

修士論文

HMD ベース VR 環境で提示された上肢運動の
追跡特性

指導教員 野村由司彦 教授

平成 29 年度

三重大学工学研究科機械工学専攻

プロセス解析研究室

415M116 木下 真

目次

第1章	序言.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	既存研究.....	2
1.3	観測視野.....	5
1.3.1	前方直接視野.....	5
1.3.2	前方鏡像視野.....	5
1.3.3	後方直接視野.....	6
1.3.4	観測視野の仮説.....	6
第2章	システム構成.....	11
2.1	ハードウェア構成.....	11
2.1.1	HMD (Head-Mount Display).....	11
2.1.2	トラッカー.....	11
2.1.3	コントローラー.....	11
2.2	ソフトウェア構成.....	12
2.2.1	映像提示ソフト.....	12
2.2.2	使用したアバター.....	13
第3章	片上肢運動追跡実験.....	15
3.1	実験条件.....	15
3.1.1	観測視野.....	15
3.1.2	提示動作.....	15
3.2	実験手順.....	18
3.3	評価方法.....	19

3.3.1	移動方向誤答率.....	20
3.3.2	応答遅れ.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
3.3.3	移動距離誤差.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
3.4	実験結果.....	20
3.4.1	移動方向誤答率の評価.....	20
3.4.2	10%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
3.4.3	90%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
3.4.4	移動距離誤差の評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
3.4.5	考察.....	21
第4章	両上肢運動追跡実験.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.1	実験条件.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.1.1	観測視野.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.1.2	提示動作.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.2	実験手順.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3	実験結果.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.1	移動方向誤答率の評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.2	10%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.3	90%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.4	移動距離誤差の評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.5	考察.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
第5章	まとめ.....	23
第6章	付録.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.1	片上肢運動追跡実験.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.1.1	移動方向誤答率.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.1.2	10%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。

6.1.3	90%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.1.4	移動距離誤差の評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.2	両上肢運動追跡実験	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.2.1	移動方向誤答率の評価	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.2.2	10%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.2.3	90%点応答遅れの評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
6.2.4	移動距離誤差の評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
参考文献.....		24
謝辞.....		26

第1章 序言

1.1 研究背景

球技や格闘技，ダンスなどといったスポーツに置ける特定の動きの習熟は，それぞれの競技において高いパフォーマンスを発揮するために非常に重要な要素である．これらの動作は特に教えられることもなく自然に修得することもあるが，多くの場合，動作について何らかの教示を受け，教示に基づいて修正しながら学習を進める．このような動きの習熟方法として，触覚，視覚，聴覚など様々な人間の感覚器官に働きかけることで教示を行う手法は古くから研究されている．その中でも視覚を用いた動作教示手法は，非常に有効であることが既存研究においても示されてきている．ここで述べる視覚を用いた動作教示手法とは，学習者が動画や写真を観察するなど，視覚から動きに関する情報を得て，動きの体得に努めるものである．

しかし，近年これら視覚情報を用いた動作学習は変貌しつつある．この変貌の立役者となっているのは，主に高性能な HMD の登場に伴った，VR 技術の進歩である．この VR 技術は，コンピュータ援用動作教示の有効な手法としても利用され始めており，コンピュータ援用自己学習にも新しい展開がもたらされると考えられる．本研究は，このような展開の一つとして位置づけられるものであり，ステレオ HMD(Head-Mount Display)を用いた VR を援用して動作の学習を支援するシステムの開発を目標としている．HMD を使用する利点として，没入感の向上，お手本を観察する視野の切り替えが容易であることなどがあげられる．

我々はこの視野の切り替えが容易に行えることにとりわけ注目している．その理由として，お手本の動きを正確に，素早く認知するために適切な観測

視野は学習する動きによって変化すると考えられるためである。そのため、VR を用いた動作学習では、お手本の動きに合わせて、学習者が適切に観測視野を切り替えることができる学習手法が有効ではないかと考えている。本研究では、このような動作学習方法を提案するにあたり必要になってくると予想される、各観測視野における学習者の提示された動作に対する知覚・再現パフォーマンスの調査を行っている。

1.2 既存研究

近年では、VR 環境を動作学習に応用する研究や VR 環境における知覚精度を調査する研究が増えつつある。例えば、Bailenson らが VR を用いた動作学習方法と従来のビデオを用いた動作学習方法の比較を行なっている[1]。そしてシステムを使用した学習者にアンケートを取ることで、VR を用いた動作学習の方が被験者は没入感をより得ることができ、結果としてよりお手本動作を認識しやすくなることを示している。また Roosink らは、VR 環境における自らの姿勢の知覚精度を調査している。具体的には被験者の姿勢にスクエーリングという形で被験者の実際の姿勢とわずかに異なる姿勢を提示し、その違いを被験者がどの程度知覚できるかを調査している[2]。結果として被験者の知覚精度は十分高かったことから、動作学習に VR を問題なく適用できることを示した。

また、観測視野による知覚の変化を調査した研究も古くから進められている。Adria らは表示される自らの動作映像にリアルタイムで遅延を加え、知覚できる最小の遅延時間が観測視野によってどのように変化するかを調査している[3]。この研究で取り扱っている観測視野として、Direct（一人称視点で自分自身を観測）、Mirror（前方から三人称視点で左右反転した自分自身を観測）、Behind（後方からの三人称視点で自分自身を観測）の3種類を用意し、さらにそれぞれの観測視野に反転などの効果を加えている。その結果、

Direct, Mirror, Behind の順で知覚できる遅延時間の閾値は小さくなる傾向が見られ、さらに観測視野への反転などの効果が少ないほど遅延時間閾値は小さくなった。この結果は観測した自身の動きが反転などによって普段なじみのないものに近づくほど、自身の動きの映像とは認識しにくくなり、結果自分の動きと提示動作の映像との間の遅延に対する知覚が鈍くなっていると考えられる。

