

自己帰属感の生起過程におけるモーターコマンドからの 予測可能性による影響の調査

齊藤寛人^{†1} 福地健太郎^{†1}

概要: 自己帰属感の生起は、主に視覚と体性感覚の一致性および視覚と運動指令からの予測の一致性の認知によって引き起こされることが先行研究により明らかになっている。しかし能動的運動時にどちらの認知が主要な役割を果たすのかは明らかではない。本研究では、予測との一致性は保ちつつ、視覚と体性感覚との間に不一致をもたらすことで体性感覚と予測とを分離した検証を行った。具体的には、被験者には複数の映像から自己の動きに同期する映像を見つけるタスクを課した実験を実施した。このとき被験者の手の動きを様々な角度で回転させた映像を呈示することで、視覚と体性感覚との間の不一致条件を作り出し、また被験者の運動に制限を設けることで、手の動きが回転して呈示されても視運動を予測可能な状況を作り出した。実験の結果、能動的運動時の自己帰属感の生起過程では視覚と予測の一致性が優位に働くことが明らかになった。また、この予測可能性は手の運動パターンやその見た目にも影響されることが示唆された。

The Effect of Predictability of Visual Motion from Motor Commands on the Recognition Process of Self-Attribution

HIROTO SAITO^{†1} KENTARO FUKUCHI^{†1}

Abstract: Previous studies of the recognition process of self-attribution conducted that it is mainly caused by congruence between visual and proprioceptive information, and congruence between visual information and prediction from motor commands. However, they did not declare which congruence acts the primary role in the process during the voluntary movements.

We conducted a user study that distinguishes proprioceptive information and prediction from motor commands by displaying modified images of the subjects' hands in various rotation angles, that introduced the conflict between visual and proprioceptive information. The hand motion of the subjects was restricted so that they could predict the visual motion of the images of their hands by the motor command even while the images were rotated.

The result indicates that the prediction of the motion plays a primary role in the recognition process of self-attribution, and this predictability depends on the motion pattern and the appearance of the hand images.

1. はじめに

マウスポインタやアバターなどがディスプレイ上に表示され、操作者が身体運動によってそれら进行操作するインタフェースの有効性が広く知られている。こうしたインタフェースでは、操作者は身体外にある視覚的な対象を自己の身体と同一あるいは延長するものとして捉えていると考えられている。このような視覚的な対象を自己として捉えている感覚は「自己帰属感」(self-attribution)と呼ばれ[3]、インタフェースデザインの分野でも自己帰属感が重要なキーワードとなっている[25]。自己帰属感の生起過程においては、視覚的に捉えられた対象の運動(視運動)と自己の運動との随伴関係の認知が大きく影響することが知られている[17][25]。自己帰属感の生起過程を分析する上で、この認知がどのようなプロセスで得られているかを明らかにすることが重要な課題となっている。

視運動と自己運動との随伴関係を認識する過程の1つとして、自己の運動感覚の認識(自己受容感覚)と視運動との随伴関係を認知することが挙げられる。これを「感覚と

の随伴」と呼ぶ。我々は自己受容感覚から自分の運動や姿勢の情報を知ることができ、その情報と視覚情報をマッチングすることから視覚的な対象の運動を自分の運動であると認識する。

能動的運動時においてはこれに加えて、モーターコマンドによる予測と視運動の随伴関係の認知も、視運動と自己運動との随伴関係を知る方法の1つとして挙げられる。これを「予測との随伴」と呼ぶ。例えば、目の前に置かれている物を手で取る際に、手を動かすモーターコマンドをどのくらい送ればその物に手が届くのか予測しながら我々は手を制御している。このように我々は日常的にモーターコマンドからの情報をもとに自己の運動を予測しながら身体を制御していることが明らかになっており、その予測と視運動が一致することからも視覚的な対象の運動を自分の運動であると認識すると考えられている。

以上のように自己運動と視運動の随伴関係の認知プロセスには異なる2つのプロセスが関与しており、特に能動的運動時には予測と体性感覚の両方の情報が得られる。そのため、どちらのプロセスが主に働いているかは明らかに

^{†1} 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo, Japan

なっていない。自己帰属感の生起過程を理解するためには、この2つのプロセスを区別することが課題となっている。

特にバーチャルリアリティ (VR) 環境においては、操作者の実世界における身体や運動をそのままバーチャル空間で再現するだけでなく、それらを拡張・変容して表現するものが多く見られる。例えば、バーチャル空間内のアバターが、操作者の実身体と異なる形状をしていたり、物理的・身体的制約を超えた運動ができたりするコンテンツが多く制作されている。しかし、実際の操作者の身体や運動は変化しないため、このような状況では操作者とアバターとの間で身体イメージ (body image) に不一致が生じ、自分とアバターとの同期を感じにくくしている可能性がある。したがって、VR インタフェースの設計指針を与える上で、実身体とバーチャルボディとの見た目や運動の不一致が自己帰属感の生起にもたらす影響を調査することはより重要となる。

本研究では、「予測との随伴」は保ちつつ、実運動と視運動に空間的不一致を生じさせることで「感覚との随伴」を把握しにくい状況下で被験者実験を行った。具体的な方法としては、ディスプレイ上にバーチャルハンドを実際の手に対して回転した位置に呈示した状況で、円運動を含むいくつかの運動パターンで被験者と連動して動く視覚オブジェクトを見つけるタスクの正答率を調査した。これは円運動であれば実身体に対して視覚的なバーチャルハンドが回転した状況でも運動方向が右回りや左回りに限定されて認識できるために「予測との随伴」が保たれるという著者らの過去の調査から得られた仮説によるものである[23]。また、身体の見え目が自己帰属感の度合いや操作者の振る舞いに影響するという知見があり、本研究の実験環境でもバーチャルハンドの見え目が自己運動と視運動の関係性の認知過程に影響する可能性がある。そこで、運動パターンに加えてバーチャルハンドの見え目の条件を設定した。

実験の結果、同一の環境下で空間的不一致の影響を受ける条件と受けない条件の双方が観測された。円運動のように実運動とバーチャルボディの視運動の空間整合性が崩れていても、「予測との随伴」が保たれる条件では空間的整合性が保たれた状況と崩れた状況とでタスクの正答率に有意差が生じなかった。一方で直線運動のように実運動とバーチャルボディの視運動の空間的整合性が崩れると運動の予測がしにくくなる条件では空間的整合性が保たれた状況とそうでない状況でタスクの正答率に有意差が生じた。また実身体に近い見え目のバーチャルボディを用いると、円運動のように予測が保たれやすい運動の場合でも空間的整合性が保たれた状況とそうでない状況とで正答率に有意差が生じた。

