

Kinesthetic mirror illusion における 「手のイメージの想起性」の影響

石原 由貴・小鷹 研理

In the mirror visual-feedback paradigm, the mirrored hand image directly affects the sense of motion of the hand hidden behind the mirror (mirror kinesthetic illusion). Our previous study found that the kinesthetic illusion was observed even when both hands were not anatomically congruent, suggesting that showing the hand image in the mirror is not a minimal requirement for inducing the kinesthetic illusion. However, what critical factor yields this illusion in such an incongruent situation remains unclear. This paper introduces a new concept of “hand imaginability” relating to what extent we can imagine an “invisible hand” in the mirror when the mirror does not in fact reflect the hand. This experiment asked participants to report the hidden hand’s subjective speed using the original mirror visual-feedback setup and examined the effect of the handle’s visuo-tactile congruency. The result showed that the kinesthetic illusion became active mainly when the same shaped handle was used on both sides, suggesting a significant contribution by the invisible hand’s imaginability.

Keywords: mirror visual feedback (ミラー錯覚), invisible hand illusion (透明な手の錯覚), multisensory integration (感覚間統合), kinesthesia (運動感覚), body perception (身体知覚)

1. 背景

Mirror Visual Feedback (MVF) は幻肢痛や知覚運動障害、半側不全麻痺などのリハビリテーションに利用される錯覚である (Ramachandran, Rogers-Ramachandran & Cobb, 1995). この錯覚では両腕の間に鏡を立てることにより、鏡面裏側に配置した手 (Hidden hand) が本来存在するはずの位置に鏡面の手前側に配置した手 (Visible hand) の像 (鏡像) を提示する。実験参加者はこの鏡像を観察することで、あたかも鏡像が Hidden hand として存在しているかのような感覚を得ることができる。この状態は、鏡像に対し Hidden hand のイメージを重ねる状態にあることから、プロジェクション科学における「異投射 (実在するソースとは異なるターゲットにイメージを投射する状態)」が起きている

ると考えられる (鈴木, 2016). この投射を維持したまま、Visible hand を動かすと、本当は動いていないはずの Hidden hand が、動いているかのように感じることができる。この MVF によって引き起こされる位置・筋運動感覚の錯覚は Kinesthetic Mirror Illusion (KMI) と呼ばれ、健康な実験参加者に対して行った場合にも起こることが知られている (Guerraz, Provost, Narison, Brugno, Virolle & Bresciani, 2012). また KMI の錯覚強度は、鏡像に対する身体所有感 (Body Ownership) が大きく関わる事が分かっている。例えば Holms らは、木や姿勢の異なる手を鏡像として用いた MVF を体験した後、指を指定の位置へと動かすリーチングタスクを行なった際に、その精度が実際の手を鏡像として用いた場合よりも下がることを報告している (Holmes, Snijders & Spence, 2006). また、Medina らが行った、MVF 下での Hidden hand の位置を報告する課題においては、両手の動きが同期する場合、同期しない場合よりも Hidden hand の

Kinesthetic Mirror Illusion for the Invisible Hand, by Yuki Ishihara, and Kenri Kodaka (Nagoya City University).

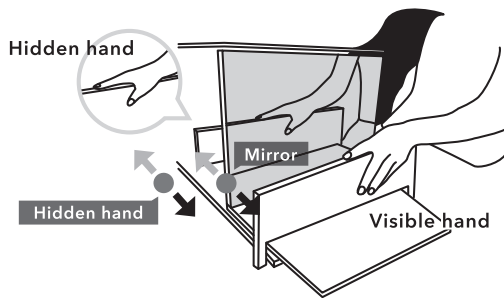


図 1 MRMB 装置

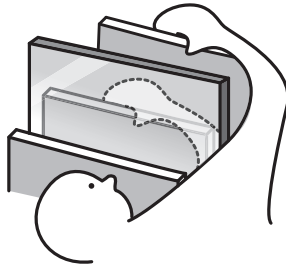
位置感覚が鏡像の位置に引き寄せられることを報告している (Medina, Khurana & Coslett, 2015). これらの報告は、鏡像に対し身体所有感を誘起する要因である。Hidden hand と鏡像の形態的な類似と姿勢の合致が、KMI の錯覚強度に直結することを示している。では、KMI が〈視覚 (鏡像)〉と〈Hidden hand の筋固有感覚〉との二者間の単純な感覚間統合の結果であるかという点、そうではない。Guerraz らのグループは、MVF 中の Visible hand の筋固有感覚を振動によってマスクした際、マスクしない場合と比べ、Hidden hand の移動感覚が抑えられることを報告し、〈Visible hand の筋固有感覚〉が KMI の誘起に影響を及ぼすことを示した (Chancel, Brun, Kavounoudias & Guerraz, 2016). また同グループは、MVF を行っている途中で視覚を遮る実験において、Visible hand が動いている場合に、実際には動いていない Hidden hand の KMI が持続したことも報告している (Chancel, Kavounoudias & Guerraz, 2017). これらの研究は、両肢の筋固有感覚のカップリング現象 (Interlimb Coupling) が KMI の誘起に重要な役割を果たすことを示している。よって、KMI の要因を考える上では〈視覚 (鏡像)〉、〈Hidden hand の筋固有感覚〉、〈Visible hand の筋固有感覚〉の 3 者間の感覚間統合を考える必要がある。これまでの MVF の装置は、鏡像の動きを作り出すために Visible hand を動かさねばならないという重要な制約が存在していた。そのため、〈Visible hand の筋固有感覚〉の影響を完全に取り去った状態で KMI を観察することができず、Visible hand を全く動かさない状態で計測を行う必要がある〈視覚 (鏡像)〉単独の効果については解明されないままであった。