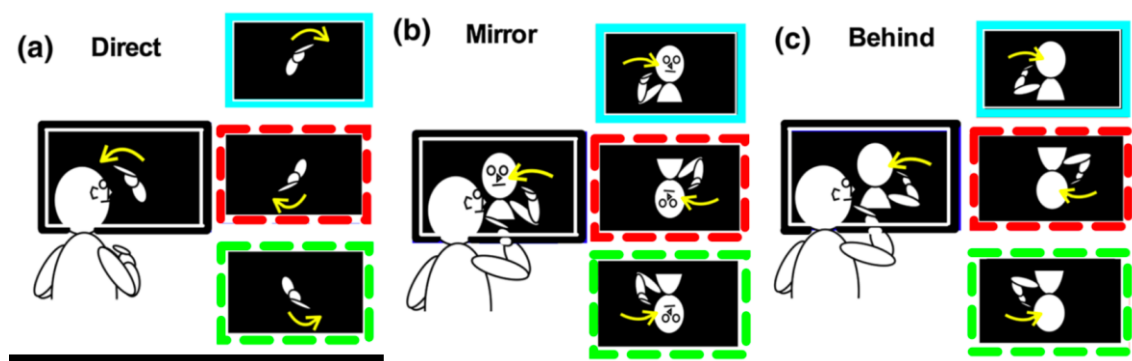


Figure 1: 遅延時間の知覚研究 ([3]より引用)

Adria らの研究では自分自身の動きを認識することに主眼を置いているが、我々の研究では、学習者が真似るべきお手本の動きを認識することがより重要である点で異なる。そして、観測する動きが自分自身でないため、観測に用いる視野が三人称視点になることは必然であり、我々が注目している視野もまた三人称視点のものとなっている。

また学習者が普段なじみのない視野で動きを観測した場合、その動きを自分自身で正しく認識するためには、なじみのある視野による映像に心的に変換させる必要があるのではないかと予想している。この心的な変換の中でも代表的なものとして心的回転があげられる。心的回転の既存研究として、Shepard らは、被験者にブロックから成る 3 次元物体を同時に二つ提示し、その物体を心的に回転させ二つの物体が同じものかどうかを回答してもらうことで心的回転に要する時間を調査している[4]。そして、心的回転を行う角度範囲が $0 \sim 180$ [degree]であるのに対し、心的回転に要する時間は約 $1000 \sim$

5000 [ms]であるという結果が得られている。またこの実験ではブロックを認識するタスクを行っているが、動作学習では観測対象は人間の姿勢である。姿勢の認識における心的回転に要する時間は三次元物体の認識における場合と異なるのだろうか。Alfredらは認識対象がブロックから成る三次元物体の場合と人間の姿勢の場合、またその中間の場合で心的回転に要する時間がどのように変化するか調査している[5]。そして、心的回転を行う角度範囲が0～180 [degree]であるのに対し心的回転に要する時間は、観測対象が姿勢の場合は1300～2500 [ms]、姿勢とブロックの中間の場合は1400～2900 [ms]、ブロックのみの場合は1800～3500 [ms]であった。つまり認識する対象が人間の姿勢に近いほど、心的回転に要する時間は短くなることが示されている。

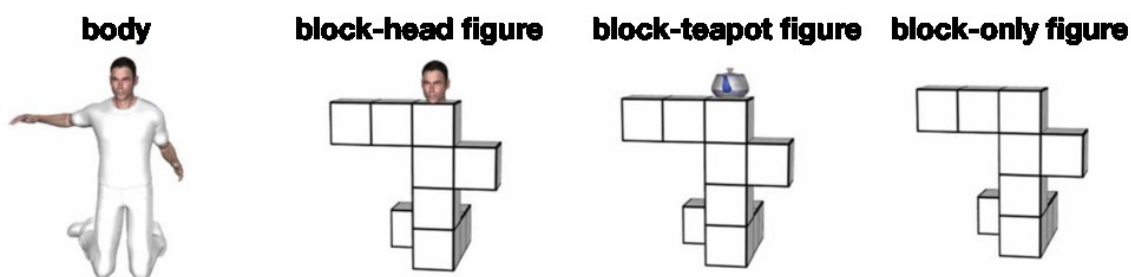


Figure 2: 観測対象による心的回転の違いに関する研究 ([5]より引用)

これらの心的変換に関する既存研究が示唆していることとして、それぞれの実験のタスクや条件によって多少の違いはあるにせよ、視野によって数秒単位で認識に時間を要してしまうことだ。これは特に学習者が速い動きを習得する際は、動きに追いつくことができずうまく認識することができなくなる恐れがある。よって適切な視野を選択することがお手本動作を認識するうえでより重要であると考えられる。

またこれらの視野による知覚の変化を調査した既存研究で共通していることとして、その多くが知覚特性のみに集中して調査している。本研究では、視野による知覚特性を動作学習に応用することを前提にしているため、動作

の知覚のみではなく再現も取り扱っている。これにより動作学習により近い状況における各視野の特性を調査している。

1.3 観測視野

本研究にて調査している観測視野として、前方直接視野、前方鏡像視野、後方直接視野を用意している。以下にその詳細を記述する。

1.3.1 前方直接視野

前方直接視野はお手本姿勢を前方から観測する視野である。この視野は動画を用いた動作学習において最もよく用いられるものであり、一般的なものである。この視野の特徴として、四肢の動きが胴体に隠れることもなく、動きが見やすいケースが多いことがあげられる。しかし欠点として、お手本の水平方向と奥行き方向の動きが学習者には反対方向の動きとして観測されてしまうことがあげられる。

