

バーチャルリアリティ技術を用いた身体姿勢の学習におけるマルチモーダルフィードバック効果に関する研究

徳田拓海^{†1,2} 花島諒^{†1,3} 持丸正明^{†1,2} 大山潤爾^{†1,3}

概要: 本研究では、バーチャルリアリティ技術を用いた姿勢学習におけるマルチモーダルフィードバックの影響を明らかにすることを目的とした。具体的には、視覚情報フィードバックとして1人称視点と3人称視点で学習者の姿勢と目標姿勢を呈示し、触覚情報フィードバックとして頭部および腰部において目標姿勢との一致時または不一致時に振動が呈示する学習方法について、それぞれのモダリティへのフィードバック情報が学習に及ぼす影響と、それらを同期して同時に呈示するマルチモーダルフィードバック効果について検討するために、モーションキャプチャ、視点制御、振動呈示制御が可能なマルチモーダルバーチャルリアリティシステムを開発し、そのシステムを用いて、24名の実験参加者に対して学習効果の評価実験を行った。また、学習時のアバターに対する身体所有感及び運動主体感を調べ、姿勢学習との関係を検討した。その結果、学習時の視点条件は、姿勢によらず学習後の頭部の姿勢再現性に影響を及ぼすことが明らかになった。一方、振動の有無は姿勢の学習全般に有効であるほどの効果は見られないことが示唆された。

1. はじめに

ヒトは従来、現実空間において、鏡を見て自身の身体を見る方法や熟練者やインストラクターを見て模倣する方法により姿勢や動作の学習を行っている。しかし、近年、姿勢や動作の学習において、学習者に対して現実空間よりも優れたフィードバックを与えることができることから、バーチャルリアリティ (Virtual Reality ; VR) 技術の活用が期待されている。

Chua ら[1]は、太極拳のトレーニングをタスクとし、1人称視点及び3人称視点のどちらがより効果的に学習を行うことができるかを明らかにするために VR 技術を用いて開発を行った。Adolf ら[2]は、ジャグリングのトレーニングをタスクとし、現実空間での学習と仮想空間内において、視覚・聴覚・触覚を組み合わせたフィードバックによる学習のどちらがより効果的に学習を行えるかを明らかにするために、VR 技術を用いて開発を行った。大山ら[3]は、溶接のトレーニングをタスクとし、視覚と触覚を組み合わせたフィードバックによる学習効果を明らかにするために、VR 技術を用いて開発を行った。

このように、VR 技術を用いることで、視点の切り替えや仮想空間内の学習者の姿勢や動作に連動して、フィードバックを与えることが容易にできる。また、フィードバックを行う際に、使用するモダリティやフィードバックする情報も変更することができる。

本研究では、姿勢学習に焦点を絞り、姿勢学習に重要だと考えられる要因として、①視点 (1人称視点・3人称視点)、②使用するモダリティ (視覚・視触覚)、③伝達情報 (正解情報・失敗情報) の3つに着目する。また、マルチモーダル VR システムを開発し、実験を行い、フィードバックの無い学習後を評価する。また、フィードバックの無

い学習後の目標姿勢との誤差を各呈示方法で比較することで、どのような呈示方法が最も学習を保持できるかを明らかにする。また、質問紙調査により、身体所有感及び運動主体感が姿勢学習に与える影響についても検討する。

現実空間で実際のタスクを行う際には、フィードバックは与えられないため、フィードバックの無い学習後において、学習が保持されているかが重要だと考えられる。

本研究では、学習する目標姿勢を四肢関節の多様性などを考慮し、決定した。この目的を解決することで、スポーツやリハビリテーション、職業訓練などといった様々な分野に応用が可能だと考えられる。

2. 先行研究

2.1 視点 (1人称視点・3人称視点)

Hoang ら[4]は、武道のトレーニングをタスクとし、目標姿勢との誤差を検討した。学習中においては、1人称視点による学習が最も効果的であると示した。しかし、フィードバックの無い学習後においては、1人称視点と3人称視点のどちらが学習を保持できるかは明らかとなっていない。

2.2 使用するモダリティ (単感覚・多感覚)

