域による身体的制約によって決定される可能性を検討した。この仮定に従うと、左手のラバーハンドを用いた今回の実験では、身体的制約上左手では再現困難な時計回り 180° - 270° の範囲内で RHI が弱くなると予想された。

RHI の強さに関する VAS 得点ではラバーハンドの角度が 0° と 180° , 225° , 270° の間, 45° と 225° , 270° の間, そして 90° と 270° の間で差が見られた。つまり、左手のラバーハンドの角度が時計回りに 180° - 270° の間では RHI が弱いと考えられる。これは左手では再現困難な角度と対応すると考えられ、身体的制約を反映した結果であると言える。また、視覚呈示された左手の線画に対しては 225° をピークとした反応時間の遅延が生じることを報告した Sekiyama (1982) のデータともほぼ一致する。特に注目すべき結果は、実際の手とラバーハンドの不一致の実質的な大きさが同じである 90° と 270° の間で差が見られたという

ことである。これは従来 RHI に影響すると考えられてきたラバーハンドの空間的条件の効果が、単に実際の手との角度の不一致の増大によって生じるのではなく、関節の可動域を前提とした身体的制約によって生じるのであるということを示唆する。

RHI 生起までにかかる時間は 0° と 45° で最も早く、 225° で最も遅くなった。この結果も RHI の強さの結果とほぼ同様の傾向を示し、左手で再現困難な角度では RHI が生起するまでに長い時間を必要とすることを示す。RHI の強さの結果と負の相関が示されたことから、RHI が強いほどその感覚が生じるまでの時間が早く、RHI が弱いほどその時間は遅いという関係性がある。これは実際の手とラバーハンドの距離の効果を RHI の強さと RHI 生起までの時間によって検討した Lloyd (2006) の先行研究の結果と一致する。

左手の感じられる高さのずれに関する Proprioceptive Drift では角度間に差が見られなかった。しかし、ずれの量は RHI の強さと正の相関を示しており、RHI が強いほど左手の高さはラバーハンドの方へ大きくずれたように感じられる。また、グラフからは 0° , 45° で最もラバーハンドの方に左手が大きくずれたように感じられ、 225° , 275° で最もずれの量が小さい傾向が見て取れた。またしても RHI における身体的制約の効果が作用し、再現困難な角度では左手の感じられる高さにずれがあまり起こらなかったと考えられる。

Ehrsson et al. (2004) が実際の左手に対しラバーハンドの左手を時計回りに 180° 回転し、Tsakiris & Haggard (2005) が 270° 回転した場合、実際の手とラバーハンドの角度が同じであった場合と比べて RHI が弱いことを報告した。本研究の結果は、左手のラバーハンドを時計回りに 180° や 270° 回転した場合での RHI の減少は、身体的制約の逸脱によるということを示唆する。一方、Honma et al. (2009) は実際の左手は手の平を上にし左手のラバーハンドは手の甲を上にした状態で、ラバーハンド上に一点のライトを照射することで RHI が生じることを報告した。本研究の結果から、

Honma et al. (2009) のようにラバーハンドを前額面上の垂直線を軸とした回転で不一致にした場合、身体的制約の逸脱が無い場合 RHI も生じると予想される。

したがって、RHI においてラバーハンドの空間的条件が果たす役割が、身体的制約の影響によって統一的に解釈できる可能性を本研究の結果は示唆する。RHI が身体的制約の影響を受けるとすると、その制約を逸脱した画像に対する判断が困難であることを報告した多くの実験結果 (井上・北崎, 2010; Reid et al., 2005; Slobounov et al., 2000) の背景にある過程と同様の過程が RHI でも生じていると考えられる。すなわち、ラバーハンドに触知覚を定位する前段階で、ラバーハンドと自己の身体像との比較照合が為され、それが自己の身体であり得ると暗黙に判断された場合にだけ RHI が生起する。

本研究では左手だけに関する報告に留まったが、現在右手でも同様の実験を行っている。左手の場合ラバーハンドを時計回りに180° - 270° 回転させた時 RHI が生じづらくなったが、対照的に右手の場合は時計回りに90° - 180° 回転させた時、その姿勢が身体的制約上再現困難であるため RHI が生じづらくなることが予測される。この結果が示された時、RHI に対する身体的制約の効果が一層強く証明される。

また、身体像はいわゆるイメージとして身体を内的に意識化するだけでなく、自発的運動によって生じる先行する姿勢と現在の姿勢との差に関する運動感覚を貯蔵する (河野, 2006)。したがって、RHI が生じる際に身体像との比較が為されると言っても、それがイメージとしての身体像なのか、運動感覚としての身体像なのか明らかでない。イメージとしての身体像との比較が生じていた場合、その姿勢の自分の手を日常的に見る頻度が高いか低いかが RHI に重要であると考えられる。一方、運動感覚としての身体像との比較が生じていた場合、現在とっている姿勢からラバーハンドの角度を運動感覚に準拠して予測し、その姿勢を再現することができるか否かが重要で

あると考えられる。この問題を検討することで、本研究が明らかにした RHI に対する身体的制約の効果を詳細に解明することができるため、更なる検討が必要であると考えられる。

引用文献

- Armell, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: Evidence from skin conductance response. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **270**, 1499-1506.
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, **391**, 756.
- 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**, 875-877.
- 井上康之・北崎充晃 (2010). 生体力学的制約が身体ポーズ認識における視点依存性と倒立効果に及ぼす効果, *心理学研究*, **81**, 105-113.
- Honma, M., Koyama, S., & Osada, Y. (2009). Double tactile sensations evoked by a single visual stimulus on a rubber hand. *Neuroscience Research*, **65**, 307-311.
- Kammers, M. P. M., de Vignemont, F., Verhagen, L., & Dijkerman, H. C. (2009). The rubber hand illusion in action. *Neuropsychologia*, **47**, 204-211.
- 河野哲也 (2006). 「心」はからだの外にある, 日本放送出版協会
- Reid, V. M., Belsky, J., & Johnson, M. H. (2005). Infant perception of human action: Toward a developmental cognitive neuroscience of individual differences. *Cognition, Brain, Behavior*, **9**, 35-52.
- Schilder, P. (1935). *The image and appearance of the human body*. Connecticut; International Universities Press.
- Sekiyama, K. (1982). Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and

right hands. *Perception & Psychophysics*, **32**, 89-95.

Slobounov, S., Tutwiler, R., Slobounova, E., Rearick, M., Ray, W. (2000). Human oscillatory activity within gamma-band (30-50 Hz) induced by visual recognition of non-stable postures. *Cognitive Brain Research*, **9**, 177-192.

Tsakiris, M., & Haggard, P. (2005). The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **31**, 80-91.

——— 2011. 10. 7 受稿, 2012. 1. 23 受理 ——