

# 前腕を対象とした運動錯覚に関する鏡像実験システムの開発

角田 雄太郎<sup>\*1</sup> 上杉 繁<sup>\*2</sup>

## Development of Experimental System Using a Mirror-Image to Study Forearm's Illusory Kinesthesia

Yutarou Tsunoda<sup>\*1</sup>, Shigeru Wesugi<sup>\*2</sup>

**Abstract** – The goal of our research is to create and control an illusory kinesthesia with visual representation of a human body, and authors focused on a mirror illusion which utilizes a mirror-image of a right side of a human body as visual representation of the other left side of the body. Therefore authors developed an experimental system which moved the mirror-image of a forearm by rotating a mirror around a roll axis and a yaw one. Furthermore authors conducted an experiment to investigate an illusory kinesthesia by changing range of rotational angle and velocity of a right hand's mirror-image. Experiment results indicated that our experimental system created a feeling as if a physical left hand, which was still, were moving by rotating a right hand's mirror-image in a smaller range of rotational angle and in slower velocity.

**Keywords:** illusory kinesthesia, visual representation of a human body and a mirror-image

### 1. はじめに

近年、「この身体は自分のものである」という身体保持感や、「この身体の運動を引き起こしたのは自分自身である」という運動主体感などの自己身体感覚<sup>[1]</sup>の研究において、ビデオ映像やVR技術を活用し異種感覚間に様々な刺激を与える手法が試みられている。例えば、被験者の手を実験装置で動かす時の映像を遅延させ被験者に提示することで、視覚・体性感覚間の時間的整合性を調べる研究<sup>[1]</sup>や、被験者の手とCGモデルの手に同時に触覚刺激を与え、そのCGモデルを視覚情報として被験者に提示することで被験者がCGモデルを自身の手のように感じる錯覚に関する研究<sup>[2]</sup>などが行われている。

映像やVR技術を活用した身体の実験技術は、上述した自己という問題を科学的に研究するための手がかりとして、あるいはコミュニケーションや教育・学習、エンターテインメント分野への応用として期待されている。

こうした状況において著者らのグループでは、新たな身体表現のための技術として、四肢の運動錯覚創出に関する研究に取り組んできた。これまでに、腱振動刺激法による運動錯覚現象に着目し、上腕が伸びきった状態よりもさらに伸展する過伸展という運動錯覚を引き起こす実験システムを開発し、過伸展錯覚の特性を調査する研究を行ってきた<sup>[3]</sup>。

本研究では、身体の実験表現を利用して運動錯覚を創出させることを目的とし、鏡像錯覚に着目した。そして鏡像を自在に動かす実験システムを開発し、前腕を対象とした運動錯覚に関する実験を行ったので報告する。

### 2. 鏡像実験システムの開発

#### 2.1 実験システムのデザイン

身体のような視覚的表現を生成する方法として、ビデオ映像やCG技術を活用することは一般的といえる。それらの技術の特徴として、物理的な身体に拘束されずに、身体の形状やテクスチャ、さらには位置・姿勢を自由に描画可能であることがあげられる。一方、それらの技術を原理的に捉えたときには、映像提示の実時間性の問題や、皮膚の精細なテクスチャの再現性、さらには光学的特性による視点位置などの問題が考えられる。本研究ではこうした原理的な問題を可能な限り対象とせず、身体の実験表現を検討するため鏡像に着目した。

鏡像を身体の実験表現として利用した例として、身体切断後にあるはずもない身体に痛みを感じる幻肢痛の治療<sup>[4]</sup>があげられる。著者らはこの治療に使われる仕掛けを参考に図1のような実験モデルを製作した。この実験モデルでは鏡に映った右腕の鏡像をあたかも自身の左腕の視覚情報として利用できる。

