

## Mirror illusion の生起に遠心性コピーは必要か

田島 大輔\*・水野 統太\*\*・久米 祐一郎\*\*\*・葎田 貴子\*

\* 東京工業大学 大学院理工学研究科

〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 I1-36

\*\* 電気通信大学

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

\*\*\* 東京工芸大学

〒243-0297 神奈川県厚木市飯山1583

tajima.d.aa@m.titech.ac.jp

### 1. はじめに

ある種の義手や遠隔地ロボットハンド等，ヒトが自己身体の動作結果を視覚的に観察しながら操作するシステムにおいて，操作の結果として得られる視覚像は，生身の身体と比較して様々な物理的変容を伴うことがある．例えば，ヒトの身体との形状の差異，身体動作に対する時間遅れ，自己身体との位置ずれなどが挙げられる．それにも関わらず，操作者が操作対象を文字通り自己身体の一部と感じられるような操作感や没入感を戦略的に設計する目標で，我々はヒトの身体の様相とは異なる視覚像が自己身体の一部として感じられるための脳の制約条件やメカニズムを検討している．

このような背景のもと，本研究では実際の身体とは異なる位置に身体の視覚像が提示される状況にて，観測者が両者の位置ずれに気づかず，かつ自己身体を操るかのような感覚も失われないと想定される位置ずれの許容範囲を定量的に測定した．具体的には，手などの身体部位が鏡に映る身体部位の位置にあると錯覚される現象(Mirror illusion<sup>1)</sup>)を用いて，被験者が手を動かしている際に，身体の視覚像と実際の身体の位置ずれに気付かない許容範囲を，新たに提案する機械学習を用いた評価方法を用いて2次元平面上で測定した．

同時に，提案した評価方法を用いてMirror illusion の生起メカニズムを検討した．Mirror illusion は能動的な身体動作により数秒で生じることが確認されており，これは動かない身体の視覚像を用いた類似現象よりも早い(e.g. Rubber Hand Illusion<sup>2)</sup>)．このことは自分の身体である感覚(Self-body sensation)が身体の視覚像に対して生じる際に，能動的な身体動作が有効であることを示唆していると考えられる．ヒトが能動的な身体動作を行う場合，脳は身体に運動指令を送り，同時に感覚系へとその複製信号(遠心性コピー)を送ることが知られている．Gallagherは遠心性コピーによる身体動作の予測と実際の動作結果の一致がSelf-body sensationを発生させると論じている<sup>3)</sup>が，どの程度Self-body sensationの発生に遠心性コピーが関与しているかは不明であった．そこで本研究では，能動的でない身体動作でもMirror illusionは発生するかの検討を通して，Mirror illusionやSelf-body sensationに対する遠心性コピーの関与について考察した．具体的には，ピノキオ錯覚<sup>4)</sup>のような，振動を指先に与えると指が持ち上がるような感覚が生じる現象<sup>5)</sup>をMirror illusionと組み合わせ，運動指令と遠心性コピーは存在しないが，視覚と体性感覚による身体動作感覚は存在する状態でMirror illusionの生じる範囲が変化するかを検討した．

## 2. 実験方法

### 2.1 被験者

被験者は12名の正常視力または矯正視力を持つ右利きの大学生であった。すべての被験者は研究の目的に対して知識のない状態であった。本研究は東京工業大学ヒトを対象とする疫学研究等倫理委員会の承認を経て、被験者に対する書面によるインフォームドコンセントの下実施されたものである。

### 2.2 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。被験者は椅子に着席し、その前方に、1.0m四方の大きさの鏡が被験者の正中線沿いに床から60cmの高さで設置された。被験者は頭部をわずかに左側に傾けることで、この鏡の左側面のみを観察可能であった。被験者の右手位置を測定するために、被験者から見て鏡の右側1.0mの位置に赤外線式ポジションセンサが設置された(CyVerse, SLC-C02)。ポジションセンサの計測用マーカを被験者の右手の人差指の先端に取り付け、さらに鏡の縁に対する相対位置を得るために、赤外線LEDを計測用マーカとして鏡の裏面のポジションセンサから見て左上の角に取り付けた。被験者に指が動いた感覚を運動指令なしに提示するため、指先に振動を加えると指が持ち上がる感覚が生じる現象である力覚様感覚<sup>5)</sup>を用いた。力覚様感覚は指サックを用いて指の腹に固定された小型の振動素子によって提示された(TOKYO PART INDUSTRIAL, FM34F;