この結果から、自己運動と視運動の関係性の認知過程では視覚とモーターコマンドからの予測の一致が優位な認知プロセスであり、この予測可能性は運動パターンやバーチャ

ルハンドの見え目によって異なることが示唆された。ここから導かれる議論として、VR インタフェースを設計する上で、実身体とバーチャルボディに空間的不一致が生じる状況で両者の運動の随伴関係をわかりやすく伝え自己帰属感を生起させるには、視運動の予測のしやすさが重要なファクターとなり、操作精度が求められる状況では身体イメージの不一致に注意を向けさせない抽象的な身体表現を使うなど予測のしやすさを考慮したデザインを検討することが望ましいと結論付けられる。

2. 背景

2.1 自己帰属感の概念

外界の対象に対する自己帰属感の生起過程は、Gallagher による sense of agency (以降 agency) と sense of ownership (以降 ownership) という 2 つの概念を用いて議論されている[5]。Gallagher は基本的な自己意識をまず ‘narrative self’ と ‘minimal self’ の 2 つに分けて考察している。‘narrative self’ は「自分自身の記憶や他人によって語られることによって永続的に存在する自己」と捉えられ、‘minimal self’ は「経験的な知識がなくても、自己と呼べるような基礎的で一時的な自己」と捉えられる。自己帰属感の生起はこの ‘minimal self’ に関連しているとされる。minimal self はさらに agency と ownership に分かれる。agency は、「この運動を引き起こしたのは自分自身である」という感覚を指し、ownership は、「この身体はまさに自分のものである」という感覚を指す。

agency は、能動的な運動時にのみ感じられる感覚である。その基盤となるものは、遠心性コピーによる自己の運動の予測と、視覚刺激の随伴関係の認知である。遠心性コピーとは脳から筋肉にモーターコマンドが送られると同時に作られるモーターコマンドのコピーのことである。またモーターコマンド理論によれば、このような能動的な運動に対する予測的な知覚メカニズムはフォワードモデルと呼ばれ、その予測は体性感覚による筋収縮結果のフィードバックに対してだけではなく、視覚的な運動結果など他の感覚モダリティからの知覚フィードバックに対しても働く[19]。

ownership は能動的な運動時に限らず、受動的な状態においても感じられる。その基盤となるものは視覚と体性感覚の随伴関係の認知である。我々は、動きだけでなく、姿勢や位置など自己の体について複数の感覚情報を統合することで認知している。ownership が生起することによる有名な錯覚現象には、ラバーハンドイリュージョン (RHI) がある[2]。これは、ラバーハンドのみが見え、実際の手は隠された状態で、ラバーハンドと自分の手が同期してブラシなどでられるなど同様の触覚刺激を与えられ続けることで、実際の手が刺激されなくても、ラバーハンドを自分の手であると感じられるようになるという錯覚である。RHI は視覚刺激が同期していないと生じない[2]。また回転した位

置にあるなど空間的にずれのある状態では錯覚が有意に弱まる[4].これらのことから、ownership は体性感覚と視覚フィードバックの時空間的整合性の認知を基盤として感じることでできる感覚であると示唆されている。

しかし、Agency や ownership の生起には前述した基盤となる認知の他にも視覚フィードバックと自己のボディイメージとの見た目の一致性など様々な副次的な要因が関与していると考えられる[1]. また、agency と ownership の境界は非常に曖昧で、agency を感じるものが ownership を高めたり、逆に ownership を感じるものが agency を高めるといった相互に影響し合っていると考えられている[17].

2.2 モーターコマンドからの予測の有効性

能動的運動時においては、自己運動と視運動の随伴関係の認知について「感覚との随伴」の認知と「予測との随伴」の認知の2つの基盤が影響すると考えられる。Tsakiris らは受動的運動時より能動的運動時の方が視覚的に呈示された自己身体の認知を優位に行えることからモーターコマンドからの視運動の予測の有効性を示した[16]. このことから能動的運動時では「予測との随伴」も自己帰属感の生起の重要な要因であると考えられるが、「感覚との随伴」と「予測との随伴」の認知がどのように関係し、またどちらのプロセスが優位に働くかは明らかになっていない。

我々は「予測との随伴」が優位に働くという仮説をたて、我々の過去の研究[23]では「予測との随伴」を保ちつつ空間的整合性が崩れた運動をさせる事で「感覚との随伴」を把握しにくい状況での検証を試みた。この研究ではクランクハンドルを用いた回転運動によって同じく回転するポインタを操作する際の自己帰属感について調査した。これは実身体に対して操作する視覚オブジェクトが回転した位置に呈示されても回転運動であれば「予測との随伴」が保たれるという仮説から設計した。例えば、視覚オブジェクトが実身体に対し 180° 回転していた場合、実運動と視運動の運動方向（実運動 - 視運動）は直線運動の認知だと方向が反転するが（例、右方向 - 左方向）、回転運動の認知だと同一の方向の回転運動（例、右回り - 右回り）であると認知できると考えられる。実験の結果、入力に対するポインタの回転速度を変更しても自己帰属感の生起に差が生じず、実運動と視運動の空間的整合性が絶対条件ではなかった。この結果から我々の実験環境においては「予測との随伴」の認知が空間的整合性が崩れた状況でも自己帰属感の生起に有効に働いた可能性が示唆された。ただしくランクハンドルというデバイスを介したことや、回転速度による空間的不一致は一定ではなく運動量に依存することなどが結果に影響した可能性がある。

これらの知見から、能動的運動時での自己帰属感の生起過程にはモーターコマンドによる予測と視運動の随伴関係を認知できることが重要であると考えられるため、どのような状況で予測が有効に働くのかについてより詳細に明ら

かにしていくことが求められる。

3. 関連研究

van den Bos らは自己帰属感の生起への視覚的身体と自己身体の空間的整合性の影響を調べた[18]. 彼らは被験者と実験者の手をテーブルを挟んで対称に置き、複数の角度(0°, 90°, 180°, 270°)で回転させた映像を表示し、自分の手がどちらかを判断させる実験を行った。その結果、実際の被験者と同じ向きに被験者の手が見える映像が表示された 0° 条件では、他の回転角度の映像より被験者は自分の手を正しく認識できた。180° の条件で誤答が最も多くなった。また被験者と映像が同じ動きをするときはどちらも動かない時に比べて結果が良くなったが、同じく回転の影響を受けた。この研究は自己帰属感の生起において視覚と自己身体の空間的整合性が重要であることを示している。

Argelaguet らは VR 環境での自己帰属感の生起に視覚的な身体の見え目が影響することを示した[1]. 彼らの研究では、VR 空間で呈示される操作者の手に同期して動くバーチャルハンドの形状について、見え目が実身体に近い方が ownership を強く感じるものの、球体など記号的な表現に近いほど操作が上手に行え、agency の評価が高いことを示した。また彼らの実験環境では障害物として火やノコギリといった身体を傷つけられるイメージをさせるメタファーが使用されており、身体のパールハンドの見え目がリアルなほど障害物による影響が大きいことが確認された。