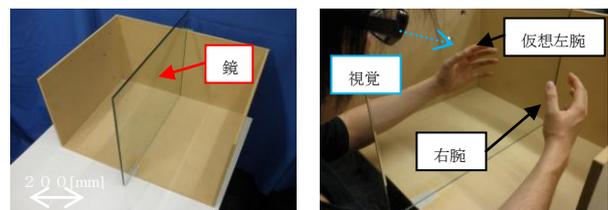


図1 鏡像実験モデル

Fig.1 An experimental model using a mirror-image

本研究では、この実験モデルにおける右腕の鏡像である仮想左腕（以下、右腕の鏡像を仮想左腕と記す）の姿勢変化を自在に操作する方法を考案することにした。

\*1: 早稲田大学大学院 創造理工学研究所

\*2: 早稲田大学理工学術院

\*1: Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University

\*2: Faculty of Science and Engineering, Waseda University

まずは、被験者が右腕を動かして仮想左腕の姿勢を変化させる場合を考えてみると、確かに様々な仮想左腕の表現が可能であると想定されるが、全く同じ動きを繰り返し表現することや、位置・速度を設定して被験者に右腕を動かしてもらうことは現実的に困難である。さらには、被験者が右腕を動かすことに集中して、左腕の運動の感覚に上手く注意を向けられない可能性も考えられる。そこで、仮想左腕の姿勢を変化させるために両腕を固定した状態で、鏡を動かす手法を提案する。図2に示すようにこの手法においては、並進運動とピッチ軸回転による鏡の操作では仮想左腕の姿勢変化を起こせず、ロール軸とヨー軸の二軸回転運動が有効だと考えられる

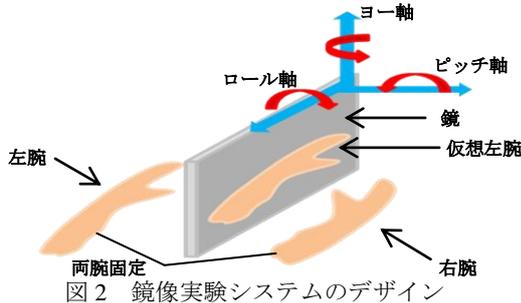


図2 鏡像実験システムのデザイン

Fig.2 Design of an experimental system using a mirror-image

上記の実験システムを開発するにあたり、鏡を任意の回転角度・回転速度で振動を抑えて回転させる鏡面二軸回転機構部の開発が必要になる。さらに被験者が鏡の回転に気付かないような環境の開発も必要となる。

## 2.2 鏡像実験システムの製作

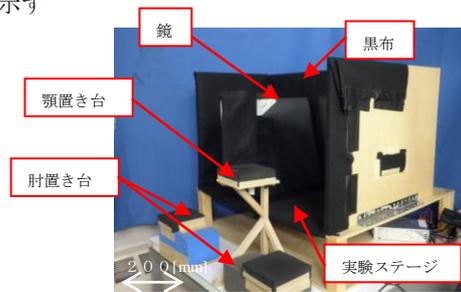
2.1 で述べた実験システムに対する要求緒言をもとに設計・製作した鏡像実験システムの全体図を図3に示す。本実験システムは鏡面二軸回転機構部、実験ステージ、モータ制御装置から構成されているが、以下にそれらの詳細を示す。

鏡面二軸回転機構部は、機構部が被験者の視界に入らないように小型にすることと、仮想左腕の滑らかな姿勢変化を実現するために低振動回転であることを考慮した。そこで、携帯電話のディスプレイ回転部などに用いられている二軸ヒンジ機構を参考に設計することで小型化した。また鏡が高速回転しないことを踏まえ軸受の材料として低摩擦のジュラコン材を使用し、アクチュエータとして高分解能な二台のステッピングモータを組み込むことにより、鏡(330×300×3[mm],0.353[kg])を任意の回転速度、回転角度で、振動をほとんど生じることなく二軸回転(ロール、ヨー軸回転)させることを実現した。

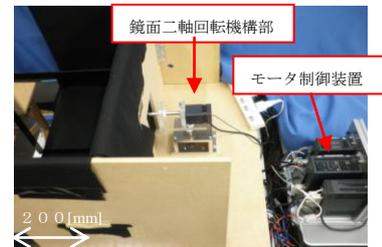
実験ステージにおいては、ヨー軸回転駆動源であるステッピングモータの収納空間を実験ステージの下に設け、実験時に被験者の視界に鏡面二軸回転機構部が入らないように製作した。また鏡のエッジ部に黒色のビニールテープを貼り、さらに実験ステージのエッジ部が鏡に映ら

