

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

Spatial limit of the visual capture of the felt hand position in a mirror

1091024



研究代表者

東京大学 情報学環

特任研究員

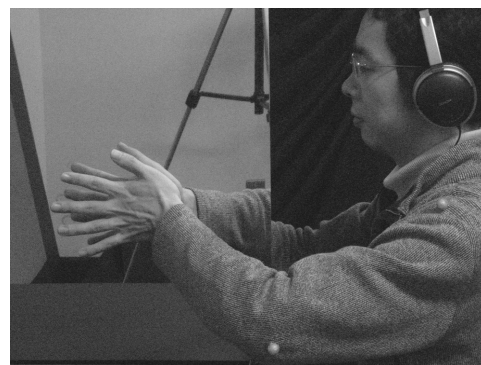
荻田 貴子

[研究の目的]

ある種の義手や手の形をしたブレイン・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、自己の手を模した像を視覚的に観察しながら制御するタイプのマン・マシン・インターフェースの操作には、手像の動作の時間遅れや不自然な形状など、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、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、ここでは人が実際の手腕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）であると錯覚するための脳の要件を検討した。これら一連の研究を通じて、1) どのような形状の手腕に対して脳がそれを自分の身体の一部であると認識するのか、2) 実際の手腕の位置と見えている手の位置のずれはどこまで許容範囲か、また、3) 脳が発する身体の運動指令情報とタイミング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点に関して知ると同時に、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ことが一連の研究の大きな目標である。ここでは特に、2に関して重点的に検討した結果の一例を報告する。

[研究の内容、成果]

実験には、ミラー錯視（Mirror Illusion）と呼ばれる錯覚を利用した。健常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回つ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



Note: that gray balls on the participant's shoulder and elbow are reflectors to detect their position via infra-red motion capture system.

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.

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己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。

被験者は右手中指・右手首と両肩、両肘の関節にポジションセンサーとして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.)、モーションキャプチャー用の 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リフレクターの位置を記録した。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 箇所へ動かし、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口頭で報告した (Figure 2, 3)。

鏡の他に、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

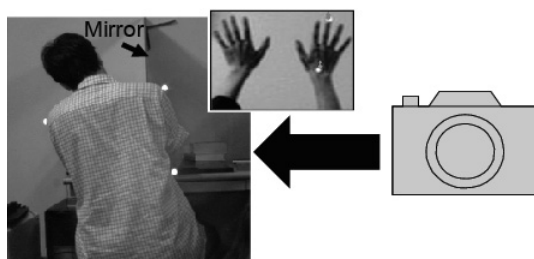


Figure 2 Schematic representations of the experimental procedure

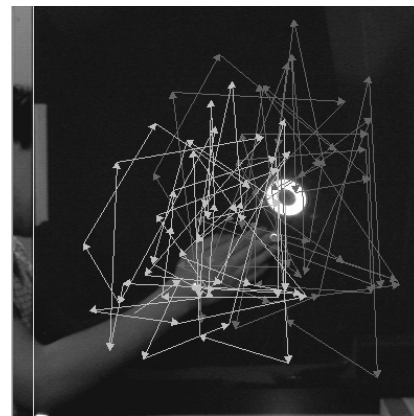


Figure 3 An example of the recorded hand and finger positions for a participant in a condition. Red arrows show results from the wrist marker and green arrows show results from the middle finger marker.

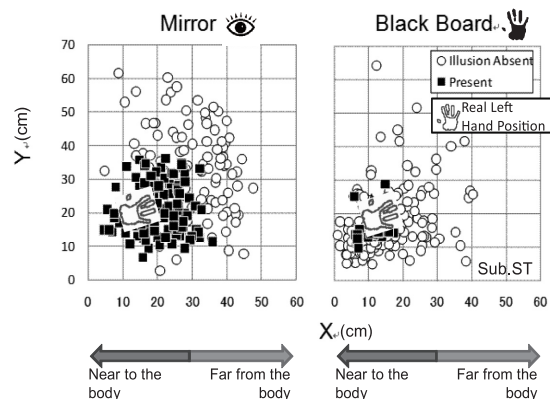


Figure 4 Typical results from one participant

じていると判断した。

一条件につき 12 名の被験者で実験を実施したが、結果は非常に頑健であり被験者間の差違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を示す。被験者の肩や腕などに複数の位置マーカーを設置し手腕位置を記録したうち、ここでは最も簡便に錯覚の有無を示していると考えられる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、白抜きの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ほぼ図中に示される左手位置の近傍に集中していることから、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て広範囲に右手位置の錯誤が認められていたことは即ち、鏡の中に左手が写り込んだことによる虚像の右手を観察者が視覚的に観察したことが何らかの原因であることが伺える。なお、従来この錯覚は身体近傍空間（peripersonal space）と呼ばれる手腕の届く範囲内で生じると考えられてきたが、本研究結果は全て被験者の右手が届く範囲内で計測したものである。従って、本研究結果は身体近傍空間というよりは他の要因がこの錯覚の有無を規定している可能性を初めて明示したものといえる。