このことはバーチャルハンドの見え目の違いが、視覚的身体の性質や外界との対応関係についての予測的な認知に影響を与える可能性を示唆する。

一方で、Short と Ward は視覚的身体のバーチャルハンドの動きをモーターコマンドから予測できることによって空間的不一致や見え目によらず自己帰属感が生じることを示した[15]. 彼らの実験では、自己身体と一致する位置にある光点は、光点が自己身体と隣接する位置にあるときよりも反応時間が早くなるという現象[6]について、ヘッドマウントディスプレイを着用し手を利用してバーチャルハンドを操作する環境で「運動の同期性」、「空間的整合性」、「見え目」による影響の検証を行った。その結果、バーチャルハンドが操作者の動きと同期して動く時は、空間的不一致がある場合（視覚的な手が実身体から離れた位置にある、鏡のように向かい合った位置にある）や、実身体と見え目が異なる場合（手ではなく足など実際とは異なる身体部位、抽象的な円錐オブジェクト）でも光点に対する反応時間が早くなったが、操作者の動きに無関係な動きをする場合には、反応時間の短縮は見られなかった。ただし、この研究結果は実身体とバーチャルハンドの動きの随伴関係を十分に学習した後での比較を行っているため、実身体と視覚的身体の運動の随伴関係の認知が得られるまでのプロセスに空間的な位置や見え目の不一致が影響するかは明らかにな

っていない。したがって彼らと同じ実験環境であっても、学習時間やポインティングの精度などについては van den Bos らや Argelaguet らの実験のように空間的な位置や見た目に不一致による影響が出る可能性がある。

4. 目的

本研究の目的は、対象の視運動と自己の能動的運動との随伴関係から自己帰属感が生起する上で、運動の性質や対象の見た目の違いがどのように影響するかを明らかにすることである。

これまでの研究では受動的運動と能動的運動の比較により、能動的運動時には「予測との随伴」の認知が有効に働くと示唆されてきたが、能動的運動時に、「感覚との随伴」と「予測との随伴」が自己帰属感の生起にどう影響するかについて実験的な分析を行った例は少ない。その大きな要因は、体性感覚とモーターコマンドによる予測によって知覚される自己運動が空間的に一致しているため、それぞれの影響を分離して検証することが難しいためである。

そこで本研究では、我々の以前の調査と同様に「予測との随伴」を保ちつつ空間的整合性が崩れた運動をさせる事で「感覚との随伴」を把握しにくい状況での検証を目指した。空間的整合性を崩す具体的な方法としては van den Bos らの研究と同様に被験者の手を回した映像を呈示する手法を用いた。「予測との随伴」を保つ手段としては、タブレット上でペン入力をする被験者の手の運動を円運動を含むいくつかの運動パターンに限定する手法を用いた。これは、運動方向を右回り、左回りに限定することで視覚情報の回転によって空間的整合性が崩れても運動に対する予測が損なわれにくいという我々の過去の知見による仮説を基に設定した。また視覚的な見た目がバーチャルハンドに対する予測に影響する可能性があるため、異なる見た目のバーチャルハンドを用いて比較を行った。自己帰属感が生じたかどうかの評価には、自己運動と視運動の随伴関係を認知することで達成されるタスクを用いた。その課題達成率から実験環境における予測の影響を分析し、能動的運動時における自己帰属感の生起過程について議論した。

5. 実験設計

自己帰属感の生起過程として運動の随伴関係の認知に注目し、複数のバーチャルハンドから自己の運動に同期したものをを見つけさせるというタスクを課す実験を実施した。このタスクでは、被験者の動きに制約を加えた上で、その被験者に同期するバーチャルハンドと無関係の運動をするバーチャルハンドを合わせて呈示し、正答を選ばせる。その正答率から自己帰属感の生起過程についての分析を試みた。

5.1 装置

本実験では、映像呈示用の液晶ディスプレイ(3M

M2256PW)とペンタブレット(wacom Cintiq 22HD)、webカメラ(logicool C910)を組み合わせた入力装置を用いた(図1)。被験者は液晶ディスプレイの正面に置かれた椅子に座り、利き手側に設置された入力装置を操作した。入力装置及び操作する被験者の手は衝立によって被験者の視界から隠されており、被験者は液晶ディスプレイによって呈示される映像のみを見ながら課題を実施する。課題で用いる呈示映像を作成するためにタッチペンでポインティングした位置と操作する被験者の手を上部から撮影した映像を入力情報として記録した(図1-A)。被験者からの視認性を考慮して、液晶ディスプレイとペンタブレットはともにテーブル面に対して15°の傾斜をつけて設置された。

実験中の被験者のペンタブレット上での運動可能領域は厚さ1.5mm程の厚紙製のステンシルによって制限され、ステンシルの溝の幅は5mmであった。カメラ映像をクロマキー処理するためにステンシルは青色で、溝部分にも同色の映像が投影された。ステンシルの形状や大きさについては後述する。また実験前に全ての被験者はペンの操作方法について十分な説明を受け、操作の際に手首の回転運動を使わずにペンを常に立てた状態で操作するように指示された。これは実験中の被験者の手の運動を統一するためであった。

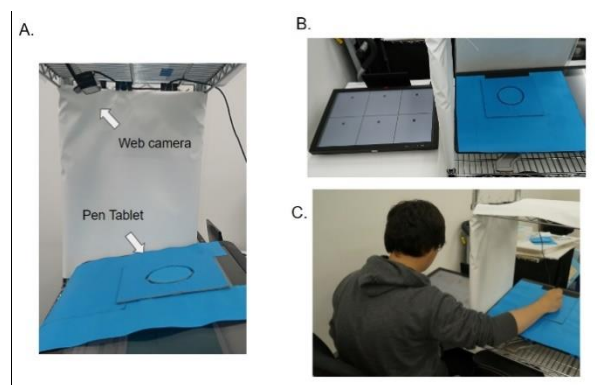


図1 実験装置 (A: 入力装置, B: 入出力装置の配置, C: 実験風景)

5.2 タスク

視覚的なバーチャルハンドを自己の身体として帰属させるには、視覚的な運動と自己の運動の随伴関係を認知することは重要なプロセスである。渡邊らは複数の動くマウスカーソルから自己が操作するカーソルを瞬時に発見できることを確認しており、視覚的な運動と自己の運動の随伴関係を認知することができるかの評価に複数の運動するオブジェクトから自己の運動に同期するものを見つけるタスクは有効であると考えられる[24]。またこのようなタスクでは、運動したか否かだけでなく運動のイメージ(速さや方向)が一致しているかについての認知能力を検証することができ、単一のバーチャルハンドが同期か非同期かを2択で回答するタスクに比べチャンスレベルを下げるができるため結果を評価しやすい。そこで画面上に登場する複