Sigrist ら[5]は、カヌーの手漕ぎ動作のトレーニングをタスクとし、オールの空間誤差と速度誤差について検討を行った。学習中における空間誤差については視触覚フィードバック呈示方法、速度誤差については視聴覚フィードバック呈示方法による学習が最も効果的であると示した。しかし、フィードバックの無い学習後において、学習効果が保持されないという課題が存在する。

†1 産業技術総合研究所 人間拡張研究センター

†2 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

†3 筑波大学大学院 人間総合科学学術院

2.3 伝達する情報（正解情報・伝達情報）

大山ら[3] は、溶接のトレーニングをタスクとし、視覚フィードバックによる学習中のタッチ速度について検討を行った。具体的には、触覚フィードバックにより、目標とする熟練者のタッチ速度に合わせて前腕に振動刺激を与えることで、目標との不一致、すなわち失敗情報を伝達した。

Hoang ら[4]らは、武道のトレーニングをタスクとし、学習中における目標姿勢との誤差について、検討を行った。具体的には、視覚フィードバックにより、目標姿勢と一致した時、学習者の一致した身体部位の色を変化させることで、目標との一致、すなわち正解情報を伝達した。

このように、正解情報あるいは失敗情報を伝達しても、より効果的に学習を行うことができる。しかし、フィードバックの無い学習後においては、検討されていない。

3. マルチモーダル VR システム

3.1 システムの概要

図1に開発したマルチモーダル VR システムを示す。ハードウェアシステムはヘッドマウントディスプレイとトラッカー（いずれも HTC 社製、VIVE）、マイクロコンピュータ（Arduino 社製、Arduino UNO）、コンピュータ（Dell 社製、ALIENWARE）、無線モジュール Digi 社製、X Bee、外部電源入力（ELECOM 社製、モバイルバッテリー）、自作の触覚フィードバックデバイスによって構成された。

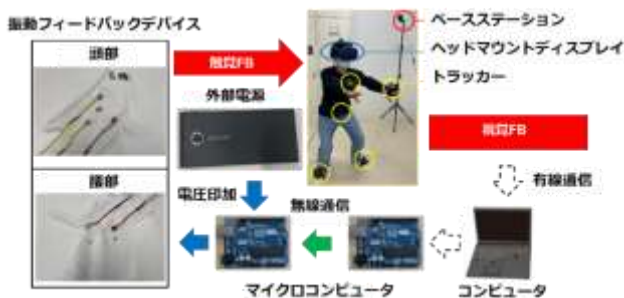


図1 システムの概要図

ソフトウェアについては、姿勢のキャリブレーションや記録と姿勢に対応したインタラクティブなマルチモーダル情報の提示制御が可能なマルチモーダルインタラクションプラットフォーム“Xperigrapher” [6]を用いた。

本研究では、仮想空間の中で用いるアバターを18個の部位（つま先、足首、膝、股関節、腰、腹、胸、肩、肘、手首、頭）を球、部位間の骨を棒で表現したアバターを用いた。また、仮想空間内において、目標姿勢アバター（目標姿勢を取っているアバター）を用意し、学習者が目標とする姿勢を取っているアバターに重なるように姿勢を学習できるように開発を行った。

3.2 触覚フィードバックデバイス

図2に触覚フィードバックデバイスの装着例を示す。本研究で開発した触覚フィードバックデバイスは、腰及び頭へ振動刺激を呈示するために、直流変心モータ（Precision microdrives 社製、Type 310-113）を用いた。頭のデバイスについては、頭部の表面に沿って振動呈示を行う必要があると考えられることから、キャップ上に頭頂部が中心となるように、同心円状に中心から60mm離れた位置に3つのモータを接着した。腰のデバイスについては、同様に腰の表面に沿って振動呈示を行う必要があることから、

