

Mirror Visual Feedback を活用した鏡の移動による上肢の移動感覚の変調

石原由貴^{†1} 小鷹研理^{†1}

概要: 実験心理の分野では、鏡によって隠された一方の手を、鏡面に映ったもう一方の手の像と誤認させることで、隠された手の移動感覚が変調することが報告されている (MVF: Mirror Visual Feedback)。これらの研究は鏡面に映す手が動いていることが前提とされており、鏡面上の虚像の影響のみを純粹に取り出すことはできなかった。そこで、本研究は見えている側の手 (左手) を一切動かすことなく、虚像が与える視覚刺激が、隠れている側の手 (右手) の移動感覚に与える影響を検証するために、鏡と右手の水平位置をそれぞれ独立に、異なる速度で制御する装置を作成した。被験者実験において、鏡と右手を種々の速度条件で4秒間移動させたのちに、右手が左右どちらに動いたかを解答させたところ、被験者の主観的な移動方向は、実際の移動方向に対して、虚像の移動する方向にバイアスを受けることが分かった。さらに、この移動方向の変調の程度は、両手の姿勢が一致している時に、より強くなった。以上の結果は、MVFによるリハビリテーションに対する新たな応用を示唆するものである。

Mirror's movement distorts sense of hand motion

ISHIHARA YUKI^{†1} KODAKA KENRI^{†1}

Abstract: MVF (Mirror Visual Feedback) is known as the way of affecting sense of hand location using mirror, whereas how MVF affects illusory sense of motion remains unclear when the visible hand is fixed. We made an original MVF box containing movable mirror and a movable stand for the right hand, to probe the effect of their movement on sense of motion. In the experiment, eight participants were asked to answer "right" or "left" for the subjective motion's direction of the right hand after their horizontal movements in various situations. The results showed that the sense of motion in the right hand was strongly affected by the mirror's motion, regardless of both hands posture, while the effect of the distortion was especially stronger when both hands are anatomically congruent with each other.

1. 背景

鏡はその表面にもう一つ世界を映し出す。鏡の模倣力を利用した実験として、我々の身体を錯覚させる Mirror Visual Feedback (MVF) がよく知られている。この実験では被験者の両腕の間に鏡を立て、被験者の一方の手のみを鏡に映し出す (以下、この鏡に映り込む手を「鏡面手前の手」と呼ぶ)。鏡に映る手の像を見ながら鏡面手前の手を動かすと、鏡面上の手の像 (以下、虚像と呼ぶ) が、視界からは隠されているはずのもう一方の手 (以下、「鏡面背後の手」と呼ぶ) そのもののように感じられるだけでなく、動いていないはずの鏡面背後の手が動いているかのような感覚を生み出す[1][2]。この錯覚は片腕が無い場合や麻痺している状態においても起こり、幻肢痛や知覚運動障害、片側不全麻痺などへのリハビリテーションに応用されている[3-7]。MVFがこうしたリハビリに有効なのは、それまで失われていた脳の運動指令に対する隠された側の手の視覚的なフィードバックが、虚像によって与えられるためと考えられている。また近年では、虚像による視覚の影響に加えて、左右の手の固有感覚が同期し変化することに起因する鏡面手前の手固有感覚の影響も、MVFにおける錯覚を引き起こす要因であるとして関心を集めている[8-10]。

このように MVF は虚像による視覚と、鏡面手前の手を動かした際に起こる固有感覚の複合感覚により、鏡面背後の手の位置感覚や運動感覚を変調させる[11-18]。この変調の強度は、鏡に映し出された虚像に対し、いかに身体所有感 (Body Ownership: 我々が普段自身の身体に対して自然に抱いている「これは自分の身体である」という感覚) を抱くことができるかどうかに関わっている。身体所有感を変調する、MVFと類似した認知科学的実験の1つに、Rubber Hand Illusion (RHI)[19]が挙げられる。RHIは被験者の目の前に置かれたゴムの手を実験者が触ると同時に、隠された被験者の手に対しても同じ箇所に触覚刺激を与えることで、ゴムの手に身体所有感を抱くようになる実験である。MVFもRHIも現実の手から形態の似た偽物の手に身体所有感が移動することにより、被験者は上肢に関する様々な属性を誤認する。MetralらのMVFの実験では、鏡面背後の腕の肘部分を固定した状態で、両手の上下運動を行った際、それぞれの位相のずれが大きくなればなるほど、錯覚の効果が減退することを報告した[11]。これは、疑似身体と実際の身体との距離が大きくなるほど身体所有感変調の効果が低下するという、RHIで観測される一般的な特徴と一致している[20]。また、MVF中の鏡面背後の手の運動意思と視覚的な運動が一致する場合に錯覚がより強く、一致しない場合に弱くなる報告もされている[12]。これに関しても、能動的な動作が疑似身体と同期した場合には錯覚が

^{†1} 名古屋市立大学
Nagoya City University

強化されるという RHI の実験の報告と類似している[21]. さらに、こうした腕の移動感覚の変調は上下運動のみに留まらず、平面的な動作に関しても適用される。例えば Holmes らの実験[17][18]では、鏡を挟んで左右に配置された手を同時に動かした後に、鏡面背後の手のみを指定された位置まで移動させる課題を与えたところ、虚像をマスクした対照条件と比べて到達誤差が増大するという結果が得られている。一方で、左右の手に異なる動作をさせてから課題を行った場合には、ターゲットへの移動精度が向上したことから、虚像が誘発する位置感覚の変調の程度は、身体所有感によって左右されていることが示唆されている。