そこで、著者らは鏡と Hidden hand を置く台をそ

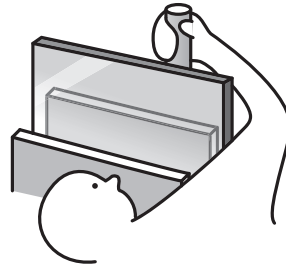
れぞれ独立に機械的に動かすことのできる Movable Ramachandran's Mirror Box (MRMB: 図 1) を作成した。この装置は鏡を左右に動かすことのできる機構を持つため、Visible hand を動かさずとも鏡像を左右任意の方向へと動かすことが可能である。〈視覚 (鏡像)〉が KMI に単独で与える影響について調査するため、MRMB の機構を用いて、鏡と Hidden hand を様々な速度で同時に動かした際に、Hidden hand がどちらの方向に動いたか実験参加者に回答してもらう実験を行ったところ、Hidden hand の移動速度が一定の割合を超えない場合、鏡と逆方向に動く Hidden hand の動きが鏡像と同じ方向に動いたように錯覚すること、すなわち〈視覚 (鏡像)〉が単独で KMI を誘発することができることをはじめて示した (Ishihara & Kodaka, 2018). 一方で、この実験では左右の手の姿勢が異なる場合にも一定のレベルの KMI が誘発されるという結果も得られており、具体的にどのような視覚情報 (身体、背景、持ち手などの特徴的物体) が KMI に寄与したかについては、十分に明らかとされなかった。姿勢が異なる場合であっても KMI の効果が得られた理由として、Visible hand と Hidden hand の持ち手の形状が同じであったために、Hidden hand の存在を喚起する触覚的な手がかりが視覚的に与えられ、手の鏡像が一致しない場合でも、鏡面の中に、Hidden hand のイメージを暗黙的に立ち上げることのできる状態、すなわち、「手のイメージの想起性」が高い状態が作り出されていたことが挙げられる。そこで、本稿ではこの「手のイメージの想起性」が KMI に与える影響を調査することを目的として、手や持ち手の提示条件の異なる環境下において、鏡と Hidden hand を同時に様々な速度で移動させた際に感じる速度を報告してもらう実験を行なう。また、この実験では Visible hand を鏡面手前に配置しないことで、Hidden hand が存在するはずの位置に、手の像を明示しない条件を用意する。この条件は、視覚的には物質的なものが存在しない空間に対し、Hidden hand のイメージを持たせる「虚投射 (鈴木, 2016)」の条件であると言えることができる。この状態を作り出すことで、Visible hand からの手の触覚的な要因を考慮する必要無く、Hidden hand からの持ち手の触覚的な手がかりと、鏡面に映る Visible hand の持ち手の視覚的なイメージの合致性をシンプルに比較することができる (図 2)。

触覚的な手がかりと視覚的な手がかりが一致

触覚的な手がかりと視覚的な手がかりが不一致



手のイメージの想起性が高い



手のイメージの想起性が低い

図2 手のイメージの想起性

さらにこの比較は、プロジェクションによって引き起こされる身体へのフィードバックについて検討することにも繋がる。Rubber hand illusion (Botvinick & Cohen, 1998) にみられるような「異投射」の事例では、投射先の物体や事象の状態によって変調した位置感覚が、投射のソースとなる自身の身体情報として受容されることが知られている (Armel & Ramachandran, 2003)。今回の実験では、投射先の対象が明示されないために同様の現象を確認できなかった「虚投射」において、投射先の周囲の環境を変化させることによる間接的なターゲットの変位の提示を行い、身体情報の変調を引き起こすことが可能かどうかを確認する。

2. 方法

2.1 実験参加者

本実験では計12名(男性6名、女性6名)の大学生の実験参加者に協力してもらった。その内、左利きは3名(内2名が女性)で、他は全員右利きであった。

2.2 装置

使用したMRMBには左右に動くことのできる30×45cmの鏡と、その左右に2つの持ち手A(厚み1.2cmの板)が取り付けられている(図2)。持ち手Aは鏡から左右15cmずつ離れた位置を基準に配置され、手前から30cmの位置に直径8mmの円状の赤いシリコンが貼られている。Hidden handの持ち手Aの外側には、持ち手B(直径2.4cmの円柱)が取り付けられ、持ち手Aの移動と共に動く。鏡とその裏側にあるHidden handの持ち手は

可動式であり、それぞれが独立して左右に動かすことができる。鏡は装置の構造上、底面と一緒に動くようになっているが、底面及び持ち手の表面を白い紙で覆うことにより、鏡像以外のものが与える視覚的影響を抑えている。さらに、鏡への映り込みの影響を抑えるため、装置は鏡面側に白い壁面が映るようにして置かれた。また、Visible handの持ち手は固定され、動かない構造となっている。可動式である鏡とHidden handの台には、リニアアクチュエータ(Firgelli: L16-P Miniature Linear Actuator 140 mm 150:1)が取り付けられており、ArduinoとProcessingで制御することによって動作する。この時に起こるモーター音の影響を抑えるため、実験内の試行中、実験参加者は装着したヘッドホンからホワイトノイズを聞かされた。

2.3 要因計画

2.3.1 移動刺激要因

鏡とHidden handの移動刺激を同時に1度提示する操作を1試行とした。用いる移動刺激として、〈鏡の移動要因〉3条件、〈手の移動要因〉3条件の組み合わせ計9種を用意した。鏡とHidden handの持ち手は参加者の身体に対し水平方向に移動する。身体空間から鏡が遠く右の動きを正の動き、近く左の動きを負の動きとすると、鏡は5 (Separation), 0 (Pause), -5 (Attraction) mm/sの3種いずれかの速度で移動する。同様に、Hidden handの持ち手については3 (Separation), 0 (Pause), -3 (Attraction) mm/sの3種の内、いずれかの速度で移動を行う。1試行の提示時間は3sであるが、実際に移動する時間はノイズ音が鳴ってから0.5s後

