

# Kinesthetic mirror illusion における グリップ感の相同性の影響

## Contact-shape Congruency Activates Kinesthetic Mirror Illusion.

石原 由貴<sup>†</sup>, 小鷹 研理<sup>†</sup>  
Yuki Ishihara, Kenri Kodaka

<sup>†</sup>名古屋市立大学  
Nagoya City University  
haraishihara@gmail.com

### 概要

本研究では Mirror Visual Feedback 下で見られる鏡面裏側の手の仮想的な移動感覚 (KMI) の誘起に対し、左右の持ち手のグリップ感の一致/不一致、及び鏡像の提示/不提示の条件の効果がどの程度あるかについて比較した。結果、KMI 及び身体所有感の誘起には手を提示することによる影響が大きいものの、鏡面裏側と同じ持ち手を鏡像に提示することでも、ある程度の KMI が誘発されることが分かった。

キーワード : Mirror visual feedback, Invisible hand illusion, Multisensory integration, Kinesthesia, Body perception

### 1. 背景

Mirror Visual Feedback (MVF) は、直立した鏡に片手を映し出すことで、鏡面内の手の像 (鏡像) が鏡面裏側に配置した手そのものであるかのように感じられる錯覚である[1]。この錯覚中、鏡面手前側に配置した手 (以下、手前の手) を動かすと、鏡面裏側に配置した手 (以下、裏側の手) があたかも動いているかのように感じられる。これは Kinesthetic Mirror Illusion (KMI) と呼ばれ、鏡像による視覚及び左右の手の固有感覚間の統合によって作り出されるとされている[2][3]。この時、鏡像の動きや姿勢が裏側の手と異なっている場合であっても、視覚的な手の動きと実際の手の筋固有感覚の動きが統合され、移動感覚が誘起されることが分かっている[4][5][6]。

著者らはそうした KMI の柔軟性に着目した実験の 1 つとして、左右の持ち手の組み合わせ (= “手のイメージの想起性”) が KMI にどのような影響をもたらすのかについて検討を行った[7]。結果、手前の手が提示されていない場合であったとしても、裏側の手が把持する持ち手と同じ持ち手が鏡面手前側に提示される “手のイメージの想起性” が高い条件の場合には、KMI の誘起を確認することができた。ただし、この実験ではあくまで各条件における鏡像の動き毎の KMI の誘起を確

認するに留まったために、各条件の錯覚強度を直接比較することができておらず、錯覚の誘起においてどの要素 (手の像の有無、把持する姿勢の差異、グリップ感の差異等) がどの程度貢献するのかについては解明されなかった。また前回の実験[7]内で使用した持ち手の形状 2 種はそれぞれ異なる姿勢で把持する必要があったため、筋固有感覚の力の加え方にばらつきが生じ、ノイズの多い比較となってしまっていた可能性がある。そこで今回の実験では姿勢の条件を統制し、持ち手の視覚的・触覚的なグリップ感の類似に焦点を当てた “グリップ感の相同性” の違いによる KMI の強度の比較を行う。これに類似した知見として、Guerraz らの実験[8]では MVF 中に把持する道具が左右異なる場合、十分な KMI は誘起されないとしつつも、鏡面を使用しない場合と比較して KMI の発生が見られる結果が得られている。本実験ではこうした左右のグリップ感が異なる場合の条件に加え、手前の手を配置しない条件を同時に作成し、“グリップ感の相同性” が KMI に対しどのレベルの影響力を持つのかについて調査する。

手前の手を配置しない条件下での MVF では、物質的なものが存在しない空間に対して手のイメージの投射が行われる虚投射[9]が起こっている状態にあると言える。このように何も存在しない空間に対して身体所有感を抱く実験として Invisible Hand Illusion[10]がある。この実験では、何も無い空間に実験者が触れるのと同じタイミングで隠された本物の手をなぞられることで、何もない空間に自分自身の手が存在するかのような感覚を作り出す。これは視覚同期によって何もない空間に身体所有感を与える実験であるが、投射先の空間を視覚的に変位させることで、身体イメージを変形させることも報告されている[11]。この実験では隠された本物の指を引っ張ると同時に、空を掴んだ指が引っ張られる方向へと移動する様子を視覚的に提示することで、あたかも引っ張られた指が伸びたかのような感覚を与える。興味深い点として、この