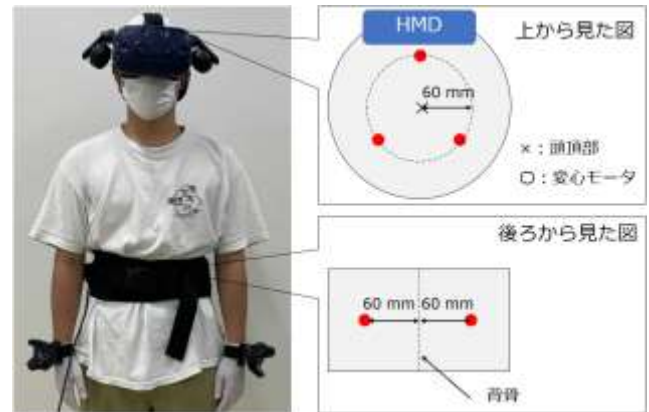


図2 触覚フィードバックデバイスの装着例

布の上に30mm間隔で2つのモータを接着した。触覚フィードバックデバイスによる振動呈示は、直流モータへの入力電圧の変化を用いて、マイクロコンピュータ（Arduino Uno）により制御した。モータへ印加する電圧の時間遅れは約50msであった。

3.3 目標姿勢アバター刺激の作成

本研究では、学習者が目標姿勢のアバターに重なるように姿勢を学習できる必要があるため、目標姿勢アバターの3次元モデルを作成する必要がある。そこで、筆者自身がトラッカー及びヘッドマウントディスプレイを装着し、目標姿勢となる6つの姿勢を再現し、計測を行った。計測した3次元位置情報をもとに、各部位間の単位ベクトルを求め、その単位ベクトルと学習者の骨の長さの積から、3次元モデルの目標姿勢アバターを生成した。また、実験における写真での姿勢教示に利用するために、目標姿勢記録時の後ろ方向と左方向からの姿勢の写真を記録した。

3.4 視覚フィードバック

視覚フィードバックでは、学習者自身の姿勢を1人称視点と3人称視点（2m後方）から確認できる視覚情報呈示と、学習者の姿勢と目標姿勢アバターが一致していることを関節の色を変えることで視覚的にフィードバックする情報呈示の姿勢学習への効果を検討した。図3に開発したシステムを用いたときの1人称視点と3人称視点の映像例を

示す。1人称視点の映像例では、自身の手及び足元を見ている時、3人称視点の映像例では、自分が直立している時の映像例である。また、図4に3人称視点における目標姿勢と学習者の姿勢の不一致時及び一致時の映像例を示す。赤色のアバター学習者のアバター、青色のアバターが目標姿勢を取っているアバターである。本研究では目で確認することが可能な部位である腰と目で確認することのできない部位である頭に着目した。頭と腰に関して、学習者のアバターと目標姿勢アバターが一致した時に、その一致した部位を黄色に変化させることで、一致をフィードバックすることとした。ここでの一致とは、腰と頭に関して、学習者のアバターと目標姿勢アバターの距離が50mm以内になったと定義した。

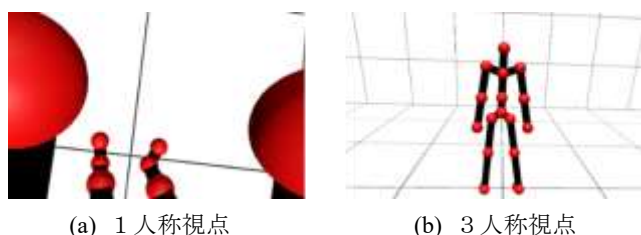


図3 視点異なる場合の映像例

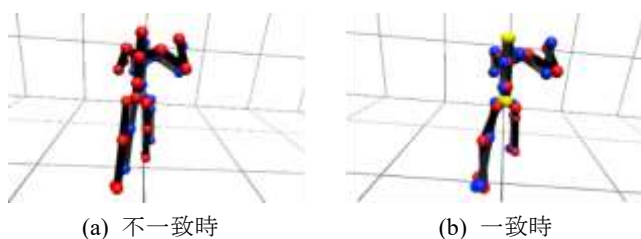


図4 不一致時及び一致時の映像例

3.5 触覚フィードバック

触覚フィードバックは、視覚フィードバックにおいて一致した部位を黄色で表示する条件と同じ条件、すなわち腰と頭において学習者のアバターと目標姿勢アバターの距離が50mm以内になった条件で呈示された。具体的には、一致している間、振動呈示を行う方法（正解情報の伝達）と不一致の状態振動呈示を行い、一致している間は振動を呈示しない方法（失敗情報の伝達）の2つの方法により行えるように開発を行った。触覚フィードバック条件は、一致時振動条件、不一致時振動条件に加えて、コントロール条件として一致不一致に関わらず振動を呈示しない振動なし条件を加えた3条件であった。