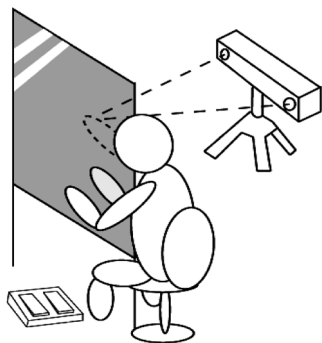


図1 実験装置概略図。

Suzuki Latex Industry, 2ZC-S15)。課題中は両手が使えないため、被験者に手を使わず質問に回答させる目的で、フットペダルが鏡の左側に設置された(P.I. Engineering, Classic X-keys USB and PS/2 Foot Pedals)。被験者が音の手掛かりによって右手位置の定位を行う可能性を防ぐ目的で、ノイズキャンセリングヘッドホンにより被験者に実験中ホワイトノイズが提示された。

### 2.3 実験手順及び実験条件

被験者は左手を鏡面の右下からおおよそ縦、横30cmの位置に、右手を鏡の裏面の任意の位置に置き、そのまま鏡に写る左手を注視しながら、左手の人差指を上下するように教示された。この時、鏡の裏側にある右手の人差指の動作は後述する4つの条件によって異なった。被験者は事前にメトロノームを用いて、指の上下運動が1秒間に1回のペースになるように訓練した。被験者は左手の指を6回以上上下させた後に“鏡に写る手と右手は同じ位置にあると感じますか”の質問に二肢強制選択にて、フットペダルの左右を押し分けることで回答した。フットペダルが押されるとビーブ音が被験者に提示され、同時に被験者の右手のマーカ位置がポジションセンサによって測定された。被験者はビーブ音が提示された後に、左手の位置はそのままに、右手の位置を鏡に沿って任意の位置に移動させ、次の試行を行うように指示された。この動作を一条件につき200試行実施した。

被験者が右手の人差指が動いたと感じる4条を設定した。条件の概要を図2に示す。設定した4条件は被験者が右指を自発的に動かす条件

		Voluntary Movement (VM)	
		○	×
Vibration (Vib)	○		
	×		

図2 実験条件概念図。鏡に写る左手は条件によらず常に指を上下する。

(Voluntary Movement), 被験者が振動によって実際の運動なしに指が動いた感覚を得る条件 (Vibration) の組み合わせを用いた。被験者が右指を能動的に動かす条件では、右手の人差指を左手の人差指と同期させて上下動することが教示され、右指を動かさない条件では、右指を脱力させ動かさないことが教示された。被験者の右指に振動を加える条件では、被験者は左手の上下動のタイミングを、振動を感じた時に左指を上げるように教示された。振動素子の ON-OFF の周期は 1Hz であった。

### 3. 結果と考察

図3に提案する評価方法の処理過程を模式的に示す。図3のA、Bのグラフは被験者1名の代表を、Cのグラフは被験者間の平均を示している。各グラフの原点は左手の人差指の先端の位置を示し、鏡に写る手の像の位置とほぼ同等である。これは右手のように見える視覚像、つまり自己身体の視覚フィードバックの位置とほぼ同等である。横軸と縦軸は、手の視覚像と実際の右手の水平方向・垂直方向の距離を示している。

図3Aは被験者が右手に関する質問の回答と回答した際の実際の右手の位置を示している。黒点は被験者が自己身体の視覚像と実際の身体的位置ずれに気づかないと回答した場合、白抜き丸が気づいたと回答した場合の右手のマーカ位置を示している。グラフより被験者が自己身体の視覚像と実際の身体的位置ずれに気づかない場合の右手位置は原点付近に分布したことが確認された。したがって、被験者が視覚像と

実際の身体的位置ずれに気づくことのない右手位置の範囲があると仮定し、その範囲を Support Vector Machine による境界判定を用いて判定したところ、図3Bのような結果が得られた (kernlab<sup>6)</sup>; R ver 2.15.2)。境界線で示された範囲の内側が、被験者が視覚像と実際の身体的位置ずれに気付かない場合の右手の位置範囲である。解析に用いた Support Vector Machine の Kernel は一般的な RBF Kernel を用い、特別なパラメータの変更は行わなかった。上記の方法を用いて判定された各被験者の視覚像と実際の身体的位置ずれに気付かない右手の位置範囲を被験者間で平均した。その結果を図3Cに示す。被験者が視覚像と実際の身体的位置ずれに気付かなかった場合の右手の範囲は視覚像を中心とするおよそ 18×20cm の楕円形状であることが確認された。この一連のデータ処理を行うことによって、被験者が身体の見え方と実際の身体的位置ずれに気づかない、つまり Mirror illusion が生じる視覚像と実際の身体位置関係が2次元空間上の領域として示された。

被験者が右手の人差指が動いたと感じる条件別の、自己身体の視覚像と実際の身体的位置ずれに気づかない右手の範囲とその面積を図4に示す。被験者が視覚像と実際の身体的位置ずれに気づかなかった場合の右手の範囲の絶対位置は条件間でやや異なるが、その領域の大きさは条件間で有意な差が認められなかった。