実験の中で取られたアンケートからは、実験参加者が「透明な手を持っているように感じていた」とは言えない結果が得られている。つまり、単純に虚投射が起こっていた空間内に身体所有感が起こっていたというのとは異なる現象が引き起こされていたと可能性がある。そこで、本実験内においては身体所有感、KMI、周囲の環境の移動感、身体の透明感を問う複合的なアンケートを行い、手の像を用いない KMI がどのような要因により発生するのかについて詳しく調査を行った。

## 2. 装置

今回用いた実験環境は図 1 のようになっている。実験参加者は立てられた 30 x 45cm の鏡の前に座り、鏡の初期位置から左右に各 15cm、手前側の鏡の端から 30cm 離れた箇所に立てられた持ち手を左右で握る。持ち手は丸棒（直径 3cm、高さ 25cm）と板（厚み 1.2 x 10cm、高さ 25cm）の 2 種類用意されており、それぞれ上部 13.5cm 内に手の把持位置がくるようになっている。またそれぞれの持ち手の下部には振動モータ（LBV10-B-009）が取り付けられ、実験中振動した。

鏡は可動式となっており、リニアアクチュエータ（Firgelli : L16-P Miniature Linear Actuator 140mm 150:1）を Arduino と Processing で制御することによって左右に動作する。また、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なら置かれた。



図 1 実験装置

## 3. 実験

### 3.1. 実験参加者

本実験では計 8 名（男性 2 名、女性 6 名）の大学生に協力してもらった。

### 3.2. 移動刺激

実験中、鏡は 2 種類の速度（5mm/s or 3mm/s）で左右どちらかの方向へと動く。1 度の動作は 2 秒間であり、動作が終わると 1 秒停止した後再度いずれかの速度で動き出す。この鏡の移動は 1 試行につき 30 秒間断続的に行われるが、一定の範囲での移動となるよう、左右×2 種の速度=4 種の動きを 1 セットとして、1 セットの動きをランダムに提示した後、次のセットを提示するような順序の操作を行った。動作時に起こるモーター音の影響を抑えるため、実験参加者は試行中ヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聞かされた。それと同時に、鏡の移動に伴う持ち手の振動の大きさをマスクするため、グリップ下部の振動モーターが振動した。

### 3.3. 環境条件

今回の実験では手の像の提示と、左右の持ち手の組み合わせを用いて環境条件を作成している（図 2）。手の像の提示には両手がグリップを握る<hand>条件、手前の手を膝の上に置いて裏側の手のみハンドルを握る<none>条件の 2 条件、左右の持ち手の組み合わせとして丸棒と板の持ち手 2 種を組み合わせた 4 条件を用意した。これらを組み合わせた計 8 種を Condition 条件として 1 試行毎に提示した。また、解析においては持ち手の組み合わせを、左右の持ち手が同じ条件である<congruent>条件、左右の持ち手が異なる<incongruent>条件の 2 種で取り扱い、手の組み合わせ 2 種×持ち手の組み合わせ 2 種の計 4 種の Condition 条件として調査した。