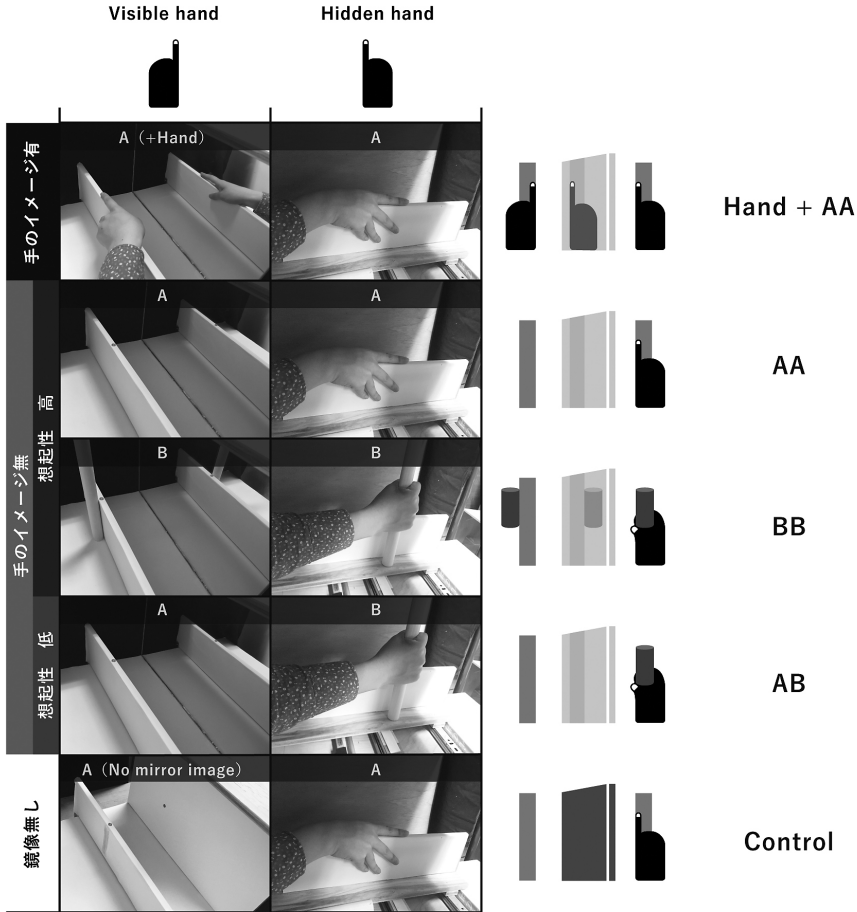


図3 環境要因

の2.5s間であった。これら鏡と Hidden hand の持ち手の移動は同時に提示され、移動時間が終わると流れていたノイズ音と共に停止した。

2.3.2 環境要因

今回の実験では鏡の左右に手を配置する、従来のMVFと同様の環境で行う条件と、Visible hand が鏡面手前の持ち手を保持せず、鏡面上に手のイメージを提示しない条件を用意する。また後者の条件下においては、鏡面に提示される持ち手と Hidden hand が保持する持ち手が同じ場合／異なる場合を比較することで、KMIの誘起にどのような要因が重要となるのかについて詳細に検討する。実験にて用いた2種類の持ち手ABは全くタイプの異なる持ち手である。持ち手Aは板状であり、実験参加者は赤いシリコンの突起に人差し指の先を合わせ、

他の指で板を握り込んで使用する。持ち手Bは円柱状で、持ち手B以外に触れないようにしながら、丸棒を握りこむようにして使用する。本実験では左右の持ち手の組み合わせと鏡像の提示条件の異なる5条件から為る〈環境要因〉(図3)を作成し、KMIに対する「手のイメージの想起性」の影響を調査する：

1. [Hand + AA] 条件

この条件では Visible hand が持ち手 A を握り、鏡の裏側の Hidden hand も持ち手 A を握る。鏡面には持ち手 A を握った状態での Visible hand が映し出され、参加者は Hidden hand と同じ状態の鏡像が左右に動く様子を眺める。

2. [AA] 条件

この条件では Visible hand は膝の上に置かれ、鏡の前には持ち手 A のみが置かれている。鏡の裏

側の Hidden hand は持ち手 A を握っているが、鏡面には持ち手 A のみが映し出され、参加者は Hidden hand で握られているのと同じ持ち手が左右に動く様子を眺める。

3. [BB] 条件

この条件では Visible hand は膝の上に置かれ、鏡の前には持ち手 A と持ち手 B が置かれている。鏡の裏側の Hidden hand は持ち手 B を握っているが、鏡面には持ち手 A・B のみが映し出され、参加者は Hidden hand で握られているのと同じ持ち手が左右に動く様子を眺める。

4. [AB] 条件

この条件では Visible hand は膝の上に置かれ、鏡の前には持ち手 A のみが置かれている。鏡の裏側の Hidden hand は持ち手 B を握っているが、鏡面には持ち手 A のみが映し出され、参加者は Hidden hand で握られているものと異なる持ち手が左右に動く様子を眺める。

5. [Control] 条件

この条件では Visible hand は膝の上に置かれ、鏡の前には持ち手 A が置かれている。ただし、鏡は不透明な白い紙で覆われる。鏡の裏側の Hidden hand は持ち手 A を握っているが、鏡面には何も映し出されないため、参加者は白い板が左右に動く様子を眺める。

1-4 の鏡を用いる条件では鏡面に映る持ち手 A の赤い突起もしくは人差し指の先端を注視点としたが、[Control] 条件に関しては白い紙の上に持ち手 A と同じ高さ・奥行きに合わせた座標に持ち手 A に用いているのと同じ赤い突起を取り付け、注視点とした。また [Control] 条件は Hidden hand の動きが如実に分かる条件であることが予想されたため、他の条件への影響を抑えるため、他の条件を提示し終えた後に用いた。

2.4 アンケート

本実験では〈環境要因〉によって生じた身体所有感に対する影響についても合わせて観察するため、下記のアンケート 2 項目を作成した：

Q1) 鏡の中の赤い点に右手の指が乗っている様子をイメージすることができた。

Q2) 透明な右手を持っているように感じた。

実験参加者は〈環境要因〉の各条件に対し、こ

れらの項目について -3 (全くそう思わない) から 3 (とてもそう思う) までの 7 段階評価で回答を行った。

2.5 基準の速度

回答する速度の基準となる Hidden hand の動きを実験参加者に覚えてもらうため、実験参加者は目を閉じ、Hidden hand の持ち手を握った状態で、右、左の順にそれぞれ 2.5 s 間 Hidden hand の持ち手が移動する感覚を、連続して体験する(「基準の速度」の提示)。この時提示された速度は、移動刺激と同様、3 mm/s である。実験参加者にはこの時の右の動き (Separation) を 10、左の動き (Attraction) を -10 として、刺激提示時に感じた Hidden hand の速度をレーティングするように指示した。実験者は回答の例示として、基準よりも半分の速度に感じた場合には 5、倍の速度に感じた場合には 20、全く動いていないと感じた場合には 0 と述べることで、左の動きにはマイナスを付けること、整数であれば 1 や 13 などの細かい数で回答できることを伝えた。また、この「基準の速度」の提示操作は実験中何度も繰り返されるが、実験参加者の左右の手の配置は次の試行で用いる〈環境要因〉の配置で行われた。

2.6 手続き

実験参加者は装置に対して鏡面が左側となるように座り、Hidden hand の様子を覗くことができないように、鏡から右肩にかけて黒の布で覆われた。実験者は実験参加者が鏡の裏側を見るのが無いよう配慮しながら、人差し指の先が持ち手 A の赤い突起の位置になるよう、実験参加者の両手を誘導した(条件 [AA] の状態)。実験参加者は左側から鏡をしっかりと覗き込み、実験中は鏡面内の Visible hand の人差し指先端もしくは赤い突起を見つめるよう、実験者から指示を受けた。その後、実験参加者には目を閉じて「基準の速度」を体感してもらい、回答の方法について実験者から教わった上で、実際の試行を数度体験した。

実験では「基準の速度」を提示した後、〈鏡の移動要因〉3 条件 × 〈手の移動要因〉3 条件を組み合わせた 9 試行をランダムに提示する。1 試行毎に、実験参加者は試行中に感じた Hidden hand の速度について口頭で回答を行った。9 試行を行なった後、機材のノイズによる持ち手と鏡の位置の基準の位置