ないように実験ステージ全体を黒布で覆うことで、被験者が鏡の回転に気づかないような環境を構築した。

モータ制御装置では PC 上で作成したモータの回転方向、回転数、回転速度などの指令コマンドを通信ケーブルで接続したモータコントローラに送り、モータドライバを介して、ステッピングモータをオープンループ制御している。最後に、開発した実験システムの性能を表1に示す



(a)実験ステージ



(b)鏡面二軸回転機構部とモータ制御装置

図3 鏡像実験システム

Fig.3 the experimental system using a mirror-image

表1 鏡像実験システムの性能

Table 1 Performance of the experimental system using a mirror-image

	ロール軸	ヨー軸
基本ステップ角	$2.4 \times 10^{-4}$ [deg]	
鏡面の回転速度範囲	$2.4 \times 10^{-3} \sim 48 \times 10^0$ [deg/s]	
鏡面の回転角度範囲	-144~+120[deg]	±24[deg]
鏡面の繰り返し回転角度誤差	1/720[deg]以下	

## 3. 運動錯覚実験

### 3.1 実験方法

開発した鏡像実験システムによって、動かしていない左手にどのような運動感覚が生じるのかを調査する、予備的な実験を行った。被験者 16 名 (20~22 歳の成人男性)のうち 8 名 (被験者 A~H) は①仮想左手の姿勢角度量の変化 (以下、回転角度変化)に関する実験を行い、他の 8 名 (被験者 I~P) は②仮想左手の姿勢速度量の変化 (以下、回転速度変化)に関する実験を行った。各実験では、表 2 に示す回転条件で鏡をロール軸回転させることで、前腕の回内・回外運動の姿勢変化として提示する。順序効果を避けるために、被験者ごとに鏡を回転させる実験条件の順序はランダムにした。またモータ制御

装置の駆動音による実験への影響を避けるために、実験中は被験者にイヤホンを装着させ、ホワイトノイズを聞いてもらうことにした。さらに被験者は顎と両手を安定させるために、図4に示すようそれぞれ台上にのせ、光環境を一定にするために、被験者と実験ステージを黒布で覆った。



図4 覆いを外した状態の実験の様子

Fig.4 Experimental scene in the condition of a cover removed

表2 実験条件

Table 2 Details of experiment conditions

①回転角度変化実験	②回転速度変化実験
(a)鏡静止状態	(a)鏡静止状態
(b)回転角度(小): $\pm 4.8[\text{deg}]$ の範囲 (回転速度: $1.2[\text{deg/s}]$ で一定)	(b)回転速度(小): $1.2[\text{deg/s}]$ (回転角度の範囲: $\pm 4.8[\text{deg}]$ で一定)
(c)回転角度(大): $\pm 8.4[\text{deg}]$ の範囲 (回転速度: $1.2[\text{deg/s}]$ で一定)	(c)回転速度(大): $2.4[\text{deg/s}]$ (回転角度の範囲: $\pm 4.8[\text{deg}]$ で一定)

以下に①回転角度変化実験における実験手順を示す。

#### (1)鏡静止条件

まず鏡の静止状態において、実験者は被験者に仮想左手と自身の左手の物理的な位置が一致するように肘の位置を調節させ、一致したと感じたらその後は左右の腕を動かさないように指示する。その後、被験者に仮想左手を注視させ、仮想左手が自身の左腕のように感じたら実験者に口頭で合図を送らせ、それまでにかかった時間を計測した。

#### (2)鏡回転条件

鏡静止条件と同様に、実験者は被験者に仮想左手と自身の左手の物理的な位置が一致するように肘の位置を調節させ、一致したと感じたら口頭で合図を送らせる。被験者の合図から30秒後に鏡を回転させ仮想左手の姿勢を変化させる。30秒という時間は鏡静止条件の実験において計測した時間を参考にした。実験者は被験者に左右の腕を動かさないように指示して、仮想左手の姿勢変化を3分間注視させる。