4. 実験

4.1 概要

実験は、視点（2水準：1人称視点/3人称視点）と振動（3水準：振動なし/一致時振動/不一致時振動）を組み合わせた計6つの呈示方法で姿勢学習を行った場合、どの呈示方法が学習の保持がより行われるかを明らかにすることを

目的とした。また、身体所有感及び運動主体感が姿勢学習の保持に影響を与えるかについても質問紙により調査した。

本研究では、スポーツやリハビリテーションといった様々な分野に応用することが考えられるため、全身を使う姿勢であることが求められる。そこで、四肢関節の多様性を考慮し、図5に示すような6つの姿勢を選択した。これらは、体操やヨガ、お辞儀といった姿勢を参考に選択した。姿勢a及び姿勢dは左右対称かつ前後に身体を傾ける姿勢、姿勢bは前後左右対称かつ腰を下げる姿勢、姿勢c及び姿勢fは、前後対称かつ左右に身体を傾ける姿勢、姿勢eは上半身と下半身を傾ける方向が違う姿勢である。

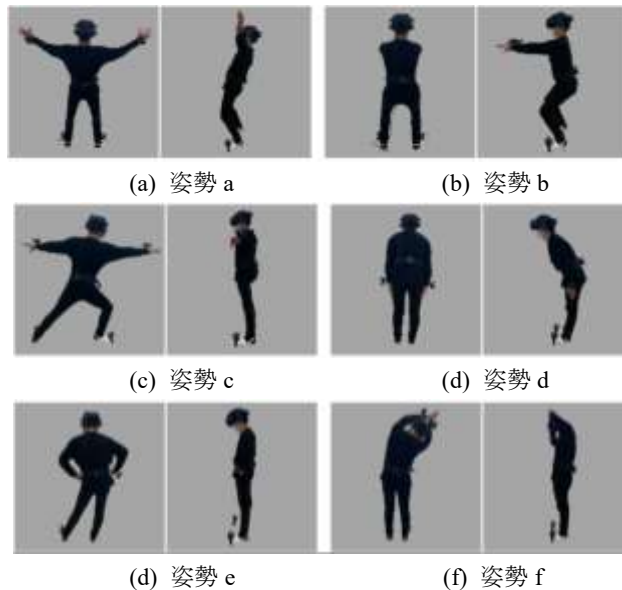


図5 決定した目標姿勢

4.2 実験協力者

実験の実験協力者は、男性13名（23.0歳±4.19）と女性11名（23.4歳±3.02）の計24名とした。1人あたりの実験時間は170分程度であった。本研究は産業技術総合研究所の実験倫理委員会における承認を受け、実験協力者に実験前に説明を行い、同意を得た上で実験を行った。

4.3 方法

(1) 姿勢計測

実験で学習前後及び学習中の姿勢を計測した。両足首、腰、両手首についてはトラッカーで実際の姿勢を計測し、頭部はヘッドマウントディスプレイで実際の姿勢を計測し、それらの計測値から、両足首、腰、両手首、頭、両足先、両膝、両股関節、腹、胸、両肩、両肘の位置をインバースキネマティクスにより推定した。姿勢データは、1回につき、再現している姿勢を3秒間維持して平均を求め、その姿勢再現は各条件について3回ずつ計測した。

(2) 質問紙

身体所有感及び運動主体感が姿勢学習の保持に影響を与えているかを明らかにするため、各課題終了後に質問紙へ

の回答を依頼した。質問紙は、Peck ら[7]が作成した質問紙を日本語訳し、研究に合うように改変したものを用いた。回答には7件法のリッカート尺度を用いて得点化した(-3:全くそう感じなかった~3:非常にそう感じた)。