のズレを修正するため、持ち手と鏡を基準の位置に戻す操作を行なった上で、基準の速度の提示を再度行なった。その後、再び移動刺激 9 種をランダムに提示する試行を再度行い、先の試行と合わせた計 18 試行を 1 セットとして扱った。1 セットが終わる毎に、実験参加者はアンケート 2 項目について回答を行ない、〈環境要因〉を別の条件に変えた上で、9 セットを繰り返して行なった。〈環境要因〉の提示は、最初の 4 セットは実験参加者毎にランダムな〈環境要因〉順 ([Control] 条件を除く) で提示、その後 4 セットを同じ順で繰り返した後、[Control] 条件を 1 セット行い、実験参加者 1 名につき計 9 セット (=162 試行) を実施した。

3. 結果

今回の実験中に実験参加者が回答した Hidden hand の速度感覚 (Subjective speed rating) について、参加者毎のデータを確認した。通常、KMI が誘起されない場合であったとしても、Hidden hand の移動方向に関する報告は固有感覚もしくは鏡像が移動した方向へと引き寄せられる。しかし、今回の実験参加者 1 名 (女性、左利き) は Hidden hand が移動する場合に、鏡が同じ方向に動いていたとしても、半数以上の〈環境要因〉内において、強く逆方向の方向に速度感覚の回答を行っていた ([Hand : Attraction] - [Mirror : Attraction] で 10 以上、[Hand : Separation] - [Mirror : Separation] で -10 以下を回答)。この傾向は他の実験参加者と全く異なる傾向を持っていたことから、今回の報告ではこの 1 名を除いた 11 名で解析を行なった結果について報告する。また、この実験参加者 1 名のデータは他の実験参加者から抽出した 2 名のグラフとともに、付録として掲載している。

3.1 Subjective speed rating

3.1.1 Hidden hand が身体空間へと近づく場合 [Hand : Attraction]

図 4 上段のグラフは Hidden hand が身体空間へと近づく場合 (Hand : Attraction) に得られた Subjective speed rating の実験参加者平均について、〈環境要因〉、〈鏡の移動要因〉別に掲載したグラフである。[Hand : Attraction] 時には手は -10 (負の基準の速度) で動くため、全体的なグラフの概形も負の方向に寄っていることが分かる。〈環境要因〉と〈鏡

の移動要因〉が KMI に与える影響を比較するため、被験者内 2 要因分散分析を行なったところ、〈環境要因〉 × 〈鏡の移動要因〉の交互作用が有意であった ($F(8, 80) = 2.32, p = .027, \eta^2 = 0.031$)。さらに、〈環境要因〉における〈鏡の移動要因〉の単純主効果検定の結果、鏡を用いた全ての〈環境要因〉内の条件において〈鏡の移動要因〉による効果が有意であることが示された (〈Mirror motion〉 × [Hand + AA] : $F(2, 20) = 12.34, p < .001, \eta^2 = 0.380$; 〈Mirror motion〉 × [AA] : $F(2, 20) = 3.83, p = .039, \eta^2 = 0.172$; 〈Mirror motion〉 × [BB] : $F(2, 20) = 11.53, p < .001, \eta^2 = 0.429$; 〈Mirror motion〉 × [AB] : $F(2, 20) = 7.10, p = .005, \eta^2 = 0.268$)。また、[Control] 条件については〈鏡の移動要因〉による有意傾向がみられた ($F(2, 20) = 3.22, p = .062, \eta^2 = 0.142$)。さらに、〈鏡の移動要因〉における〈環境要因〉の単純主効果検定の結果、[Mirror : Separation] 条件においては〈環境要因〉による効果が有意であった ($F(4, 40) = 4.02, p = .008, \eta^2 = 0.117$)。ただし、他の〈鏡の移動要因〉に関しては、有意な主効果は見られなかった (〈Condition〉 × [Mirror : Attraction] : $F(4, 40) = 1.28, p = .295, \eta^2 = 0.042$; 〈Condition〉 × [Mirror : Pause] : $F(4, 40) = 1.08, p = .381, \eta^2 = 0.040$)。主効果が見られたものについて、より具体的に調査するため、Holm 法による多重比較を行なったところ、[Hand + AA]、[AA]、[BB] 条件における一部の〈鏡の移動要因〉内の条件で、鏡像の移動方向へと Subjective speed rating が有意に変調する傾向を観察することができた ([Hand + AA] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] : $p = .005$, [Mirror : Pause] - [Mirror : Separation] : $p = .020$; [AA] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Pause] : $p = .028$; [BB] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Pause] : $p = .012$, [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] : $p = .012$, [Mirror : Pause] - [Mirror : Separation] : $p = .020$)。また [Hand + AA]、[AA]、[AB] 条件内の一部においては〈鏡の移動要因〉内の条件の効果が有意傾向であることを観察できた ([Hand + AA] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Pause] : $p = .065$; [AA] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] : $p = .096$; [AB] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] :