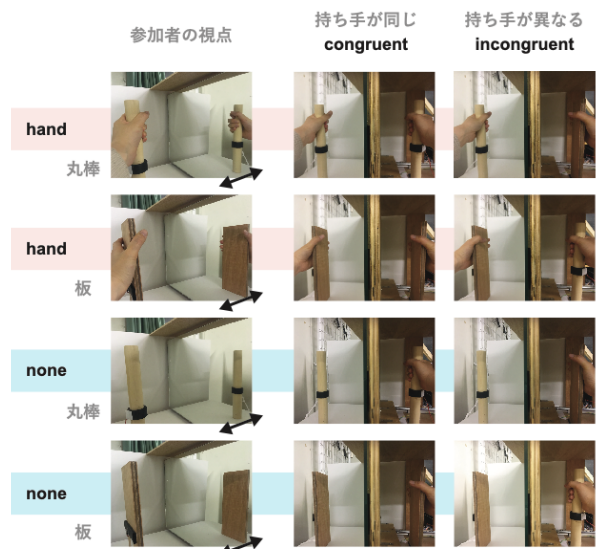


図 2 持ち手の条件

分類	アンケート文
S1	鏡の中の「棒 / 板」を握っているように感じた
illusory ownership	S2 鏡の中に右手が存在するように感じた
S3	鏡の中の「棒 / 板」が近づく場合に、右手が動いているように感じた
KMI	S4 鏡の中の「棒 / 板」が遠のく場合に、右手が動いているように感じた
illusory motion	S5 鏡の中の「棒 / 板」が動いているように感じた
invisible hand	S6 透明な右手を持っているように感じた
control	S7 切断されたかのように、右手が消えてしまったと感じた
S8	右手を2本以上持っているように感じた

表1 アンケート

### 3.4. アンケート

実験参加者は1試行が終わる毎にアンケート(表1)について回答を行った。これら8項目のアンケートは身体所有感(illusory ownership)、裏側の手の移動感覚(KMI)、持ち手の移動感覚(illusory motion)、透明な手の所有感(invisible hand)に関連する設問とcontrolで構成されている。これらはそれぞれ、-5(全くそう思わない)~5(とてもそう思う)の11段階で評価された。

### 3.5. 手続き

実験参加者は実験前に、左右の持ち手(双方丸棒)を握ってもらい、実際に鏡が動く様子を体験した(<hand-congruent>状態)。その際、鏡をしっかりと覗き込み、鏡面内の手ないしグリップの把持部を注視するよう実験者に指示された。また、試行後にはアンケート(表1)がある旨が伝えられ、記載の8項目と回答方法について説明を受けた。

実験では各環境条件を1試行ずつ行い、全ての条件を網羅する8試行×2週の計16試行を行った。各試行が終わった段階で実験参加者はアンケートに記入を行い、次の試行まで1分程度の休憩をとった。

## 4. 結果

左右の持ち手の組み合わせ、及び手前の手の配置の有無によって分けられた“グリップ感の相同性”条件(Condition)毎の設問(Questionnaire)の回答の被験者平均を図3に示す。これらについて被験者内2要因分散分析を行ったところ、Condition×Questionnaireの交互

作用が有意であった( $F(12, 84) = 7.40, p < .001, \eta^2 = 0.108$ )。さらに、各QuestionnaireにおけるConditionの単純主効果検定を行ったところ、身体所有感について述べた設問である<illusory ownership>及び<KMI>の項目でConditionによる効果が有意であった(<illusory ownership>  $F(3, 21) = 30.34, p < .001, \eta^2 = 0.477$ ; <KMI>  $F(3, 21) = 14.24, p < .001, \eta^2 = 0.424$ )。ただし、他のQuestionnaireにおいては有意な主効果は見られなかった。

より詳しい差を調査するため、<illusory ownership>についてHolm法を用いた多重比較を行ったところ、<hand-congruent>、<hand-incongruent>、<none-congruent>、<none-incongruent>の順で、錯覚の効果が高くなることが分かった。このことから手が明確に提示される<hand>条件においては、視覚的なグリップ感と筋固有感覚から伝わるグリップ感の齟齬が生じる<incongruent>の状態をマスクし、実際とは異なるグリップ感であったとしても鏡像に身体所有感を抱かせることが可能であることを示唆している。また、<hand>条件、<none>条件のどちらについても、左右の持ち手が同じである<congruent>条件の場合に身体所有感の低下が抑えられている。視覚的な手の提示がない状態においても、鏡面裏側の手のグリップ感と同じ特徴の持ち手が提示されることで、その持ち手対し身体イメージを投射することが可能であったことが分かる。