4.4 実験手順

実験に先立ち、実験協力者への実験説明を行い、同意書によるインフォームド・コンセントを実施した。腰に振動刺激が感じられるように、実験中は生地が薄いTシャツを前もって着用または持参するように依頼した。実験に同意した実験協力者は以下に示す(1)~(5)の手順を追って各課題を行った。なお、学習姿勢と視点と振動の提示方法は、実験協力者間でカウンターバランスを取った。

(1) 写真により目標姿勢を提示する課題

実験協力者はHMD、トラッカー及び振動デバイスを装着し、部屋の中央に立った。図5(a)に示すような後方からと左方向から撮影した目標姿勢の写真(平面画像)を、仮想空間内に10秒間ずつ提示した。仮想空間内での写真は2m×2mの正方形であり、視距離は3.1mであった。姿勢のみに着目してもらうため、背景をグレーで塗りつぶした。

(2) 写真で見た姿勢を再現するフィードバック学習前姿勢再現課題

実験協力者は写真により姿勢を提示された後、その姿勢を3回再現した。1回ごとの姿勢再現で、姿勢を3秒間計測した。

(3) マルチモーダルフィードバック姿勢学習課題

実験協力者は、仮想空間内で自身の身体情報が反映されている赤色のアバターを動かし、目標姿勢を取っている青色の目標姿勢アバターに重なるように学習を行った。学習時には、視覚フィードバックは1人称視点と3人称視点の2条件、触覚フィードバックは振動無し、一致時振動、不一致時振動の3条件のうちどれか一つの方法で提示された。この課題の制限時間は1分間とした。

(4) 学習者アバターに対する身体性の質問紙課題

実験協力者は目標姿勢アバターに重なるように姿勢の学習を行った後、一度ヘッドマウントディスプレイを外して、質問紙の回答を行った。質問紙への回答はペンを用いて行い、最も当てはまる回答に丸を付けた。なお、質問紙の回答時間は無制限とした。

(5) マルチモーダルフィードバック学習時の姿勢を再現する学習後姿勢再現課題

実験協力者は、マルチモーダルフィードバック姿勢学習課題時に記憶した姿勢を、目標姿勢などを提示しない条件で再現する課題を行った。再現は1回3秒で、3回再現した。

4.5 評価方法

学習効果を評価するために、マルチモーダルフィードバック学習の前後の姿勢再現課題(実験手順4.4の(2)と(5))

における学習者の姿勢と目標姿勢の誤差を算出した。具体的には、学習者の各3回の再現姿勢と目標姿勢についてそれぞれの姿勢の両足首の中心を原点とし、両足首の線分が一致するように、体の向きを一致させた後、原点から見た頭・腰・その他の関節点の3次元ベクトルでの誤差を算出した。また、身体所有感及び運動主体感についてはPeckらが提案した手法[6]により、各質問項目の得点から得点化を行った。

姿勢学習中に目標姿勢と一致しなかったデータはほとんど無かった(全データの2.78%)ため、目標姿勢が提示されている学習中には目標姿勢を学習できている(目標姿勢との誤差が0)であると考え、学習後にフィードバックの無い状態で再現した姿勢と目標姿勢との誤差は学習した姿勢の保持効果を分析しているといえる。

