

視覚的に観察される自己身体部位に対して自分が動作行為主体だと感じられる脳の要件 およびそのインターフェース技術への応用

代表研究者 菫田 貴子 オックスフォード大学 実験心理学部 博士研究員

1 研究の目的

ある種の義手や手の形をしたマン・マシン・インターフェース、内視鏡手術、遠隔地ロボットハンドの制御等、電気通信技術を用いて、実際の自分の手の位置とは異なる位置に自己の手を模した効果器を設置し、効果器の像を視覚的にほぼリアルタイムに観察しながら制御するタイプのマン・マシン・インターフェースが増加している。これらの操作には、不自然な形状や情報通信に伴う手像の動作の時間遅れなど、実際の手と比較して視覚像の変容を伴うものである。それにも関わらず、最小限の訓練であたかも自己身体の一部であるかのように意識せず使える視覚・触覚・自己受容感覚統合型インターフェースの設計指針を得る目的で、ここでは種々の錯視を利用し、実際の手の様相とは異なる手の視覚像に対して、使用者が、自分自身がその所有者 (ownership) ないし動作行為主体 (agent) であると感じられるための脳の要件を心理物理学的に検討した。具体的には、どのような形状の手であっても自分の身体であると実感できるか、実際の手的位置と見える手の位置のずれはどこまで許容範囲か、また、脳が発する身体の運動情報と実際に見える手の運動の遅れ時間はどの程度まで許容範囲か、の3点を検討項目とする。これら一連の研究を通じて、ここで挙げられるような原理に基づくインターフェースのユーザビリティ向上に際して、言語報告に頼ることなく、かつ我々人間の脳が急激に変性しない限り永久に利用可能な標準的設計指針を得る。同時に、これらのインターフェースを一種の道具とみなした際に、我々人間が道具をあたかも自分の身体の一部のように使いこなす際に、我々の脳ではそれらの道具がどのように表現され、文字通り我々の身体の一部となるのか、そのモデルを探索し、脳と機械をつなぐ技術に役立てたい。さらに、これら一連の実験を通じて、我々の脳がどのような手がかりによって自己と他者、および自己の身体位置を認識しているか認知心理学的に知る手がかりとしたい。

2 実験

上記研究の目的に沿った実験を複数並行して実施しているが、ここでは特に、「実際の手的位置と見える手の位置のずれはどこまで許容範囲か」に関して進捗が認められたため、それに関連した結果を重点的に報告する。

2-1 装置および手続き

実験には、ミラー錯視 (Mirror Illusion) と呼ばれる錯覚を利用した。健康被験者の体の正中線に対して垂直に左側片面の鏡を立て (Figure 1)、その中に映る自身の左腕の像を観察させ、この状態で左右の手の手首より先を鏡合わせになるよう同時に指をそろえて1秒に1回ずつタッピング動作を繰り返し行くと、わずか数秒の間に被験者は次第に鏡の中に写り込んだ左手の虚像が自分の右手であるかのように感じ始め、あたかも自分の右手が鏡の中に視覚的に観察される位置にあるように鮮明に感じるようになり、実際の右手が観察される像より離れた位置にあってもなかなか気づかない。本研究ではこの錯視が鏡の中に観察される右手像と実際の右手がどの程度離れていても生じるかを、鏡に沿った垂直面に対して調べることで、我々の脳が実際の我々の手指位置とは無関係に我々の手指を模した視覚像や効果器の位置に対して自



Figure 1. When normal healthy participants views their left arm in a mirror positioned along the midsagittal plane, the impression of viewing his right hand visually captures the felt right hand location and participants rarely notice their unseen real right hand location, which is far from the virtual hand. Note that gray balls on the participant's shoulder and elbow are reflectors to detect their position via infra-red motion capture system.