この結果は、能動的に右手の人差指を動作させなくても、受動的に指が動いた感覚さえあれば、Mirror illusion が生じることを示している。これは振動の影響あるいは振動によって引き起

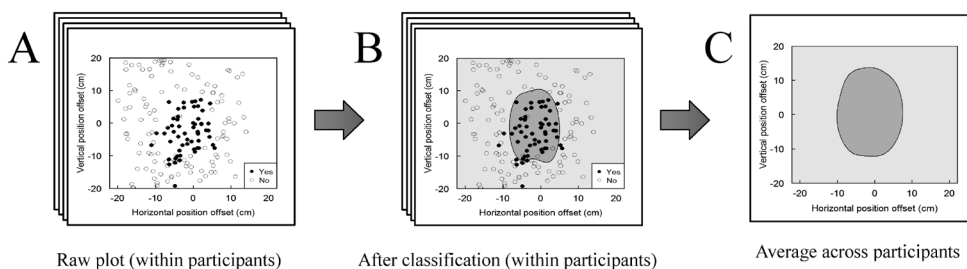


図3 データ解析の一連の流れ。

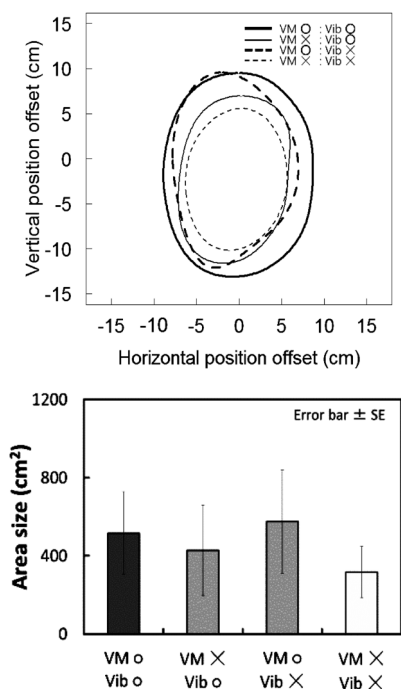


図4 各条件における，自己身体の視覚像と実際の身体の位置ずれに気づかない右手位置の範囲とその面積。

こされた受動的な指の動作感覚の影響なのかは現時点では区別できないが，Mirror illusionが生じるためには運動指令及び遠心性コピーは必ずしも必要でないことが示唆される。むしろ，視覚や体性感覚など身体動作の情報が，観測者が期待する感覚情報と一致することがMirror illusionを引き起こす要因ではないかと考えられる。

今回測定した，観測者が自己身体の視覚像と実際の身体の空間的な位置ずれに気づかない許容範囲は，観測者が身体の視覚像に対して“Self-body sensation”を感じるための臨界距離と一致しているかどうかは興味深い。我々が行った別の実験では，これらの2つの許容範囲はほぼ重複することが示唆されているほか，自己身体位置知覚及び視覚像に対する“Self-body sensation”に関連した様々なテストバッテリーに主成分分析を実施した研究では，身体位置知覚と自己身体知覚は同じクラスに属している

ことが示されている (Jared Medina, personal communication, December 27, 2013). しかしながら，これらの2つの知覚の詳しい関係は現段階では不明であるため，このことに関してさらなる検討が必要であろう。

本研究では，Mirror illusionの定量的な評価及び可視化手法を提案した。この手法は，従来の“Self-body sensation”の研究で使用される質問紙による定性的な評価とは異なり，リハビリテーションの効果の定量的な評価や自己身体のような操作性を提供するシステムの設計標準など，自己身体の知覚に関わる様々なアプリケーションへの応用が期待される。このような“Self-body sensation”の産業応用も今後の検討課題である。

## 文 献

- 1) N. P. Holmes, G. Crozier and C. Spence: When mirrors lie: “visual capture” of arm position impairs reaching performance. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 4, 193–200, 2004.
- 2) M. Botvinick and J. Cohen: Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, 391, 756, 1998.
- 3) S. Gallagher: Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science, *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 14–21, 2000.
- 4) J. R. Lackner: Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain: a Journal of Neurology*, 111, 281–297, 1998.
- 5) 水野統太, 佐藤充晃, 木村瑞生, 久米祐一郎: 振動刺激により指に誘発される力覚様感覚の特性. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 15, 595–601, 2010.
- 6) K. Alexandros, S. Alex, H. Kurt and Z. Achim: kernlab—An S4 Package for Kernel Methods in R. *Journal of Statistical Software*, 11, 1–2, 2004.