1.3.2 前方鏡像視野

前方鏡像視野は左右反転されたお手本姿勢を前方から観測する視野である。この視野はお手本姿勢を鏡上に映し出した提示方法に対応する。この視野の特徴として、前方直接視野と同様に四肢の動きが胴体に隠れることもなく、動きが見やすいケースが多いことに加え、水平方向の動きを学習者が同方向の動きとして観測できることがあげられる。しかし欠点として、お手本の奥行き方向の動きが学習者には反対方向の動きとして観測されてしまうことがあげられる。

1.3.3 後方直接視野

後方直接視野はお手本姿勢を後方から観測した視野である。この視野の特徴として、前方直接視野や前方鏡像視野のようにお手本の水平方向または奥行き方向の動きを反転もなく同方向の動きとして学習者は観測することができる。しかし欠点として、四肢の動きなどが胴体に隠れやすく、お手本の動きを把握しにくくなりがちなのがあげられる。

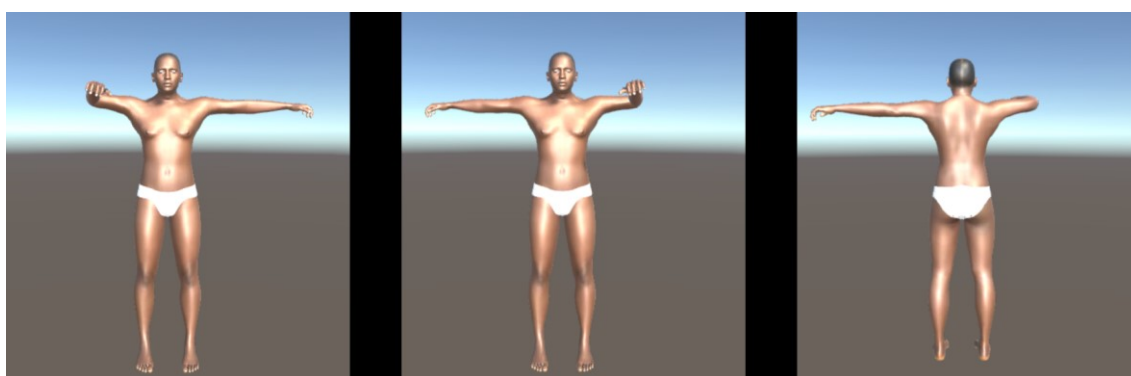


Figure 3: 各観測視野 (左: 前方直接視野, 中: 前方鏡像視野, 右: 後方直接視野)

1.4 観測視野の仮説

一般に動作を映像や画像で確認する際には、手本となる姿勢を前方から撮影、つまり前方直接視野で観測したケースが多い。その理由として、上述したように前方直接視野や前方鏡像視野では、動きを主に構成する四肢の動きが胴体などに隠れてしまうことが少ないためだ。しかし、四肢の動きが胴体に隠れることがない動きを習得するときに限定すれば、観測する動きが反転することのない後方直接視野の方が有効で、具体的には、素早くお手本動作を認識・再現できるものと予想される。なぜなら視覚によってお手本動作を観測し、それをリアルタイムに再現するに当たり必要となる時間は各視野に

よって異なると考えられるためである。必要となる時間の内訳として、以下があげられる。

- お手本動作を単純に認識する時間

これは、現実世界で純粹にお手本動作を認識するのに要する時間と等しい。

- HMD の解像度の影響

現実世界で観測する場合と比べ、HMD の解像度の影響により動作を認識するのにより長い時間を要すると考えられる。特に奥行き方向の動きは現実世界よりもこの影響が顕著に現れると予想される。

- 心的な変換に要する時間

上述したように、前方直接視野では水平方向と奥行き方向の動き、前方鏡像視野においては奥行き方向の動きが反対方向の動きとして観測されてしまう。この反転した動きを正しく認識するためには学習者が心的に何かしらの変換をしなければならないと考えられる。

これらのうち、心的な変換に要する時間は後方鏡像視野では一切かからないと考えられる。このことが後方直接視野の方がより素早くお手本動作を再現できると考える理由である。

1.5 視覚系構造に基づいた知覚モデル

観測視野の仮説では、学習者が動作を認識するために時間を要する理由の一つとして、HMD の解像度の影響を上げた。そしてその影響は特に奥行き方向の動きにおいて顕著であると述べた。これは、そもそも人間が奥行き方向の動きに対する知覚が水平方向の動きよりも鈍いことに起因している。人間の動きに対する知覚は、ある一定以上の位置変位が発生したときに初めて生じると考えられるが、奥行き方向の動きの知覚がより鈍いということは、この最小の位置変位が水平方向よりも奥行き方向の方が小さいことを示している。

そして VR 空間で位置変位が生じてても、それが HMD の解像度の影響でわずかな変位はディスプレイ上に適切に投影されない可能性がある。このことが HMD の解像度の影響が動きの知覚に影響し、特に最小位置変位が小さい奥行方向で顕著である理由である。