MVF に関するこれらの先行研究は、いずれも視覚的に動いている虚像を提示するにあたって、鏡面手前の手の動きが伴うことを前提としている。先に述べたように MVF では、虚像による視覚的影響に加えて鏡面手前の手の固有感覚や運動感覚が、鏡面背後の手の属性に影響を及ぼすことが知られている。したがって、仮に、鏡面背後の手の運動感覚の発生において、虚像による視覚的影響のみを取り出そうとするならば、「鏡面側の手を一切動かさないままに鏡面上の虚像のみが動く」というような特殊な機構が必要となるであろう。このような思考実験を具体化する第一歩として、筆者らは昨年度、機械的な機構を用いて、鏡面のみを水平方向に移動制御することで、鏡面手前の手の動きにかかわらず虚像を移動させる装置を制作した。この装置を、卒業制作展等で複数人に体験してもらったところ、アンケートレベルでは「鏡の向こう側にある手が動いているように感じる」という感想を多くの人から聞くことができた。本研究の主要な目的は、本装置の効果を、心理実験により適切に統制のとれた状態で計測することで、MVF において発生する擬似的な手の移動感覚における視覚的影響が果たす役割をより詳細に検証することにある。

以上の目的に照らしたときに、最も簡易な実験系は、鏡を左右に動かしたうえで「鏡面背後の手」に移動感覚を感じたか否かをアンケートで問う事である。しかしながら、このような手法では、1)視覚によって確認される鏡の物理的移動の有無を移動感覚の有無と短絡する「肯定バイアス」の作用が懸念されるとともに、2) 仮に虚像のみによる移動感覚が確認された場合にも、それが固有感覚に由来する移動感覚にどの程度影響するものなのかは全く不明のままである。そこで、本研究では、鏡に加えて鏡面背後の手を短時間だけ同時に移動させたうえで、鏡面背後の手の移動方向を問う二肢強制選択法による恒常法を採用する。ここで重要なのは、鏡と鏡面背後の手の移動方向は独立に決定されるため、視覚的な運動方向と固有感覚に与えられる運動の方向は一致したりしなかったりする点にある。これにより、肯定バイアスが除去されるとともに、<視覚に由来する移動感覚>と<鏡面背後の手の固有感覚に由来する

移動感覚>のそれぞれが、複合的な移動感覚に対してどのようなバランスで寄与するのかについて詳細に解析することが可能である。とりわけ、重要な点は、恒常法を採用することで、それぞれのモダリティーで矛盾した移動感覚を与えたときの均衡点 (=主観的な静止ポイント) が割り出されることにある。加えて、本実験においても先行研究同様、視覚に由来する移動感覚が MVF における身体所有感に基づいたものであるか否かを確認するために、左右の手の姿勢が同期しているかどうかの要因の影響についても検証した。

2. 実験

本実験では以下の3点の検証を行なう。

- (1) 鏡面手前の手を完全に動かさない状態で、鏡の移動によって運動する虚像を提示した際、鏡面背後の手の移動感覚を生み出すことができるか
- (2) 本実験において発生した移動感覚において、虚像による視覚的移動刺激と鏡面背後の手の固有感覚がそれぞれの程度寄与しているか
- (3) 純粋な視覚のみに由来する移動感覚が、身体所有感に基づいたものであるかどうか

2.1 被験者

被験者は8人の大学生(男性3名、女性5名)である。

2.2 装置

本実験のために制作された可動式のミラーボックスを用いる。これは面に対して垂直の方向に動くことのできる 30 x 45 cm の鏡と、底面の板から 13cm の高さに手を置くことのできる手置台(厚み 1cm)を左右に有している。これらの台は鏡から左右 15cm ずつ離れた位置に配置される。人差し指の先端を置く位置の目印として、台には手前から 30cm の部分にシリコンの突起が貼り付けてある。鏡面側にある左手を置く台は非可動式であるが、鏡背面にある右手を置く台は鏡と同じく可動式となっている。この装置はテーブルを前にした被験者に対し鏡面が左側となるよう置かれる。また、鏡の右側は黒の布と板で覆われ、被験者が覗き込めないようにした。

可動式となっている鏡と右手の台は、リニアアクチュエータ (Firgelli : L16-P Miniature Linear Actuator 140mm 150:1) を Arduino と Processing で制御することで動作する。動作時に起こるモーター音の影響を抑えるため、実験中、被験者にはヘッドホンを装着してもらい、モーターが動いている間、ホワイトノイズを聞かせた。このモーターや音の制御は Processing によって自動で行われ、被験者が手を動かす等の操作を行なう必要は無い。また、被験者から見た鏡面への写り込みの影響を少なくするため、無地の壁が鏡の正面(被験者の左側)となる位置で実験を行った。

2.3 刺激

左手の台は固定されているが、鏡と右手の台は被験者から見て左右に動くようになっていた。4秒につき、鏡は16(mm)、右手の台は4, 8, 12, 16, 20(mm)の距離を進むことができる(図1)。但し、後述する装置の精度の問題で、図1のHand Movement部分の円に対応する範囲で誤差が見られ、目標の距離から前後することがあった(詳細は3.1節)。これらの移動速度は非常に低速であるが、大部分は移動知覚が可能な速度である。Pickettらによると、関節がpassiveに変位する際の移動知覚の検出閾値は、およそ秒速0.3degであるとされている[22]。この速さは、本実験の手の移動速度に換算すると、およそ<6mm / 4秒>に相当する(前腕長を30cmで計算)。従って、本実験における手の移動速度の大部分(8, 12, 16, 20 mm / 4秒)は、固有感覚の上で移動感覚として十分に検出可能な速度である。

