

卒業論文

身体運動に同期した三次元教示モデルを
用いた動作獲得システム

平成26年1月31日 提出

指導教員 谷川智洋 講師

東京大学 工学部 機械情報工学科
120270 小嶋泰平

目 次

第1章 序論	5
1.1 本研究の背景	6
1.2 研究の目的	7
1.3 本論文の構成	7
第2章 VR・AR技術と身体動作学習	9
2.1 身体運動学習の段階	10
2.2 観察・模倣学習	10
2.2.1 指導者による手取り足取りの指導	11
2.2.2 “目で盗む”学習	12
2.2.3 科学的分析による学習	12
2.2.4 観察・模倣学習の問題点	13
2.3 運動制御システムの変化	14
2.3.1 初心者のフィードバック制御	14
2.3.2 熟練者のフィードフォワード制御	15
2.4 VR・AR技術による動作獲得	15
2.4.1 初心者の学習における課題	16
2.4.2 VR・ARによる運動学習	16
第3章 身体運動に同期した三次元教示モデルを用いた動作獲得システム	23
3.1 本研究における身体動作獲得	24
3.1.1 学習者の身体と熟練者動作の重畠	24
3.1.2 身体運動同期による観察の易化	25
3.2 三次元教示モデルを用いた動作学習	26
3.2.1 三次元情報の利用	26
3.2.2 三次元教示モデルを用いた学習システム	27
3.3 三次元教示モデル観察学習プロトタイプシステムの実装	28
3.4 プロトタイプシステム作成	29
3.4.1 プロトタイプシステムの概要	29
3.4.2 プロトタイプシステムの試用	34
3.5 プロトタイプシステムの結果	34

3.6 プロトタイプシステムの考察	35
第4章 利き腕でない腕を用いた投球動作学習システムの評価実験	37
4.1 システムの改善内容	38
4.1.1 仮想空間での被験者姿勢の表示	38
4.1.2 学習者と教示モデルの姿勢差分の可視化	39
4.2 実験に用いたシステム	40
4.2.1 システムの実装	40
4.2.2 システムの概要	41
4.2.3 全身判定による学習システム	43
4.2.4 部分判定による学習システム	44
4.3 利き腕でない腕を用いた投球動作獲得システムの評価実験	48
4.3.1 概要	48
4.3.2 実験手順	49
4.3.3 実験結果	53
4.3.4 考察	59
4.3.5 まとめ	60
第5章 結論	62
5.1 結論	63
5.2 今後の展望	64
5.2.1 改善されるべき点	64
5.2.2 将来の展望	65
謝辞	67
参考文献	74
付録A 実験に利用したアンケート用紙	80

第1章

序論

1.1 本研究の背景

2020年に東京にて夏季オリンピックが開催されることが決定した¹。まずは2年後のリオデジャネイロを、そして6年後の東京オリンピックを見据えて各種競技のプレイヤーが心技体のパフォーマンスを高めるために日々厳しいトレーニングを己に課している。自身の身体を思い描いたとおりに動かすためにはどうすればいいのか。高みを目指せば目指すほど答えの見えない道のりである。

己の身体をコントロールすることに心血を注いでいるのは何も運動競技のプレイヤーに限ったことではない。人間の肉体をもって何かを表現する芸術は数多い。日本では能や歌舞伎、その他の伝統舞踊が代表であり、世界でも各種のダンスを始めとして様々な形で身体の動きを用いた表現が行われている。劇場の芸術に限らずとも、工芸その他における研ぎ澄まされた職人技の数々は繊細な身体感覚のコントロールによって生み出されるものであり、思うがままに身体と道具を扱うことができなければ不可能なものと言える。超高齢化社会の到来が現実のものになってきている日本では、こうした伝統技能を持つ職人の高齢化が進みその技能の伝承が深刻な問題となっており、研究が盛んに行われている[1]。

身体動作を獲得するために、まずは目標とする動作を“理解”しなくてはならない。動作を理解するために学習者は目標動作の観察と模倣を行ってきた[2]。その道のプロの動作を見て学び、自分の指導者の手本を見て学び、あるいは自分より上手い友人の動きを見て学ぶ。テレビ中継の録画機器や家庭用ビデオカメラの普及が進んだ20世紀後半以降は、注目している動きを繰り返し再生し、場合によってはコマ送り機能などを使って目標とする動作をより細かく観察することが可能になった。近年はインターネットの普及によって更に手本とするべき映像情報を容易に収集観察することが可能になってきている。

こうした他人の動作の観察と模倣による学習はあらゆる身体動作の獲得において基本となるものであり[3]、初心者・熟練者を問わず行われる。しかし、観察学習のみで動作を獲得することは現実的には難しい。観察は通常客観視点から行われるが、自身の身体を動かすのは常に主観視点であるため観察動作を正しく模倣できるとは限らないためである。近年では様々な技術を用いて主観視点を活用して視点のギャッ

¹<http://tokyo2020.jp/jp/>

プを埋める方法が考案されているが、主観視点では見える部位は正確な把握が可能である一方で、見えない部分は全く把握できないために全身動作を対象とするものは少ない。本研究では従来の見本の姿勢に対して学習者が合わせるという考え方を転換し、学習者の姿勢に対してある程度時系列を合わせた見本姿勢を提示する模倣システムを提案し、全身動作学習に対する有効性を実験によって評価する。

1.2 研究の目的

本研究の目的は従来の運動学習手法では不十分であった動作のコツを効率よく初心者に教示する手法の構築である。バーチャルリアリティ（VR）の技術を利用して熟練者による学習動作の見本を自身の身体と重畳した形で観察することで動作をより直接的に模倣できるシステムを構築する。これに学習者に時系列を合わせた教示姿勢を自動的に提示する仕組みを取り入れることで全身動作を効率的に学習するシステムを提案、構築し実験により評価する。

1.3 本論文の構成

本論文は全5章で構成される。以下に各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、及び本論文の構成を述べた。

第2章「VR・AR技術と身体動作学習」では、VR技術を用いた動作獲得システムを提案するにあたり、従来の運動学習について紹介した後、既存のVR・AR(Augmented Reality)技術による動作獲得システムを紹介する。身体動作の獲得における要素を抽出し、従来のシステムで解決された部分また不十分な部分について分析を行う。

第3章「身体運動に同期する三次元教示モデルを用いた動作獲得システム」では、学習者の身体運動に同期して動作する仮想空間上の三次元教示モデルを用いた動作獲得システムのプロトタイプを構築し、教示モデルが身体運動に同期することで主観視点から効率的に全身動作を学習することが可能であるか検証する。

第4章「利き腕でない腕を用いた投球動作学習システムの評価実験」では、第3章で得られた知見をもとに改善を加えたシステムに関して実験による評価を行う。初

心者を題材としたシステムを評価するために、題材として利き腕でない腕による投球動作を扱う。

第5章「結論」では、本研究についての結論と今後の展望について述べる。

第2章

VR・AR技術と身体動作学習

2.1 身体運動学習の段階

運動技能の獲得は段階的に行われるものであり、運動学習には各個人の習熟度に合わせた内容が取られることが望ましい。Fittsら[4]は運動技能学習を認知層、連合層、自動化層の3段階に分類した。これによれば運動学習はまず認知層における運動の目標・概要の理解から始まり、次に連合層における個々の運動の結果の知識（実行した運動の成否のフィードバック）獲得の繰り返しを経て、最後に自動化層における各運動の結合と自動化のプロセスを通じて達成される。動作の意識レベルと学習段階の対応を図2.1に示す。

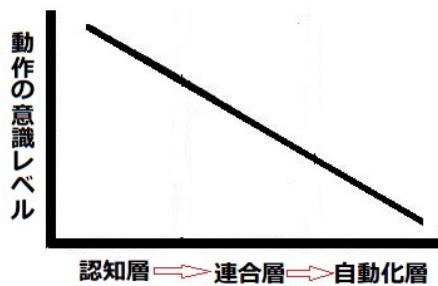


図 2.1: Fitts らの提唱した運動学習段階 [4]

本研究では認知層から連合層にかけての段階に着目する。まず身体動作の学習に関する研究を紹介した後に、VR・ARの技術を用いることで効果的な学習システムを提案した例を挙げる。

2.2 観察・模倣学習

運動学習の研究の多くは実際に学習者が身体を動かし、その動作の誤差を修正する過程を扱うものである。具体的な練習方法や練習過程に関するものや、結果の知識と呼ばれる学習者の運動に対するフィードバックについて主に取り扱っている。これらはFittsの分類に当てはめれば主に連合層から自動化層にかけての学習を対象としていると考えられる。

一方、認知層から連合層にかけては動作の繰り返し練習を始める以前の段階である。動作を初めて目にしてから、観察と模倣によってその概要を視覚的にもしくは

言語的に理解し学習者自身が独力で動作を行えるようになるまでの学習である。

本節ではこの学習段階における観察と模倣を観察・模倣学習と呼称し、これらに関する研究例について述べる。

2.2.1 指導者による手取り足取りの指導

初めて身体動作を学習させる場合にはまず指導者が最低限の基本を伝授することが一般的である。見本となる動作を指導者が学習者の前で実際に見せる、あるいは図2.2のような二人羽織の形で直接学習者の身体を支えながら正しい姿勢を教示する[5]。学習初期段階においては学習者当人のみでは何を学習すればいいのか判断できないためこうした指導は有効である。しかし、宮本[6]は人の手で行う限界として複数の身体部位の協応動作を指導することが困難であること、指導者の指導能力の影響が大きい点を指摘した。



図2.2: ホークスジュニアアカデミーによる手取り足取りの野球指導¹

¹<http://hawks-npo.jp/>

2.2.2 “目で盗む”学習

指導者不在の形でももちろん学習は行われる。人から教わることなく動作を身につけようという場合には、熟練者の動作を観察し、見本として模倣することで学習を行うことがまず考えられる。観察から模倣を通じて他者から学習することは人間の技能の獲得において本質的役割を演じているとされる[3]。また、観察により運動学習を進めることはミラーニューロンの発見以来脳機能の面からも支持されている[7]。伝統工芸の職人芸の伝承やアスリートの技能模倣においては直接指導によらず観察によって動作のコツを身に付けることが多い[8-10]。いわゆる“目で盗む”と言われるような技能獲得である。学習者が基礎的な動作を理解した後は指導者の動作を観察するよりも実践的な局面で熟練者の動作を観察することがより効果的である。

また、各種映像媒体の普及によってデータとして保存された動作の映像を繰り返し観察する学習が可能になった。特筆すべき点は映像再生時に一時停止、逆再生、コマ送りなどの操作によって、高速動作の瞬間姿勢を観察することや学習者自身の動作を客観視点から観察することなどの観察形態が可能になったことである。特に近年ではインターネット上の各種動画サービスによって非常に多くの映像が集積されたため個人での動画観察学習が容易になり、指導者を持たない者でも熟練者動作の模倣に取り組みやすい状況となっている。

2.2.3 科学的分析による学習

近年ではコンピュータを利用した科学的な動作解析技術が登場[11]し、スポーツ分野などで幅広く用いられるようになった。モーションキャプチャ技術によって学習者の身体動作を記録可能になったことで、熟練者の動作との比較分析が容易になり、理想の動作に近づけるための運動学習においても科学的な評価が可能となった[12]。このような科学的分析に基づいたトレーニングはプロスポーツ界の選手たちの間で行われており[13]、適切な動作姿勢の獲得に貢献している。

モーションキャプチャ技術は当初は英国VICON社のVICONシステム(図2.3)[14]など高度な動作解析のシステムを用いて行われていた。しかし、2010年にMicrosoft社がKinectを市販したことで精度は劣るもの非常に安価に身体動作のデータ化[15]

が可能となった(図2.4). 将来的には計測技術の更なる発達によって身体動作を容易に分析することが可能になると予想される.

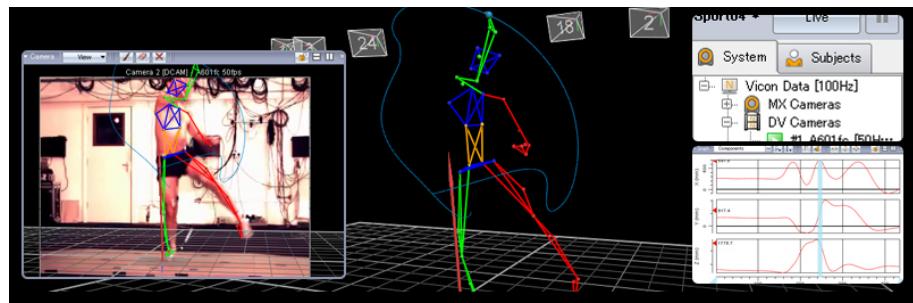


図2.3: VICON三次元動作分析システム・モーションキャプチャ[14]

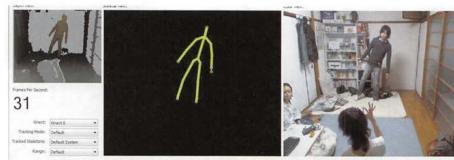


図2.4: Microsoft Kinectによる動作解析の例[15]

2.2.4 観察・模倣学習の問題点

ここまで観察・模倣による学習方法について紹介した. 正確な動作を身につける上でこのような方法は初心者・熟練者問わず有効である. しかし小田ら[16]の指摘によれば, 観察学習において自らの運動感覚的印象と客観的に得た情報が一致するとは限らないため, 動作が自動化に達した熟練者と異なり初心者には観察による客観的情報を適切に処理し学習に活かすことが難しい. 大島ら[17]は運動の観察・模倣に大きな役割を果たすとされているミラーニューロンの活動が対象の運動に関する観察者の経験によって影響されることに着目し, 運動技術の差が観察能力に影響することを明らかにした.