また、人間は水平方向より奥行方向の方が知覚に必要な最小位置変位動が小さいと述べたが、その理由を人間の視覚系構造をモデル化することによって考察する。

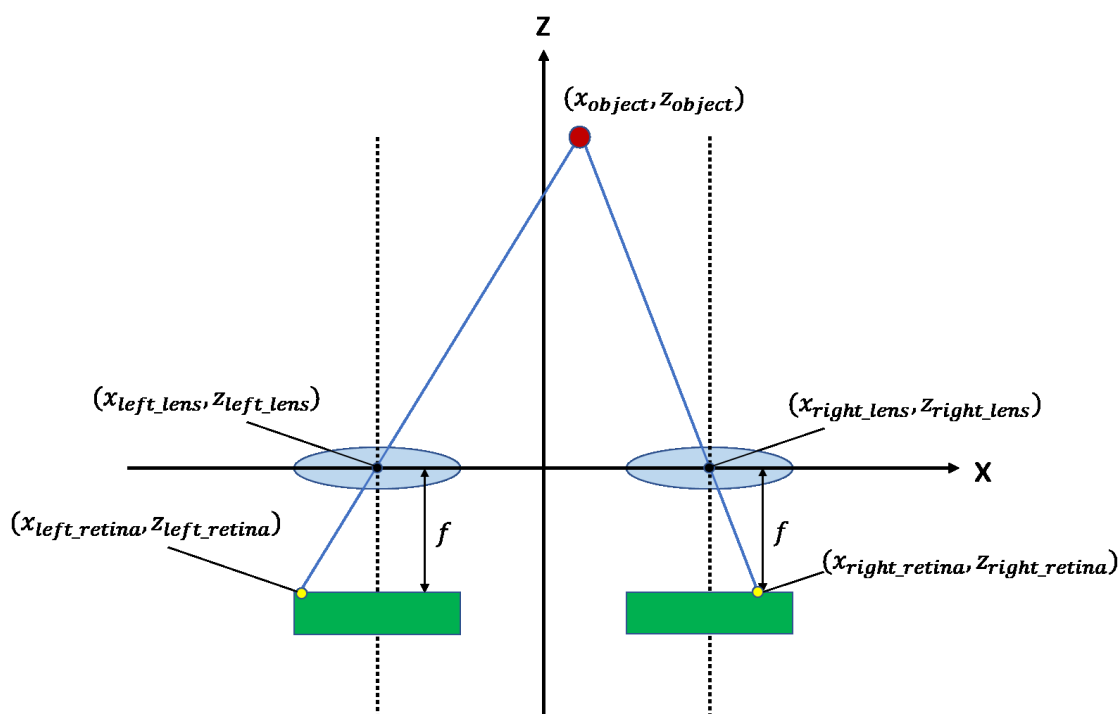


Figure 4: 視覚系構造のモデル (赤円: 観測物体, 青楕円: 眼球のレンズ, 緑長方形: 網膜)

モデルは Figure 4 で表されている。今回は簡略化のため観測する物体は大きさを持たない点状の物体を扱っており、物体の位置座標は (x_{object}, z_{object}) で表されている。また座標 $(x_{right_lens}, z_{right_lens})$ と $(x_{left_lens}, z_{left_lens})$ に右目と左目それぞれのレンズが存在し、座標 $(x_{right_lens}, z_{right_lens} - f)$ と $(x_{left_lens}, z_{left_lens} - f)$ に右目と左目それぞれの網膜が存在する。図中の f は右目と左目のレンズの焦点距離である。そしてこの網膜上の座標

$(x_{right_retina}, z_{right_retina})$ と $(x_{left_retina}, z_{left_retina})$ に観測した物体が投影される。この時、網膜上での観測座標の各成分は幾何学的な関係から以下の式で表すことができる。なお、ここでは例として右目の網膜上に観測される座標の関係のみを表す。

$$x_{right_retina} = -\frac{x_{object} - x_{right_lens}}{z_{object} - z_{right_lens}} f$$

$$z_{right_retina} = z_{right_lens} - f$$

ここで観測物体を水平方向または奥行方向にそれぞれ微小距離だけ移動させることを考える。この時、網膜上での観測点 $(x_{right_retina}, z_{right_retina})$ の変位はそれぞれ x_{object} , z_{object} の偏微分で表すことができる。

$$\frac{dx_{right_retina}}{dx_{object}} = -\frac{1}{z_{object} - z_{right_lens}} f$$

$$\frac{dx_{right_retina}}{dz_{object}} = \frac{x_{object} - x_{right_lens}}{(z_{object} - z_{right_lens})^2} f$$

$$\frac{dz_{right_retina}}{dz_{object}} = 0$$

$$\frac{dz_{right_retina}}{dx_{object}} = 0$$

z_{right_retina} の変位は常に 0 になるため、 x_{right_retina} の変位のみから人間は水平方向と奥行方向の動きをそれぞれ知覚しているということになる。そして人間が点状物体の動きを知覚できるのは、この変位の値が特定の閾値を超えたときだと考えられる。そして x_{right_retina} の水平方向と奥行方向の変位の大小関係を比較するため、変位の比を r とすると、

$$r = -\frac{z_{object} - z_{right_lens}}{x_{object} - x_{right_lens}}$$

となる．この式は点状物体を同じ微小距離だけ動かした場合， $|r| > 1$ の時は水平方向の動きの方が知覚しやすく， $|r| < 1$ の時は奥行方向の動きの方が知覚しやすいということになる．

そして，今回のようなお手本動作を三人称視点で観測する動作学習では，お手本を視野の中心にとらえ，姿勢全体を観測するために奥行方向に 1m 以上の距離をとった状態が想定される．水平方向の距離に関してはお手本を必ずしも視野の中心に配置する必要はないが，人間の眼球距離はせいぜい 10～20 cm に収まることや人間の視野角の広さが限られていることなどから水平方向に大きく距離をとって配置するとお手本が視野から外れてしまい，観測できなくなってしまうため現実的ではないと考えられる．よって，お手本と学習者の距離は水平方向よりも奥行方向のほうが大きく， $|r| > 1$ となると予想され，水平方向の動きの方が奥行方向の動きよりも知覚しやすいと考えられる．