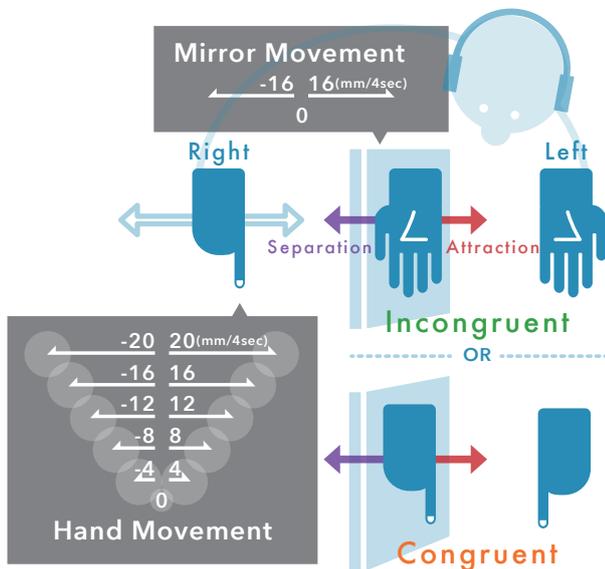


図1 鏡と右手の動作イメージ

Figure 1 Relation between two hands and one imaginary hand on mirror in two posture conditions

鏡と右手を置く台は1試行につき等速かつ同時に4秒間移動する。この時、鏡は初期位置から同方向への動作2回分・32mmよりも大きく離れない範囲内で動作するようにした。同様に、右手の台は初期位置から一度の移動の最大移動量・20mmよりも大きく移動しない範囲内で作動する(ただし、実験装置の移動速度のノイズにより、範囲外にはみだすこともあった)。また、この速度変数には鏡ないし右手が動かない場合、両方が動かない場合も含まれる。前述の速度と動かない組み合わせを足し、鏡の移動速度3種(図1:Mirror Movement部分) x 手の移動速度11種(図1:Hand Movement部分)の計33通りの動きのパターンを3度、計99試行を1セットとして扱った。刺激の提示は先に述べた移動範囲を守りつつ、33回毎に一通りの刺激パター

ンを提示できる範囲で、ランダムな順に行っている。また、鏡と右手の台の位置は1セットを終える毎に初期位置まで戻される。

また、本装置においても虚像に対する身体所有感の影響が現れるかを確かめるため、手の形態同期環境条件として左手と右手の姿勢が共に台を握り込む形であるCongruent環境、隠された右手が台を握り込み、左手は仰向けに手を配置したIncongruent環境の2環境を用意した(図2:2環境の違いは白丸の部分)。どちらの環境も、台に付けられた印が人差し指末節部分に当たる姿勢となるように位置を定めた。鏡面手前の手となる左手は1セットを終える毎に姿勢を変え、1人につき手の形態同期条件を2度ずつ、計4セットの396試行を行った。(実験者は被験者を半数ずつに分け、最初にとる姿勢がCongruent環境のグループと、最初にとる姿勢がIncongruent環境のグループに振り分けている。)

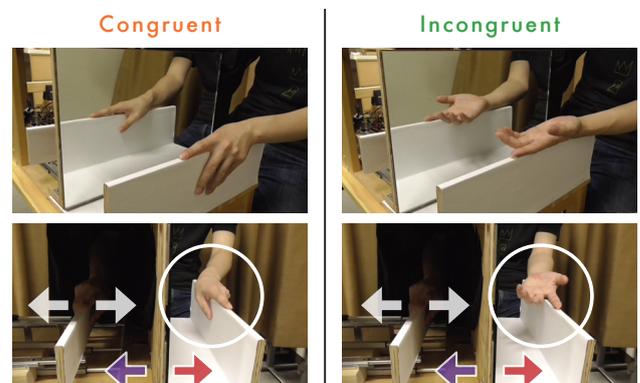


図2 手の姿勢による鏡の見え方の違い

Figure 2 Appearance of two anatomical conditions

2.4 手順

被験者は装置が置かれた机の前に座り、ヘッドホンを装着する。また、鏡の裏側を見ることができないよう、実験者によって肩に黒い布をかけられる。被験者は左側から鏡面を覗き込む姿勢をとり、鏡面側の台に左手を、裏側の台に右手を置く。右手を置く際は中身が見えないよう、実験者が手の位置へと誘導した。

上記の準備を終えた後、実験者は被験者に対し「実験中には常に鏡の中に映る手を眺め、写り込んだ手を自身の右手だと思えるようにしてください」と説明し、鏡と右手の台を実際に1試行分動かしてみせた。モーターは動き始めてから4秒経過すると自動で停止し、同時に鳴っていたヘッドホンからのホワイトノイズも止まる。被験者にはこの音が鳴り止んだ瞬間、「ノイズが鳴っている時に自分の右手が右と左、どちらに動いたと感じたか」を可能な限り早く口頭で答えてもらった。この際、被験者が「右手は動いていない」「どちらか分からない」と感じた場合であっても、強制的に右か左かを選ぶよう指示した。また、被験者が実験