分身体の延長がそこにあると錯覚しやすいのか、その要件を検討した。このことを通じて、鏡映像の自己身体に対する錯覚が起きている条件が即ち観察される自己身体がまさしく自己のものであるとの Ownership の感覚や、その身体を自分自身が制御しているという Agency の感覚が生じる条件とみなして、これらの特異な自己身体感覚が生じる要件を検討した。

被験者は右手中指・右手首と両肩、両肘の関節にモーションキャプチャーセンサー用のリフレクターを装着し(Library co. ltd.), これらの位置を CCD モノクロカメラと近赤外線照射セットを使用した 2 台の赤外線カメラで記録した。被験者は左手位置を予め実験者に指定された鏡上の位置に固定した状態で、右手を鏡に沿って任意の位置 200 箇所を動かかし、それぞれの位置で上記のタッピング動作を 6 回以上行った後、その時点における自己の右手の位置は自己の左手と鏡合わせの位置であると感じるか否かを報告した (Figure 2, 3)。

比較参照条件として鏡と同じアクリル素材で作られた黒いマットな板を用い、同じ実験を実施した。この条件では、手指の視覚像が観察されず、観察者は主に自己受容感覚に頼って右手位置を判断していると考えられる。この条件のデータに対して、右手の位置の錯誤が認められる空間範囲が拡大することをもって、自己受容感覚のみに頼る手腕の位置判断状況と比較し視覚像の影響による手腕位置の錯覚が生じていると判断した。

2-2 結果と解釈

結果は非常に頑健であり被験者間の差は殆ど認められなかった。Figure 4 に被験者一名による結果の典型例のうち右手首に設置したマーカーから記録された位置結果を示す。左側の図は鏡を用いた条件の実験結果を示しており、右側の図は黒いマットな板を用いた条件の結果である。プロットされている点は、被験者が任意に自己の右手を設置し右手の位置に関して評価した位置 200 箇所を示している。赤で示されているものは、この時被験者の左手が固定されていた位置である。黒い点は被験者が右手と左手は鏡合わせの位置にあると感じたと報告した場合(錯覚あり)の右手位置を示しており、白抜き丸は被験者が右手と左手は鏡合わせの位置にないと報告した場合(錯覚なし)の右手位置を示している。これらの結果により、鏡を用いた条件において、図中に示される左手の位置に対して、右手の位置が前後左右に 10 センチから 20 センチ程度移動していても被験者は右手と左手の位置が鏡合わせの位置にあるように感じると報告していることが分かる。このことから、これらの領域において右手位置の錯覚が生じていることが読み取れる。一方、黒い板を用いた条件においては、右手位置が左手位置と板を挟んで鏡合わせの位置にあるように感じると被験者が報告した位置は図中に示される左手位置の近傍に集中

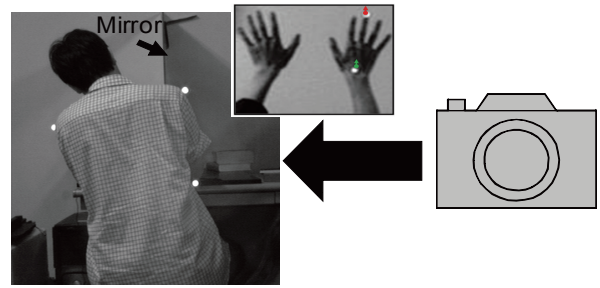


Figure 2. Schematic representations of the experimental procedure.

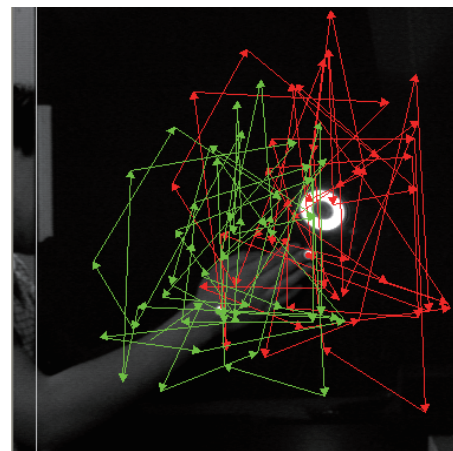


Figure 3. An example of the recorded hand and finger positions for a participant in a condition. Red allows show results from the wrist marker and green allow show results from the middle finger marker.

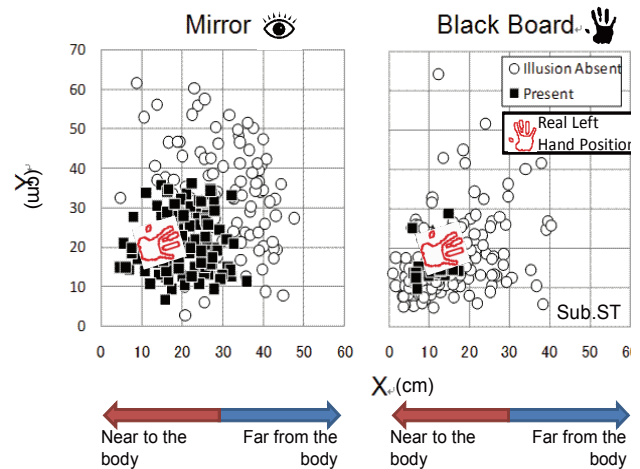


Figure 4. Typical results from one participant.