5. 結果

5.1 学習後における目標姿勢との誤差

図6及び図7に学習後における目標姿勢との誤差に関する実験結果を示す。

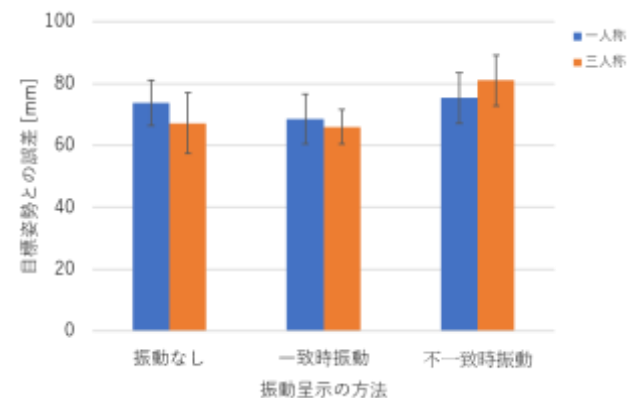


図6 腰における目標姿勢との誤差

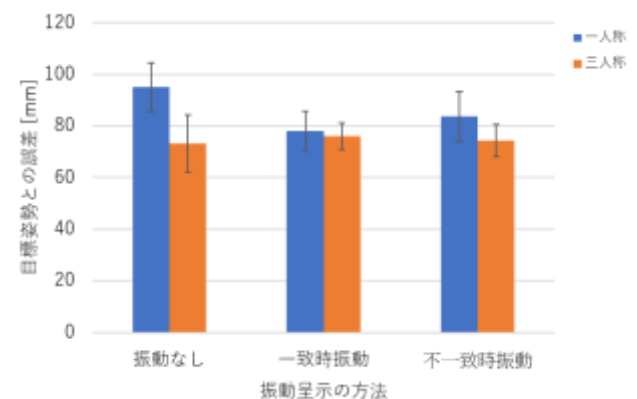


図7 頭における目標姿勢との誤差

マルチモーダルフィードバック姿勢学習の評価を分析するために、学習後の再現姿勢と目標姿勢の誤差について、視点が2水準(1人称/3人称)と振動が3水準(なし/一致

時/不一致時)を組み合わせた2要因の被験者内分散分析を行った。その結果、腰については視点と振動の両方の要因の主効果が有意ではなかった(視点: $F(1, 23) = .0455, p = .8330$ ・振動 $F(2, 46) = .7968, p = .4569$)。視点×振動の相互作用も有意ではなかった($F(2, 46) = .4698, p = .6281$)。

一方、頭については、視点の主効果が有意であり($F(1, 18) = 4.5723, p = .0433$)、1人称視点よりも3人称視点の方が、学習後の誤差が小さいことが示された。また、振動の主効果は有意ではなかった($F(2, 46) = 0.5274, p = .5936$)。さらに、視点×振動の相互作用も有意ではなかった($F(2, 46) = 0.5417, p = .5855$)。

マルチモーダルフィードバック学習課題における学習の終了から、学習後の姿勢の再現までの時間は平均3分35秒であった。

5.2 学習中における目標姿勢との平均一致時間

学習中における目標姿勢との平均一致時間については、視点が2水準(1人称/3人称)と振動が3水準(なし/一致時/不一致時)を組み合わせた2要因の被験者内分散分析を用いた。ここでの平均一致時間とは、学習時間1分間当たりに、目標との一致時間を一致回数で除した1回一致した際の一致時間を意味する。

腰における学習中の目標姿勢との平均一致時間については、視点の主効果が見られ($F(1, 22) = 4.7745, p = .0398$)、1人称視点に比べて3人称視点の方が、一致時間が長かった。一方、振動の主効果は見られなかった($F(2, 44) = .4862, p = .6182$)。視点×振動の相互作用でも主効果は見られなかった($F(2, 44) = .9483, p = .3952$)。

頭における学習中の目標姿勢との平均一致時間については、視点の主効果が見られ(視点: $F(1, 22) = 14.6745, p = .0009$)、1人称視点に比べて、3人称視点の方が、一致時間が長かった。また、振動の主効果では、有意傾向が見られた($F(2, 44) = 3.1118, p = .0545$)、しかし、多重比較の結果、振動の水準間では有意ではなかった(振動なし vs 一致時振動: $t(22) = 2.2048, p = .1147$ ・振動なし vs 不一致時振動: $t(22) = 2.0560, p = .1147$ ・一致時振動 vs 不一致時振動: $t(22) = 1.2537, p = .2231$)。一方、視点×振動の相互作用は見られなかった($F(2, 44) = 1.4278, p = .2507$)。

5.3 身体所有感及び運動主体感

身体所有感及び運動主体感の評価は、視点が2水準(1人称/3人称)と振動が3水準(なし/一致時/不一致時)を組み合わせた2要因の被験者内分散分析を用いた。身体所有感について、視点の主効果は有意ではなかった($F(1, 23) = .1895, p = .6674$)。振動の主効果は有意であったが($F(2, 46) = 3.3683, p = .0431$)、多重比較の結果、どの条件間でも有意ではなかった(振動なし vs 一致時振動: $t(23) = 1.9623, p = .1239$ ・振動なし vs 不一致時振動: $t(23) = 2.2586, p = .1011$ ・