各条件において被験者の左手の様子をビデオカメラで撮影した。被験者は各条件の実験終了後に、表3に示すような左手の動きの感覚の強さを5段階で評価する調査(鏡静止条件においては質問項目1,2のみ)と、左手の動きの感覚に関する自由記述を行った。また各実験条件の間には適度な休息を与えた。②回転速度変化実験においても①回転角度変化実験と同様の手順で実験を行った。

表3 左手の感覚に関する質問項目

Table 3 Question items about a feeling of the left hand

質問項目
項目1:目に見える手の像を自身の左手と感じるか
項目2:目に見える手の像を偽の左手と感じるか
項目3:手の像が動いている時、自身の左手が動いていると感じるか
項目4:手の像が動いている時、偽の左手が動いていると感じるか
項目5:手の像が動いている時、自身の左手を動かしていると感じるか
項目6:手の像が動いている時、自身の左手が動かされていると感じるか

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 鏡静止条件における仮想左手に対する感覚

被験者16名に行った鏡静止条件の実験における、左手の感覚に関する調査結果を図5に示す。ただし、項目は1,2のみとする。

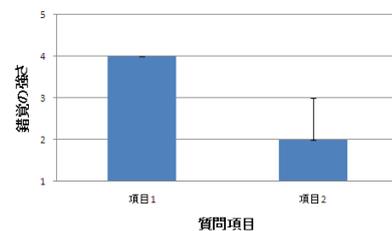


図5 鏡静止条件における仮想左手に対する感覚

Fig.5 Sense of a virtual left hand in immovable mirror condition

### 3.2.2 鏡像の回転角度変化量と動きの感覚の強さ

①回転角度変化実験として、被験者8名に行った左手の動きの感覚に関する実験結果を図6に示す。各質問項目において2条件間のサイン検定を行った結果、いずれも有意差は見られなかった。

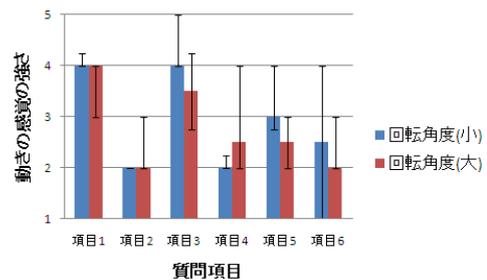


図6 鏡像の回転角度変化量と動きの感覚の強さ

Fig.6 Relation between rotational angle of a mirror image and intensity of left hand's sense of motion

### 3.2.3 鏡像の姿勢速度変化量と動きの感覚の強さ

②回転速度変化実験として、被験者8名に行った左手の動きの感覚に関する実験結果を図7に示す。

各質問項目に対してサイン検定を行った結果、質問項目3において、回転速度(小)条件と回転速度(大)条件の二つの鏡回転条件における運動錯覚の強さに有意水準5%で有意差があった。(両側検定: $p < .05$ ,  $N=6$ )

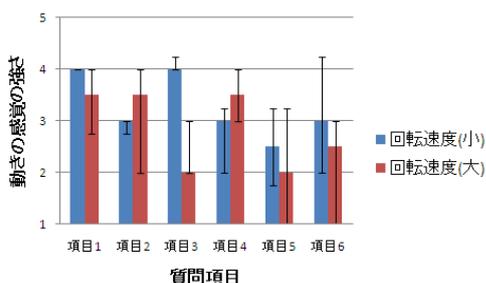


図7 鏡像の回転速度変化量と動きの感覚の強さ

Fig.7 Relation between rotational velocity of a mirror image and intensity of lefthand's sense of motion