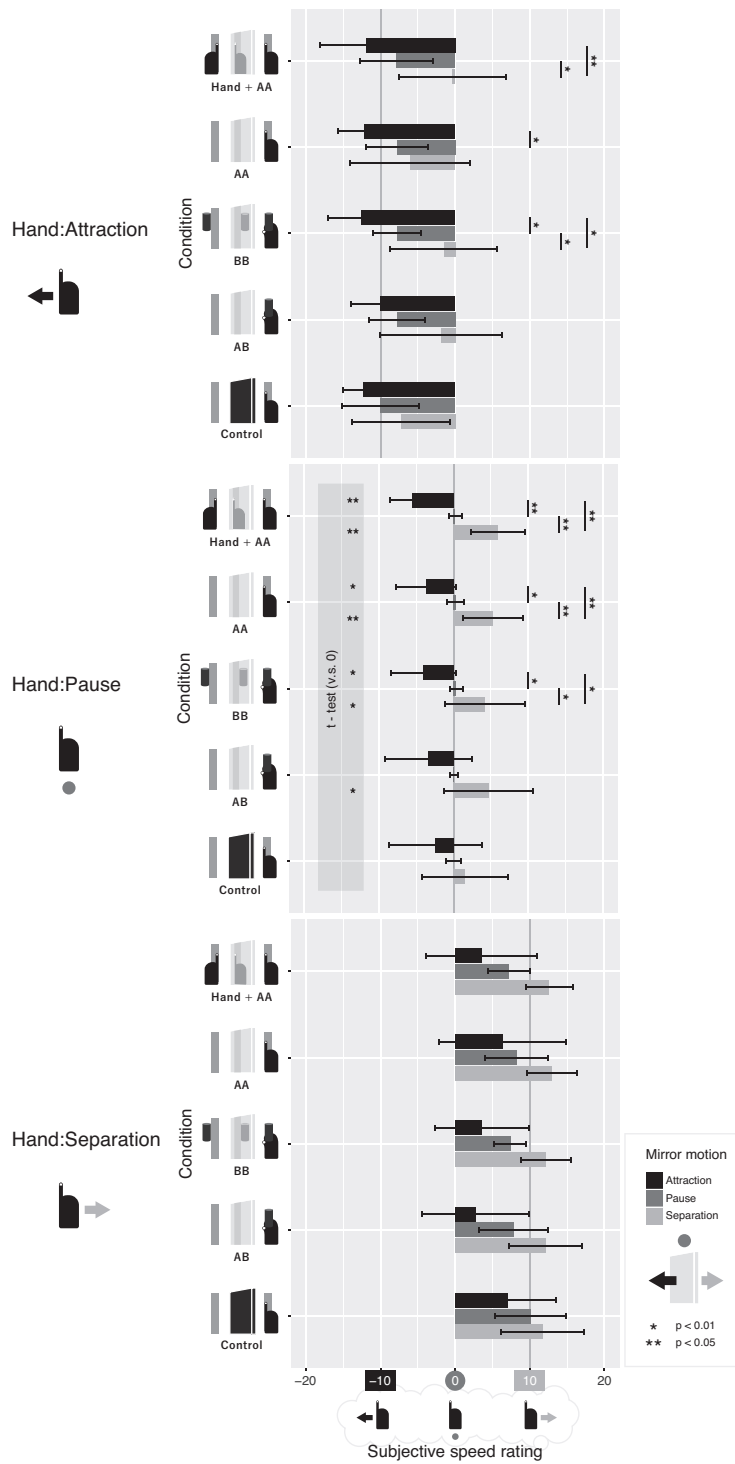


図 4 Hidden hand の移動速度の回答平均 (Subjective speed rating)

$p=.053$, [Mirror : Pause] \times [Mirror : Separation] : $p=.053$). これら〈鏡の移動要因〉内の条件の差は、実際には -10 方向へと動いている Hidden hand が、鏡像の静止、あるいは実際の動きと矛盾した鏡像の動きを視覚的に与えられることで、移動感覚が抑制されることを示している。また、[Mirror : Separation] 時においては [Hand + AA] の方が [AA] よりも移動感覚の抑制効果が高いという有意傾向が出ていた ($p=.087$)。〈環境要因〉内の条件の効果については有意に差のある箇所は見当たらなかったものの、多重比較によって〈鏡の移動要因〉内の条件間に明確な移動感覚の差が見られた [Hand + AA], [AA], [BB] 条件は [AB], [Control] 条件に比べ、KMI の誘起が容易であったことが示唆された。

3.1.2 Hidden hand が静止している場合 [Hand : Pause]

図 4 中段のグラフは、Hidden hand が静止している場合 (Hand : Pause) に得られた Subjective speed rating の実験参加者平均を示している。[Hand : Pause] は実際の Hidden hand が動かない条件であるため、Subjective speed rating は 0 を基点として左右に広がっていることが、グラフの概形から分かる。これについても被験者内 2 要因分散分析を行なったところ、〈鏡の移動要因〉 \times 〈環境要因〉の交互作用が有意であった ($F(8, 80) = 2.58$, $p = .015$, $\eta^2 = 0.036$)。さらに、〈環境要因〉における〈鏡の移動要因〉の単純主効果検定の結果、[Control] 条件以外の〈環境要因〉の各条件において、〈鏡の移動要因〉による効果が有意であることが示された (〈Mirror Motion〉 \times [Hand + AA] : $F(2, 20) = 37.32$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.754$; 〈Mirror Motion〉 \times [AA] : $F(2, 20) = 13.38$, $p < .001$, $\eta^2 = 0.549$; 〈Mirror Motion〉 \times [BB] : $F(2, 20) = 7.75$, $p = .003$, $\eta^2 = 0.419$; 〈Mirror Motion〉 \times [AB] : $F(2, 20) = 5.02$, $p = .017$, $\eta^2 = 0.321$)。ただし [Control] 条件に関しては〈鏡の移動要因〉による効果は有意ではなかった ($F(2, 20) = 1.46$, $p = .256$, $\eta^2 = 0.100$)。また、同様に〈鏡の移動要因〉における〈環境要因〉の単純主効果検定の結果、[Mirror : Separation] における〈環境要因〉の効果に有意傾向が見られた ($F(4, 40) = 2.87$, $p = .035$, $\eta^2 = 0.085$)。しか

し、他の〈鏡の移動要因〉内の条件においては有意な主効果は見られなかった (〈Condition〉 \times [Mirror : Attraction] : $F(4, 40) = 1.44$, $p = .240$, $\eta^2 = 0.044$; 〈Condition〉 \times [Mirror : Pause] : $F(4, 40) = 0.46$, $p = .763$, $\eta^2 = 0.020$)。主効果がみられたものについて多重比較を行なったところ、[Hand + AA], [AA], [BB] において〈鏡の移動要因〉間に有意な差が見られた。 ([Hand + AA] : 全ての〈鏡の移動要因〉間 : $p < .001$; [AA] : [Mirror : Pause] - [Mirror : Separation] : $p = .009$, [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] : $p = .009$, [Mirror : Attraction] - [Mirror : Pause] : $p = .013$; [BB] : [Mirror : Attraction] - [Mirror : Pause] : $p = .029$, [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] : $p = .035$, [Mirror : Pause] - [Mirror : Separation] : $p = .047$)。この結果は [Hand : Pause] においても、[Hand : Attraction] と同様、[Hand + AA], [AA], [BB] の環境条件が、他の環境条件と比べ、KMI の誘起が容易であったことを示している。また、[Mirror : Separation] における〈環境要因〉についても同様に多重比較を行なったが、いずれの〈環境要因〉内の条件にも有意な差は見られなかった。

さらに、〈鏡の移動要因〉内の条件の差異のみならず、実際に視覚単独の効果によって Hidden hand の移動感覚が発生しているかどうか調査するため、手が全く動いていないと感じた状況 (回答が全て 0 であった場合) と、[Mirror : Attraction], [Mirror : Separation] 条件を対応のない t 検定を用いてそれぞれ比較した。すると、[Mirror : Attraction] においては [Hand + AA], [AA], [BB] において、有意な KMI の誘起が確認できた ([Hand + AA] : $t(10) = 6.14$, $p < .001$, $d_D = 1.85$; [AA] : $t(10) = 2.92$, $p = .015$, $d_D = 0.88$; [BB] : $t(10) = 2.97$, $p = .014$, $d_D = 0.89$)。ただし、[AB] 条件における KMI の誘起は有意傾向に留まった ($t(10) = 1.85$, $p = .094$, $d_D = 0.56$)。また [Control] 条件については KMI の誘起が確認できなかった ($t(10) = 1.24$, $p = .243$, $d_D = 0.37$)。また、[Mirror : Separation] においては [Control] 条件を除いた全ての〈環境要因〉内の条件で有意な KMI の誘起が確認できた ([Hand + AA] : $t(10) = 5.28$, $p < .001$, $d_D = 1.59$; [AA] : $t(10) = 4.19$,