田中ら[18]は知覚段階での刺激の受容や認知段階での反応選択に照合する記憶材料の違いから熟練者と初心者では同一刺激から得る情報理解に差異がある点を指摘

した。また宮本ら [19] は測定可能な客観的情報だけでなく運動者の主観的運動理解に着目し、「身体が理解する」運動感覚的印象と学習の習熟度の関係性を検討して、学習段階に応じた特徴的变化の存在を明らかにした。これは客観的観察情報の処理だけでなく、実際に体を動かして学習を行う際の主観的理解にも初心者と熟練者の間で差異があることを示しており、熟練者に対して有効な学習方法が必ずしも初心者に対して有効とは言えないことが示唆される。

次節ではこうした初心者と熟練者の間の差について運動制御の仕組みから知見を紹介する。

2.3 運動制御システムの変化

人間は空間上での自身の身体部位の位置・動きを深部感覚で知覚している。深部感覚は体性感覚の一部であり、どの位置に身体部位があるかを知覚する感覚は位置覚、どんな動きをしているのかを知覚する感覚は運動覚と呼称されている。こうした深部感覚を利用することで、暗闇でものを取ったり背中でエプロンの紐を結んだりなど視覚情報に頼らない身体動作を達成することができる。深部感覚を司る体性感覚野と運動野のコネクションは運動学習の形成に重要だと考えられており [20–22]、運動中の深部感覚の鋭敏さはトレーニングによって鍛えられることが明らかになっている [23]。つまり、初心者は熟練者ほど自身の身体姿勢を視覚に頼らずに把握することができない。初心者と熟練者ではこのような深部感覚の差異により身体制御の方法が異なる。

2.3.1 初心者のフィードバック制御

身体動作の模倣を行う場合には実際に動作を行い理想動作との誤差を修正する試行錯誤学習が一般的である。滑らかに姿勢を移行できない初心者は、動作を時系列に分割して着目する姿勢を決定して模倣するのがよいと言われている [5]。目標姿勢との誤差を視覚的に確認しながら逐次修正することで各時点の姿勢を身につけ、繋げていくことで動作の模倣を行う。これをフィードバック式の運動制御と呼ぶ。

静止姿勢あるいは非常に速度の低い姿勢移行については高い学習効果が見込めるため、初心者が動作の形をなぞる段階ではフィードバック制御が有効である。しか

し、一定以上の速度のある動作を学習する場合には軌道修正に時間遅れが生じてしまうために不適切である [24]。繰り返し練習することで速度のある動作を身につけた熟練者では自然と次節で述べるフィードフォワードの運動制御を行うようになる。

2.3.2 熟練者のフィードフォワード制御

初心者のフィードバック制御に対して、熟練者では制御方法が異なる。フィードバック制御は一通りの動作の形をなぞるためにものであるが、逐次誤差を確認して修正を行う以上時系列的な流れを考慮していない。姿勢が大きく変化していく動作や身体が静止する瞬間の無い動作では誤差修正をリアルタイムに行うことは不可能である。このような動きのある運動を制御する方法がフィードフォワードの制御である。

フィードフォワード制御とは、目標に対しての差分を修正しながら動作を進めるのではなく、目標に対して動作を完遂させるための運動指令をあらかじめ計算したものを一方的に投射することによって動作を行う制御方法である [25]。動作途中に新たな運動指令を加えることがないため滑らかな姿勢の移行が可能である。そのためには中枢神経系に筋骨格系のダイナミクス情報が存在しなければならない。これは内部モデルと呼ばれ、小脳内に保持されていると考えられている。

内部モデルを構築するためには、運動指令と動作の対応を学習により獲得する必要がある。身体部位の位置と姿勢を深部感覚のみで把握できるようになるまで繰り返しの学習が必要となる。Kottke ら [26] の研究により運動学習には夥しい回数の反復練習が必要であることがわかっており、いわゆる“身体で憶える”次元まで達して初めて滑らかな姿勢の移行が可能となる。

フィードフォワード制御ではリアルタイムに自身の姿勢と目標姿勢を比較し修正することは不可能である。学習は完了した動作に対し理想動作との差分を評価して小脳内の内部モデルに誤差修正を加える形となる。

2.4 VR・AR技術による動作獲得

前節で初心者と熟練者の学習上の差異について述べた。本節ではこれらの差異を踏まえて初心者の学習における従来手法の課題を上げ、課題の解決のために VR・

AR技術を用いた学習システムを提案した先行研究の例を紹介する。

2.4.1 初心者の学習における課題

初心者が動作の習得を目的に観察・模倣を行う場合に熟練者が同様に観察する場合と比べて動作の理解が浅いことは先に述べた。この差異の要因としては動作を観察する視点の違いの影響が挙げられる。他人の動作を観察する場合には単に肉眼で動作を観察する場合やビデオカメラなどで四方からあるいは上方下方から撮影した動作を観察する場合が考えられるが、いずれにせよ熟練者を外部から客観的に観察する形となる。この客観視点からの観察によって動作概要を把握することは可能であるが、学習者が実際にその動作を自身で再現することは必ずしも容易ではない。これは学習者は通常自身の身体動作を客観視点から把握していないためである。日常的に人間は自身の身体を主観視点から制御しており、客観視点から得た動作のイメージを基に自身の身体を動かすことは直感的ではない。

動作に習熟し深部感覚による身体イメージが確立されている熟練者と異なり、初心者は客観的観察情報を主観的運動情報に処理する能力が低い。

2.4.2 VR・ARによる運動学習

上記のような初心者の観察・模倣学習における課題に対してVR・ARの技術を利用することで実世界での制約に縛られない形で動作の学習を行うことが可能と考えられており、多くの研究者が効果的な学習システムについて模索を続けている。本説ではVR・ARを用いた動作学習システムの中で、初心者のフィードバック制御段階の学習を対象とし、熟練者動作の観察・模倣や主観的感覚理解に注目したものを持ち紹介する。

Nawahdahら[27]はVR空間での観察学習において観察対象の教師モデルの向きを動作が見やすいように自動的に回転させるシステム（図2.5）を構築し検証実験により学習効率を高めることが可能であることを示唆した。

Andersonら[28]はARの鏡を用いた全身身体運動の学習システム Youmove（図2.6）を構築した。学習者がリアルタイムに目標姿勢との誤差フィードバックを受

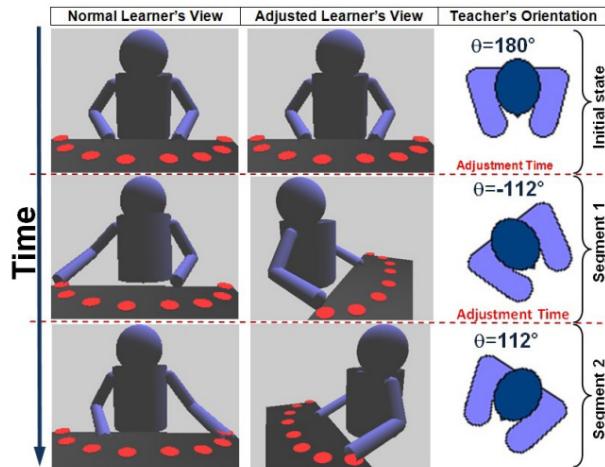


図 2.5: Nawahdah らによる VR 教師の自動回転システム [27]

け取るシステムとなっており、実験により従来のビデオ観察学習に対して短期的な効果があることを確認した。

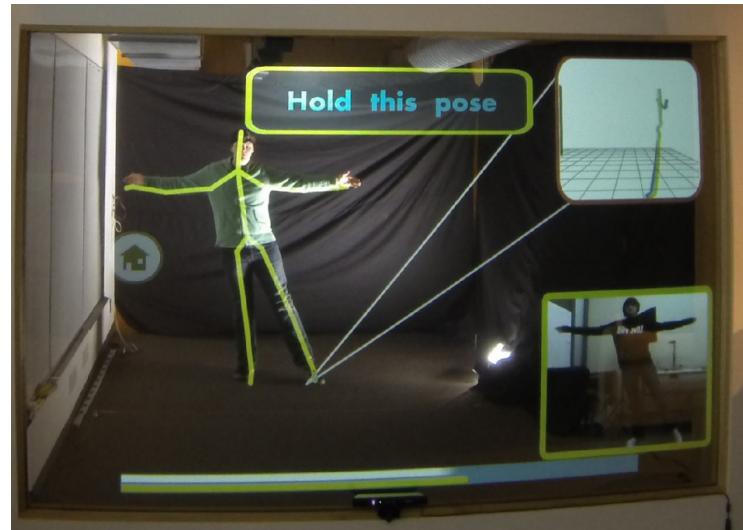


図 2.6: Anderson らによる AR 運動学習システム Youmove [28]

Rector ら [29] は弱視の方を対象に視覚的フィードバックに頼らないヨガのエクササイズ学習システムを構築した。Kinect によって学習者の姿勢を取得し、目標姿勢に向けた適切なフィードバックを音声によって行うシステムにより学習効果を高め

られることを明らかにした。

また音と身体動作を対応付けることで身体状況を把握可能にする研究領域があり、身体動作学習にも用いられている。Kapur ら [30] は音声によってミュージシャンやダンサーなどの身体動作の理解の補助が可能であることを示した。

Chua ら [31] はワイヤレスの VR 太極拳学習システム（図 2.7）を構築した。仮想空間内で自身の姿勢を表す 3D モデルと、その周囲もしくは学習者モデルと重畠した位置に配置される熟練者の 3D モデルを客観的に見比べながら学習するシステムであり、実験により学習効果を伝統的な太極拳の模倣学習と比較した。結果として従来手法に比べて高い効果は見られず、学習者が客観視点から自身と熟練者を模倣するシステムによる学習は困難を伴う場合があることが示唆された。



図 2.7: Chua らによる VR 太極拳学習システム [31]

Yang ら [32] はゴーストメタファー（図 2.8）として教示者の動作をリアルタイムで映像的に学習者の身体に重畠させるコンセプトを提案した。学習者はゴーストメタファーによって熟練者から見た熟練者の身体動作を観察・模倣することにより学習時に客観的情報から主観的情報に変換を行う過程を省略可能であると主張し，“Just Follow Me”と名付けたシステムを構築した（図 2.9）。書道の学習効果を検証する実験などによって従来の学習手法と比較し、コンセプトの有効性を示した。

また西野ら [33] もゴーストメタファーと類似のコンセプトとして、熟練者から見た熟練者自身の身体部位の見え方を学習者が体感できる AR の技術による情報表示

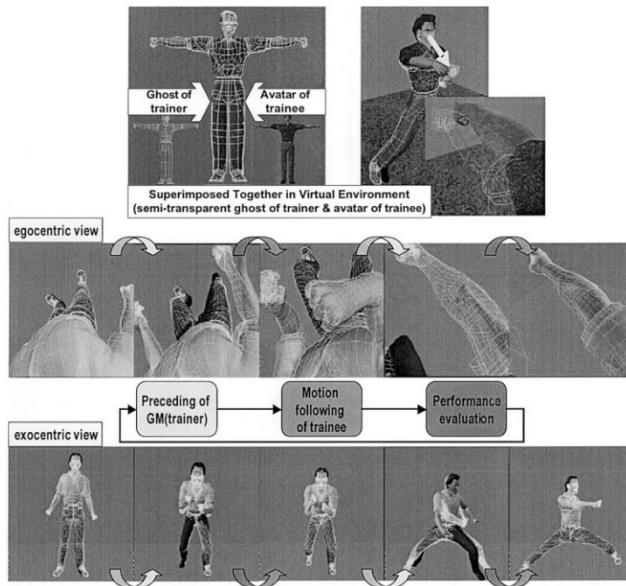


図 2.8: Yang らが提案したゴーストメタファー [32]

方法を提案し、書道を対象動作として学習支援システムのプロトタイプ（図 2.10）を構築した。

本荘ら [34] は HMD を用いた初心者を対象とする VR ゴルフスイング学習システムを構築し（図 2.11），視覚的フィードバックの表示方法と学習効果に関して検証を行った。結果、正しいフィードバックの無い学習は誤った動作を獲得してしまう可能性があること、ある程度は動作の全体像を情報表示することが動作の把握に必要であることを明らかにした。

米村ら [35] は熟練者の頭部に装着したビデオカメラの映像を学習者の視界に合成する視野共有のシステムにより、心肺蘇生法の訓練において従来手法では伝えにくい精度の必要な作業を効率よく学習できることを示した（図 2.12）。

檜山ら [1, 36] は紙漉きの伝統技能学習において主観視点からの多感覚追体験システム（図 2.13）の開発を行った。実験による検証を行った結果、熟練者から学習者への非言語的な技能のコツの伝達において VR 技術を用いた主観情報による学習の有効性が示された。