### 3.2.4 運動錯覚のコメント結果

各条件の実験終了後に行った左手の動きの感覚に関するコメント結果をまとめたものを表4に示す。

表4 左手の動きの感覚に関するコメント

Table 4 comments about the feeling of left hand's motion

①回転角度変化実験	
(i)回転角度(小)(範囲:±4.8[deg])	(ii)回転角度(大)(範囲:±8.4[deg])
<ul style="list-style-type: none"> <li>・仮想左手を目で追う時、動きにつられて引っ張られているような感覚</li> <li>・手が勝手に動いているような気がした</li> <li>・手が震えているような感覚を受けた</li> <li>・前半は特に感じなかったが、後半は左手を動かしているように感じた</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鏡が動いている時、若干左手が動いている気がした</li> <li>・自分の左手と思っていたところ、ふと偽物と感ずるようになる</li> <li>・自分の手より太っているように見え、自身の左腕とはあまり感じなかった</li> </ul>
②回転速度変化実験	
(i)回転速度(小)(大きさ:1.2[deg/s])	(ii)回転速度(大)(大きさ:2.4[deg/s])
<ul style="list-style-type: none"> <li>・像の姿勢変化につられて、左手が動いている感覚を得た</li> <li>・左手に連動して、体全体が回転するように感じた</li> <li>・回転速度(大)条件よりも、つられて手が動いているように感じる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・仮想左手の動きが速く、左手だとは感じられなかった</li> <li>・仮想左手が第3の手のような感じがする</li> </ul>

## 4. 考察

鏡像の回転角度の条件と回転速度の条件の違いによる、手の動きの感覚への影響について考察する。

自身の手の動きの感覚に関する質問項目3の結果を注目し、回転角度の条件に関する図6を見ると、いずれの条件においても3以上の強さの運動の感覚を報告していることから、動きの感覚が生じていることが分かる。一方で、動きの感覚に関するコメント結果を調べると、回転角度(小)条件では、8人中7人が左手が動いているような感覚を得たとコメントし、回転角度(大)条件では、8人中2名がそのような動きの感覚が生じたと報告した。このことから、小さな回転角度の方が、強い動きの感覚を誘発できる可能性が考えられる。

また、回転速度の条件に関する図7を見ると、回転速度(小)条件において3以上の強さの動きの感覚を報告し、回転速度(大)条件ではそれ以下の強さを報告した

こと、さらにはそれらの条件間に有意差も確認できることから、回転速度(小)条件の方においてのみ動きの感覚が誘発された可能性が示唆されている。

これらの結果より、仮想左腕の姿勢の回転角度・速度の変化が大きくなるにつれて、実体の左手の体性感覚情報の方が、仮想左手の姿勢変化の視覚情報よりも優位な影響を与えていることが推察できる。動きの感覚に影響を与える鏡像変化の範囲や、こうした異種感覚間の有意性の境界の問題に関しては、さらに細かな実験条件を設定し、検討していきたい。

また、各実験において左手が動いていると強く感じた被験者のビデオ映像を見ると、16人中4名において、ロール軸回転方向における、実体の左手の動きを確認した。このことは錯覚としての動きの感覚というよりは、鏡像の動きに引きこまれて、動かしているという意図はないにせよ自動的に手が動いてしまい、その実際の動きに対して、動きの感覚が生じたと報告したとも考えられる。同様に、他の被験者においても、実体の手は動かないにせよ筋肉レベルで反応が生じている可能性が予想される。こうした点については、表面筋電位を計測することを検討していきたい。

## 5. おわりに

我々は運動しているスポーツ選手のビデオ映像にあわせて思わず身体が動くことや、ビデオゲームのキャラクターの動きに力を込めてしまうなどの、自身の身体外の映像に対して身体の動きやその感覚が連動する現象を日常的に経験している。こうした映像コンテンツをデザインするための基礎研究として、あるいは本論文の冒頭に述べたような自己の問題に関する実験ツールとして、本研究で開発した実験システムは今後寄与できる可能性が考えられる。こうした技術への発展を目指し、鏡を複数軸で自在に動かしたときの手の動きの感覚の調査や、自然な手の動きを再現する鏡像の可動方法、さらには鏡像の身体部位の範囲を広げることなどについても今後研究していきたい。

## 参考文献

- [1] 開,長谷川: ソーシャルブレインズー自己と他者を認知する脳; 東京大学出版会,pp59-77,(2009)
- [2] 河合,柴田: 先端メディアと人間の科学; 早稲田大学eヒューマン研究所,pp37-46,(2006)
- [3] 友田,上杉,三輪: 上腕への腱振動刺激と他動運動による過伸展錯覚の特性; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌,Vol.14,No3,pp361-369,(2009)
- [4] V.S.Ramachandran: 脳のなかの幽霊; 角川書店,pp158-207,(1999)