の流れを掴むまで装置を動かし、2 回程度左右を答える練習を行った。実験が始まると、実験者は被験者の回答を 1 試行毎に PC に打ち込み、入力後直ちに次の試行を行った。1 つ 1 つの試行は連続して行ったが、1 セットを終える毎に 2 分間の休憩を挟み、被験者には手を台から離してもらい、楽な姿勢をとらせた。

3. 結果

3.1 分析方法

個々の被験者の結果を付録 A.1 に示す。横軸は右手の移動速度を表している。この値は被験者から見て左方向を正の値とし、右方向を負の数としている。右手の移動速度は、実験装置の精度上げにつきが不可避であったため、-22, -18, -14, -10, -6, 0, 6, 10, 14, 18, 22mm の範囲 (-22~-6 は値+4 未満・値-4 以上, 0 は-2 以上・2 以下, 6~22 は値-4 超・値+4 以下の範囲を含む。この範囲は図 3: グラフ下の薄青半円部分に対応) 別に集計し、平均値を算出した (移動速度はリニアアクチュエータから返ってくる移動前後の位置の値から算出)。0 のみ適用範囲が小さいのは、動きの無い速度であることから、より微細な範囲設定の必要性を感じたためである。また、この速度のノイズは被験者の装置への圧のかけ方等が原因となって起こったと考えられる。そのため、移動刺激が 4 秒間一定の速度であった確証は無いが、速度が低速であること、被験者の手が台の稼動中に動かなかったことから、突然大きく動き出す、といった急激な動作があったとは考えにくい。よって、動作の不安定さによる被験者の回答への大きな影響は無かったと考えられる。また、これらの横軸の値は鏡の移動速度 (16mm/4 秒) を基準とした単位に変換した。縦軸は「左に動いた」と答えた率、つまり右手が左手側に近づいたと答えた割合 (Ratio of “Attractive” response : RA) をとっている。

グラフ内の円は実測値であり、曲線は実測値から算出した近似曲線 (シグモイド曲線) である。これは以下の式を用いており、a と b は R を用いて算出されている。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}}$$

数式 1 近似曲線の計算式

Equation 1 Formula of sigmoid

この曲線は後述する PSS という値を算出するためにも用いる。また、実線と塗りつぶされた円は Congruent 条件を、点線と白抜きの円は Incongruent 条件を表す。さらに、塗り分けられた 3 色は鏡の移動条件を表している。紫色は鏡が右側に動く、鏡面上の虚像が視点から遠ざかっているように見える条件 (Separation 条件)。赤色は鏡が左側に動く、虚像が手前に近づいてくるように見える条件 (Attraction 条

件)。緑色は鏡が動かない条件 (Pause) である。

被験者毎の RA 平均を示したグラフが図 3 である。このグラフにおいて算出された近似曲線のうち、RA が 50% を示す部分の右手の移動量を PSS (Point of Subjective Stationary : PSS) と呼ぶ。これは、これまでモニタ上の視覚刺激に対する心理実験で採用されてきた指標 [23] である一方、被験者自身の身体の移動感覚に対して適用されたことはない。移動方向の回答の均等点である PSS は主観的に左右どちらに動いているのか判断がつかない、主観的な静止ポイントに対応している。これを各条件間で比較することで、鏡の移動による影響と鏡面背後の手の移動による影響が及ぼす詳しい割合を確かめることができる。

また、鏡が静止状態の際の PSS を基準として、Attraction・Separation 条件における PSS を再計算したものを ΔPSS とする (具体的には各値から Pause の PSS を引いたもの)。これにより、鏡が移動することによって、鏡面背後の手の移動判断の基準がどの程度変化したのかについて、Congruent 環境と Incongruent 環境との間で比較することが可能となる。

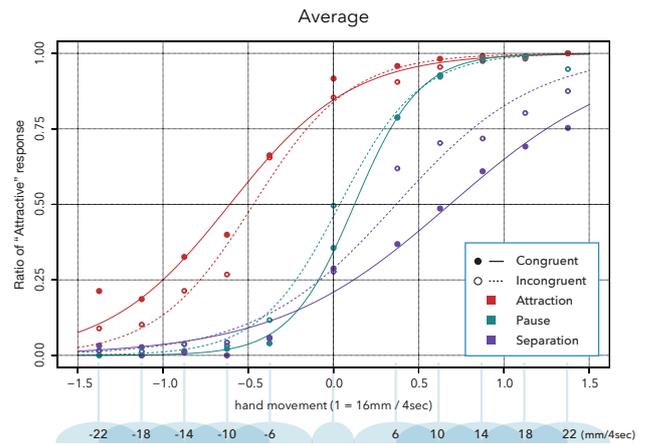


図 3 各条件下での RA 平均

Figure 3 Average of RA

3.2 鏡の移動による影響

鏡の移動による右手の移動感への影響を調べるため、各条件の PSS を比較した。図 4 グラフは、鏡の移動速度別 PSS の平均を手の一致条件毎に示したものである。鏡の動き毎に PSS 値の比較をするため、対応のある 1 次元分散分析を行ったところ、Congruent, Incongruent 環境ともに、鏡の移動速度による PSS 平均に差があることが 0.001% 以下の強い水準で得られた。そこで各鏡の移動速度別に比較を行なうため、手の形態同期環境毎に Holm 法による多重比較を行ったところ、全ての鏡の動作条件下で有意な差が得られた。(表 1)