第2章 システム構成

2.1 ハードウェア構成

2.1.1 HMD (Head-Mount Display)

本実験においては、動作提示のため、HMD(Head-Mount Display)を用いた。今回用いたのは、HTC 社の Vive HMD である。Vive HMD には加速度センサや角速度センサなどの慣性センサが内蔵されており、センサから得られた角速度や加速度から学習者頭部の動作角度が出力される。したがって、これに合わせて、映像をリアルタイムに変化させることのできる装置である。Vive HMD のスペックは、解像度が片目あたり 1080 x 1200 pixel (合計 2160 x 1200 pixel)、リフレッシュレートは 90 Hz、視野角は 110 degree である。

2.1.2 トラッカー

本実験においては、学習者の右上肢運動を計測するために、HTC 社の Vive トラッカーを使用した。Vive トラッカーは学習者の手首の甲側に固定された。

2.1.3 コントローラー

本実験において、学習者が実験のオペレーションを行うために HTC 社の Vive コントローラーを使用した。実験中、学習者にコントローラーを装備してもらっている。



Figure 5: ハードウェア構成 (左上: HMD, 左下: トラッカー, 右下: コントローラー)

2.2 ソフトウェア構成

2.2.1 映像提示ソフト

今回実験で映像を提示するため使用したソフトは、Unity 社の Unity Game Engine を使用して独自に開発された。このソフトで HTC Vive を用いた VR 環境を容易に構成でき、動作教示を行うことができる。本研究で使用する仮想環境では、アバターと被験者の距離感なども分かるように簡素な背景も表示するようにしている。

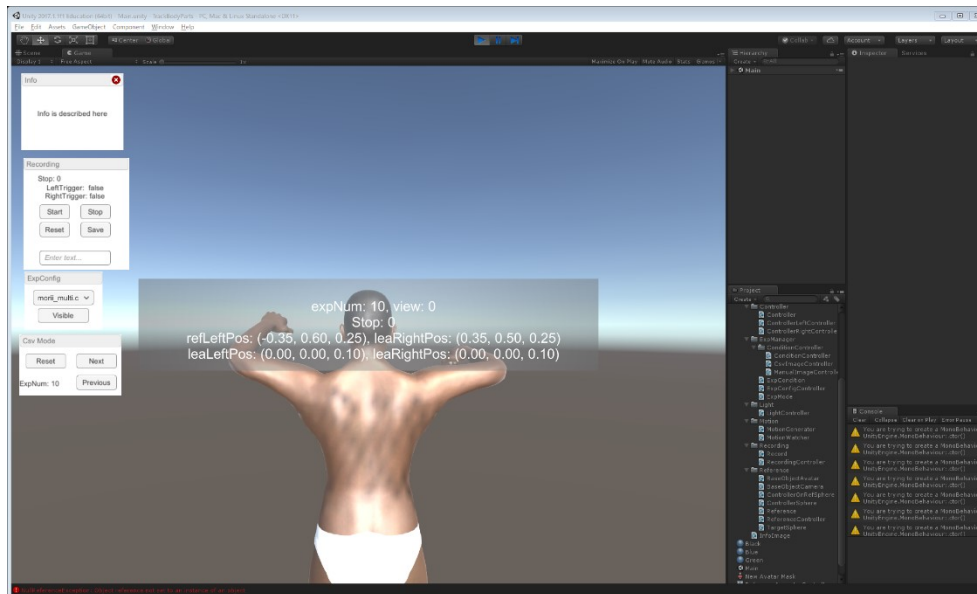


Figure 6: 映像提示ソフトのシステム画面図

2.2.2 使用したアバター

今回用いた姿勢提示用アバターは、フリーソフトの **MakeHuman** を用いて作成した。本研究でこの人型アバターを使用した理由は、学習者が姿勢を認識する際に、人型の方が認知しやすいと考えたためである。また、アバターが着用する衣服に関しては、姿勢認知の妨げにならないようにできる限り小さい面積のものをアバターに着用させた。

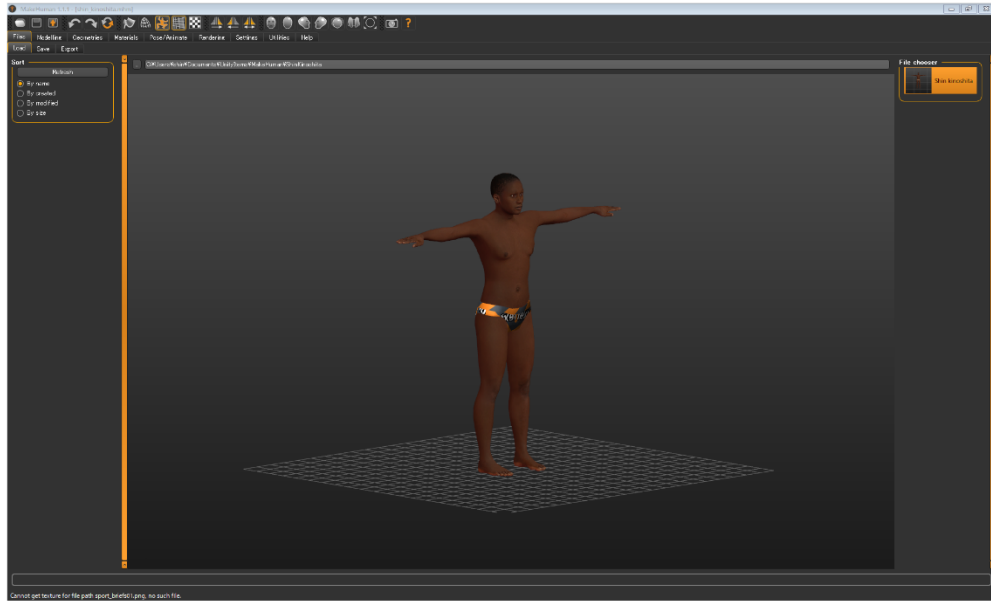


Figure 7: MakeHuman システム画面図

第3章 上肢運動追跡実験

視野による学習動作の認識・再現パフォーマンスの違いを調査するために、上肢運動の追跡を伴う実験を行なった。この実験には20代の男性12名に学習者として参加してもらい、HMDを頭部に、コントローラーを手に、トラッカーを手首に装備してもらっている。学習者はHMDを通しVR空間にてお手本動作を再現するアバターを観測することができる。学習者にはアバターが行う運動をリアルタイムで観測、再現してもらい、その時の学習者の動きを評価することで仮説を検証している。