数のバーチャルハンドから自己の右手の動きが投影されたものを見つけるタスクを設計し、その正答率を比較した。

呈示する映像としてディスプレイを分割し、各フレームに1つずつ運動するバーチャルハンドを表示した(図2)。そのうちランダムに選ばれた1フレームに被験者のペン操作の動きと同じ動きをするバーチャルハンドが呈示され、その他のフレームには被験者の動きに無関係な運動(ダミー運動)をするバーチャルハンドが呈示された。様々な運動を再現するために、ダミー運動には過去の被験者および現在の被験者の過去の試行での入力値のログデータを記録し用いた。

このタスクでは被験者はステンシルで制限された運動領域内でタッチペンを動かし自己運動に同期して動くバーチャルハンドが呈示されているフレームを探した。実験中、被験者の運動は手首の運動とタッチペンの運動可能領域のみが制限され、スピードや方向は被験者の意志で自由に変更できた。

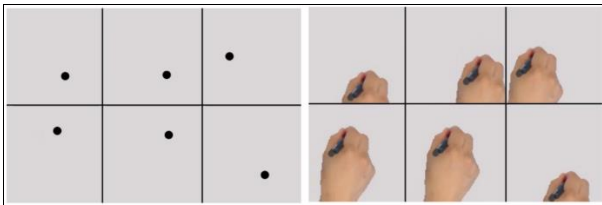


図2 タスクでの呈示映像(左: Abstract, 右: Realistic)

6. 実験1

実験1では回転角度4条件(0°, 90°, 180°, 270°)、運動パターン4条件(Circle, Square, Semicircle, Line)、バーチャルハンドの見た目2条件(Abstract, Realistic)を組み合わせた計32条件でタスクの正答率を比較した。

6.1 視覚フィードバック

本実験では、被験者の正面に設置されたディスプレイを6つのフレームに分割し(横3×縦2)、各フレームに1つずつバーチャルハンドを呈示した(図2)。そのうちの1つのバーチャルハンドは被験者のペン入力による運動に同期して運動し、その他の5つのバーチャルハンドはダミー運動をする。1フレームにはペンタブ上での20cm×20cmの正方形領域での運動を可視化し、ディスプレイに呈示されたフレームの実寸は15cm×15cmであった。

6.1.1 バーチャルハンドの見た目

バーチャルハンドの見た目として、AbstractとRealisticの2条件を用意した。

Abstractは視覚的な身体として抽象的なバーチャルハンドを呈示する条件である(図2左)。Abstractでは被験者の動きに同期するバーチャルハンドとして灰色の背景にタッチペンでポイントした位置に黒色の円形のポインタを表示した。ポインタの直径は25mmであった。ダミー運動は、ロ

グデータを元に呈示位置を決定し、同一のポインタを呈示した。

Realisticは視覚的な身体として被験者の実体に近いフォトリアルなバーチャルハンドを呈示する条件である(図2右)。Realisticでは被験者の動きに同期するバーチャルハンドとしてWebカメラで撮影した被験者のリアルタイムの手のカラー映像に画像処理を加えて表示した。クロマキー処理により被験者の手とタッチペンのみを抽出し、背景はAbstractと同じ灰色とした。ダミー運動は、被験者がポインティングした位置座標とログデータの位置座標の差分を元に、リアルタイムの手の映像を平行移動することで表現した。

6.1.2 バーチャルハンドの回転

バーチャルハンドの回転条件として0°, 90°, 180°, 270°の4条件を用意した(図3)。各条件は呈示するバーチャルハンドをフレームの中心を軸に反時計回りにその条件の角度だけ回転して呈示するものである。したがってRealisticのバーチャルハンドはペンでタッチしている位置も身体イメージも回転する(図3右)。各試行では、被験者は何度回転したバーチャルハンドが呈示されるかを事前に伝えられ、ダミー運動のバーチャルハンドも全て同じ角度だけ回転されて呈示された。

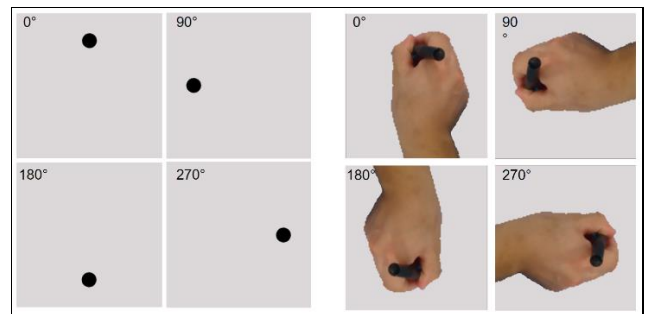


図3 実験1でのバーチャルハンドの回転条件(左: Abstract, 右: Realistic. 被験者が初期位置をタッチする時の各回転条件で呈示されるフレームの例)

6.2 運動パターン

我々の過去の研究における知見[23]から、本実験において円運動であればバーチャルハンドが回転して呈示されても予測が保たれるのではないかとという仮説を立てた。

そこで予測が変わりうる運動の特徴として運動が「直線運動か円運動か」と「循環運動か非循環運動か」の2つに注目し、Circle, Square, Semicircle, Lineの4条件の運動パターンを用意した(表1, 図4)。Circleでは半径5cmの円の外周を運動することができる。Squareは1辺が10cmの正方形の外周を運動することができる。Semicircleは半径5cmの半円の弧を運動することができ、その領域はCircleの上半分と同じである。Lineは長さ10cmの直線上を運動でき、その領域はSquareの上辺と同じである。

タスク開始時のタッチペンの初期位置は全ての条件で同

じ位置であり、垂直方向は運動可能領域の最上部の位置、水平方向は中心部の位置であった。ダミー運動にはログデータをを用いているため、呈示される6つのバーチャルハンドの初期位置はすべて同じ位置であり、各回転角度条件における課題開始時のバーチャルハンドは図3のように呈示される。

表 1 運動パターンの特徴

	円運動	直線運動
循環運動	Circle	Square
非循環運動	Semicircle	Line

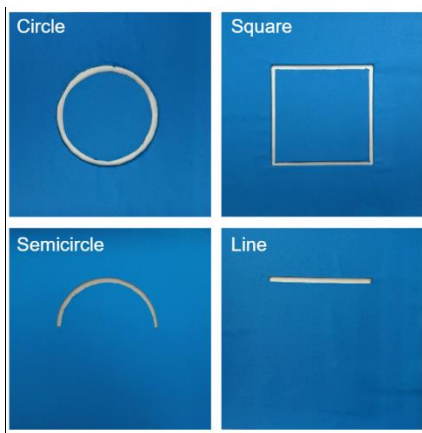


図 4 運動パターン（ステンシルの形状）

6.3 手続き

被験者 1 人に対するタスクは運動パターン 4 条件 × 見た目 2 条件の 8 セッションからなり、被験者毎にランダム順番で行った。各セッションは回転角度 4 条件の 4 ブロックからなりセッション毎にランダム順番で行った。各ブロックはそれぞれ 10 回の試行からなる。各ブロックの最初の試行の前にそのブロックでのバーチャルハンドの回転角度が被験者に伝えられた。実験全体を通して 3200 試行(10人×8セッション×4ブロック×10試行)を行った。