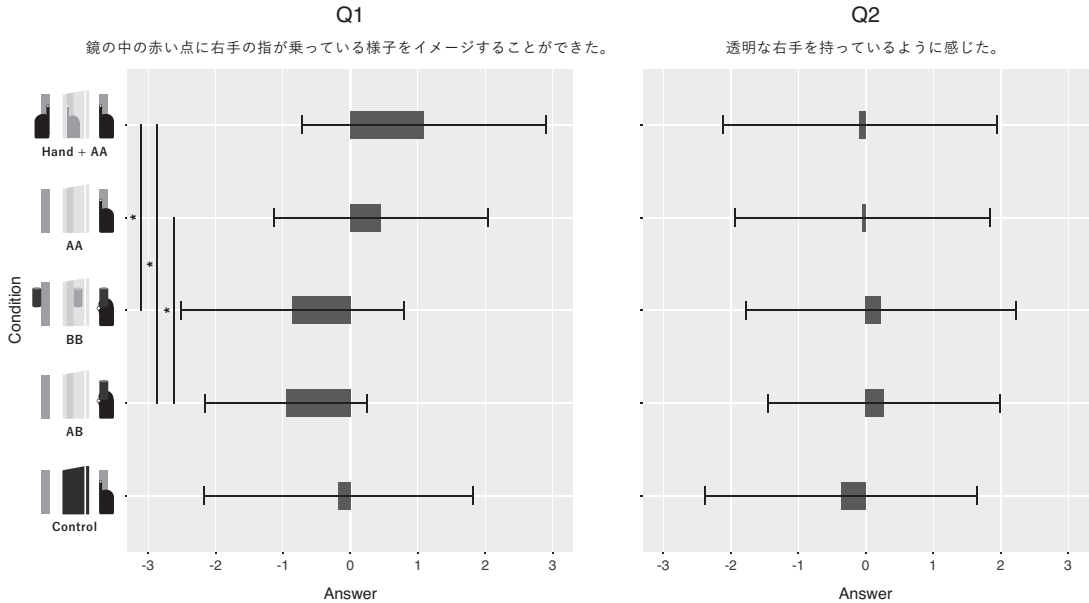


図5 アンケート結果

$p = .002$, $d_D = 1.26$; [BB] : $t(10) = 2.52$, $p = .031$, $d_D = 0.76$; [AB] : $t(10) = 2.48$, $p = .032$, $d_D = 0.75$). しかし [Control] 条件では有意な KMI の誘起は見られなかった ($t(10) = 0.85$, $p = .417$, $d_D = 0.26$).

3.1.3 Hidden hand が身体空間から離れる場合 [Hand : Separation]

図4下段のグラフには、Hidden hand が身体空間から離れる場合 (Hand : Separation) に得られた Subjective speed rating の実験参加者平均を示す。[Hand : Separation] 時には手は 10 (正の基準の速度) で動くため、全体的なグラフの概形も正の方向に寄っていることが分かる。〈鏡の移動要因〉と〈環境要因〉が KMI に与える影響を比較するため、被験者内 2 要因分散分析を行なったが、〈環境要因〉 \times 〈鏡の移動要因〉の有意な交互作用は見られなかった ($F(8, 80) = 1.65$, $p = .123$, $\eta^2 = .018$)。ただし〈鏡の移動要因〉による主効果は有意であった ($F(2, 20) = 9.14$, $p = .002$, $\eta^2 = 0.249$)。これらについて Holm 法による多重比較を行なったところ、[Mirror : Separation] よりも [Mirror : Pause]、[Mirror : Pause] よりも [Mirror : Attraction] で Subjective speed rating が有意に抑制される効果が見られた ([Mirror : Pause] - [Mirror : Separation] :

$p = .011$, [Mirror : Attraction] - [Mirror : Separation] : $p = .023$, [Mirror : Attraction] - [Mirror : Pause] : $p = .042$)。また、〈環境要因〉の主効果も有意であった ($F(4, 40) = 3.10$, $p = .026$, $\eta^2 = .019$)。これについても同様に多重比較を行なったが、いずれの〈環境要因〉内の条件にも有意な差は見られなかった。

3.2 アンケート

これら Subjective speed rating の他、各〈環境要因〉における実験参加者が Hidden hand に抱いたイメージを調査するため行ったアンケート Q1, Q2 の実験参加者平均を図5に示す。〈環境要因〉について被験者内 1 要因分散分析を行なったところ、Q1 で〈環境要因〉による効果が有意であった ($F(4, 40) = 4.08$, $p = .007$, $\eta^2 = 0.180$)。〈環境要因〉内の各条件の効果の差を見るため、Holm 法による多重比較を行なったところ、[Hand + AA]、[AA] 条件において、[BB]、[AB] 条件よりも有意に鏡像の中で持ち手 A を握るイメージを持っていたことが部分的に示唆された ([Hand + AA] - [AB] : $p = .014$; [Hand + AA] - [BB] : $p = .044$; [AA] - [AB] : $p = .044$)。また Q2 では〈環境要因〉による有意な効果は確認できなかった ($F(4, 40) = 1.01$, $p = .415$, $\eta^2 = 0.014$)。