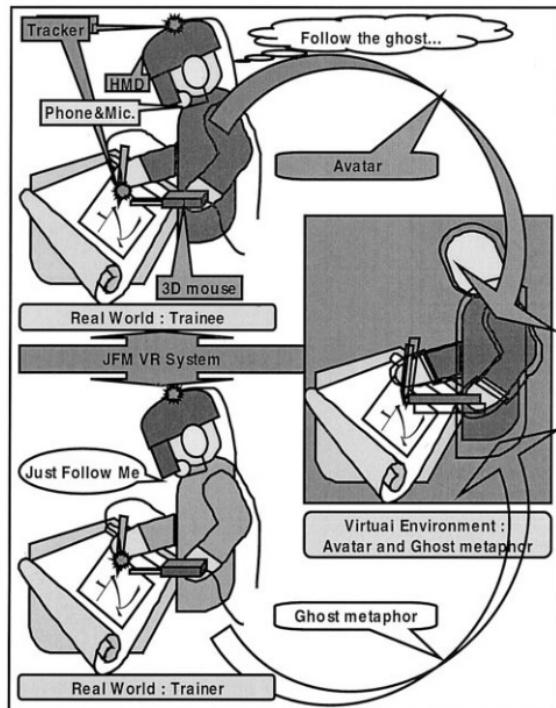


図 2.9: “Just Follow Me” の習字学習システム [32]



図 2.10: 西野らによる AR 学習支援システムプロトタイプ [33]

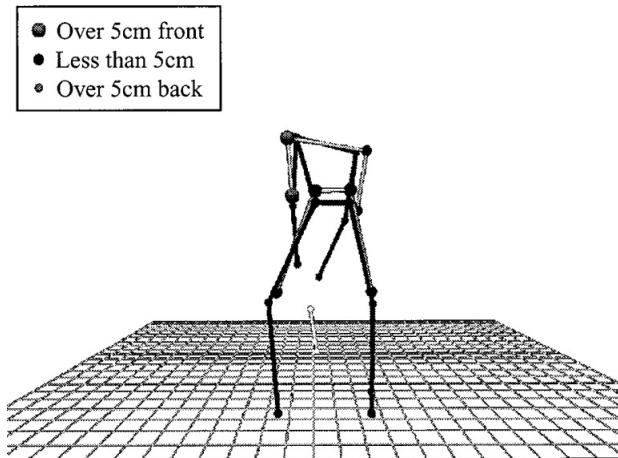


図 2.11: 本荘らによる VR ゴルフスイング学習システム [34]

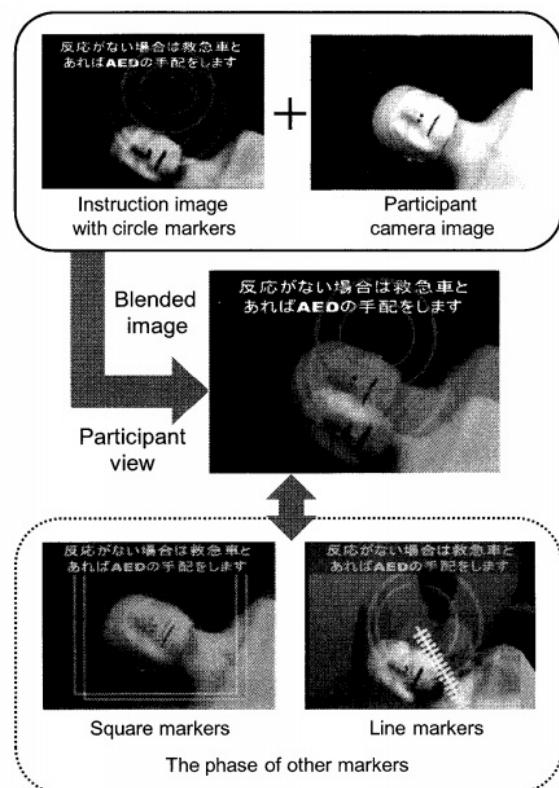


図 2.12: 米村らによる視野共有システム [35]



図 2.13: 檜山らによる紙漉きの多感覚追体験システム [1]

第3章

身体運動に同期した
三次元教示モデルを用いた
動作獲得システム

3.1 本研究における身体動作獲得

初心者の運動学習においては視覚的に自身と熟練者の姿勢を比較しながら動きの型を身につけるフィードバック制御が初期段階として有効であり、先行研究の多くはリアルタイムな観察・模倣と誤差のフィードバックをいかに学習者に伝えるかということに着目している。しかし、それらは主に客観的な全身姿勢を提示するものもしくは腕の動きなどの主観視点から常に把握できる身体部位による動作を対象としたものであり、全身運動に対して主観視点を有効に活用した研究結果は得られていない。これは主観視点からの観察では身体の一部しか視界に入らないために全身姿勢の変化に対応しにくいことが原因の一つとして挙げられる。

本研究ではこの問題に対して熟練者姿勢の変化を学習者に合わせるシステムを提案する。学習者が熟練者の動作に合わせる従来の方法では初心者が熟練者の速度に対応しきれないことがあるが、本システムでは学習者の姿勢に合わせて観察すべき熟練者の姿勢を決定することで確実に姿勢を対応させることができる。

3.1.1 学習者の身体と熟練者動作の重畠

観察学習についての知見は2.2節で述べたが、観察によって獲得したイメージが正しいものかどうかの判定は実際に学習者が身体動作を行って熟練者動作との比較検討を行わないことには不可能である。フィードフォワード制御を必要とする段階の運動学習においては熟練者と学習者の動作をそれぞれ保存し比較を行うことになるが、フィードバック制御の段階においてはリアルタイムに熟練者と学習者の姿勢差分を伝えることで修正を行うことが最も効率的な差分修正である。従って本研究ではVR技術により学習者が仮想空間で熟練者を観察しながらその模倣を行いリアルタイムに姿勢の比較をすることで効率的な差分修正を可能にする。熟練者動作の観察と学習者自身の身体姿勢の把握は共に主観視点から行うことが最も動作の理解と模倣の上で効率的であるため、双方が同じ位置に重畠された状態で観察を行うシステムとなる。(図3.1)に主観視点から熟練者動作を学習者身体に重畠して観察を行うイメージを示す。薄い赤色で示されている腕が熟練者の腕を示している。

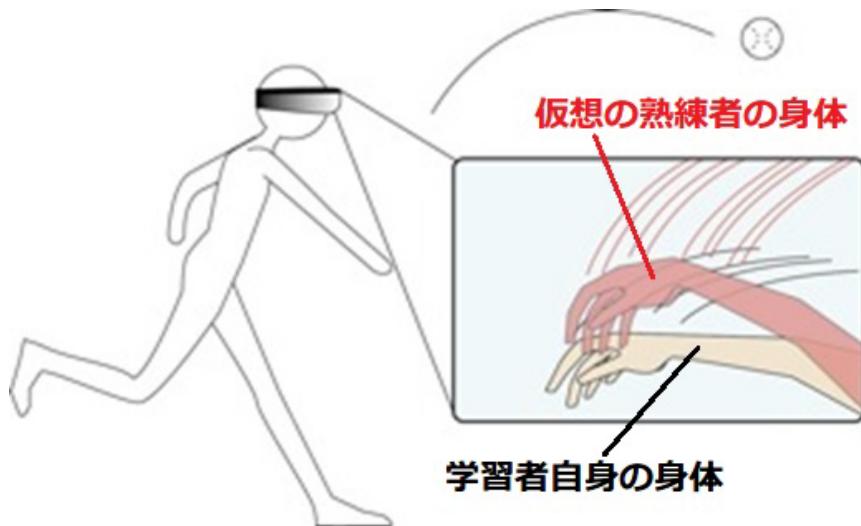


図 3.1: 主観視点から熟練者動作を学習者身体に重畠して観察を行うイメージ

3.1.2 身体運動同期による観察の易化

主観視点からの観察は動作を自身の身体に反映させる上で有効であるが、全体像を俯瞰できないため注目部位以外については情報が得られない。従って模倣姿勢の全容を把握することが出来ないまま姿勢が移行してしまう場合が多く、学習者が熟練者動作の流れに適切に合わせることが難しい。

フィードバック制御の段階においては滑らかに動作を移行させることよりも各時点での姿勢を正しく模倣することが重要である。従来の模倣学習においては熟練者の動作に学習者が合わせるのが一般的だが、本研究では姿勢変化を熟練者側が学習者に合わせることで観察・模倣を容易にする。この形式を教示側の身体運動同期と呼称する。身体運動同期の手順を図 3.2 に示す。

従来手法では熟練者は熟練者のペースで動作を行い、姿勢を模倣する学習者はその熟練者のペースに合わせなければならない。本システムでは、まず学習者の姿勢に合わせて熟練者がそれに近い姿勢をとり、それに対して学習者が熟練者の模倣を行う。学習者が姿勢を変更することで熟練者の姿勢が移行するため、学習者が熟練者のペースを追い切れないという事態を回避することができる。

以上のシステムを構築し実験によってその有効性を検証する。

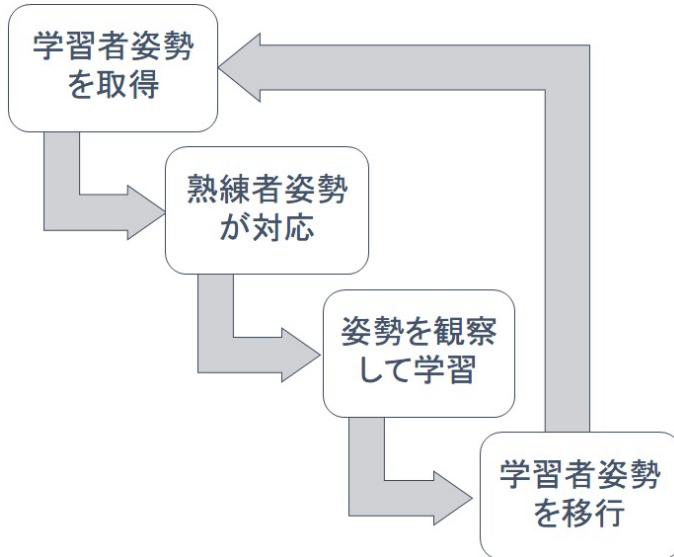


図 3.2: 身体運動同期による学習の流れ

3.2 三次元教示モデルを用いた動作学習

3.2.1 三次元情報の利用

球技などの全身の部位を複雑に動かす運動において、単なる写真や動画といった二次元情報では動作を模倣、学習し獲得するために十分な情報を表示できない [37]. 前章で述べた通り動作に習熟した学習者であれば自身の身体動作イメージを正しく把握しているため、自分もしくは他人の動作をビデオのような二次元情報から三次元の動作イメージを構築し、動作に反映させることも可能である。しかし、動作イメージが確立されていない初心者は、目標動作の一面的な観察から情報落ちした部分を正しく補完できない。従って、目標とする動作を三次元情報として表示することが効果的である。

三次元の動作情報を取得する際にまず考えられるのは多方向から静止画または動画を撮影し組み合わせること方法である。撮影方向からの視覚的情報を過不足無く伝えられるため情報量が多いという利点がある。

しかし、動作を学習する上で必要な細かな姿勢情報を伝えるには破綻のない映像を多角的に観察できるように表示しなければならないが、これには非常に大掛かり

な設備もしくは多大な労力を必要とする。テニスの大会で使用されるチャレンジシステム（ホークアイシステム [38]）が多角的な映像処理で三次元映像を再現するシステムとして有名だが、全身運動を同様に再現することは容易なことではない。

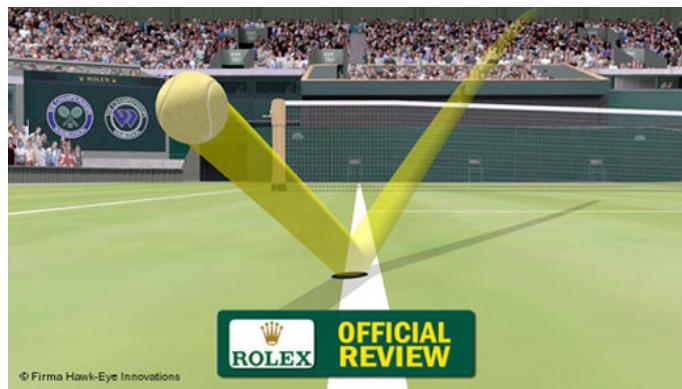


図 3.3: ホークアイシステムによるテニスのラインアウト判定 [38]

そこで本研究では教示データとして映像ベースの情報を利用するのではなく、熟練者の身体姿勢の情報のみを抽出し仮想空間内で姿勢を再現することで模倣学習に利用する。周囲の環境や外見などのデータを除外して純粋な姿勢情報のみを用いることで、多角的に破綻の無い三次元情報を映像処理に比べて容易に取り出すことができる。

3.2.2 三次元教示モデルを用いた学習システム

前節に述べたように、熟練者動作を主観視点から学習者自身の身体に重畠された形で観察するシステムを構築する。仮想空間内に人体骨格構造を持った3Dモデルを表示し、熟練者のモーションをリターゲットすることで熟練者動作を再現する。この熟練者動作を行う3Dモデルを教示モデルと呼称する。教示モデルの動作を学習者の身体運動と同期させることで効率的な模倣学習を可能にする。