実験開始前に被験者は実験内容について十分な説明を受けたのちにトレーニングセッションに参加した。トレーニングセッションでは、6つのフレームに登場するバーチャルハンドすべてが被験者の操作に同期して動き、すべての回転角度条件でのバーチャルハンドの動きを時間無制限で体験できた。

各試行は以下のような手順で行われた。各試行の開始前に被験者はタッチペンを初期位置に置くように指示された。タッチペンが初期位置にあることを実験者が確認した後、実験者の音声による開始合図とともに画面の6つのフレームに1つずつバーチャルハンドが呈示された。この時6つのバーチャルハンドはすべて同じ位置に静止した状態で呈示される。被験者がタッチペンを動かすと同時に全てのバーチャルハンドが動き出し、2秒間の視運動刺激が

呈示された。その後解答画面に切り替わり、バーチャルハンドは呈示されなくなり代わりに各フレームに1-6の番号が表示され、被験者は自己の動きと同期したバーチャルハンドが呈示されたフレームの番号を口頭で解答した。解答は必答とし、解らなかった場合でも必ず1つの番号を解答させた。

6.4 参加者

実験には 20 歳から 23 歳の健康な大学生 10 名（男性 7 名、女性 3 名）が参加した。すべての被験者は正常な視力（または矯正視力）を有し、右利きだった。

6.5 結果

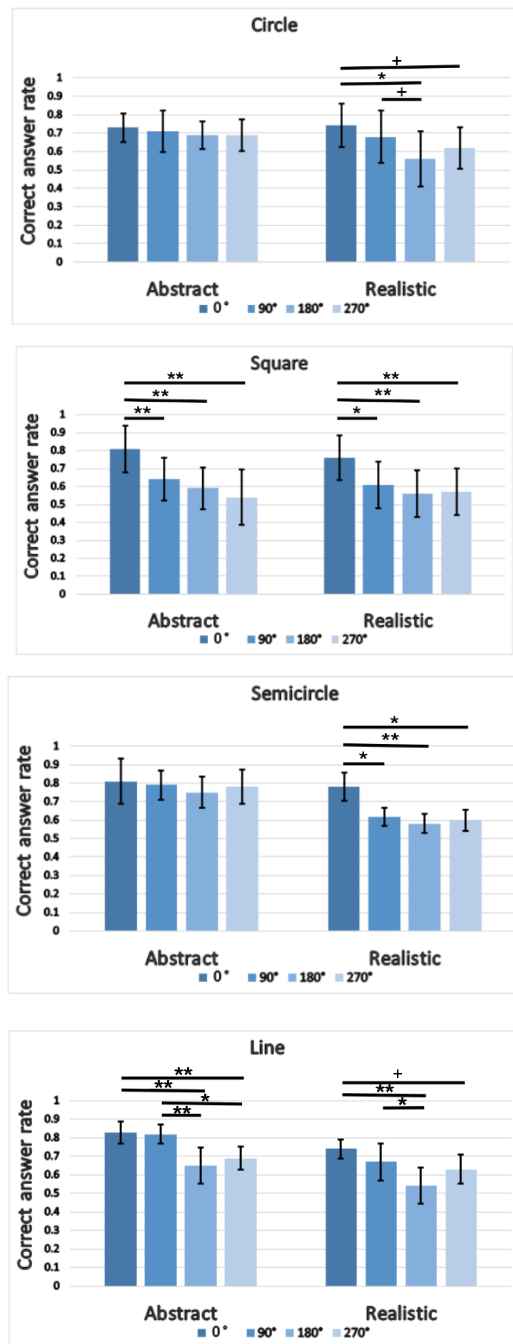


図 5 実験 1 の正答率（エラーバー：95%の信頼区間，
+：p<.10, *：p<.05, **：p<.01）

全体の正答率の平均は約 68%であった。回転角度ごとの正答率の平均は 0° では 78%, 90° では 69%, 180° では 62%, 270° では 64%であった。運動パターンごとの正答率の平均は Circle では 68%, Square では 64%, Semicircle では 71%, Line では 70%であった。バーチャルハンドの見た目ごとの正答率の平均は Abstract では 72%, Realistic では 64%であった。正答率について回転角度 (4 水準) と運動パターン (4 水準) とバーチャルハンドの見た目 (2 水準) で三要因分散分析 (Three-Way repeated measures ANOVA) を行った結果, 回転角度の主効果 $[F(1, 9) = 19.456, p < 0.001]$ と見た目の主効果 $[F(1, 9) = 19.456, p = 0.002]$ のみが確認され, 運動パターンの主効果は確認されなかった $[F(3, 27) = 1.552, p = 0.231]$ 。Ryan's method による回転角度の主効果における多重比較では, 180° - 270° 間以外の全ての組み合わせにおいて有意差が確認された ($p < 0.001$)。図 5 に各条件での正答率を示す。どの要因間でも交互作用は確認されなかったが, 運動パターンと見た目による影響について分析するために運動パターン 4 条件 × 見た目 2 条件の 8 条件それぞれでの回転角度の主効果を調べた (One-Way repeated measures ANOVA)。その結果, 「Circle - Abstract」と「Semicircle - Abstract」の条件では回転角度による主効果は確認されなかった。

6.6 考察

実験 1 全体での正答率は約 68%で, 本実験でのタスクのチャンスレベルは 1/6 であるので実験全体での正答率は高く被験者は実運動とバーチャルハンドの視運動の随伴関係を認知できていたと言える。

回転角度の条件で比較すると有意差が認められ, 0° 条件で一番正答率が高くなり, 180° や 270° では低くなった。この結果は触覚刺激や運動感覚と視覚刺激の随伴関係認知において実身体と視覚的身体の空間的不一致に大きさや解剖学的に不可能な姿勢であることが負の効果を生むという過去の研究の結果を支持する [10][11][20][22]。空間的不一致の大きさが影響を与える要因としては身体の心的回転 (メンタルローテーション) にかかる時間が空間的不一致に比例して大きくなる事が挙げられる [12]。また 90° と 270° では実身体と視覚的身体の空間的不一致の大きさは同じだが, 本実験では被験者の右手を利用したため, 解剖学的に不可能な姿勢である 270° 回転した身体は負の効果が大きかったと考えられる。本研究では 180° と 270° の結果に有意差は見られなかったが, 過去の研究では 270° の姿勢の方が 180° の姿勢よりも解剖学的に不可能な姿勢であるため負の効果が大きいという結果を報告しているものもあり [20], 空間的不一致の大きさと解剖学的な不可能性の大きさのどちらの影響が強くなるかは実験条件によって異なると思われる。