4. 考 察

Hidden hand が身体空間側へと近づく方向に進む〔Hand : Attraction〕条件、静止している〔Hand : Pause〕条件において、〈環境要因〉と〈鏡の移動要因〉の交互作用が確認され、KMI に対する〈環境要因〉の効果が確認された。これらの内、手のイメージが具体的に提示されていた〔Hand + AA〕条件、鏡を使用しつつも左右の持ち手が同じであった〔AA〕、〔BB〕条件は、多重比較と〔Hand : Pause〕条件下での t 検定の結果から、鏡像の動きの効果による KMI の誘起を確認することができた。また、〔Hand + AA〕条件においては、〔Hand : Attraction〕×〔Mirror : Separation〕の場合に〔AA〕条件よりも大きな KMI の効果があるという有意傾向があったこと、〔Hand : Pause〕条件時の平均値や効果量が他の条件と比較して大きな値であったことから、鏡像に手を明示した場合の方が、手を明示しない場合よりも KMI の錯覚強度が高まることを示唆された。今回の結果で特に重要であるのは、〔AA〕条件、〔BB〕条件においては〈鏡の移動要因〉に応じた方向へと KMI の誘起が多重比較の結果から確認されたものの、Hidden hand の持ち手と提示した持ち手が異なる〔AB〕条件においては KMI の誘起が明確ではなかったことである。これは「手のイメージの想起性」が KMI の誘起を容易にする 1 つの要因であることを示している。またアンケート Q1 において〔Hand + AA〕条件と〔AA〕条件の間に差が見られなかったことは、具体的に手のイメージを提示しない状態であっても、実験参加者が持ち手 A の上に手が乗っているイメージを損なわなかったことを示している。身体の具体的なイメージを提示しない場合であったとしても、その空間に身体所有感を抱くことができる「虚投射」の事例は Rubber hand illusion や Full body illusion などの心理実験において報告されている (Guterstam, Gentile & Ehrsson, 2013; Guterstam, Abdulkarim & Ehrsson, 2015; D'Angelo, Pellegrino & Frassinetti, 2017)。特に 2013 年に行われた Ehrsson らのグループによる報告では、何もない空間をゴムの手の代わりに使用した Rubber hand illusion の研究において、透明な手が遠くにある場合などの実際の身体に対して不調和な条件、つまり「手のイメージの想起性」が低い条件においては錯覚強度が下がることを報告し

ていた。この報告は〔AA〕条件〔BB〕条件と比べ、〔AB〕条件で KMI の誘起が起りづらかった点と類似している。ただし今回の結果では〔AB〕条件においても〈鏡の移動要因〉による効果は有意であったこと、〔Mirror : Separation〕条件時の「手が全く動いていないと感じていた場合」との比較において、有意に移動感覚が観察されたことから、「手のイメージの想起性」が低い条件であっても KMI の誘発は少なからずあったことが示唆される。

反して、〔Hand : Separation〕条件における〈環境要因〉の影響については確認することができなかった。以前我々が報告した実験においても、鏡が近づいてくる条件においてのみ、左右の手の姿勢が異なる場合の Hidden hand の移動感覚の変調強度が、姿勢が一致する場合よりも下がるという結果が得られ、鏡が離れる場合には姿勢の効果が確認できなかった (Ishihara & Kodaka, 2018)。視覚を用いた身体性の錯覚は、擬似的な身体が身体近傍空間 (peripersonal space) から離れるにつれて、錯覚強度が下がるとされる (Lloyd, 2007)。その一方で、光点検出課題の研究によると、人は身体近傍空間内の物体に対して過敏になることが示されている (Reed, Grubb & Steele, 2006)。今回の結果では、身体近傍空間内から Hidden hand が離れることで、本物の手である Hidden hand に対する注意が小さくなり、各々の〈環境要因〉間の差がより曖昧になったと推測する。ただし、〈鏡の移動要因〉による主効果からは鏡の移動方向に応じた Subjective speed rating の変調が確認されたことから、〔Hand : Separation〕条件においても、KMI が起こることは確認できた。

また、〔Hand : Attraction〕条件が〔Hand : Pause〕と比べ、〈鏡の移動要因〉の効果がまばらであった。これは、発生する KMI に〈鏡像による視覚〉だけではなく、〈Hidden hand の筋固有感覚〉の影響も加わったために、〈鏡像による視覚〉に影響を受けやすい実験参加者と〈Hidden hand の筋固有感覚〉に影響を受けやすい実験参加者の間で回答にばらつきが生じたためと考えられる。また、Hidden hand が動く〔Hand : Attraction〕条件、〔Hand : Separation〕条件が〔Hand : Pause〕条件と比べて大きな SD 値を取ることも同様の理由であると考えられる。

今回の実験では、鏡を用いていない〔Control〕

条件において、いずれの〈手の移動要因〉にも、鏡の移動方向に応じた Hidden hand の移動感覚の変調を確認できなかった。これは MRMB によって誘起される Hidden hand の移動感覚の変調が、単なる目の前の物体の移動によるものではなく、鏡像として提示される擬似的な空間情報が変化することによって引き起こされるものであることを示している。「手のイメージの想起性」とは、この鏡面内の擬似的な空間内に Hidden hand の存在を投影する、つまり「透明な手のイメージ」を持つことであるとも考えられる。しかし、「透明な手のイメージ」について尋ねたアンケート Q2 の結果では、〈環境要因〉内の条件間に差は見られなかった。これは設問が「手が透明に変化したように感じた」とも「見えていないが、鏡の中に手が存在しているように感じた」とも読み取れるために、回答に複数の印象が混在してしまった可能性がある。また、〔AB〕条件においても KMI が誘起されている可能性が存在することは、単に手のイメージを持ち手の上に投影する以外のプロセスでも、KMI の誘起が起こりうることを示唆している。例えば、身体周りの空間が視覚的に変位することによって身体の移動感覚を生み出す現象：ベクション (Fischer & Kornmueller, 1930) のような現象が併発しているのであれば、「透明な手のイメージ」が無くとも、鏡面の奥にある Hidden hand の存在感と鏡面による空間的な変位が揃うことで移動感覚が生まれる可能性も考えられる。これらの可能性について検討するためにも、正確に「手のイメージの想起性」を取り出すことができる語について調査するとともに、部分的なベクション現象を引き起こすことが可能であるかについて実験を行う必要がある。

また、前回の実験では移動方向感覚を実験参加者に尋ねていたため、具体的に速度感覚が変調していたかどうかまでは分からなかった (Ishihara & Kodaka, 2018)。しかし、今回の速度を尋ねる実験においても、いずれの〈手の移動要因〉も実験参加者が感じている Hidden hand の移動感覚が鏡の移動に応じて変調していたことが確認できたことから、MRMB を用いた Visible hand の移動を伴わない実験環境においても、KMI が速度感覚のレベルで変調を引き起こすことが示された。鏡像の動きによってもたらされた、実際に実験参加者が感じた速度 (Subjective speed rating) を具体的な数

値で見ると、〔Hand + AA〕条件における手と鏡像が矛盾した動きをとる場合の Subjective speed rating の結果は〔Hand : Attraction〕×〔Mirror : Separation〕”で -0.38 、〔Hand : Separation〕×〔Mirror : Attraction〕で 3.52 であった。このとき Hidden hand は基準となる速度 10 で動く。また鏡の動き (5 mm/s) についても、基準の速度と同じ単位に揃えると 16.7 で動いていた。更に鏡像は鏡の反射像であることから、鏡の速度の 2 倍の値である 33 を取る。「固有感覚が Hidden hand の移動感覚に与える影響に対する鏡像の影響 (α)」について求めようとする場合、各値を以下の式に当てはめることで求められる。

$$\text{Hidden hand の実際の速度} + (\text{鏡像の速度} \times \alpha) = \text{Subjective speed rating} \quad (\text{数式 1})$$