誤差のフィードバックを含む正確な模倣システムを構築するための前段階としてプロトタイプシステムを構築する。プロトタイプシステムの目的は教示モデルの身体運動同期によって主観視点からの観察が効率的に行われることの確認である。

動作の題材としては野球における投球動作を取り扱う。全身の複数の身体部位を同時に制御する一般的な運動動作であり、学習初期にはフィードバック制御運動であるが学習により最終的にフィードフォワード制御運動となること、また熟練度の優劣があり正しい姿勢の教示が重要とされているため学習システムの検証に適していると考えられるためである。

3.3 三次元教示モデル観察学習プロトタイプシステムの実装

システムを構築するにあたっては、OSとしてWindows7、仮想空間を構築するためのゲームエンジンとしてUnity3D、開発言語にUnity Scriptを用いて実装した。教示モデルのモーション作成にはMicrosoft Kinectを用いたモーションキャプチャをiPi soft社のiPi Mocapを利用して行い、モーションの調整にAutodesk社のAutodesk MotionBuilderを利用した。学習時の利用者姿勢の取得にMicrosoft Kinect、ディスプレイとしてヘッドトラッキング機能を搭載したヘッドマウントディスプレイであるOculus VR社のOculus Rift（図3.1、以後HMDと呼称）を利用した。Oculus Riftを採用した理由は視野角の広さ、内蔵センサによる遅延の少ないトラッキング機能とデバイスの軽さにある。主観視点からの観察可能な身体部位が限られているため、出来る限り広い視野を確保する必要がある。また、全身を利用した動作であるためにヘッドトラッキングによって学習者の頭部姿勢をバーチャル空間内に反映させることは必須事項である。軽さに関しては言うまでもない。また、Unity3Dのアプリケーション内でKinectのデータを利用するためのライブラリとしてZDK for Unity3Dを用いた[39]。

¹<http://www.oculusvr.com/>

図 3.4: Oculus Rift¹

3.4 プロトタイプシステム作成

3.4.1 プロトタイプシステムの概要

利用データ

まず Microsoft Kinect を用いた非同期モーションキャプチャを iPisoft 社の iPisoft Mocap のソフトを用いて行い、投球のモーションデータを BVH フォーマットで取得した。BVH フォーマットは様々な商用 3D キャラクターアニメーションソフトでもサポートされているモーションキャプチャデータフォーマットである。モーションアクターは野球歴 12 年の東京大学運動会軟式野球部の 4 年生部員である筆者が担当した。モーションキャプチャの様子を図 3.5 に示す。

このデータを Autodesk 社の Autodesk MotionBuilder を用いて編集して細部の調整を行った。この調整作業はプロ野球で実績のある投手数人の連続写真と市販のピッチング教本（ピッチングの正体 [40] ほか）を参考に行った。

完成した BVH ファイルを既存の人型 3D モデルに適用してフォーマットを FBX ファイルとして書き出し、ゲームエンジン Unity3D 上で動作させた。モーションを適用した 3D モデルを図 3.6 に示す。

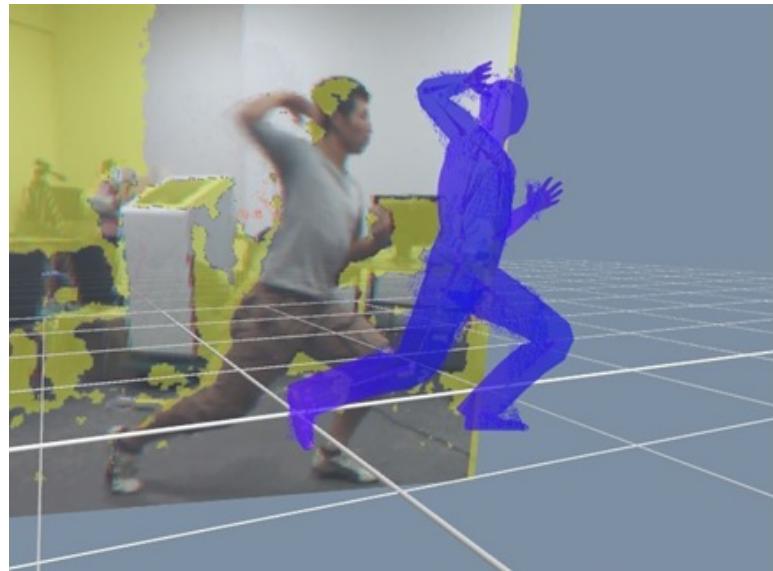


図 3.5: モーションキャプチャの様子



図 3.6: モーションを適用した 3D モデル

システム

Unity のゲームエンジン上で構築される仮想空間にピッキング動作する上記の人物型 3D モデルを配置し、その動きをヘッドトラッキング機能を持つ HMD で観察して模倣することで動作の獲得を行う。Microsoft Kinect によって学習者の姿勢を検出し、学習者の右上腕、右前腕、右手首の位置と角度を元に 3D モデルのピッキング

モーションをコントロールする。

システムにおけるデータの流れを図3.7に示す。また、システム利用時の学習者とデバイスの配置を図3.8に示す。



図3.7: システムにおけるデータの流れ

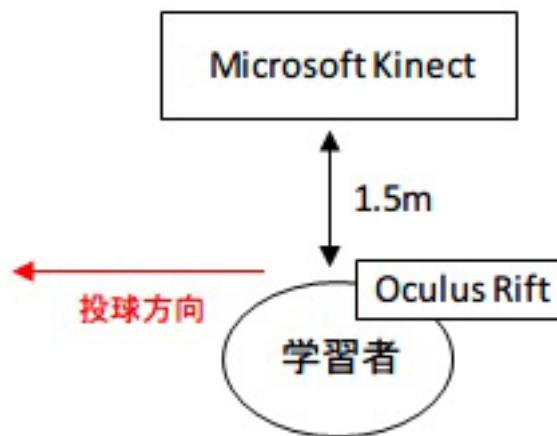


図3.8: デバイスの配置

モーションのコントロール まず投球動作のモーションを a~k まで 11 の区間に分割する。分割された各モーションの終了姿勢を重ねたものを図 3.9 に示す。

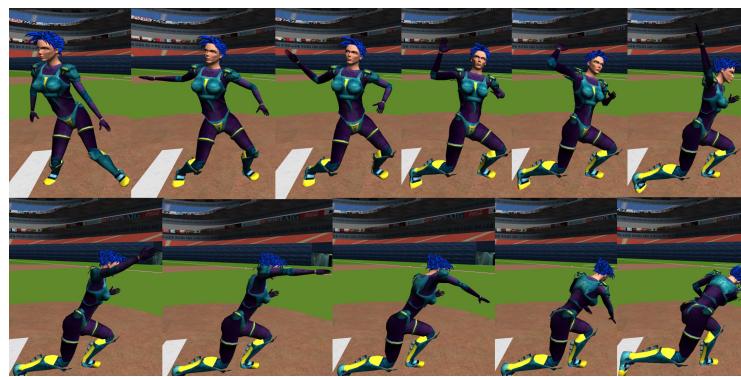


図 3.9: 投球モーションの 11 分割

これらのモーションから ZDK により Unity3D 上に取り込まれた学習者の右上腕、右前腕、右手首の位置と角度を元に学習者の姿勢と近い姿勢のモーションを選択し再生する。フィードバック制御によって差分を修正しながら学習を行うことが前提であるため、モーションの再生速度は本来の速度の 10 分の 1 の速度である。

学習者が模倣する対象となる 3D モデルは 2 体用意されている。1 体は学習者から見て右前方に位置しており、背中右側を学習者に向けた姿勢を取っている。これを客観視点モデルと呼称する。もう 1 体は学習者の観察位置と重なって位置しており、ヘッドトラッキングを用いることで HMD がなければ本来学習者自身の身体が見えるであろう位置に重畠された 3D モデルを見ることができる。つまり、学習者の身体が 3D モデルに置き換わったような形で観察することになる。これを主観視点モデルと呼称する。

この時学習者自身の身体姿勢を表す 3D モデルは画面上に表示しない。第 2 章で述べた通り初心者の学習では適切なフィードバックを与えることが重要であるため、教示モデルと学習者姿勢の視覚的な比較を行うために学習者自身の身体姿勢を表示することを検討した。そのためには正確な学習者姿勢の取得が必要である。しかし今回のプロトタイプシステムにおいては簡易な実装として学習者姿勢の取得は Microsoft Kinect 一台のみによって行っているため、投球動作においては腕が身体の前を横切る瞬間にオクルージョンが発生し取得姿勢が不安定となる。従って学習者がモデル

の姿勢に違和感を憶える可能性が高い。プロトタイプシステムの目的はあくまで身体運動同期による主観視点からの観察について検証することであるため、学習者に違和感を与える可能性のある身体姿勢の表示は実装要素から除外した。

学習者が右腕を持ち上げた瞬間の仮想空間内の状況を図3.10に示す。その瞬間に前方の3Dモデルを観察する場合の視線方向を視線方向Aとして図中に黄色の矢印で表し、その場合に学習者が観察する画面の様子を図3.11左に示した。また学習者自身の視点位置にいる3Dモデルの腕部分を観察する場合の視線方向を視線方向Bとして図中に赤色の矢印で表し、その場合に学習者が観察する画面の様子を図3.11右に示した。学習者はまず視線方向Aを中心に観察を行い、客観視点から動作の全体像を把握する。全体像の把握が済み次第視線方向Bのように学習者自身の身体に重畠した位置の教示モデルの観察を開始し、実際に動作を行う際の主観的運動イメージを学習する。



図3.10: 仮想空間内の様子



図 3.11: 視線方向 A の画面（左）と視線方向 B の画面（右）

3.4.2 プロトタイプシステムの試用

構築したプロトタイプシステムをより多くの人に試用してもらいフィードバックを得ることを目的としてデモンストレーションを行った。2013年11月に東京大学駒場第一キャンパスで開催された学園祭において研究室のプロジェクトのデモンストレーションを行った際に場所を借りて展示を行った。

学園祭に来場した老若男女様々な層の人にシステムを利用してもらい、感想を得るとともに試用時の骨格情報を保存し、分析した。野球の投球動作に習熟している利用者はわずかであり、初心者を対象としたシステムの検証としては十分な状況設定であった。

プロトタイプシステムをデモ試用した際の様子を以下の図 3.12 に示す。

3.5 プロトタイプシステムの結果

プロトタイプシステムをデモ試用した結果、以下のような意見が得られた。

- 自分の身体が見えないからどう違うのかわかりにくい
- 見本との違いが姿勢を見比べるだけでなく画面の表示でも教えて欲しい
- 腕だけではなく身体の他の部分を使って動かしてみるのもよさそう



図 3.12: 駒場祭展示の様子

- 一通りの投げ方だけではなくてサイドスローとかアンダースローでも投げられるようにしたらどうか
- 他の動きにも使えそう
- もっと滑らかに動くようにすれば自分自身がなりきったような感覚になれると思う

また、試用の様子を観察する中で散見された主要な問題としては腕にのみ着目しているため他の姿勢の模倣が全く行われないという問題と、客観視点モデルを操作することに集中してしまい自身の姿勢に注意を払わないという問題が見られた。特に前者については、学習者自身は違和感なく動作を行っているにも関わらず実際の教示モデルとは大きく姿勢が異なる場合が散見された。

学習者の模倣姿勢に関して問題が見られたものの、身体運動同期による教示モデル制御とその観察には問題がなく、感想としてもおおむね好評であった。

3.6 プロトタイプシステムの考察

第3章で構築し試用してもらったプロトタイプシステムでは計測精度上の問題を考慮して学習者姿勢のフィードバックを行っておらず、教示モデルに姿勢を合わせ

る作業において自身の姿勢は深部感覚によって把握してもらう形を取った。しかし結果としては適切に姿勢の模倣が出来ない場合が見られ、利用者の感想からも学習者自身の姿勢を表示する必要性が見られた。第2章で述べた通り、初心者は深部感覚に頼って自身の身体を把握することが困難であるため、より正確な教示姿勢の模倣を行うためにはまず学習者の姿勢を可視化し教示モデルと比較できるようなシステムの構築が必要と考えられる。

単純にモデルを見比べて修正するだけでなく、システムとして姿勢をどう修正すべきかのガイドを表示することでより効率的な学習ができるのではないかという意見も得られた。既存のVR学習システムにおいてもフィードバックの可視化は重要視されており、本システムにおいても実装することで学習効率の向上が見込まれる。

また、今回は腕部のみに注目した身体運動同期のシステムであったが、身体の他の部位に注目したシステムを組み合わせて学習することでより効率が向上する可能性も示唆された。

利用した3Dモデルの視認性や身体運動同期の滑らかさなどにも改善の余地が多く見られた。

第4章

利き腕でない腕を用いた投球動作学習
システムの評価実験

本章では第3章で構築、評価したプロトタイプシステムに改善と新たな実装を加えた身体動作獲得システムについて扱う。改善と実装については後ほど述べる。プロトタイプシステムでは投球時にボールに直接力を与える腕部に注目部位を限定して教示モデルが同期するシステムを構築した。しかし、全身動作の学習としては全身姿勢に注目して教示モデルが同期するシステムが有効であることも可能性として考えられる。したがって、新実装として全身の姿勢に注目するシステムを構築する。また、体幹からの末端部位への加速が重要である投球動作の性質上、注目部位を限定する場合もプロトタイプシステムの腕部注目による同期システムのみでは不十分と考えられるため、肩の姿勢に注目する同期システムも新たに構築する。