見た目の条件で比較すると, Abstract の方が正答率が高かった。この結果は, Argelaguet らの実験結果を支持して

いる。この要因として, Abstract のシンプルなバーチャルハンドの方が視覚的な運動を認知しやすかったことや Realistic の方が回転による負の影響が強かったことなどが考えられる。Argelaguet らはリアルな見た目の方が agency の評価が下がる理由として, 見た目が実身体に近くなることでそのバーチャルハンドに期待する動きが変わることの影響の可能性を示唆している。我々の実験でも同じような可能性が考えられ, バーチャルハンドの見た目の違いがそのバーチャルハンドの運動に対して異なる期待や予測を与え, 全体の正答率や回転による正答率の変化に結果として現れた可能性がある。

運動パターンと見た目を組み合わせた 8 条件で回転による影響を調査したところ, 空間的整合性の影響を受ける条件と受けない条件の双方を確認できた。ほとんどの条件では回転による正答率への負の影響が確認され, 0° で正答率が高く 180° や 270° で低くなるという結果が得られたが, 円運動かつ抽象的な見た目の「Circle - Abstract」と「Semicircle - Abstract」の 2 条件では有意差が確認されなかった。直線運動の Square や Line の運動パターンでは見た目によらず回転の影響を受けた。また循環運動かどうかでは結果の差が見られなかった。この結果はクランクハンドルを用いた我々の先行研究の結果を支持しており, 他の過去の研究 [9][18][22] では予測が働く能動的運動時も空間的不一致の影響を受けることが示唆されているため, 我々は運動が円運動であるこの 2 条件ではバーチャルハンドが回転して呈示された状況でも「予測との随伴」の認知が容易であったことが要因であると考えられる。それと同時に予測しやすい状況であれば空間的整合性が崩れても自己運動と視運動の認知に影響がないという結果は体性感覚と「感覚との随伴」よりも「予測との随伴」の認知が自己運動と視運動の関係性の認知において優位なプロセスである可能性を示唆する。

円運動であっても Realistic 条件では回転による影響が認められた。この要因について我々は前述したようにバーチャルハンドの見た目の違いがそのバーチャルハンドの運動に対して異なる期待や予測を与えたのではないかと考える。特に本実験環境において, Abstract のバーチャルハンドは運動位置が回転した分だけずれたと解釈できるが, Realistic のバーチャルハンドでは運動位置がずれただけでなく身体イメージが回転したという解釈が生じることになり予測のしやすさに影響を与えたのではないかと推察する。実験 2 ではこのことについて Realistic の見た目条件において「身体イメージの回転」と「運動位置の回転」の一方のみを与える回転条件を設計し追加検証を試みる。

7. 実験 2

実験 1 において円運動を行う条件 (Circle, Semicircle) では Realistic な見た目でのみバーチャルハンドが回転して呈

示されることによる有意差が確認され、Abstract では確認されなかった。そこで実験 2 では、Realistic 条件において追加実験を行うことでその要因の検証を試みた。

実験 2 では実験 1 での「運動パターン：Circle—見た目：Realistic」のセッションに対して新たに実験 1 とは異なる 2 つの回転方法を設定し、追加検証した。その他の実験設計は全て実験 1 と同じである。

7.1 視覚フィードバック

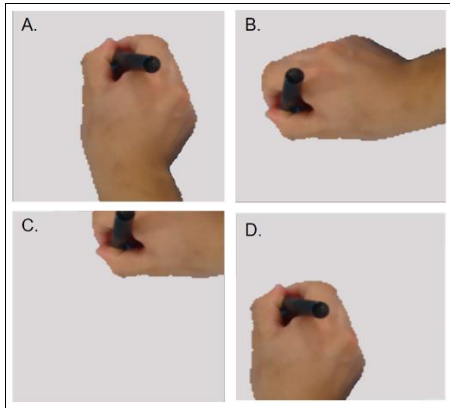


図 6 回転方法による見え方の違い。A は回転を付与していない 0° 条件のバーチャルハンドであり、B は実験 1 での回転方法で 90° 回転したもの、C は「身体イメージの回転」で 90° 回転したもの、D は「運動位置の回転」で 90° 回転したものである。

2 つの条件でのバーチャルハンドは、被験者がポインティングした位置座標と回転を加えた後の位置座標の差分を基に、リアルタイムの手の映像に画像処理を加えることで表現した。

「身体イメージの回転」の条件では、バーチャルハンドがタッチペンでポイントしている位置は被験者がポイントする位置と同じであるが、手の向きが回転する。例えば図 6 - A に示すようにポイントされた場合、90° 回転するブロックでは図 6 - C のようにポイント位置は変わらずに手の向きのみ回転する。

「運動位置の回転」の条件では、バーチャルハンドの向きは常に同じであるが、バーチャルハンドがタッチペンでポイントする位置のみが回転する。例えば図 6 - A に示すようにポイントされた場合、90° 回転するブロックでは図 6 - D のように手の向きは変わらずにポイント位置のみ回転する。

したがって実験 2 ではどちらの回転方法でも、0° 以外の回転条件では被験者がリアルタイムに経験する手の動きとは異なる手の動きをするバーチャルハンドが呈示されることとなる。例えば 90° の回転が付加された状態で被験者の手が「奥側から右側」に運動したときに、「身体イメージの回転」では右側からのびたバーチャルハンドの手が「右側 - 手前側」の運動し、「運動位置の回転」では下側からの

びたバーチャルハンドの手が「左側 - 奥側」に運動する。

7.2 参加者

実験には 20 歳から 22 歳の健康な大学生 12 名（男性 9 名、女性 3 名）が参加した。すべての被験者は正常な視力（または矯正視力）を有し、右利きだった。

7.3 結果

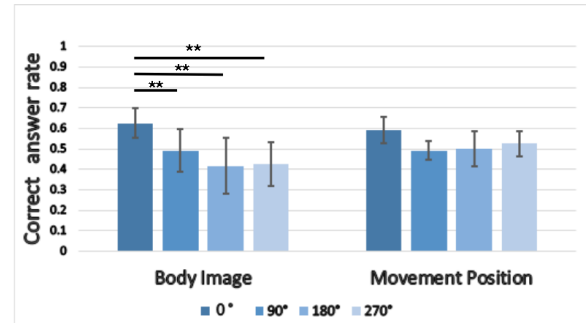


図 7 実験 2 の正答率（エラーバー：95%の信頼区間、+：p<.10, *：p<.05, **：p<.01。右は「身体イメージの回転」のグラフ群で、左は「運動位置の回転」のグラフ群である。）