また、裏側の手の移動感覚に関する回答<KMI>についてもHolm法を用いた多重比較を行ったところ、<hand-congruent>が他の条件と比較して有意に錯覚効果が高かった。このことから、<KMI>においても手の明確な提示とグリップ感の相同性は、錯覚効果を高める

大きな要因であることが分かる。また、グラフの概形が<illusory ownership>と酷似していることから、身体所有感と KMI の深い関連性が示唆される。そこで<illusory ownership>と<KMI>について、Pearson の相関係数による検討を行ったところ、やはり強い正の相関が見られた ( $r = .800, p < .001$ , 図4) 。<hand-congruent>以外の Condition との差異は明確には得られていないものの、<KMI>もまた<illusory ownership>同様、<hand>条件の強い寄与と、<congruent>条件による錯覚の誘起が示唆される。

また<KMI>については S3, S4 の設問によって、誘起される移動感覚の方向(左右)に差があるかどうか調査した(図5) 。S3, S4 の設問と Condition で被験者内 2 要因分散分析を行ったが、これらの間に相互作用は見られなかった ( $F(3,21)=0.30, p = .824, \eta^2 = 0.001$ ) 。よって本実験においては身体方向へと鏡像が近づく場合と、離れる場合とで KMI の差は無かったと考えられる。

さらに、各 Condition における Questionnaire の単純主効果検定を行ったところ、すべての Condition において Questionnaire の効果がみられた (<hand-congruent>  $F(4,28)=19.98, p < .001, \eta^2 = 0.695$  ; <hand-incongruent>  $F(4,28)=7.01, p = .001, \eta^2 = 0.386$  ; <none-congruent>  $F(4,28) = 6.66, p = .001, \eta^2 = 0.355$  ; <none-incongruent>  $F(4,28)=8.52, p < .001, \eta^2 = 0.405$ ) 。そこで、各 Condition において Holm 法を用いた多重比較を行ったところ、<control>と他の Questionnaire 内の Condition 条件との間に幾つかの有意な差異が見られた。

特に<illusory motion>と<control>間に関しては<hand-incongruent>を除く全ての Condition 条件で<illusory motion>の値が高くなっていることから、鏡の動きに合わせて、ハンドル自体が移動している感覚は一樣に起こっていたことが分かる。また<none-congruent>においては<invisible hand>の値が<control>よりも有意に高くなっており、他の Condition 条件と比較しても僅かながら透明な手を受け入れやすい状況にあった可能性が示唆された。