構築したシステムに対して、初心者を対象とした学習システムとしての有効性を検証するために、利き腕でない腕を用いた投球動作を対象として学習効果を計測する。

4.1 システムの改善内容

第3章で得られた問題点を踏まえてシステムの改善を行った。主要な改善点は2点である。

- 仮想空間上での被験者姿勢の表示
- 被験者と教示モデルの姿勢差分の可視化

4.1.1 仮想空間上での被験者姿勢の表示

プロトタイプシステムと同様に、被験者の姿勢は Microsoft Kinect の深度カメラを用いた骨格検出を用いて行った。Kinect1台による検出ではピッチングという動作の特性上オクルージョンが発生し姿勢の正確な取得が不可能であるため、90度向きを変えた2方向から2台のKinectを用いて骨格検出を行う形をとった。プロトタイプシステムではZDKというインターネット上に公開されている有志によるプログラムを利用することでKinectで取得した骨格データをUnityの仮想空間で利用したが、ZDKでは2台のKinectを同時に利用することは考えられていない。そのため改善システムではMicrosoft社のKinect for Windows SDK [41]のプログラムを元

にして2台のKinectを同時起動しそれぞれから名前付きパイプによるプロセス間通信によってUnityに骨格データを送るシステムを実装した。

Kinect for Windows SDKは骨格データとして20箇所の身体部位の空間座標データを取得できる。これらをUnity3Dに送信し、球体モデルの位置を対応させることで20個の球体モデルによる被験者姿勢の表現を可能とした(図4.1)。さらにこの球体モデル同士を円筒状のモデルで結ぶことで被験者の骨格を再現した。姿勢を表現するモデルを棒人間形態のモデルとしたことに関しては後に4.1.2項で述べる。

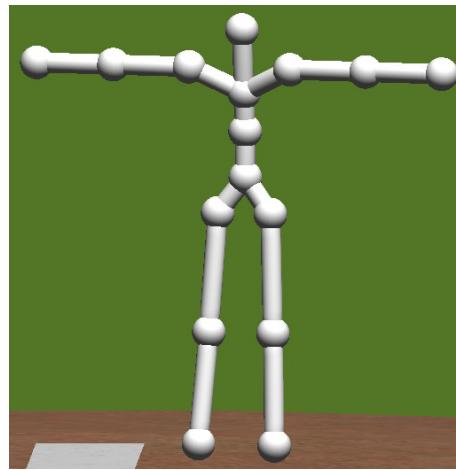


図4.1: 20点の空間座標を用いた棒人間骨格の表現

4.1.2 学習者と教示モデルの姿勢差分の可視化

プロトタイプシステムでは実装上の都合から学習者は教示モデルのみを見て模倣を行った。しかし自分の姿勢が確認できずに教示モデルの姿勢のみを観察するだけでは学習上で修正すべきポイントがわかりにくいという問題があった。従って、改善システムとして仮想空間上で姿勢を修正すべき部位を可視化することで習熟するためのエッセンスをより効率的に身につけることができると考えた。4.2.3項で詳しく述べるが、学習者モデルの身体部位が教示モデルの対応部位とある程度近い姿勢を取った場合にその部位の色を白から黄色に変化させることで姿勢の差分を視覚的に可視化した。

人体モデルと棒人間モデル

バーチャル空間で利用する3Dモデルとしては人体を模したある程度リアルなモデル（手のひら、甲、足首などが把握できる）とおおまかな四肢体幹の姿勢の把握のみが可能な棒人間モデルの2通りが考えられる。

人体モデルのメリットとしては、身体各部位の捻りなどの細かい部分を把握できるという点がある。投球動作においても、投げる瞬間の指先の使い方や前腕の捻り方を観察することを重要視するならば人体の構造を反映したリアルなモデルを利用する必要がある。

一方で人体モデルのデメリットとしては、リアルな構造をしている分だけ現実にありえない動きをしてしまった場合に観察者に強い違和感を与えててしまう点がある。実際の人体と同様の拘束を与えて関節の向きを正しい方向のみに限定し、身体各部位の伸縮も人体に則した幅に抑えることが望ましい。

今回のシステムでは、身体の細かな部位の使い方よりも四肢体幹の大まかな動きについての学習を初心者に行ってもらうことを想定しているため最終的に教示モデルに棒人間モデルを採用した。比較対象となる被験者モデルも同様に棒人間モデルとした。棒人間骨格は人体モデルの骨格の長さに合わせて作成した。教示用棒人間モデルとその骨格長の基準とした人体モデルを図4.2に示す。教示用モデルは学習者モデルと重畳するため半透明の赤色としている。

4.2 実験に用いたシステム

4.2.1 システムの実装

システムを構築するにあたっては、OSとしてWindows7、バーチャル空間を構築するためのゲームエンジンとしてUnity3D、開発言語にUnity ScriptとC#を用いて実装した。教示モデルのモーションはプロトタイプシステムと同様にMicrosoft Kinectを用いたモーションキャプチャをiPi soft社のiPi Mocapを利用して行い、モーションの調整にAutodesk社のAutodesk MotionBuilderを利用した。学習時の被験者姿勢の取得にMicrosoft Kinect2台を用い、このときUnity3Dとの連携にはMicrosoft Kinect SDKのサンプルプログラムを元にC#を用いて実装したプロセス間通信を利



図 4.2: 棒人間モデルの元にした人体モデル

用した。学習時のディスプレイとして Oculus VR 社の Oculus Rift(Head Mounted Display) を利用した。

4.2.2 システムの概要

学習者は配置された二台の Kinect に骨格を認識された状態で Oculus Rift を装着する。学習者は自身の骨格姿勢を図 4.1 で示した棒人間モデルで確認しながら教示モデルの模倣を行う。

システムにおけるデータの流れを図 4.3 に示す。また、システム利用時の学習者とデバイスの配置を図 4.4 に示す。プロトタイプシステムからの変更点は Kinect の台数が一台から二台になったことである。



図 4.3: システム

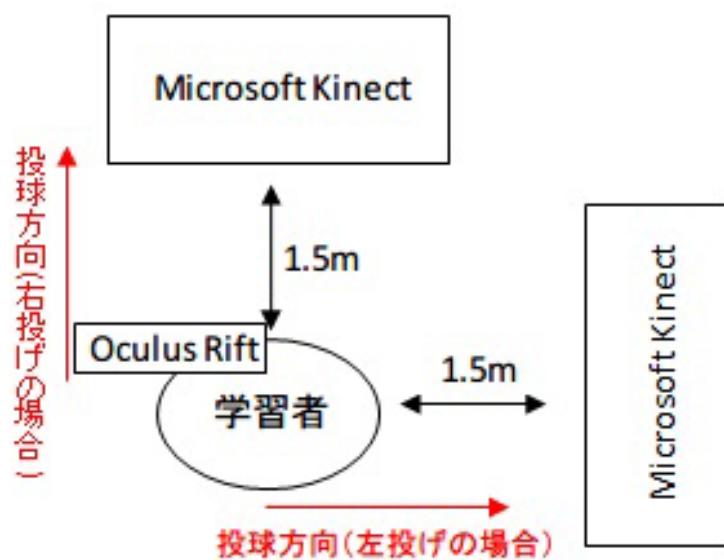


図 4.4: デバイスの配置

4.2.3 全身判定による学習システム

このシステムでは、学習者と教示モデルの全身の姿勢の対応を全身評価点を設定して判定する。

教示モデルは図4.2で示した半透明の赤色、学習者モデルは図4.1示したように白色である。また上半身の回転を可視化するために両肩を結んだ線の延長線上に棒状のモデルを表示する。これを両肩線と呼称する。教示モデルについては視認性の問題から赤色ではなく青色で表示する。

全身10箇所の部位に関して類似度を計算し、類似度がある閾値を超えているときその部位は姿勢が対応したと判断する。10箇所の内訳は左右上腕、前腕、大腿、下腿の計8箇所に加えて脊椎、両肩線の2箇所を加えた10箇所である。

姿勢が対応した部位は学習者モデルの色表示が白から黄色に変わることで視覚的な確認を可能にする。図4.6に学習者モデルと教示モデルの様子を示す。各部位はそれぞれ重要度をもっており、姿勢が対応した部位の重要度をすべて加えることで全身評価点を計算する。

類似度判定

身体各部位の姿勢の類似度判定には仮想空間内のベクトルを用いる。Unity3D内で各身体部位の向きを表すベクトルを取得し、学習者の向きベクトルと教示モデルの向きベクトルの内積を取ったものを類似度とする。各ベクトルは正規化されているため類似度の取る値は-1~1である。

姿勢対応判定の閾値

姿勢の対応を判定する類似度の閾値は部位ごとに異なる。閾値は教示モデルのモーションアクターである筆者が実際にシステムを使用しながら調整した。初心者には筋力的問題から投球動作の最終局面における沈み込み動作が難しいと判断し、その区間の模倣が難しい両下腿部は閾値を低めの0.7に設定した。また、投球動作中の優先度が比較的低い右腕部についても閾値を0.7に設定した。その他の部位の閾値は0.8とした。

重要度の設定基準

野球の投球動作においては体幹から順序良くムチのように部位を加速させることが重要であるため、脊柱と両肩線の重要度を高く設定する。脊柱の重要度を2点とし、投球時に大きく回転を伴う両肩線は特に重視して重要度を3点とする。また投球時に実際に加速しボールに力を伝える上腕と前腕の重要度を2点とした。残る部位については重要度は1点とした。実際に野球選手の投球動作ではエネルギーを稼ぐために下半身の使い方が非常に重要だが、筋力トレーニングを行っていない初心者に関しては下半身の姿勢を模倣することは困難であるため重要度は1点としている。

全身評価点

部位数は10箇所であり、全部位の重要度の合計値は15点である。内訳としては下半身の重要度が合計で4点、脊柱と両肩線で5点、ボールを投げる側の腕部が4点、投げない側の腕部が2点である。

学習者の各部位の姿勢を教示モデルの同一箇所の姿勢と比較して姿勢の対応を判定し、姿勢が対応したと判定された部位の重要度を全てを積算したものを全身評価点とする。これが一定の閾値を超えた場合に教示モデルの動作が次の動作に移行するシステムとなっている。17分割された教示動作が最終段階を終えると自動的に初期動作に戻り、再度動作の模倣を行うことが可能である。動作移行の流れを図4.5に示す。

全身評価点の閾値は11点とした。この値では両下腿部の模倣が難しい場合でも残る全部位が適切な姿勢を取ることで1点分の余裕を持って姿勢の移行が可能である。閾値が10点の場合は下半身を全て無視した状態でも全身評価点が閾値を超ってしまうため、全身に注目するシステムの意図に反する。また、閾値が12点の場合は模倣が難しい下腿部について適切な姿勢が取れない場合に残る全部位を合わせなければならぬため、利き腕や大腿部のわずかなブレによって動作が停止してしまう。

4.2.4 部分判定による学習システム

肩の角度による判定システム このシステムでは学習者と教示モデルの姿勢の対応を判定する点は全身判定システムと同様であるが、判定箇所が全身判定システムの

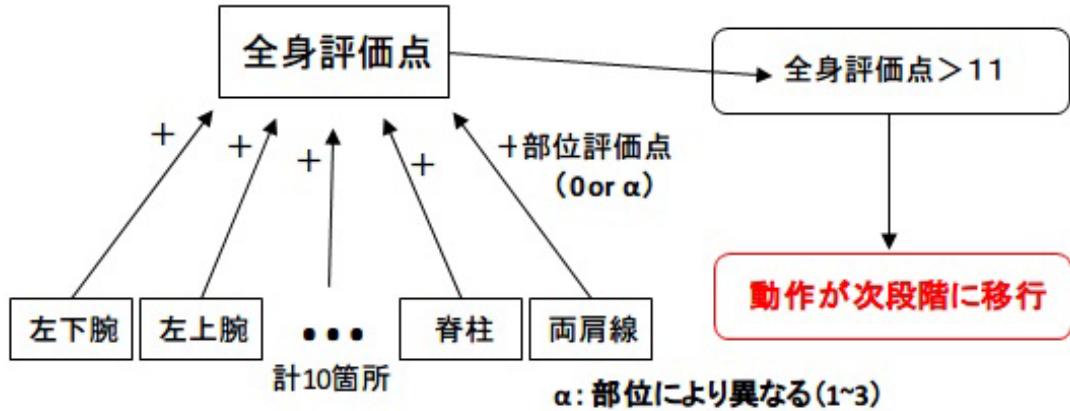


図 4.5: 姿勢に応じた教示モデル動作の流れ

表 4.1: 部位と重要度 α , 閾値の対応

部位	重要度 α	閾値
左上腕	2	0.8
左前腕	2	0.8
右上腕	1	0.7
右前腕	1	0.7
左大腿	1	0.8
左下腿	1	0.7
右大腿	1	0.8
右下腿	1	0.7
脊柱	2	0.8
両肩線	3	0.8

10箇所と異なり両肩線のみの1箇所である点が異なる。つまり両肩線の色が白から黄色に変わると同時に教示モデルが動作を移行する。判定に用いない他の9箇所に関しては全身判定システムと同一パラメータで色の変化による姿勢差分の可視化のみを行う。