していることから、被験者は自己受容感覚のみでは正確に右手位置を判断できることが読み取れる。それと同時に、黒い板の条件と比較して鏡を用いた条件において左手の位置と比べ広範囲に右手位置の錯誤が認められたことは即ち、鏡の中に写り込んだ左手の鏡映像としての右手を観察者が視覚的に観察したことが原因であることが伺える。

現時点ではこの錯視が上記データが示すように、実際の右手がその可動域の範囲の限界に近付くと消滅する性質であることの他に、この時観察される視覚像のうち高周波領域の映像がこの種の錯覚に大きく寄与していることが他の実験条件により示されている。さらに、脳が自身の手腕に対して発する運動信号の寄与についても検討する目的で、Figure 5に示すような振動素子を用いて擬似的な指の運動感覚を生成させる装置や、その時の被験者の応答を記録するためのシステムの構築も行ったが、本研究申請期間中には実験が完了していないため、ここでは結果を報告しない。

腕がその可動域の限界に近付くと錯視が消滅するという事実は、この現象における視覚的捕捉が、可動域の限界で筋肉の緊張や関節からの信号が強まると上書きされ、視覚と自己受容感覚の不一致が補正されることを示唆していると考えられる。これらの結果の応用として、手指を模したアームによる遠隔操作システムや内視鏡システムなど、自己の手指と同期して動く虚像をほぼリアルタイムに視覚的に観察しながら制御する状況において、モニタ位置やマニピュレーター位置等何らかの制約により自己の手指が観察される手指の位置とは異なる位置に設置される状況は多々生じうる。本研究結果はそのような状況において、文字通りモニタ内の効果器の位置に自己の手指があると感じられるようなシステムを設計する指標としては、実際の手指がその可動域の限界よりは少し距離を置いた場所であって、無理に捻じれたり伸びきったりすることない位置に設置されていることが不可欠であることを示唆していると考えられる。さらに、その時観察される映像は、高周波領域がカットアウトされていない、比較的高精細なものである必要があると考えられる。



Figure 5. The part of the vibration system to produce the illusory force and finger movement for the index finger.

2-1 今後の研究の方向、課題

今後の研究結果を条件間で定量的に評価するために、サポートベクターマシンを用いて各被験者において錯覚が消滅する領域を定量的に計測した上で、それらの被験者間の違いをヒートマップとしてグラフ上に表記する手法の開発を継続中である。さらに、現在本研究の知見を踏まえて、二つの共同研究の立ち上げを計画している。一つは本研究の知見を、遠隔ロボット制御の際のロボットアーム等ロボット身体の一部の操作性向上に役立てるという方向性の研究である。もう一つは、脳損傷により体の一部に対して運動制御が思うようにいかず、しかし視覚は正常で自己身体が視覚的に確認できるある種の脳損傷患者に対して、本研究で得られた知見と旧来のリハビリテーション手法の類似点を探り、脳科学的な裏付けを探るという方向の研究である。これら二つの研究のうち一つは、英国オックスフォードにおける研究者間の交流の結果立ち上がりつつあるものである。申請者のように日本の助成団体から給与の助成を受ける研究者が海外に研究拠点を置き日本に常勤の所属を持たない場合、日本国内・国外双方において応募できる競争的研究資金が制限される中で、本研究助成は申請者の海外における研究活動を支えた数少ない助成であり、感謝している。

さらに、本研究申請と類似した錯覚が視覚のみならず聴覚的に提示される自己身体的位置情報に対しても生じる可能性を示唆する研究報告例が他の研究室から報告されるため(Jimenez, et al, in press)、今後は視覚以外にもマルチモーダルに研究を展開していく必要性を考えている。

【参考文献】

Action sounds recalibrate perceived tactile distance. (in press) Jimenez, Väljamäe, Toshima, Kimura, Tsakiris, Manos, & Kitagawa, Current Biology.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
なし		