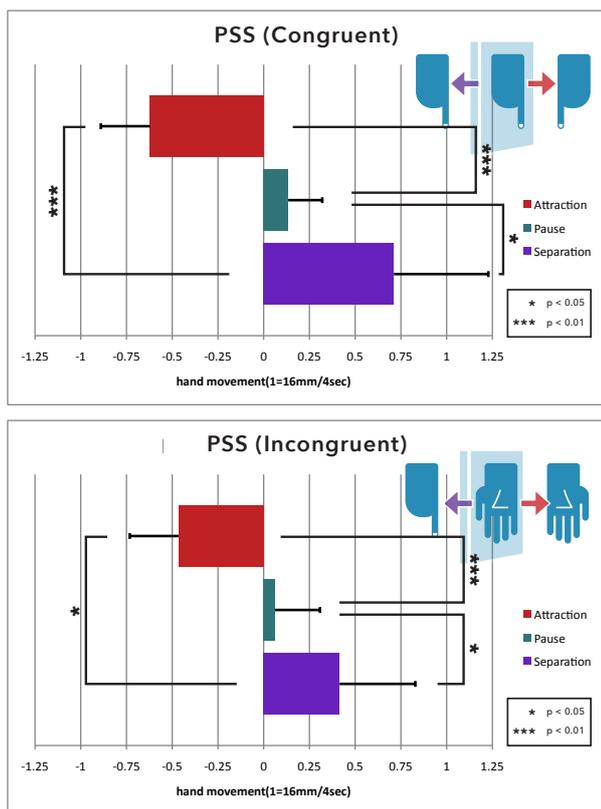


図 4 PSS における鏡の移動条件間の比較

Figure 4 Comparison of PSS among three kinds of mirror movement

表 1 PSS 値の比較 (Holms 法による多重比較: 対応あり, df は全て 7)

Table 1 Comparison of PSS

手の同期条件	鏡の速度	p
Congruent	Attraction-Pause	p<0.001
	Separation-Pause	p<0.05
	Attraction-Separation	p<0.01
Incongruent	Attraction-Pause	p<0.01
	Separation-Pause	p<0.05
	Attraction-Separation	p<0.05

先に述べたように、PSS は主観的に鏡面背後の手がどちらの方向に動いたのか判断ができない状態の時の右手の移動速度を表している。例えば、Congruent 環境における、鏡が手前に移動する際の PSS 平均は -0.62 である。これは、右手が鏡から離れる方向に動いたとしても、右手の速さが 10.0mm/4 秒を超えない限りは、実際とは逆の移動方向が平均的に多く感知されていることを示している。同様に、鏡が視点から離れる際は、右手が手前に近づいていても、その速さが 11.4mm/4 秒を超えない限り、平均的に、感知される手の動きは鏡の動きに従ったものとなる。このような傾向は、Incongruent 環境でも同様に観察されたため、鏡による鏡面上の虚像と隠された本物の身体の姿勢が一致して

いるか否かにかかわらず観測されることが示された。

3.3 手の形態同期の影響

Congruent 環境と Incongruent 環境間の比較を直接に行うため、 Δ PSS を比較したのが図 5 のグラフである。まず、Attraction 条件における Δ PSS を手の形態同期環境間比較するため、対応のある t 検定を行った。すると、Incongruent よりも Congruent 環境の方が有意に低い結果が得られた ($t(7)=3.53$, $p<0.01$)。鏡面上の虚像が手前に近づいてくる時、両手の形態が一致している場合の方が、一致していない場合よりも錯覚を受けやすくなるこの結果は、Congruent 環境時、虚像に対する身体所有感が移動感覚の変調に影響を及ぼすことを示している。

しかし、Separate 条件では Δ PSS における手の形態同期条件間の有意な差は見られなかった。 ($t(7)=1.51$, $p=0.17$)。

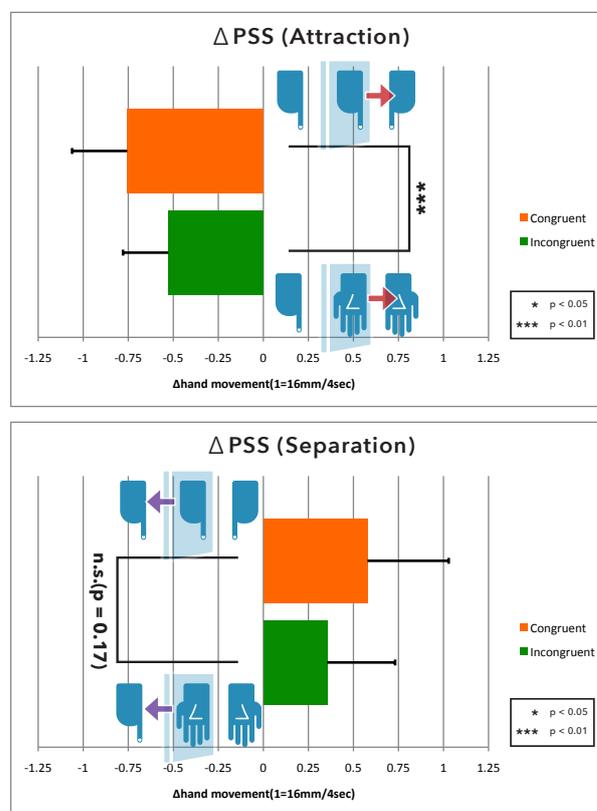


図 5 Δ PSS における手の一致条件間の比較

Figure 5 Comparison of Δ PSS between Congruent and Incongruent conditions

4. 考察

結果の詳細な考察の前に、本実験の課題において被験者が下していた左右の判定が、右手の移動前後の姿勢差分によるものではなく、右手の移動に伴って生じる固有感覚の時間的な知覚に基づくものであることを以下で確認する。本実験において、移動前後の右手差分は最大でも 20mm である。この距離は、固有感覚の解像度に照らしたときには、