全身判定システムでは姿勢対応判定における両肩線の類似度の閾値は0.8であったが、このシステムにおいては注目する箇所が少ない分だけ閾値を高く設定し0.9とした。

肘、手首の位置による判定システム 基本は第3章で構築したプロトタイプシステムを元にしたシステムである。姿勢の一致度を判定して表示を白から黄色に変える

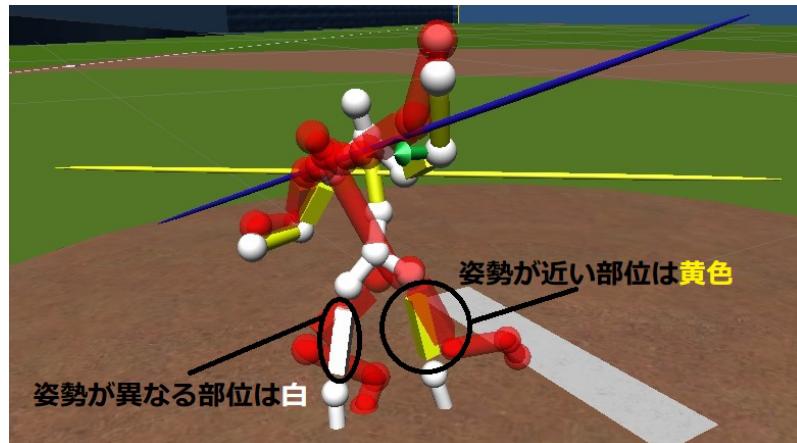


図 4.6: 教示モデル（赤）と学習者モデル（白）

仕様は全身判定システムと全く同一のパラメータを用いるが、評価度による教示モデルの制御は行わない。学習者3Dモデルの左肘（左利きの学習者の場合は右肘）の座標を元に教示モデルが17分割された投球動作のどの部分を行うかを決定する。分割した投球動作の中で、肘の位置による判定だけでは動作の決定に不十分である箇所（投球動作においてボールを投げる瞬間の前後）においてのみ手首の座標も利用して制御を行う。教示モデルの動作は姿勢を合わせることで段階的に移行するのではなく学習者の肘と手首の位置に応じて無文脈に決定されるため、現在の姿勢から次の動作方向へのガイドとして緑色の矢印を表示している。動作中に学習者が自分の左腕を見た時の表示画面の様子を図4.7に示す。

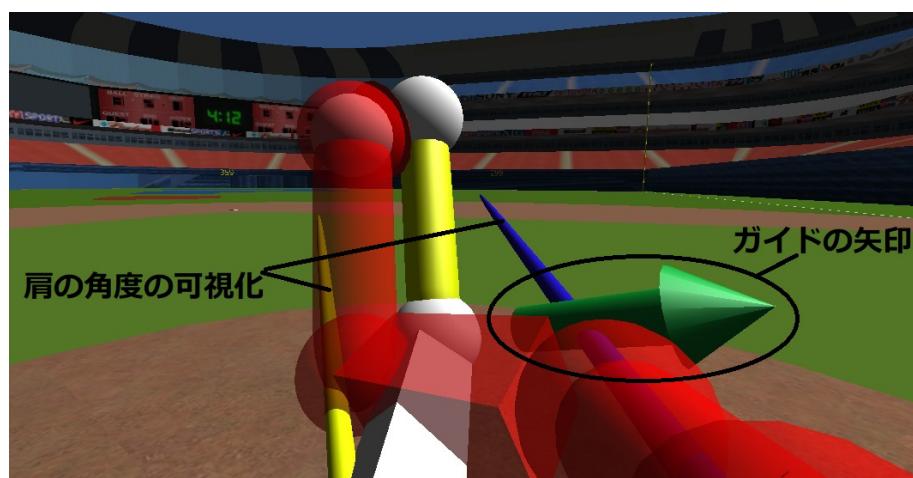


図 4.7: 学習者が自分の左腕を見た時の画面

4.3 利き腕でない腕を用いた投球動作獲得システムの評価実験

4.3.1 概要

被験者は20代男性16名、女性1名の合計17名。平均年齢は約23才で内16名が右利きであった。場所は東京大学本郷キャンパス内の運動施設である御殿下記念館のスタジオを利用した。被験者17名の内11名は本研究で構築したシステムを利用した学習を行い、残り6名は比較対象としてPC画面上に表示される教示モデル動作の観察による学習を行う。動画観察の学習時間は8分間とした。構築システムを利用した学習を行う被験者11名の内、6名は全身の姿勢を基に教示モデルを同期させるモードを7分間利用し、残り5名は肩の姿勢を基に教示モデルを同期させるモードと肘と手首の位置を基に教示モデルを同期させるモードの2モードを順番に4分間ずつ利用して学習を行った。

投球動作では適切な姿勢を身につけることが投球能力の向上に非常に重要である。学習前後に投球能力を評価し、能力の向上度によって学習効果の検証を行う。

実験室の様子を図4.8に示す。



図4.8: 実験室の様子

実験環境の配置図を図 4.9 に示す。

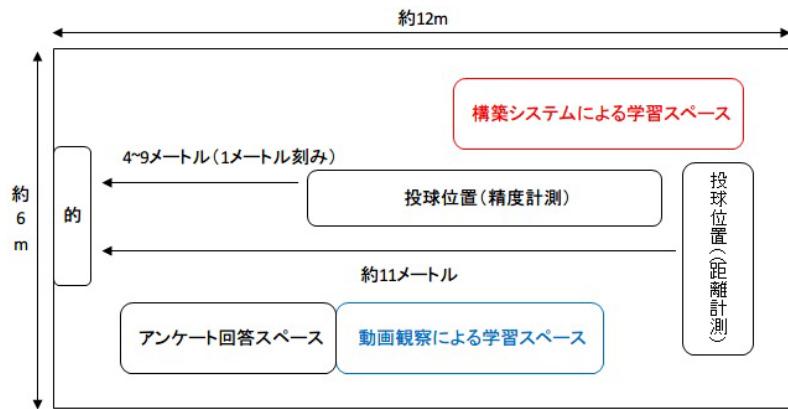


図 4.9: 実験室配置図

4.3.2 実験手順

1. 実験前アンケートへの回答、ウォーミングアップ
2. 初回投球能力計測
3. 初回計測後アンケートへの回答
4. 構築システム/動画観察による学習 (8分間)
5. 学習後投球能力計測
6. 最終アンケートへの回答

実験前アンケート

実験前にアンケートを実施し、初心者の運動学習を検証するための実験に適した被験者であることを確認した。項目は、本格的な野球経験があるか（半年間週に3日以上の頻度で野球をしていた時期があることと定義した）、投球動作について指導を受けたり訓練した経験があるか、利き腕が右腕であるか左腕であるか、利き腕

と逆の腕でボールを投げる練習をしたことがあるか、四肢の健康状態に問題があるか、の5項目であった。利き腕に関しては1名が左利きであり、その被験者には左利き用の学習を行った。その他の項目に関しては全被験者で初心者の条件をみたすことを確認した。

投球能力の評価

投球能力は“投球距離”および“投球精度”により評価した。

距離計測では、スタジオ内の壁面に設置した的を目掛けて11m離れた位置から投球し距離を計測した。この時、的への命中を目的とするのではなく大まかな投球距離の測定を目的としていることを被験者には事前に伝えた。壁に命中したボールの距離に関しては命中位置の高さを基準として判定を行った。天井に当たった場合は実験時間の都合上2回までは再投球を認め、3回目以降に関しては無効投球として計測対象から除外した。距離計測は5投(一部の被験者は実験時間の都合上3投)を行い、その平均値をスコアとした。

精度の計測では、壁面に設置した的の中心を狙って投球し中心部からの距離に応じて点数を割り当てて計測した。的の中心部に命中した場合は0点、的から大きく外れた場合の最大を8点として点数を割り振った。投球数は3種類の距離から5投ずつ計15投で計測した。3種類の距離は被験者ごとに異なる距離を設定した。これは、全ての被験者を同一の距離で計測すると被験者によって的に全く届かない場合や投げる能力に比べて的が近すぎて自然な投球できない場合を考えられるためである。距離は投球距離の計測で5投を投球した際の様子を基に、被験者が的に届かせることができるが力を抜きすぎると届かない距離を設定した。設定距離は(4m,5m,6m),(5m,6m,7m),(6m,7m,8m),(7m,8m,9m)の4通りから選択した。

投球能力計測の様子を図4.10に、精度計測に利用した的を図4.11に示す。投球距離、投球精度の評価における結果を参考に被験者を3群に振り分けて動作学習を行った。距離計測が3投の被験者の割合は偏りがないように振り分けた。



図 4.10: 投球能力評価の様子



図 4.11: 設定した的

構築システムによる学習:全身判定による教示モデル同期

この群では、先に 4.2.3 節で述べた全身姿勢の判定による学習システムを用いて学習を行った。この群を「全身判定システム群」と呼称する。PC の画面を被験者に見せながら説明員が実際にシステムを利用しているところを見せてシステムの利用方法を説明した後に説明員と交代して学習を開始してもらった。

学習時間は被験者がシステムを理解したと判断した時点から 7 分間とした。被験者 6 人は全員右利きであった。学習時の被験者の様子を図 4.12 に示す。

構築システムによる学習:部分判定による教示モデル同期

この群では、先に 4.2.4 項で述べた 2 つのシステムを用いて学習を行った。まず、肩の角度による判定システムを用いて学習を行い、その後に肘、手首の位置による判定システムを用いて学習を行った。この群を「部分判定システム群」と呼称する。PC の画面を被験者に見せながら説明員が実際にシステムを利用している画面を見せてシステムの利用方法を説明した後に説明員と交代して学習を開始してもらった。

学習時間は被験者がシステムを理解したと判断した時点からそれぞれ 4 分間とした。被験者 5 人は全員右利きであった。



図 4.12: システム学習の様子

動画観察による学習

この群では、システムの学習効果に対する比較として PC 画面上に表示される教示モデル動作の観察による学習を行った。この群を「動画観察群」と呼称する。バーチャルリアリティの技術を用いない従来の学習方法として行うため、一人称視点からの観察や学習者の身体運動に同期するシステムは取り除かれている。想定としてビデオ観察による学習をモデルとするため、学習者が可能な操作は

- 動作の再生、停止、早送り、巻き戻し
- カメラ位置の切り替え（前後左右の4通り、全て客観視点）
- リアルな人体モデルと棒人間モデルの切り替え

の3つとした。モデルの切り替えに関してはビデオ観察を基準としているという要素を踏まえ初期状態としてはリアルな人体モデルを利用する状態としたが、比較対象となるシステム学習では棒人間モデルを利用したことを踏まえて棒人間モデルとの切り替えを可能にした。

学習時間は8分間とした。被験者6名は5名が右利きであり、1名が左利きであった。左利きの被験者はモデルの左右を反転した映像による学習システムを用いた。観察学習に用いた画面表示を図4.13に示す。



図4.13: 観察学習の画面

4.3.3 実験結果

計測結果

学習前の各群の計測結果に対して一元配置分散分析を行った結果、投球距離についても投球精度についても有意な差は見られなかった。(投球距離: $p = 0.54$ 、投球精度: $p = 0.56$) 従って、各群の学習前投球能力には差はないと確認できた。

投球距離、投球精度の各群の平均をそれぞれ図4.14、図4.15に示す。投球精度は的の中心からの距離を基準に点数をつけているエラーバーは95%信頼区間を示す。

次に学習効果を見るため対応のあるt検定を行い学習前と学習後のデータの平均値に有意差があるかを検定した結果、部分判定システム群の投球精度と投球距離に有意差が見られた。 $(p < 0.05)$

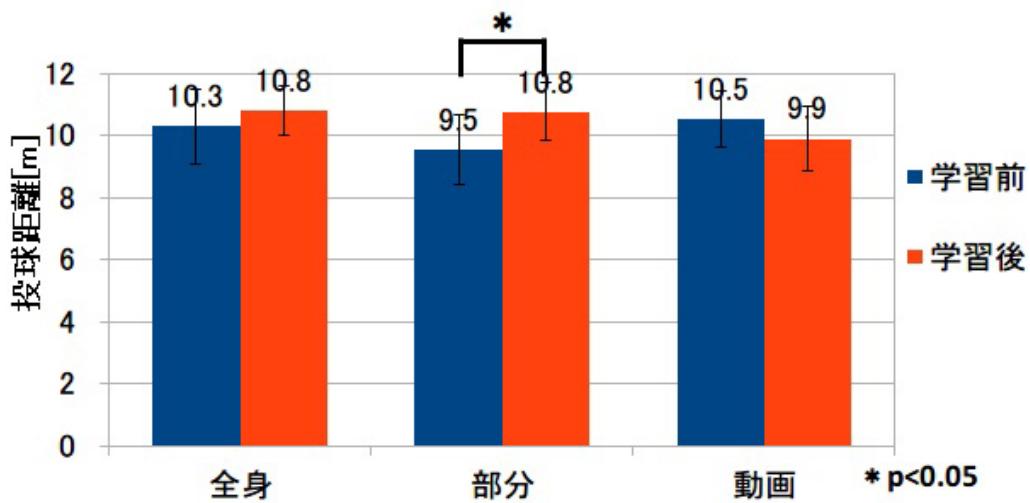


図4.14: 投球距離（各群平均）

また、投球距離、投球精度の個人別の平均値の変動をそれぞれ図4.16、図4.17に示す。左側が学習前、右側が学習後として縦軸で投球距離または点数を表している。投球距離は傾きが右上がりであるほど、投球精度は傾きが右下がりであるほど学習度が高い。