一致時振動 vs 不一致時振動: $t(23) = .0454, p = .9642$)。また、視点×振動の相互作用も有意ではなかった($F(2, 46) = .1327, p = .8761$)。

運動主体感について、視点及び振動の主効果は有意ではなかった(視点: $F(1, 23) = .0015, p = .9692$ ・振動: $F(2, 46) = 1.3785, p = .2622$)。また、視点×振動の相互作用は、有意ではなかった($F(2, 46) = .8223, p = .4458$)。

6. 考察

6.1 視点による影響

学習後の目標姿勢との誤差について、頭について、振動条件によらず、1人称視点よりも3人称視点の方が、学習後の誤差が有意に小さいことが示された。一方で、腰については、視点による学習後の誤差に視点による有意差は見られなかった。頭は、1人称視点では見ることができない部位であるため、1人称視点に比べて3人称視点の方が学習中に正しく姿勢を確認できることで学習が容易であった、または、学習時に姿勢を3人称視点で客観的に確認することで姿勢を正しく記憶し学習後の再現精度を維持できた、または、その両方である可能性が考えられる。

一方、学習中の目標姿勢との一致時間については、腰と頭の両方で、1人称視点に比べて3人称視点の方が長かった。このことは、3人称視点では1人称視点と比較して学習が容易になっていたと考えられる。ただし、腰については、学習時の一致時間には視点による差があったにもかかわらず、頭の結果のような学習後の再現誤差における3人称視点の優位性は見られなかった。この結果は、学習中の一致時間や、そこから考えられる学習のしやすさだけでは、頭だけで3人称視点での学習後の再現精度が高いことは説明できない。よって、学習時に頭部の姿勢を3人称視点で客観的に確認することで姿勢を正しく記憶し学習後の再現精度を維持できた可能性がある。また、頭部について、振動条件によらず3人称視点に1人称視点に対して有意に再現精度が高いことは、1人称視点では見えない頭部の正しい姿勢を視覚以外のモダリティである触覚情報として呈示することで把握できるようにしても、再現精度は維持されないことを示唆する。

6.2 振動呈示による影響

学習後の再現姿勢と目標姿勢との誤差について、腰と頭の両方で有意な差はみられなかった。一方で、学習中の目標姿勢との平均一致時間は、腰については、有意差は見られなかったが、頭については、有意傾向が見られた。その理由として、1人称視点では見ることができない頭は、振動呈示でしか一致を確認することができない可能性が考えられる。

Sigrist[5]らは、目で見ることが可能なカヌーの手漕ぎ動

作をタスクとし、学習後のフィードバックの無い状態におけるオールの目標との空間誤差を、①視覚フィードバック呈示方法、②視触覚フィードバック方法、③視聴覚フィードバック呈示方法の3条件で比較した。その結果、①視覚フィードバック呈示方法、②視触覚フィードバック呈示方法、③視聴覚フィードバック呈示方法の順に誤差が小さくなることを確認した。本研究においても、Sigristらと同様に、腰については目で見ることが可能な部位であり、振動呈示が学習後の目標姿勢との誤差に影響しない点は同じであった。ただし、振動呈示の効果については、主効果が有意傾向で多重比較の結果も有意では無いため、振動呈示の効果については今後更なる研究が必要である。具体的には、振動呈示の閾値を小さくすること、目標姿勢との距離に合わせて振動の強弱を変化させること、他の姿勢で確認することなどが考えられる。

6.3 姿勢学習と身体所有感及び運動主体感

身体所有感においては、振動の主効果に有意差が見られたものの、各条件間（振動なし vs 一致時振動・振動なし vs 不一致時振動・一致時振動 vs 不一致時振動）においては有意差が見られなかった。花島[8]らの研究では、身体所有感の生起には視覚と運動の同期及び触覚情報の呈示、実身体との類似性の3条件が重要であると示唆されている。よって、本研究で振動の主効果がみられなかったことについて、2つの理由が考えられる。1つ目は、学習中に用いたボーンモデルが実身体との類似性が低かったため、全体的に身体所有感が低くなった可能性である。2つ目は、振動呈示の方法の違いである。花島らの研究では、現実生活で触覚フィードバックがある状態と近い条件であるVR上での物体との接触時に振動を呈示している。一方、本研究では、頭や腰が目標姿勢と一致している状態を触覚情報で代替して伝えている。身体所有感を促進するためには、マルチモーダルであることだけでなく、それらマルチモーダルの情報が、生活における感覚体験と同様であることが重要であると考えられる。