では、身体近傍空間以外にこの錯覚の有無を規定している要因とは何であろうか。本研究に参加した被験者の主観報告によると、右手がその可動域の限界に近づき、肘が伸びきったり、右手が鏡の上方に上がり続けて肩が疲労している場合には、錯覚が生じにくいという。実際に肘や肩のマーカーから記録された結果を解析すると、被験者の肩が一定の高さよりも上部に上がると錯覚が生じなくなることが示された。そ

こで、これらの結果や被験者の主観報告等を総合し、手腕位置がその可動域の限界に近づくことで腕や肩が伸びたり不自然に曲がったりして深部感覚が強くなると、視覚的入力よりもこれらの感覚入力が打ち勝ち、脳が虚像による視覚的な見た目の手位置に騙されずに自己受容感覚に従って正確に右手位置を把握できるようになるとの仮説を立てた。

これを受けて、この仮説を検証する複数の追加実験を行った。その一例を Figure 5 に示す。ここでは、錯覚の有無が右手と左手の位置のずれの大きさではなく、手腕が手腕の可動域の許容限界に近い位置にあるか否かで規定されている可能性を検討するために、被験者の左手と右手を予め鏡合わせに同じ位置に固定した上で、右手だけを手首を中心に任意の位置に回転させながら、どこまで回転させれば錯覚が生じなくなるかを検討した。この時、右手と左手は身体近傍空間内では常に同じ位置にあるが、ある回転角以上右手を回転させ右手がその可動域の限界に近づくと、被験者はタッピング中無理な姿勢で右手を捻り続けることになり、右手や右腕、右肩の痛みによる深部感覚を意識するようになる。この条件における被験者の応答は、右手指先が左手と鏡合わせに同じ方向を向いていると感じるか（錯覚あり）、異なる方向を向いてい



Figure 5 An example of the recorded hand and finger positions for a participant in the supplementary condition

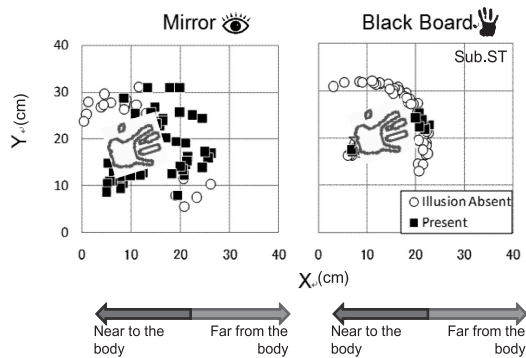


Figure 6 Typical results from one participant

と感じているか（錯覚なし）とした。

Figure 6 にこの時の被験者の右中指先端に設置したマーカーから得られた位置情報に基づきプロットした結果を示す。黒いマツな板を用いた実験結果により、実際の左手の方向と比べて右手が同じ方向を向いていると判断された条件は実際の左手の方向とかなりの精度で一致していることが分かる。即ち、右手と左手が手首を鏡合わせに合わせている状況においても、中指が両の手で同じ方向を向いているかどうかの判断はかなり正確に自己受容感覚のみで正答できることが分かる。一方、この条件と比較して鏡を使用した実験条件の結果は、右手がある程度左手と比較して回転した条件においても左右の手が同じ方向を向いていると報告されていることが分かり、この実験状況においても鏡の中の虚像の手という視覚像による視覚的捕捉が右手方向ないし右手位置の錯覚を引き起こしていることが分かる。同時にこの結果は、右手がある程度以上捻られその可動域の限界に近づく、右手と左手が同じ方向を向いていないという報告が増えることも示している。即ち、ここでは右手と左手が空間内で鏡合わせにほぼ同じ位置に置かれていても、右手が強く捻られるなどしてその可動域の許容限界に近づくとき消滅することを示している。

以上の結果により、現時点ではこの錯視は実際の右手がその可動域の範囲の限界に近づくとき消滅する性質のものと考えている。腕や手首が

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にあつて、無理に捻じれたり伸びきったりすることが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。

[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、被験者間の結果の傾向を客観的・定量的に表記する目的で、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進めている。また、限界で筋肉の緊張や関節からの信号が強まると視覚と自己受容感覚の不一致が補正されるという仮説に関しては、今後筋電図等を併用し考察するべき問題であると考えている。

[成果の発表、論文等]

葭田貴子・宮崎由樹・和氣典二：鏡に映った手位置が視覚的捕捉により錯覚される現象が消滅する条件について —— 実際の手の位置と錯覚される手の位置の距離の関係から ——、VISION, 22, 1, 90 (2010)。