3.1 実験条件

3.1.1 観測視野

観測視野は、前方直接視野、前方鏡像視野、後方直接視野の3水準を用意した。

3.1.2 運動タスク

タスクは、片上肢運動タスクと両上肢運動タスクの2水準を用意した。片上肢運動タスクの場合はお手本の右上肢の動きを、両上肢運動タスクの場合はお手本の右上肢と左上肢の両方の動きを観測・再現してもらっている。

3.1.3 提示動作

提示動作は、上肢の手首位置を時々刻々と変化させることで決定された。それぞれの時刻における手首の位置はジャーク最小軌道により算出される。

この時の初期位置，移動方向，移動距離，平均速度は以下のような条件で設定されている．

- 初期位置

初期位置は手首位置がどの視野においても観測できることと，提示する動作が人間の可動域的に実現可能かどうかの二点をもとに決定している．初期位置は Figure 8 において表されており，右手は P_{r_init} ，左手は P_{l_init} である．同図の x-z 座標系において P_{r_init} は (0.35, 0.25)， P_{l_init} は (0.35, 0.25) に設定されている．

- 提示移動方向

手首の初期位置からの移動方向として，右方向，前方向，左方向，後方向の 4 水準を用意している．Figure 8 で示されるように，右方向，前方向，左方向，後方向はそれぞれ，-90, 0, 90, 180 [degree]で示されている．

- 提示移動距離

手首の初期位置からの移動距離として，0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11, 0.13, 0.15 [m]の 8 水準を用意している．

- 提示平均速度

手首の初期位置からの平均速度として，0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 [m/s]の 8 水準を用意している．

タスクが両上肢運動タスクの場合は，上記の各実験条件はそれぞれ独立して設定されている．そのため，お手本の右上肢と左上肢は完全に独立した動きとなっており，それを学習者には同時に観測，再現してもらっている．

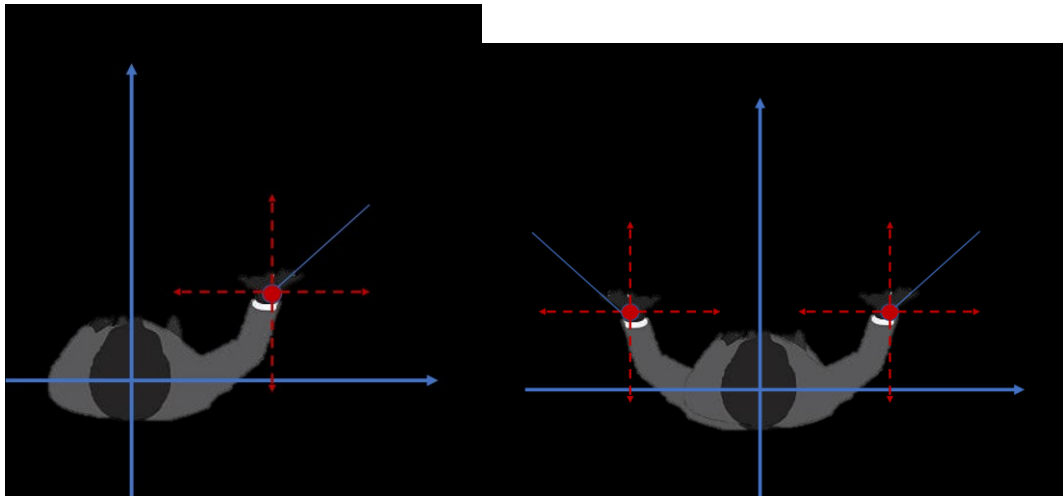


Figure 8: 提示動作の上面図 (左: 片上肢運動タスク, 右: 両上肢運動タスク)