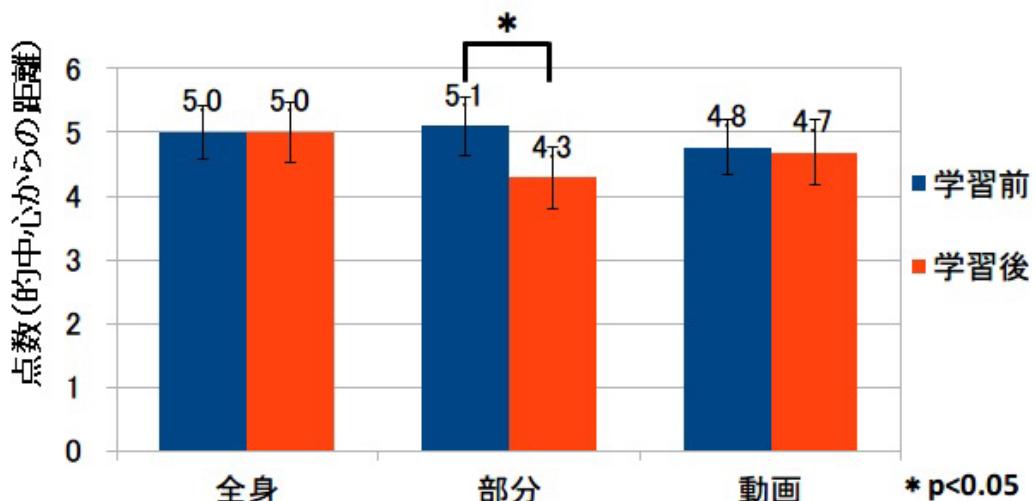


図 4.15: 投球精度 (各群平均)

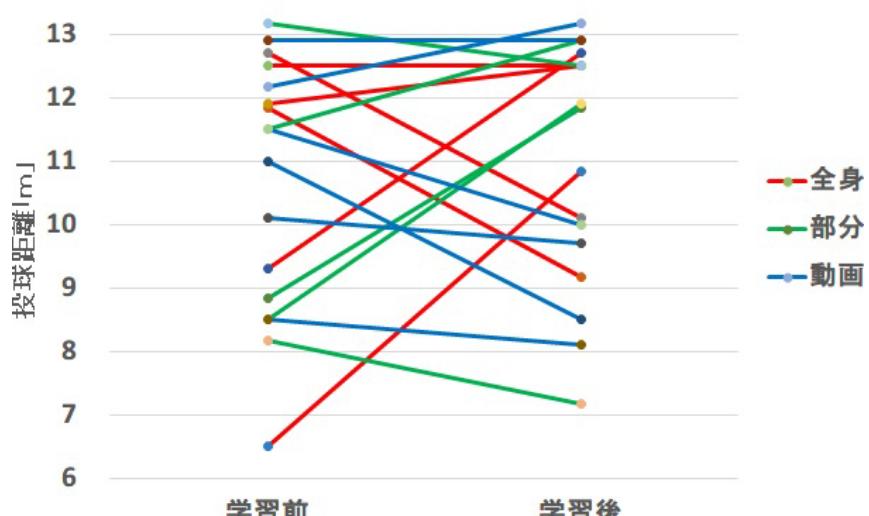


図 4.16: 投球距離学習度 (個人別)

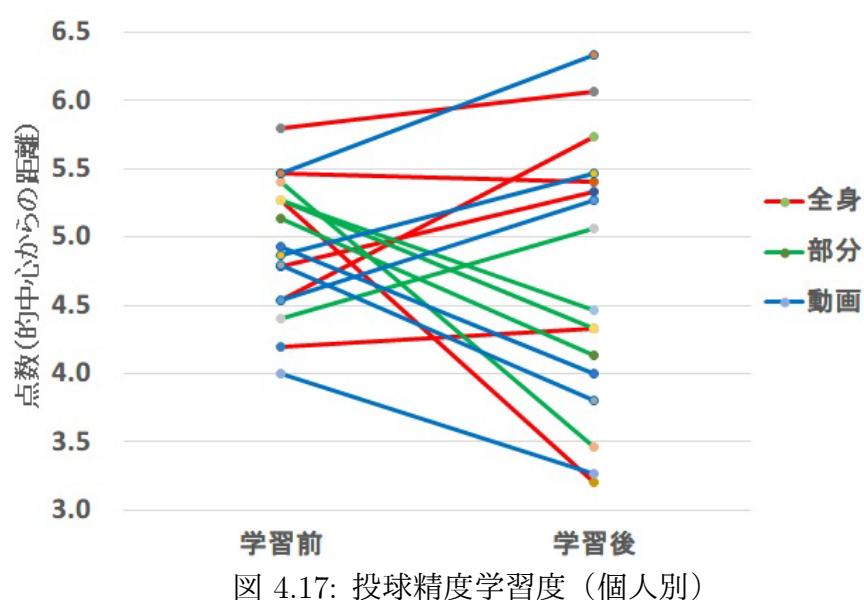


図 4.17: 投球精度学習度（個人別）

アンケートによる主観評価

評価点 各項目について {思わない, 感じない 1 ⇔ 7 思う, 感じる} の 7 段階評価でアンケートを行った。身体部位別の学習による動作把握度のアンケート結果を図 4.18 に示す。（“瞬間”はボールを投げる瞬間にについての把握度を示す）エラーバーは 95% 信頼区間を表す。

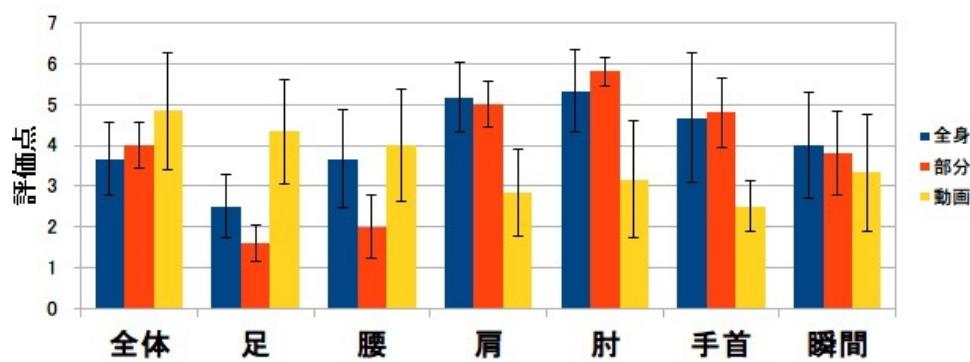


図 4.18: 部位別学習後把握度

学習前後に自身の投球距離, 精度, 投球姿勢を評価してもらったものの結果を図 4.19, 図 4.20, 図 4.21 に示す。エラーバーは 95% 信頼区間を表す。

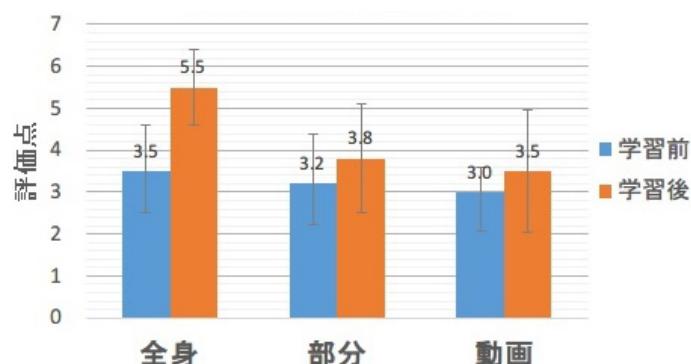


図 4.19: 投球距離主観評価

部位別学習後把握度に関しては明確な差異が見られた。システムによる学習では肩・肘・手首などの主観視点から把握しやすい部位について評価点が高く、一方動

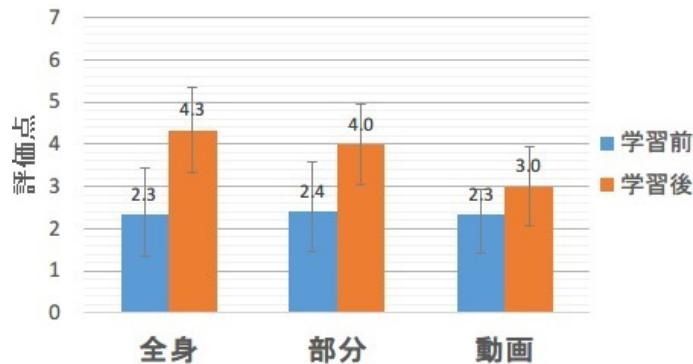


図 4.20: 投球精度主観評価

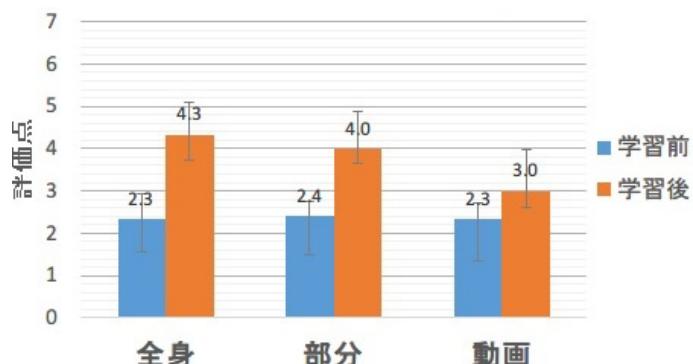


図 4.21: 投球姿勢主観評価

画観察による学習では身体全体の把握度や足・腰の把握度で高い評価を得た。主観視点と客観視点の特性が如実に現れた結果と言える。

全身判定システム群と部分判定システム群に大多数の項目で差は見られなかったが、足の姿勢と腰の姿勢に関しては全身判定が高い評価点を得た。部分判定システム群は肘と手首の把握度のみ全身判定システム群を上回っている。

学習前後の投球能力の主観評価に関しては、いずれの群も学習前から学習後に評価点の上昇が見られた。中でも姿勢に関しての向上度が最も大きい結果となった。

群ごとの差を見ると、全身判定システム群が全項目について最も大きな向上度を示した。これは全身判定システム群が学習時に意識すべき点が最も多いため、学習者の感覚としては学習を行った達成感が最も大きいことが要因として考えられる。

最後にシステムの使用感の評価について述べる。全身判定システムと部分判定シ

システムの間の身体運動同期の仕組みの違いによってシステムの利用しやすさが異なり結果に影響が出てしまった可能性があるため、システムの利用しやすさについてのアンケートを行い利用時の評価を行った。設問は「見本が自分の姿勢に応じて動くことで見本と自分の姿勢を合わせやすいと感じたか」とした。結果を図4.22に示す。エラーバーは95%信頼区間を表す。システム間で評価の有意な差は見られず、利用しやすさの違いによる結果への影響はないと考えられる。

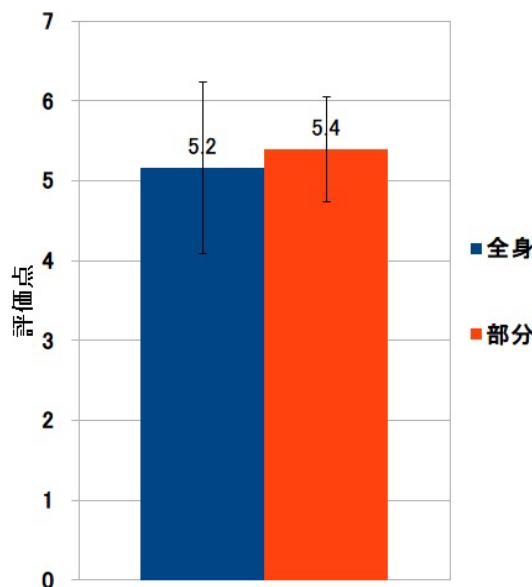


図 4.22: 身体運動同期によって見本に合わせやすいと感じたか

4.3.4 考察

最も高い学習効果が認められた群は、部分判定システム群であった。要因としては、着目部位を限定することでその部位を集中的に改善できること、また肩の学習の後に肘、手首の学習に移行する段階的な学習が実際の投球動作のステップに対応しているために効果が高かったことなどが考えられる。着目部位が少ない故に操作性が高く、ストレスの少ない学習が行えたことも影響にあげられる。

一方全身の姿勢を制御するシステムにおいては投球精度、投球距離ともに統計的

な有意差としての学習効果は見られなかったが、傾向として投球距離に関しては学習効果があったように見て取れる。繊細なコントロールを司る肘や手首に関する学習効果が部分判定システム群に比べて低かった一方で、ボールの飛距離や速度を司る下半身や体幹に関する学習効果が高かったと思われる。投球距離についても部分学習システムが最大の学習効果を上げる結果となった要因は、利き腕と逆の腕による不慣れな運動でありボールを実際に投げる腕に関する学習が結果に与える影響が特に大きかったためと考えられる。最低限の腕の使い方を学習した上で向上を図る学習を行う場合には、部分判定システムよりも全身判定システムが距離計測において高い学習効果を上げることが予想される。