それほど大きな値とは言えない。実際、RHIの錯覚効果を検証するうえで一般的な指標とされている proprioceptive drift (固有感覚の移動量)を計測する実験では、錯覚の有無にかかわらず、手の位置感覚が20mm以上の誤差を持つことは少なくない[24][25]。一方で、第2章でも指摘した通り、移動知覚のための関節角速度の閾値は、上肢の平行移動に変換するとおよそ<6mm/4秒>となり、その解像度は、絶対的な位置感覚と比較すると十分に細かい。さらに、図3で確認できるように、鏡の動きを無視できる Pause 条件における応答曲線の75%弁別閾値は<6mm/4秒>付近に存在している。これらの事実は、(少なくとも虚像が動かない状況下では)被験者の左右判定が、移動前後の右手の姿勢の違いではなく、短い時間の移動中に発生する角速度知覚に基づくものであったことを強く支持している。一方で右手の移動と同時に、鏡が左右に移動するケースでは、鏡に映された視覚像の時間変化(あるいは位置差分)もまた、左右判定の基準となり得る。しかし、この場合も、右手の固有感覚の時間的知覚が無視されているわけではないことは明らかである。実際、仮に視覚のみを判定基準として採用するならば、鏡が動く条件では、完全に鏡の移動方向に従った回答となるはずである。しかし図3において見られる応答曲線は、鏡が移動する条件 (Attraction, Separation) であっても、Pause 条件において得られたシグモイド曲線の形状を維持している。すなわち、本実験において鏡面背後の手に生じた移動感覚は、虚像による視覚的な移動感覚と、鏡面背後の手の固有感覚に由来する移動感覚とが複合的に統合されることで形成されたものである。したがって、固有感覚に由来する移動感覚は、虚像が呈示されたことにより排除されたのではなく、変調されたと考えるのが自然である。

本実験によって起こる移動感覚の変調度については、図4のPSSから読み取ることができる。前述の通り、形態同期環境別に見た鏡の移動速度条件の間には有意な差が見られ、被験者の移動感覚は鏡の移動方向へとバイアスがかけられていることが分かった。この変調された移動感覚における、虚像による視覚的な移動刺激と固有感覚の寄与のバランスは、鏡面背後の手の移動速度と応答曲線(図3)との関係性を見ることで算出可能である。鏡の移動距離はアクチュエータによる水平移動の量である。虚像は鏡面手前の手を反射した像であるため、虚像は常に鏡面手前の手と鏡の間の距離を、鏡の奥へととった位置に現れる。つまり、虚像による視覚的な移動速度は、鏡の移動速度に対して2倍となる。それを踏まえると、虚像はAttraction条件で2、Separation条件で-2の速度で移動するため、PSSの値がAttraction条件で-2、Separation条件で2の値をとった時に、被験者は鏡面背後の手が左右どちらに動いたのか分からない状況となり、虚像による視覚的な移動刺激が鏡面背後の手の固有感覚を、ちょうど打消す状態となる。実際には、虚像

による視覚的な移動刺激の強度は鏡面背後の手の固有感覚の強度と比べ、Congruent環境下のAttractionの場合0.31倍、Separationの場合0.36倍であることが分かった。またIncongruent環境下の虚像の影響はCongruent環境よりも低くなっている。このことは後述の虚像に対する身体所有感の強度と関係すると考えられる。これまでの移動感覚に関連したMVF研究において、特定条件下における移動感覚の強度の計測のみではなく、各条件(本研究での虚像による視覚的な移動刺激と鏡面背後の手の固有感覚)が背後の手の移動感覚の変調にどのようなバランスで寄与しているのかを算出したことは、本研究が初めてとなる。