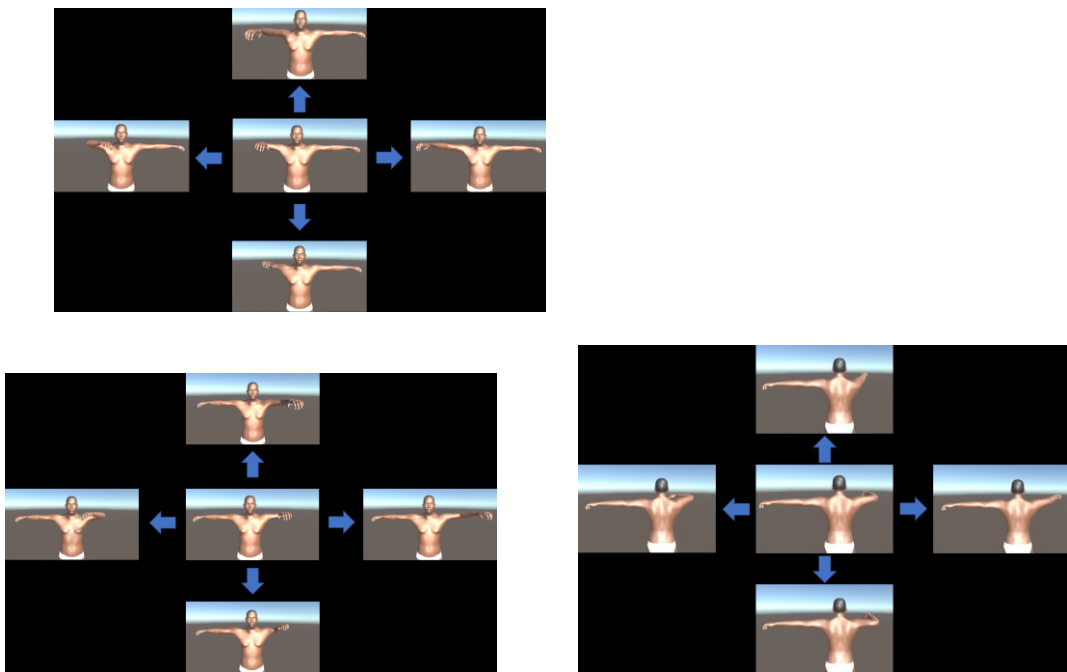


Figure 9: 片上肢運動タスクにおける提示動作の HMD 映像 (左上: 前方直接視野, 左下: 前方鏡像視野, 右下: 後方直接視野)



Figure 10: 両上肢運動タスクにおける提示動作の HMD 映像 (左: 前方直接視野, 中: 前方鏡像視野, 右: 後方直接視野)

3.2 実験手順

一連の実験手順を以下に示す

1. 学習者は立ち上がった状態で, HMD を頭部に, トラッカーを手首にそれぞれ装着, コントローラーを手に装備する.
2. 学習者は HMD ディスプレイ上にお手本のアバターが表示されていることを確認する.
3. 学習者はお手本のアバターの姿勢と同じ姿勢を再現する事で初期位置合わせを行う. この時, 数値表示のお手本の手首位置座標と学習者の手首位置座標も表示され, この数値を一致させる事で正確な初期位置合わせを実現している.
4. 学習者は任意のタイミングでコントローラーのトリガーを引き, そのままの状態を保持してもらう.
5. 学習者がトリガーを引いたタイミングで, 数値表示のお手本の手首位置座標と学習者の手首位置座標が非表示になり, 学習者が HMD 上で見れるのはお手本のアバターのみとなる. そしてアバターは上肢運動を開始する.

6. 学習者はアバターの上肢運動の提示を確認したら、リアルタイムでその動きの再現を行う。
7. アバターの上肢運動の提示が終わり、学習者もその動きの再現が完了した時、学習者には引いているコントローラーのトリガーを離してもらう。
8. 実験者はコントローラーのトリガーを引いてもらっていた間に記録された、学習者の手首に装着されたトラッカーの位置情報を保存する。
9. 次の実験試行（上記3へ）に移る。



Figure 11: 実験風景（片上肢運動タスク時）

3.3 評価方法

実験において、学習者がコントローラーのトリガーを引いている間、学習者の手首の位置情報は逐次保存された。その時系列の位置情報を用い、学習

者の手本動作の認識・再現精度，応答遅れを評価している．その評価方法として移動方向誤答率をここで導入する．

3.3.1 移動方向誤答率

移動方向誤答率は，お手本の手首の移動方向に対して学習者が誤った方向に手首を移動させる確率を表している．今回移動方向の水準は，-90, 0, 90, 180 [degree] と4方向 90 degree 刻みで用意されている．そこで，学習者は再現した移動方向に対して一番近い移動方向の水準に動かしたとみなし，これが実際に提示された移動方向の角度と一致していれば正解とする．すなわち，学習者とお手本の移動方向の角度差が45 degree 以上であれば誤答，45 degree 未満であれば正答とみなし移動方向誤答率は算出されている．

3.4 実験結果

3.4.1 移動方向誤答率の評価

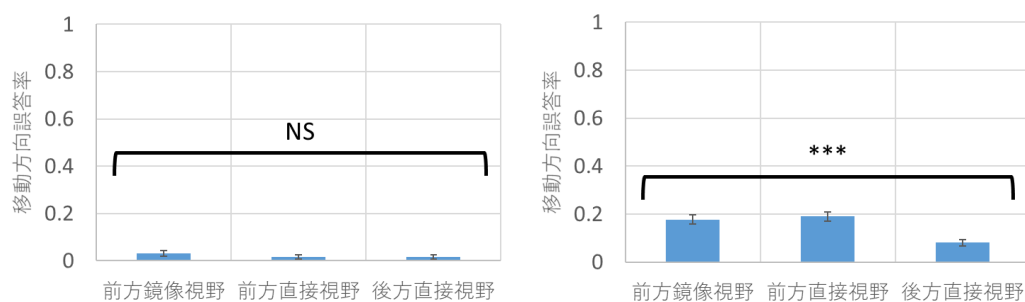


Figure 12: 観測視野における移動方向誤答率の結果(左: 片上肢運動タスク, 右: 両上肢運動タスク)

Figure 12 は縦軸に移動方向誤答率，横軸に各観測視野を示している．棒グラフは各視野における移動方向誤答率の平均値であり，エラーバーは標準誤差を示している．今回，移動方向誤答率への観測視野の因子効果を検証する

ため、一元配置の分散分析を行なった。その結果、片上肢運動タスクにおいては因子間で有意差は見られず（検定統計量 $F(4, 768) = 0.733, p = 0.570, d = 0.371$ ）、両上肢運動タスクにおいては0.5%で有意差が観測された

（検定統計量 $F(4, 1529) = 6.10, p = 7.13 \times 10^{-5}, d = 0.823$ ）。

また各水準間の等分散性を検証するため、Bartlettの等分散検定を行った。その結果、片上肢運動タスクにおいては因子間で0.5%で有意差が見られ

（検定統計量 $\chi^2(4) = 56.03, p = 1.98 \times 10^{-11}$ ）、両上肢運動タスクにおいては因子間で0.5%で有意差が見られた（検定統計量 $\chi^2(4) = 63.01, p = 6.75 \times 10^{-13}$ ）。