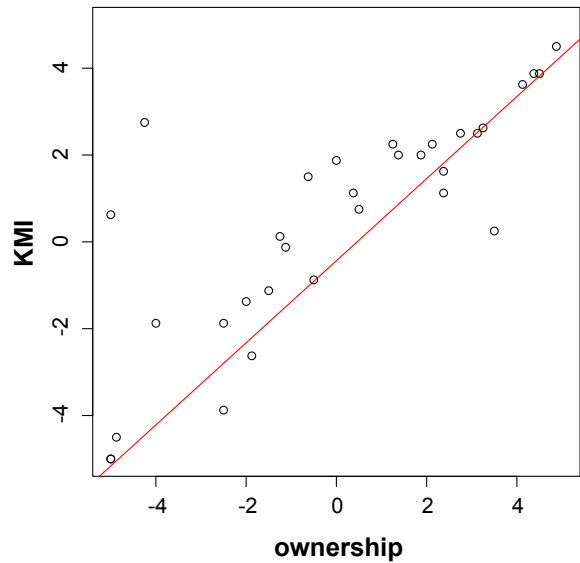


図4 KMI と ownership の相関

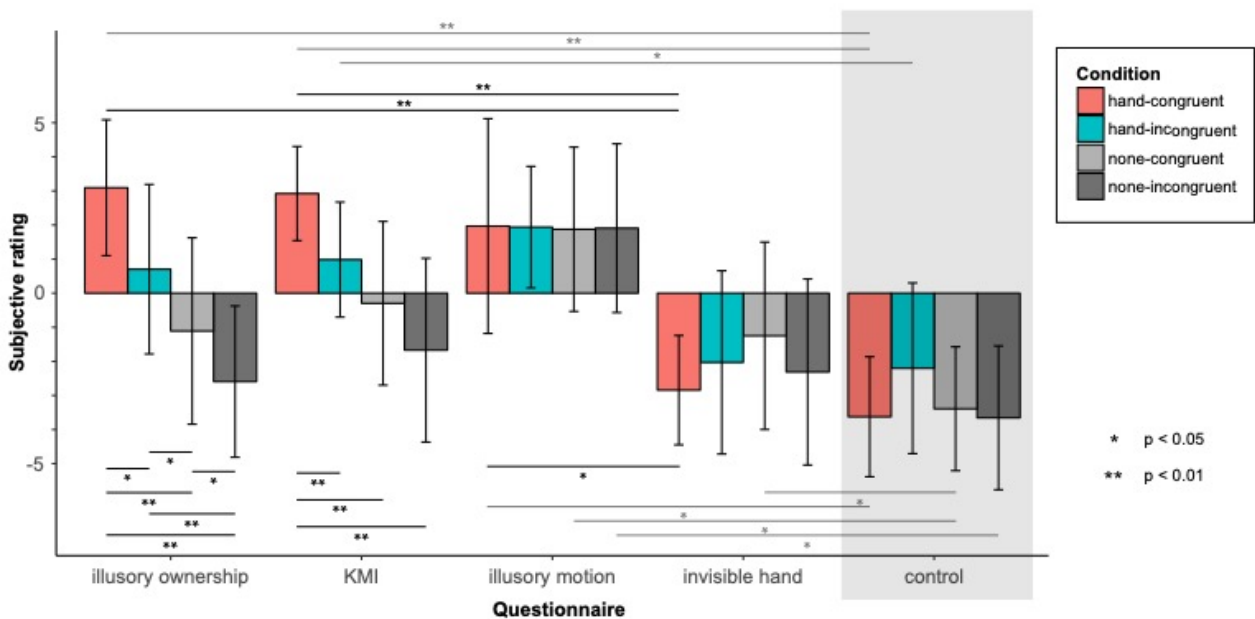


図3 アンケート結果

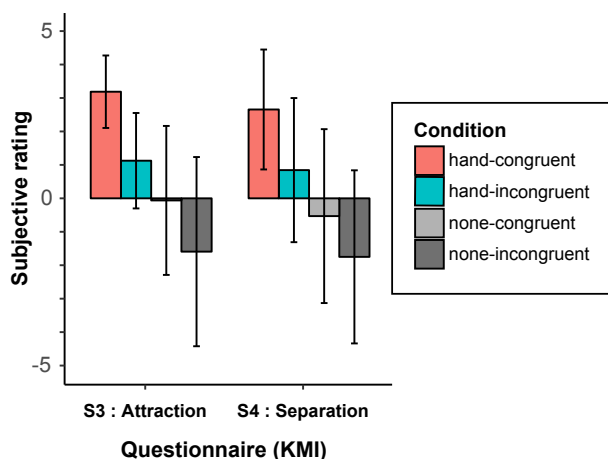


図5 KMI と ownership の相関

## 5. 考察

今回の実験から、KMI に対する“グリップ感の相同性”の効果は確かに存在するものの、“手の像の提示”による効果の方が明らかに大きな影響を持つことが示唆された。ただし手の像が提示されていないのにも関わらず、左右の持ち手が同一であることで身体所有感・KMI の効果の低下を抑える（被験者によっては引き起こす）ことができたことは興味深い。