次に、本装置を用いることによって身体所有感が移動感覚の変調の程度にどのように影響するかについて議論する。図5の結果から、視覚と固有感覚が矛盾している場合の錯覚効果は、虚像と見えない手の形態が一致していない場合でも生じている。通常、錯覚の誘起に身体所有感が関わる場合、形態的な一致が無い場合には錯覚は起こりづらくなることから、この点は、本実験の錯覚効果と身体所有感との繋がりが希薄であることを示唆する。しかし、本実験では能動的な手の動作が存在しなかったために、手の形状の差異が積極的に顕在化しない状態であったと考えられる。そのため、虚像と本物の鏡面背後の手の形状が異なるIncongruent環境であっても、少なからず身体所有感が生じていた可能性がある(つまり、異なる形状の手を自分の手のように感じていた可能性がある)。この点は、今後、例えば、手をマスクするように、物体などを虚像として投影することで、より精緻な解析が可能となるはずである。その一方で、PSSの移動量が、全体的にCongruent環境の方が強かったことは、虚像に生じている運動が自分の身体に生じているものと錯覚させるうえで、虚像に対する身体所有感の大小が重要なパラメータとなることを示している。Incongruent環境に対するCongruent環境の錯覚効果の強さが、Separation条件と比較してAttraction条件でより強かった点も、本実験で観測された移動感覚の変調が、身体所有感の変調をトリガーとしていることを示唆するものである。なぜなら、そもそもRHIは身体近傍空間外に向かって一定距離はなれると、生じないとされているためである[20]。なお、個人毎のデータを扱った際、S4の被験者のみ、鏡の影響が殆ど出ていなかった。身体所有感の移動を取り扱う錯覚において、影響を受けない人がどのような特徴を持っているのかは議論されているところである。例えばAsai.Tの研究では、共感や統合失調症の度合いが高いとRHIは起こりやすいと報告されている[26]。本研究においても、現行の実験と合わせ、被験者のバックグラウンドをアンケート等によって調査することで、視覚刺激が与える固有感覚への影響が低いことが何を指し示すのか、調査し、議論をしていきたい。

本研究はMVF研究において初めて、鏡面手前の手を一

切移動させず、鏡の移動による虚像の視覚的な動きから鏡面背後の手に移動感を与える手法を提唱し、その効果を確かめた。これは従来利用されてきた MVF のリハビリテーションにおいて、鏡面手前の手を動かす必要のない治療方法を確立できる可能性を示している。例えば CRPS (複合性局所疼痛症候群) の治療例では、患者が身体部位の一部が、従来あるべきはずの場所よりもずれた位置にあるように感じ、痛みを感じる病状報告がなされている[27]。この際、MVF 治療は有効であるものの、患者が怪我や筋肉の衰えによって鏡面手前の手を動かさないケースは十分に考えられる。この時、可動式の鏡を備えた MVF 装置を用いることで、片腕を動かすことなく、リハビリテーションを行なうことができるだろう。類似の研究として、鏡に特殊なレンズを用いて虚像のサイズを変調させることにより、痛みを軽減させたという報告があることから[28][29]、視覚のみの干渉によって病状を改善できる可能性は十分にある。また、本研究では装置にリニアアクチュエータによる自動制御を取り入れているが、これを現場に適用させることによって、補助者無しでの治療を行なうことができる、運用方法への応用の可能性も秘めている。

リハビリテーション以外にも、VR 等の現実の身体空間と仮想的な身体空間に差異を引き起こすコンテンツへの応用も十分に考えられる。VR においてよく用いられる手法に、一定方向の視覚的運動パターンを見ている際、パターンと逆の方向に観察者が動いているように感じる錯覚 Vection がある。これは身体全体の移動感を作り出すものとして利用されている。対称的に、本実験では単に視覚刺激を与える簡易な手法を用いつつも、従来 VR で行われてきた身体全体での移動感の付与ではなく、特定の身体部位だけを狙って移動感覚を与える手法を用いている。この錯覚を起こすメカニズムを解明し、VR 内のコンテンツ設計に当てはめることは、VR 内の操作体験の自由度を高める環境づくりにつながる。例えば、VR コンテンツ内に提示されたオブジェクトに対しユーザが手を伸ばす操作を行った際、ある程度の移動方向の齟齬が発生したとしても、コンテンツ内で表示されるユーザの身体の一部 (アバタの手) が正確にオブジェクトに向かって手を伸ばした像を提示することで、ユーザは移動方向の齟齬を感じない可能性がある。これを実現することは、VR 内でのスムーズな操作感を提供することにつながる。但し、本研究では外部の移動装置による受動的な移動感覚を取り扱ったため、隠された身体の能動的な動きによる影響も引き続き調査する必要がある。