運動主体感においては、どの条件間でも有意差は見られなかった。視点について、湯本ら[9]の研究は、視覚と運動の同期があれば視点に関係なく、運動主体感を感じることを示唆している。本研究においても、視点が運動主体感に影響を与えない点は同じであった。ただし、湯本らの研究と本研究においても、3人称視点での呈示について、後方から行っているため、横方向や前方向といった異なる角度からの呈示をした場合等の更なる検討が必要である。

振動について、花島[8]らの研究では、視覚-運動の同期条件と視覚-触覚呈示-運動の同期の条件のどちらにおいても、運動主体感が生起されたが、両者の条件間には有意差が無いことが示唆されている。本研究において振動呈示が運動主体感に影響しなかったことは、こうした先行研究を支持

する。

7. おわりに

本研究では、スポーツやリハビリテーション、職業訓練といった様々な分野における姿勢学習の効率化を目指し、視点や振動呈示がフィードバックの無い学習後における学習の保持に影響を与えるかを明らかにする目的のもと、実験を行った。そのため、視点（1人称視点/3人称視点）及び振動（なし/一致時/不一致時）の条件を組み合わせた6つのフィードバック呈示方法により、姿勢学習を行うことのできるマルチモーダルVRシステムを開発した。また、身体所有感や運動主体感が姿勢学習の保持にどのような影響を与えるかについても、質問紙により調査した。

実験の結果から、1人称視点で直接視覚的に確認することのできない部位である頭部については、3人称視点による学習が効果的であることが分かった。

本研究の将来展望として、視覚及び触覚フィードバックにより一致を伝達する際の閾値を変化させた場合の実験や学習後の保持時間を変更した場合の実験を行い、学習中の効果と学習後の保持効果のついて詳しく調べていくことが必要であると考えられる。

謝辞 本研究を進めるにあたり、様々な助言をくださいました産業技術総合研究所の松本吉央氏、村井昭彦氏、梅村浩之氏、尾形邦弘氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Chua, Philo Tan. et al.. Training for physical tasks in virtual environments: Tai Chi. IEEE Virtual Reality 2003 Proceedings. 2003, p. 87-94.
- [2] Adolf, Jindrich. et al.. Juggling in VR: Advantages of Immersive Virtual Reality in Juggling Learning. 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2019, p. 1-5.
- [3] 大山潤爾: 調和的認知インタラクション設計による溶接作業支援システムの開発. 溶接技術, 2018, 66(5) p. 58-65.
- [4] Hoang, Thuong. et al.. Onebody: remote posture guidance system using first person view in virtual environment. Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, 2016, p. 1-10.
- [5] Sigrist, Roland. et al.. Sonification and haptic feedback in addition to visual feedback enhances complex motor task learning. Experimental brain research, 2015, vol. 233, no. 3, p. 909-925.
- [6] Junji, Ohyama. Xperigrapher Xperigrapher: Social-Lab Experimental Platform to Evaluate Experience in Cyber Physical Society. Transactions of JSMBE 59(Proc), 2021, p. 811-813.
- [7] Peck, Tabitha C and Gonzalez-Franco, Mar.. Avatar embodiment. a standardized questionnaire. Frontiers in Virtual Reality, 2021, vol. 1, p. 44.
- [8] 花島諒, 大山潤爾. VR心理学研究: 仮想身体の触覚が身体所有感に及ぼす影響 アバターに対するフルボデイイリュージョンを用いた検討. 日本認知心理学会発表論文集, 2021, p. 76
- [9] 湯本淳史, 大竹英治. フルボディー錯覚における自己身体のプロジェクション. 人工知能学会全国大会論文集 第32回全国大会 (2018). 一般社団法人 人工知能学会, 2018