また左右の持ち手が同一であった場合の身体透明感とは他の条件と比較して若干存在する傾向にあったものの、今回の実験においても Byrne ら[8]の実験同様、手前の手が透明になった感覚は明確には無かったことがアンケートの結果から伺える。ただし、<illusory motion>の値から鏡面内の持ち手の移動感覚はどの Condition 条件であったとしても一様に感じていたこと、<KMI>と<ownership>の強い相関が観察されたことから、持ち手の周りに対して身体所有感を抱くことにより、仮の身体の動きに自身の筋固有感覚が呼び起こされる Motor back projection[12]が起こっていたことは推測できる。今回の状況は Kondo らの、手袋・靴下のみを表示したアバタに対して身体所有感を抱くことができるという報告[13]と類似しており、本実験においても持ち手が身体の着用物のようなイメージで捉えられ、それらが移動することで裏側の手の移動感覚が誘起されたと考えられる。こうした Invisible body (hand) の研究では身体所有感の強度を測定するために「身体が透明になったと感じた」か問う設問が入ることが多いが、投射先の空間に身体所有感を感じることに、既存の身

体を透過する感覚とはまた別の文脈で捉える必要があるのかもしれない。

また KMI が誘起されやすい方向についての検討を行ったが、今回の実験結果からは左右差は見られなかった。これについては Rubber Hand Illusion によって移動感覚を誘起する研究[14]でも同様の傾向が見られたことから、移動感覚の誘起に大きな左右差は無いことが考えられる。

今回の実験では“手の像の提示”と“グリップ感の相同性”の効果をアンケートによる主観評価で直接的に比較を行った。今後はより客観的な指標を取り入れ、KMI を引き起こす要因について引き続き調査を行う。

## 文献

- [1] Ramachandran, V. S., Rogers-Ramachandran, D., & Cobb, S. (1995). “Touching the phantom limb.” *Nature*, 377(6549), 489–490.
- [2] Guerraz, M., Provost, S., Narison, R., Brugnon, A., Virolle, S., & Bressiani, J.-P. (2012). “Integration of visual and proprioceptive afferents in kinesthesia.” *Neuroscience*, 223, 258–268.
- [3] 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.
- [4] Ishihara, Y., & Kodaka, K. (2018). “Vision-Driven Kinesthetic Illusion in Mirror Visual Feedback.” *I-Perception*, 9(3), 1–11.
- [5] Metral, M., Chancel, M., Brun, C., Luyat, M., Kavounoudias, A., & Guerraz, M. (2015). Kinaesthetic mirror illusion and spatial congruence. *Experimental Brain Research*, 233, 1463–1470.
- [6] Packman, E. A. F. T. (2004). “Fooling the brain into thinking it sees both hands moving enhances bimanual spatial coupling.” *Experimental Brain Research*, 157, 174–180.
- [7] 石原由貴, & 小鷹研理. (2019). “Kinesthetic mirror illusion における「手のイメージの想起性」の影響” *認知科学*, 26(1), 72–85
- [8] Guerraz, M., Breen, A., Pollidoro, L., Luyat, M., & Kavounoudias, A. (2018). Contribution of Visual Motion Cues from a Held Tool to Kinesthesia. *Neuroscience*, 388(July), 11–22
- [9] 鈴木宏昭 (2016) “プロジェクト科学の展望”, 日本認知科学会第 33 回大会発表論文集, 20–25.
- [10] 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.
- [11] Byrne, A., & Preston, C. (2019). Mr Fantastic Meets The Invisible Man: An Illusion of Invisible Finger Stretching. *Perception*, 030100661882106.
- [12] Shibuya, S., Unenaka, S., Zama, T., Shimada, S., & Ohki, Y. (2018). “Spontaneous imitative movements induced by an illusory embodied fake hand.” *Neuropsychologia*, 111, 77–84.
- [13] Kondo, R., Sugimoto, M., Minamizawa, K., Hoshi, T., Inami, M., & Kitazaki, M. (2018). “Illusory body ownership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity.” *Scientific Reports*, 8(1), 7541.
- [14] Metral, M., & Guerraz, M. (2019). “Fake hand in movement: Visual motion cues from the rubber hand are processed for kinesthesia.” *Consciousness and Cognition*, 73(June), 102761.