図 7 に各条件での正答率を示す。「身体イメージの回転」における全体の正答率の平均は約 48%であった。回転角度ごとの正答率の平均は 0° では 62%、90° では 47%、180° では 42%、270° では 42%であった。5%有意水準で分散分析を行った結果、回転角度の主効果 [F(3, 33) = 8.723, p < 0.001] が確認され、Ryan's method による回転角度の主効果における多重比較では 0° と他の 3 条件間で有意差が確認された (p < 0.001)。「運動位置の回転」における全体の正答率の平均は約 52%であった。回転角度ごとの正答率の平均は 0° では 59%、90° では 49%、180° では 50%、270° では 52%であった。5%有意水準で分散分析を行った結果、有意差は出ず回転角度の主効果は確認されなかった [F(3, 33) = 2.094, p = 0.120]。

7.4 考察

「身体イメージの回転」では被験者のポインティング位置とバーチャルハンドのポインティング位置は常に同じだったにもかかわらず 0° と他の 3 条件の間に有意差が確認された。これは運動位置の一致性にかかわらず Realistic 条件のバーチャルハンドと実身体の身体イメージに不一致が生じることが自己運動と視運動の随伴関係の認知において負の影響を与えたことを示唆する。また有意な差ではなかったが、90° の条件に比べて 180° や 270° での正答率が低く、この結果は過去の研究の結果[10][11][20][22]や実験 1 での結果と一致し、空間的不一致の大きさと解剖学的な不可能性の大きさが関係すると考えられる。

「運動位置の回転」の条件では回転角度による有意差は確認されなかったが、0° に比べると他の 3 条件の正答率が低かったが、「身体イメージの回転」と異なり 0° 以外の

3 条件の正答率は横ばいであり、空間的不一致の大きさと関係性は確認されなかった。0° 以外の 3 条件で正答率が下がった 1 つの要因としては 7.1 で述べたように 0° 以外の条件ではバーチャルハンドの運動が実身体の手運動と経験的に異なることが影響した可能性がある。また本実験においては被験者の手首の運動に制限を加えてはいたが、リアルタイムの映像に対してポインティング位置を元に画像処理を加えたため、ポインティング位置の移動に影響しない手の細かな動きと画像処理後の運動の間に不一致が生じ、不自然な動きとに見えた可能性もある。以上の結果から「運動位置の回転」では実験 1 の Abstract の見た目のバーチャルハンドが円運動をする条件と同様にモーターコマンドからの予測のしやすさが空間的不一致の大きくても自己運動と視運動の随伴関係の認知に有効に働いた可能性が考えられる。

また実験 2 全体での正答率の平均は約 50% で、実験 1 と比較すると全体的に正答率が低かった。その要因として新たに設定した回転方法では 0° 以外の条件でのバーチャルハンドの運動が実身体の手運動と経験的に異なることが難しさにつながった可能性が考えられるが、それだけでなく実験 1 と全く同じ条件である回転角度が 0° でも正答率が低かったことから被験者要因の違いや実験 1 に比べて総実験数が少なかったことによる学習効果の小ささも影響した可能性があると考えられる。

8. 議論

本実験では自己帰属感のプロセスである自己運動と視運動の随伴関係の認知において、視覚的な運動についてモーターコマンドから予測しやすいかが重要であることが示唆された。また視覚的な運動に対する予測はその見た目によって影響を受ける可能性があり、本実験では実身体に近い見た目のバーチャルハンドに対しては実身体の身体イメージと空間的不一致が生じることで運動の随伴関係の認知に負の影響を与えることが確認された。

VR 環境においては、操作者の実世界の運動や身体を拡張、変容して表現する状況が多く見られる。このような VR コンテンツでは従来の GUI や実世界での体験を超えた体験をユーザーに与えることができるという有効性がある。しかし実世界の運動や身体を拡張、変容して表現することで操作者と視覚的なアバターの運動や身体イメージに不一致が生じることでアバターに対する自己帰属感の生起に負の効果が生じる可能性がある。それを解決する上で、本実験での知見が空間的不一致を許容して扱うことができるデザインの構築に役立ち、「予測との随伴」が保たれることが VR 空間でのインタフェースデザインでの重要なファクターとなるのではないかと我々は考える。例えば、操作する視覚的なオブジェクトの運動量を変調することで疑似的な触力覚が感じられる現象 (Pseudo-Haptics) が広く知られて

いる[8]。この現象は agency が保たれた上で空間的不一致が生じることで視覚的な運動の変化の要因を外力として認知することで生じると考えられる。また、小川らは実際の手とは異なる形状でありながら運動が同期しているバーチャルハンドを用いて体験者に実世界では体験できないような奇妙な感覚を生起させるインタフェース「Metamorphosis Hand: えくす手」を提案している[21]。このインタフェースに登場するバーチャルハンドの 1 つ 1 つの指は実身体と空間的不一致が生じているが、agency を感じることから自分の手に変形したような奇妙な情動が得られる。これらの事例について本研究の結果から考察すると実運動から視覚的運動結果を予測しやすいことが空間的不一致がある状況下での agency の獲得に有効に働いているのではないかと考える。

また、本研究では抽象的な見た目の方が自己運動と視運動の随伴関係が認知しやすかったという結果が得られたが、視覚的な身体の見目は ownership を感じる上で重要なファクターであるため、抽象化された身体表現が VR インタフェースにおいて必ずしも有効である訳ではないと考える。例えば、視覚的な身体が手の形状をしていることが ownership を高めることなどが報告されている[1]。さらに ownership を感じることは視覚の優位性 (visual capture) の獲得に関与しており、ownership を強く感じているときは視覚の運動を信じやすくなるという報告[8]や、VR 空間のアバターの見た目により操作者の振る舞いに影響を与えるという報告[7]がある。このように、実身体に近い視覚的な身体の見目は特に ownership を利用した錯覚を与えるコンテンツにおいて有効であると考えられる。

しかし、テレイグジスタンスのロボットや VR 上のアバターの運動を利用してタスクを行う場合など操作に精度を求める状況では、実身体に近い見目がマイナスに働く場合があると考えられる。例えば操作する視覚的対象がユーザーの身体運動を拡張した動きをしたり、ユーザーの身体運動を完全に再現できていない状況が起きた場合、ユーザーの運動と操作対象の運動に空間的不一致が生じ、操作の精度の低下が起り得る。このような状況では身体イメージの不一致による影響を受けやすい実身体に近いリアルな見目を利用するよりも、骨格情報などを持たない抽象的な見目を利用したり、空間的不一致を補完するようなメタファーを追加するなど身体イメージの不一致を許容しやすくするデザインが必要となると考える。