5. むすび

本研究では、MVF 環境において、視覚刺激から得た身体像の移動が、鏡面背後の手の移動感覚に及ぼす影響を検証する実験を行い、鏡の移動により、鏡面手前の手が静止し

ている状況下であっても、鏡面背後の手の移動感覚が変調することを確認した。さらに、この効果が、虚像と隠された手の姿勢の不一致によって減退することを確認するとともに、複合的な移動感覚が生じるうえで、視覚情報と固有感覚の情報がどのようなバランスで統合されるかについて、重要な知見を得た。こうした身体性の錯覚の原理・強度を明らかにすることは、事実と異なる出来事を、少ない環境装置によって効果的に生々しい現実として体験させる手段の発見に繋がる。それは MVF の従来の利用方法であるリハビリテーション、また発展途上にある VR 等のコンテンツ設計の基礎的研究につながっていくことが期待される。さらにこれらの研究には「我々が揺らぎないものとして日々感じている身体がいとも容易く変調してしまう面白味」、そして「容易く変調してしまう自己の存在への問いかけ」が内包されている。今後も身体性の錯覚研究を通じ、我々がどのように身体、そして自分自身を感じているのかを探っていきたい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 15K21281 の助成を受けたものです。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Ramachandran, V. S. , & Rogers-Ramachandran, D. (1996). Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 263(1369), 377–86.
- [2] Ramachandran, V. S. , Rogers-Ramachandran, D. , & Cobb, S. (1995). Touching the phantom limb. *Nature*, 377(6549), 489–490.
- [3] Ramachandran, V. S. , & Altschuler, E. L. (2009). The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain*, 132(7), 1693–1710.
- [4] Hunter, J. P. , Katz, J. , & Davis, K. D. (2003). The effect of tactile and visual sensory inputs on phantom limb awareness. *Brain*, 126(3).
- [5] Altschuler, E. L. , Wisdom, S. B. , Stone, L. , Foster, C. , Galasko, D. , Llewellyn, D. M. , & Ramachandran, V. S. (1999). Rehabilitation of hemiparesis after stroke with a mirror. *Lancet (London, England)*, 353(9169), 2035–6.
- [6] Sathian, K. , Greenspan, A. I. , & Wolf, S. L. (2000). Doing it with mirrors: a case study of a novel approach to neurorehabilitation. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 14(1), 73–6.
- [7] Dohle, C. , Püllen, J. , Nakaten, A. , Küst, J. , Rietz, C. , & Karbe, H. (2009). Mirror Therapy Promotes Recovery From Severe. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 23(3), 209–217.
- [8] Chancel, M. , Brun, C. , Kavounoudias, A. , & Guerraz, M. (2016). The kinaesthetic mirror illusion: How much does the mirror matter? *Experimental Brain Research*, 234(6), 1459–68.
- [9] Anchoring the “floating arm”: Use of proprioceptive and mirror visual feedback from one arm to control involuntary displacement of the other arm. *Neuroscience*, 310, 268–78.
- [10] Guerraz, M. , Provost, S. , Narison, R. , Brugnion, A. , Virolle, S. , & Bresciani, J. -P. (2012). Integration of visual and proprioceptive afferents in kinesthesia. *Neuroscience*, 223, 258–68.

- [11] Metral, M. , Chancel, M. , Brun, C. , Luyat, M. , Kavounoudias, A. , & Guerraz, M. (2015). Kinaesthetic mirror illusion and spatial congruence. *Experimental Brain Research*, 233(5), 1463–70.
- [12] Metral, M. , Blettery, B. , Bresciani, J. -P. , Luyat, M. , Guerraz, M. , Hay, J. , ... Altschuler, E. (2013). Trying to Move Your Unseen Static Arm Modulates Visually-Evoked Kinesthetic Illusion. *PLoS ONE*, 8(11), e80360.
- [13] Guerraz, M. , Provost, S. , Narison, R. , Brugno, A. , Violle, S. , & Bresciani, J. -P. (2012). Integration of visual and proprioceptive afferents in kinesthesia. *Neuroscience*, 223, 258–68.
- [14] Izumizaki, M. , Tsuge, M. , Akai, L. , Proske, U. , & Homma, I. (2010). The illusion of changed position and movement from vibrating one arm is altered by vision or movement of the other arm. *The Journal of Physiology*, 588(15), 2789–2800.
- [15] Altschuler EL (2005) Interaction of vision and movement via a mirror. *Perception* 34:1153–1161.
- [16] Packman, E. A. F. T. (2004). Fooling the brain into thinking it sees both hands moving enhances bimanual spatial coupling. *Exp Brain Res*, 157, 174–180.
- [17] Holmes, N. P. , & Spence, C. (2005). Visual bias of unseen hand position with a mirror: spatial and temporal factors. *Experimental Brain Research*, 166(3–4), 489–97.
- [18] Holmes, N. P. , Crozier, G. , & Spence, C. (2004). When mirrors lie: “visual capture” of arm position impairs reaching performance. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4(2), 193–200.
- [19] Botvinick, M. , & Cohen, J. (1998). Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756.
- [20] 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(1), 104–9.
- [21] Kalckert, A. , & Ehrsson, H. H. (2012). Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own: A Dissociation of Ownership and Agency. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(March), 40.
- [22] Pickett, K. , & Konczak, J. (2009). Measuring kinaesthetic sensitivity in typically developing children. *Dev Med Child Neurol*, 51, 711–716.
- [23] Stetson, C. , Cui, X. , Montague, P. R. , & Eagleman, D. M. (2006). Motor-Sensory Recalibration Leads to an Illusory Reversal of Action and Sensation. *Neuron*, 51(5), 651–659.
- [24] 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.
- [25] Durgin, F. H. , Evans, L. , Dunphy, N. , Klostermann, S. , & Simmons, K. (2007). Rubber hands feel the touch of light. *Psychological Science*, 18(2), 152–7.
- [26] Asai, T. , Mao, Z. , Sugimori, E. , & Tanno, Y. (2011). Rubber hand illusion, empathy, and schizotypal experiences in terms of self-other representations. *Consciousness and Cognition* , 20(4), 1744-1750.
- [27] Lewis, J. S. , Kersten, P. , McCabe, C. S. , Mcpherson, K. M. , & Blake, D. R. (2007). Body perception disturbance: A contribution to pain in complex regional pain syndrome (CRPS), 133, 111–119.
- [28] Ramachandran, V. S. , Brang, D. , & Mcgeoch, P. D. (2009). Size reduction using Mirror Visual Feedback (MVF) reduces phantom pain. *Neurocase*, 15(5), 357–360.
- [29] Moseley, G. L. , Parsons, T. J. , & Spence, C. (2008). Visual

distortion of a limb modulates the pain and swelling evoked by movement. *Current Biology*, 18(22), 1047–1048.

付録

付録 A.1 各個人の RA の平均グラフ

実験で得られた各個人の RA 平均のグラフをここに示す。なお、グラフの読み方は 3 章の結果を参考のこと。