3.5 考察

今回、各実験条件における特性を調査するために複数検定を行い、各評価値に対して観測視野因子の効果が見られるかを検証した。

片上肢運動タスクにおける移動方向誤答率を観測視野について検定した結果、一元配置の分散分析では有意差が見られず、Bartlettの等分散検定では有意差が見られた。この結果から移動方向に関する偶然誤差における違いは見られるが系統誤差における違いがほとんど見られないため、いずれの観測視野を選択した場合においても、パフォーマンスは同程度であることを示している。このような結果になった理由として、今回の提示動作である片上肢運動タスクが非常に難易度の低いものであったことに起因していると考えている。

一方、両上肢運動タスクにおける移動方向誤答率を観測視野について検定した結果、一元配置の分散分析とBartlettの等分散検定、共に有意差が見られた。そしてグラフを見るとわかるように移動方向誤答率は後方直接視野における値が一番小さく、前方鏡像視野と前方直接視野では大きくなり片上肢運動タスク時に比べパフォーマンスが低下している。この結果から両上肢運

動タスクにおいては後方直接視野が最もよい観測視野ということがいえると考える。

第4章 まとめ

本論文では、仮想環境における各観測視野の特性を調査するため、それぞれの観測視野を用いて上肢運動の追跡実験を行ってもらった。

もともとの予想では、後方直接視野が前方鏡像視野や前方直接視野よりもどのような条件下であっても優れていると考えていたが両上肢運動タスク時のみ、そのような傾向が観測された。このことから後方直接視野が前方鏡像視野や前方直接視野よりも優れたパフォーマンスを発揮するのは、ある程度タスクとしての難易度が高い時であると考察する。本研究においては、提示動作の難易度の違い（難易度の低い動作: 片上肢運動タスク, 難易度の高い動作: 両上肢運動タスク）を持ってこれを示している。

今回の実験を通して、現在一般的に使用されていない後方直接視野が動作学習における動作の認識・パフォーマンスの点では有効であることを示すことができた。今回は提示動作としてジャーク最小軌道を用いて決定された単純な直線上のストローク運動を用いたが、今後はスポーツなどにおけるより複雑な動きにおいても同様の結果が得られるか検証する予定である。

参考文献

- [1] J. Bailenson, K. Patel, A. Nielsen, R. Bajcsy, S. Jung, G. Kurillo, “The Effect of Interactivity on Learning Physical Actions in Virtual Reality”, *Journal Media Psychology* Volume 11, 2008 - Issue 3.
- [2] M. Roosink, N. Robitaille, B. J. McFadyen, L. J. Hébert, P. L. Jackson, L. J. Bouyer, C. Mercier, “Real-time modulation of visual feedback on human full-body movements in a virtual mirror: development and proof-of-concept”, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 2015 12:2.
- [3] A. E. N. Hoover, L. R. Harris, “The role of the viewpoint on body ownership”, *Exp Brain Res* (2015) 233:1053–1060
- [4] R. N. Shepard, J. Metzler, “Mental Rotation of Three-Dimensional Objects”, *Science, New Series*, Vol. 171, No. 3972. (Feb. 19, 1971), pp. 701-703.
- [5] A. B. Yu1, J. M. Zacks, “How Are Bodies Special? Effects Of Body Features On Spatial Reasoning”, *Q J Exp Psychol (Hove)*. 2016 June, 69(6): 1210–1226.
- [6] F. Anderson, T. Grossman, J. Matejka, G. Fitzmaurice, “YouMove: Enhancing Movement Training with an Augmented Reality Mirror”, *UIST '13 Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology* Pages 311-320.
- [7] J. V. Stone, “Object recognition: View-specificity and motion-specificity”, *Vision Research*, 39 (1999), 4032-4044.
- [8] M. Lesourd, J. Navarro, J. Baumard, C. Jarry, D. L. Gall, F. Osiurak, “Imitation and matching of meaningless gestures: distinct involvement from motor and visual imagery”, *Psychological Research* (2017) 81:525–537.

- [9] M. V. Elk, O. Blanke, “Imagined own-body transformations during passive self-motion”, *Psychological Research* (2014), 78(1), 18-27.
- [10] E. H. van Asseldonk, M. Wessels, A. H. Stienen, F. C. van der Helm, H. van der Kooij, “Influence of haptic guidance in learning a novel visuomotor task.”, *J Physiol Paris*. 2009 Sep-Dec, 103(3-5):276-85.
- [11] G. Macaudo, G. Bertolini, A. Palla, D. Straumann, P. Brugger, B. Lenggenhager, “Binding body and self in visuo-vestibular conflicts”, *European Journal of Neuroscience*, pp. 1–8, 2014
- [12] S. Thorpe, D. Fize, C. Marlot, “Speed of processing in the human visual system.”, *Nature* 381, 520–522 (06 June 1996)
- [13] Y. Nomura, H. Fukuoka, R. Sakamoto, T. Sugiura, “Motion Instruction Method Using Head Motion-Associated Virtual Stereo Rearview”, *Technologies* (2017), 5(4), 77

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧な御指導，御助言を賜りました三重大学工学部野村由司彦教授，ならび同医学部附属病院坂本良太助教に厚く御礼申し上げます．この場をお借りして謹んで感謝の意を表します．

また実験の協力や助言をいただきましたプロセス解析研究室の皆様により感謝いたします．

本研究は日本学術振興会科学技術研究費補助金，基盤研究(B) 15H02929「弱い力による「誘発」に着目した動作教示手法の提案と一般手法に対する多次元比較」の助成を受けたものです．