すると、〔Hand : Attraction〕の動きに対する鏡像の動きの効果は約 30%、〔Hand : Separation〕の動きに対する鏡像の動きの効果は約 20% となる。前回の実験においても手の姿勢が左右同じであった場合の鏡像の効果は Hidden hand の移動感覚の約 30% であり、〔Hand : Separation〕時の鏡像の効果が若干下がるものの、速度を問う場合においてもおおよそ同等の効果を観察することができた。

5. まとめ

本研究の目的は、鏡像単独で引き起こされる KMI に対し、「手のイメージの想起性」が及ぼす影響を調査することであった。今回の結果から、鏡像に手のイメージが明確に提示されている場合のみならず、鏡像に手のイメージが提示されなくとも鏡像に Hidden hand の持ち手と同じ持ち手が提示される場合に、鏡像の移動の効果による KMI の誘起することが確認された。同様に鏡像に手のイメージが提示されず、Hidden hand で使用している持ち手と、鏡像で提示される持ち手の形状が異なる場合には、KMI の誘起は起こりづらいという結果が得られた。このことは、見えていないはずの手の存在を触覚的な手がかりによって暗黙的に立ち上げる「手のイメージの想起性」が KMI の誘起要因の 1 つであることを示唆する。

ただし、左右の持ち手が異なる、「手のイメージの想起性」が低い状態においても、〈鏡の移動要因〉の効果が有意であったことは KMI の誘発が少な

らずあったことを示している。このことから、鏡像に映る空間的な変位が KMI を誘発していた可能性が考えられるため、今後は鏡に特定の物を写さない、空間の変位のみを提示する条件を作成するなどして、この部分を明らかにする必要がある。また、今回の分析から省いた実験参加者の傾向を含め、本装置による Hidden hand の移動感覚の受け取り方 (e.g. 視覚に影響を受けやすい、Hidden hand の筋固有感覚に影響を受けやすい) には個人差が大きく関わっている。これについては今後実験参加者数を増やし、傾向別にクラスタリングすることで、詳しい調査を行いたい。

invisible hand (body) などの視覚的には何も存在しない空間に対して身体所有感を抱かせる錯覚研究では、これまで実在感や身体所有感、対象の空間に対する他者への反応など、個人がその空間に対し、どの程度身体性を感じられるかについて着目されてきた。今回の結果では、こうした「虚投射」の場合であっても、「異投射」の場合と同様、身体がプロジェクションされている環境 (鏡面内の持ち手) が変化することによって、イメージの投射元である身体の移動感覚が変調可能であることを示した。今回の実験と類似した状況として、手に握ったりモコンを VR 空間内に提示することで身体の移動を伝える VR 環境の UI がある。この手法は一般的にユーザの恣意的な動きに対し使用されるが、今回の結果からは「手のイメージの想起性」を担保することで、ユーザが意図しない動きに対し、部分的な手の移動感覚を仮想的に引き起こすことができる可能性を示している。

謝 辞

本研究は立石研究助成 (C)、及び JSPS 科研費 15K21281 の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

文 献

- Armel, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: Evidence from skin conductance response. *Proceedings, Biological Sciences / The Royal Society*, **270** (1523), 1499–1506.
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, **391** (6669), 756.
- Chancel, M., Brun, C., Kavounoudias, A., & Guerraz, M. (2016). The kinaesthetic mirror illusion: How much does the mirror matter? *Experimental Brain Research*, **234** (6), 1459–1468.
- Chancel, M., Kavounoudias, A., & Guerraz, M. (2017). What’s left of the mirror illusion when the mirror can no longer be seen? Bilateral integration of proprioceptive afferents! *Neuroscience*, **362**, 118–126.
- D’Angelo, M., di Pellegrino, G., & Frassinetti, F. (2017). Invisible body illusion modulates interpersonal space. *Scientific Reports*, **7**, 1302.
- Fischer, M. H., & Kornmüller, A. E. (1930). Optokinetisch ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und optokinetischer Nystagmus. *Journal Fur Psychologie Und Neurologie*, **41**, 273–308.
- Guerraz, M., Provost, S., Narison, R., Brugnon, A., Virolle, S., & Bresciani, J.-P. (2012). Integration of visual and proprioceptive afferents in kinesthesia. *Neuroscience*, **223**, 258–268.
- Guterstam, A., Abdulkarim, Z., & Ehrsson, H. H. (2015). Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses. *Scientific Reports*, **5**, 9831.
- Guterstam, A., Gentile, G., & Ehrsson, H. H. (2013). The Invisible Hand Illusion: Multisensory Integration Leads to the Embodiment of a Discrete Volume of Empty Space. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **25** (7), 1078–1099.
- Holmes, N. P., Snijders, H. J., & Spence, C. (2006). Reaching with alien limbs: Visual exposure to prosthetic hands in a mirror biases proprioception without accompanying illusions of ownership. *Perception & Psychophysics*, **68** (4), 685–701.
- Ishihara, Y., & Kodaka, K. (2018). Vision-Driven Kinesthetic Illusion in Mirror Visual Feedback. *I-Perception*, **9** (3), 1–11.
- Lloyd, D. M. (2007). Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand. *Brain and Cognition*, **64**, 104–109.
- Medina, J., Khurana, P., & Branch Coslett, H. (2015). The influence of embodiment on multisensory integration using the mirror box il-

lusion. *Consciousness and Cognition*, **37**, 71–82.

Ramachandran, V. S., Rogers-Ramachandran, D., & Cobb, S. (1995). Touching the phantom limb. *Nature*, **377** (6549), 489–490.

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) 166–177.

鈴木 宏昭 (2016). プロジェクション科学の展望. 『日本認知科学会第 33 回大会発表論文集』, 20–25.

(Received 20 July 2018)

(Accepted 24 Oct. 2018)



石原 由貴(学生会員)

2015 年名古屋市立大学大学院芸術工学研究科博士前期課程修了。その後、(株) GOCCO. にて UI デザイン等に従事しつつ、2016 年 4 月より同大学院博士課程入学。錯覚を通じて身体認知の研究を行うと共に、その面白みを生かした作品の制作を行う。



小鷹 研理(正会員)

1979 年生まれ。名古屋市立大学芸術工学研究科・芸術工学部情報環境デザイン学科准教授。認知心理学・VR・メディアアートを横断する複合的な視点に立ち、「からだの錯覚」に関わる諸問題を、具体的な装置を通して構成的に検証する小鷹研究室を主宰。

付 録

今回データから外した実験参加者（左）、〈鏡像（視覚）〉の効果が高かった実験参加者（中央）、あまり鏡像の効果を受けず〈Hidden hand の筋固有感覚〉の効果が高かった実験参加者（右）のデータを記載する。