今後、さらなる分析を行い自己帰属感の生起過程について詳細に明らかにすることで本研究の知見を VR インタフェースの設計指針の構築に応用することを目指す。

9. 制約と課題

ダミー運動を含む複数の選択肢の中から正解を探すというタスクが先行研究とは異なる結果を生む要因となった可

能性があり、被験者のダミー運動の存在がどのような効果をもたらしたかは定かではない。またその効果は見た目、運動パターン、角度の条件によって異なる可能性がある。

各実験は被験者内要因で調査しており、実験1と実験2の被験者は異なったため各実験間の正確な比較は行えなかった。実験2に実験1と異なる被験者を用いた理由は実験1による学習効果を避けるためであった。また、見た目の影響については Abstract と Realistic の2条件のみしか検証していないため詳細には明らかになっていない。先行研究[1]ではこの2条件に加え、骨格情報はわかるがリアルな肌質でないバーチャルハンドを用いた3条件での比較を行っており、本研究での結果に「リアルな肌質か」「骨格情報がわかるか」「形状から回転角度がわかるか」などがどのように影響するかについて興味もたれる。今後は実験1と実験2の条件の比較を可能にし、見た目の条件を増やすことでこれらについてより詳細に検証する予定である。

今回は手のひら部分のみを可視化したがる、腕までなどもっと大きな身体部位までを可視化した場合にどうなるかというのも興味深いところである。

10. 結論

本研究では、画面上に提示されたバーチャルボディに対する自己帰属感の生起において予測のしやすさに注目し、バーチャルボディおよびその運動方向を回転した場合の影響について検証した。その結果、回転による影響を受けやすい条件と受けにくい条件の双方が確認された。回転の影響を受けにくかった条件では、視覚的な身体の運動をモーターコマンドから予測しやすかったことが自己運動と視運動の随伴関係の認知に有効に働いたと考えられる。また視覚的な身体の見え方や回転方法によっても予測のしやすさが変わることがわかった。そこからの議論として、ユーザーが画面上の物体を操作するようなインタフェースのデザインにおいて、視運動の予測のしやすさが重要なファクターとなり、見え方や呈示位置などの状況に応じてユーザーが運動結果を予測しやすい設計を考える必要であると結論付けた。今後、予測と自己運動の認知の関係性についてさらなる分析を行い自己帰属感の生起過程について詳細に明らかにすることで本研究の知見を VR インタフェースの設計指針の構築に応用することを目指す。

謝辞 実験にご協力頂いた皆様に、謹んで感謝の意を表す。

参考文献

[1] Argelaguet, F., Trico, M., Hoyet, L. and Lécuyer, A., The Role of Interaction in Virtual Embodiment. Effects of the Virtual Hand Representation; In Proc. of IEEE VR 2016, 3-10. (2016)

[2] Botvinick, M., & Cohen, J., Rubber hands 'feel' touch that eyes see.; Nature, 391,756. (1998)

[3] Brozzoli, C., Gentile, G. and Ehrsson, H.H., That's near my hand! Parietal and premotor coding of hand-centered space contributes to

localization and self-attribution of the hand. Journal of Neuroscience, 32 (42), 14573-14582. (2012)

[4] Ehrsson, H. H., Spence, C., and Passingham, R. E., That's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb; Science, 305, 875-877. (2004).

[5] Gallagher, S., Philosophical conceptions of the self. Implications for cognitive science; Trends in Cognitive Science, 4, 14-21. (2000)

[6] Hari, R., and Jousmaki, V., Preference of personal to extrapersonal space in visuomotor task. Journal of Cognitive. (1996)

[7] Kilteni, K., Bergstrom, I. and Slater, M., Drumming in immersive virtual reality: the body shapes the way we play. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 19(4), 597-605. (2003)

[8] Lécuyer, A, Burkhardt, J.M. and Etienne, L., Feeling Bumps and Holes without a Haptic Interface. the Perception of Pseudo-Haptic Textures; ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (ACM CHI), April 24-29, Vienna, Austria. (2004)

[9] Salomon R, Fernandez NB, van Elk M, et al., Changing motor perception by sensorimotor conflicts and body ownership. Scientific Reports 6, Article number: 25847.

[10] Sekiyama, K. Kinesthetic aspects of mental representations in the identification of left and right hands. Perception and Psychophysics, 32, 89-95. (1982)

[11] Sekiyama, K. Dynamic spatial cognition: Components, functions, and modifiability of body schema. Japanese Psychological Research, 48 (3), 141-157. (2006)

[12] Shepard, R. N., & Metzler, J., Mental rotation of three-dimensional objects; Science, 171, 701-703. (1971)

[13] Shimada, S., Fukuda, K., & Hiraki, K. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. PLoS ONE, 4, e6185. (2009)

[14] Shimada, S., Qi, Y., & Hiraki, K. Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements. Experimental Brain Research, 201, 359-364. (2010)

[15] Short, F., & Ward, R. Virtual limbs and body space: Critical features for the distinction between body space and near-body space. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35, 1092-1103. (2010)

[16] Tsakiris, M., Haggard, P., Franck, N., Mainy, N., & Sirigu, A. A specific role for efferent information in self-recognition; Cognition 96, 215-231. (2005)

[17] Tsakiris, M., Schu'tz-Bosbach, S., & Gallagher, S. On agency and body-ownership. Phenomenological and neurocognitive reflections; Consciousness and Cognition, 16, 645-660. (2007)

[18] van den Bos, E., & Jeannerod, M. Sense of body and sense of action both contribute to self-recognition. Cognition, 85, 177-187. (2002)

[19] Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. An Internal model for sensorimotor integration; Science, 269, 1880-1882. (1995)

[20] 井手正和, 長田佳久: 身体的制約がラバーハンドイリュージョンに及ぼす効果; 立教大学心理学研究. 54, 13-20. (2012).

[21] 小川奈美, 伴祐樹, 櫻井翔, 鳴海拓志, 谷川智弘, 廣瀬通孝: えくす手: 変調バーチャルハンドへの即応的な身体所有感の生起による身体拡張システム; 情報処理学会 インタラクシオン 2016. (2016)

[22] 光真坊悟, 嶋田総太郎: 自己認識における身体映像の回転と遅延の与える影響; Cognitive Studies, 18(1), 41-49. (2011).

[23] 齊藤寛人, 福地健太郎: 能動的回転操作における自己帰属感の生起過程の分析; 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 22 No. 1, 81-90. (2017)

[24] 渡邊恵太, 樋口文人, 稲見昌彦, 五十嵐健夫: 複数ダミーカーソル中における自分自身のカーソル特定; 情報処理学会 インタラクシオン 2013. (2013)

[25] 渡邊恵太: 融けるデザインーハードソフト×ネット時代の新たな設計論; ビー・エヌ・エヌ新社, 161p. (2015)