動画観察による学習を行った群では計測結果としては向上が見られなかった一方で、主観評価においては能力が向上したと思ったという結果が得られた。これは動作を観察することで自身の能力が向上したと感じたが、計測で結果を出すことが出来なかつたと判断できる。能力向上には客観視点から観察した動作を自身の身体で再現するために視点の違いを変換する過程が必要であり、今回は学習後即座に動作を行ったため感覚のすりあわせができなかつたものと考えられる。アンケートの自由記述においても学習時間が少ないという意見があつた。

局所に着目して学習を行う方法であるほど効果が高かつたことから、初心者に対して短い時間で効果の得られる学習を行うためには矯正を行う部位を局所に集中させすることが必要であると推察された。しかしアンケートの結果全身の把握や下半身の把握では動画による客観視点からの観察が有効であると考えられ、自由記述においても主観視点に客観視点を交えて学習したいとの意見が見られたため、状況に応じて客観視点を利用することが望ましいと思われる。

4.3.5 まとめ

本実験では第3章で得られた知見を踏まえ、利き腕と逆の腕を使ってボールを投球する動作を学習するシステムを2通り構築し、動画観察による学習を合わせた3群の比較を学習前後の投球距離、投球精度を計測することで行った。その結果、本システムによる身体運動に同期した教示モデルを主観視点から観察・模倣するシステムの有効性が示唆された。

また、内訳としては部分判定システムが最も高い学習効果をあげ、初期段階の学習としては注目部位を限定して集中的に学習する方式が有効であることが示された。これは、初心者には学習した全身姿勢を協調動作に反映させることが難しいためと考えられる。動作よって注目する部位を適切に選択すること、また習熟度に応じて注目する部位の絞り方を変化させることが重要と考えられる。

アンケートの結果などから学習者の状況によっては客観視点による情報呈示が有効であることも示唆され、習熟度に応じて本システムに客観視点の要素を加えて統合することによってより学習効果の高いシステムが構築される可能性も示された。

第5章

結論

5.1 結論

初心者の身体動作獲得における課題として，“熟練者の動作を自分の動作に置き換えて模倣することが困難である。”というものがあるが、これに対してバーチャルリアリティの技術により熟練者と自身の動作を主観視点から比較観察するシステムを用いることで動作を置換するプロセスを省略し、熟練者動作の正確な模倣を容易にすることが可能と考えられる。しかし主観視点から熟練者動作の観察を行う上では動作を俯瞰することが困難であるため、模倣対象モデルが動作全体のうちどの段階の動きを行っていてどういった姿勢を取っているのかを把握しにくいという問題がある。本研究では模倣対象として熟練者の身体動作データをリターゲットした3D教示モデルを用意し、その教示モデルの姿勢を学習者自身の姿勢に応じておおまかに同期させる仕組みを採用することによって、この問題を解決した主観視点からの学習システムを構築し、効率的な身体動作学習が可能であるか評価実験を行った。

まず一般的な全身運動の例として野球の投球動作を題材にプロトタイプシステムの構築を行った。バーチャル空間の教示モデルの動作を学習者の腕部の姿勢に応じて制御する身体運動同期システムを実装した。学習者が教示モデルの主観視点から教示モデルを観察・模倣するシステムを構築し、身体運動に同期させることで全身運動を主観視点から効率よく把握可能であるかをデモ試用の場で検証した。結果として身体運動同期により主観視点からの観察を効率的にするというコンセプトが有効である可能性が確認されたため、フィードバックを元に細かな改善と新たな実装を行った。

プロトタイプシステムの腕部による身体運動同期のシステムに加えて、全身10箇所の姿勢を基に身体運動同期を行うシステムと両肩の角度を基に身体運動同期を行うシステムを実装した。全身10箇所の姿勢に注目するシステムを全身判定システム、肩に注目するシステムと腕部に注目するシステムを合わせて部分判定システムとし、この2方式に学習上でどのような差異があるか、また従来の動画観察による学習に対して効果的であるかを実験によって検証した。

実験は初心者の身体動作学習効果を検証するために利き腕でない腕による投球動作を扱った。システムもしくは動画観察による学習の前後で投球距離と投球精度を計測し、アンケートと合わせて学習効果を検証した。実験の結果、3群の中で部分

判定システムのみ投球距離と投球精度の双方において有意水準 5%で有意な学習効果が得られた。身体運動同期による観察・模倣学習システムとしては、初心者に関しては全身運動であっても着目する部位をある程度絞って学習する方式が特に有効だと示唆された。

5.2 今後の展望

5.2.1 改善されるべき点

ハードウェア面の向上

評価実験での自由回答から、ハードウェアの性能が向上することでより使いやすく学習効果の大きいシステムになるのではないかとの意見が得られた。ディスプレイの視野角がより大きくなり、映像がより高精細になること、学習者姿勢を取得するシステムの精度が向上すること、コードの配線など身体的な制約を軽減することで身体を動かしやすくなる等の改善点が考えられる。

パラメータの調整

今回のシステムでは熟練者の投球動作を 17 の区間に分割し、学習者の姿勢に対応して 3D モデルの動作を選択した。しかし、アンケートの自由記述においても動きをもっと滑らかにしてほしいという意見が得られた。よって 17 区間の分割はおおまかな動作の姿勢を把握するためには十分であるが、各姿勢を滑らかに連結させて速さのある一連動作へと昇華させるためにはやや分割が粗いと言える。細かい分割にすればするほどパラメータの調整が難しくなるが、システムの使用感が良くなる可能性は高い。

学習者自身の動作比較

本研究では学習者が自身の姿勢と熟練者の姿勢を比較することで動作を獲得するシステムを構築したが、学習者の動作を記録・編集することで熟練者の動作ではなく学習者本人の過去の動作と重畠比較を行うシステムが構築可能と考えられる。基本的に比較対象としては理想的な動作を用いて学習を行うことが望ましいが、好調

時の動作や不調時の動作を保存、確認が可能となるためスランプからの脱却等には役立つと思われる。

5.2.2 将来の展望

フィードフォワード制御への移行

本研究では学習動作の基本を把握していない初心者を対象として学習者と熟練者姿勢の差分を視覚的なフィードバックで与えるシステムを構築した。しかし、フィードフォワード制御の段階に到達した学習者に対しては時間遅れがあるためにリアルタイムで差分を修正するシステムは適切でない。学習者の動作と熟練者の動作をそれぞれデータとして記録したものを比較し、小脳内の内部モデルを修正するためのフィードバックを与えるシステムとする必要がある。フィードフォワード制御の運動中は視覚よりも深部感覚に頼る割合が大きくなるため、本システムが提案するリアルタイムな視覚的差分修正は有効性に乏しいことが予想される。しかし、学習者と熟練者の動作を記録し、その差分比較を主観視点から観察することで内部モデル修正作業を効率的に行える可能性がある。内部モデルの修正によりフィードフォワード制御の運動にも適用可能となり、将来的には習熟度に応じてリアルタイム学習とノンリアルタイム学習を自在に切り替えるシステムを構築することで学習者を問わず高い効果を上げることが可能と期待される。フィードバック制御とフィードフォワード制御の双方に対応可能な学習システムの前例はほとんどない。例えば野球の学習システムとして、少年野球を始めようという子供の学習からプロ野球の一流選手の学習までを包括的にサポート可能なシステムを構築したい。

注目部位の自動決定

本研究では教示モデルを学習者の身体運動に同期させる際の注目部位はあらかじめ決定してシステムを構築した。今後の展望としては、学習者の動作を一度システムに取り込み分析することで各人に最適な学習方式を自動的に決定するシステムの構築が考えられる。学習者の身体能力や最終的に目標とする習熟レベルによって最適な学習方法には個人差があるため、システム側で自動的に注目する部位や閾値のパラメータ等を決定するシステムは非常に効果的と思われる。

その他の身体動作への適用

本研究では一般的な全身運動として野球における投球動作を取り扱った。その他応用可能な身体動作の例としては、その他のスポーツやダンスなどが考えられる。また、全身運動を伴う伝統技能の伝承や日常生活における姿勢、振る舞いの学習などへの適用も可能と考えられる。

また、現段階では四肢体幹のおおまかな動きにしか対応していないが、教示データの記録と学習者姿勢のリアルタイム計測の精度が向上することでより細かな動作に拡張したい。野球の投球動作における変化球の投げ方の学習や、各種ラケット競技における手首の使い方の学習等に有効なシステムを構築可能と考えられる。

謝辞

本論文は筆者が東京大学工学部機械情報工学科に在学中、東京大学大学院情報理工学系研究科 廣瀬・谷川研究室で行なった研究をまとめたものです。

先生方には、日頃の指導や研究会でのアドバイスを通じて研究方針や具体的な方針まで、非常に的確な御指導を頂きました。

教授の廣瀬通孝先生には、研究会やプロジェクトのミーティングの場で幾度となく的確な指摘を頂きました。卒業論文に留まらないその先を見据えた助言の数々はとても素晴らしい指針となりました。自分以外の4年生に対するお話からも得るものが非常に多く、研究の進め方について多くを学ばせていただきました。

講師の谷川智洋先生には、お忙しい中研究をする上での考え方などを教えていただきました。研究会の場でも廣瀬先生とはまた違った切り口の指摘を頂くことができて非常に参考になりました。また、3年生向けのゼミをお手伝いさせていただいたことは貴重な経験となりました。

助教の鳴海拓志先生には、研究の姿勢を教えていただいたように思います。非常に多くの仕事を抱えながらも学生一人一人の話を親身に聞いてくださり、研究を進める上で多大なサポートをいただきました。どこかで実験の結果さえ出ればいいと思っていたところもあった自分がいますが、鳴海先生には研究の中で本質的なものを明らかにするという観点から助言を頂き、大きな刺激となりました。研究方針の相談や論文の校正にも多大なご助力をいただき、何とか研究を進めることができました。

特任講師の檜山敦さんには、研究室のプロジェクトにおいて特にお世話になりました。毎週のミーティングで相談に乗っていただき、研究の方向性の決定からシステム実装上のアイデアまで最初から最後まで大変お世話になりました。檜山さんの徹底して研究の質を高めようとする姿勢に触れて自分も気が引き締まりました。檜山さんの豊富な知識と鋭い指摘には驚かされることが多く、自分も檜山さんのように物事を見られるよう精進したいと思います。

特任助教の三浦貴大さんには、檜山さんと同様に研究室のプロジェクトにおいて特にお世話になりました。研究室にいらっしゃる時間が長く、困ったときにすぐに相談に乗っていただけたのでいろいろな場面で助けていただきました。お聞きした内容に対して的確な答えをすぐに返していただけるその理解力の高さと新たなアイデアをすぐに下さる発想力の豊かさにはいつも圧倒されます。三浦さん自身多くの仕事を抱えながらも手厚く指導していただき本当にありがとうございました。

技官の中垣好之さん、秘書の勝村富貴さん、英育子さんには、研究に専念できる環境作りに関して、大変お世話になりました。

博士課程の櫻井翔さん、徳田雄嵩さん、仲野潤一さん、竹内俊貴さん、伴祐樹さんには非常にお世話になりました。櫻井さんにはご自身が博士論文の執筆で非常に多忙な身でありながら4年生をよく気にかけていただきました。僕個人としても研究内容を相談させていただき、また研究発表に必要な挿絵を描いていただけたことは大きな力となりました。徳田さんには研究室のプロジェクトで特にお世話になりました。非常に知識の幅が広く、僕の研究に関連がありそうな研究内容を何度も教えてくださいました。徳田さん自身のアイデアも非常に機知に富んだものが多く、研究を進める上で大きな助けとなりました。仲野さんには何かエネルギーをいただいているところがあるように思います。研究室にいらっしゃることは少ないものの、その存在感とエネルギーには強烈なものがあり、猛烈な勢いで作業を進める姿は自分にもやる気を与えてくれました。竹内さんの冷静に的確な意見をおっしゃる姿はとても頼もしいものでした。騒がしく人に迷惑をかけがちな自分としては竹内さんの落ち着いた振る舞いを見習いたいと常々思っていました。研究自体についての相談をさせていただくことはあまりありませんでしたが、晩御飯にご一緒させていただいたりといろいろ面倒を見ていただき感謝しております。伴さんはいつも夜遅くまで研究室にいらっしゃり、新米で研究室に不慣れなところを何度もサポートしていただきました。その研究への集中力の高さにはいつも驚かされ、またご自身が忙しい中でも快く相談に乗ってくださるその姿は頼もしく自分もそのようになりたいと思いました。

修士課程2年の井村純さん、村上和也さん、池田周一郎さん、宇塚貴紀さん、大原寛司さん、諏訪恭平さん、永井佑樹さん、藤井達也さん、吉田成朗さん、には非常にお世話になりました。井村さんには非常に様々なことを教わったように思います。研究内容としては井村さんの下についていたわけではない自分ですが、事ある毎に的確な助言をいただきました。その能力の高さと面倒見の良さには僕だけでなく多くの学生が助けられているように思います。宇塚さんには4年生全体を目にかけていただいたように思います。ご自身もお忙しい中で4年生を優先して考えてくださることも多く、未熟な身としては本当に感謝しております。大原さんには研究に必要な機材のセッティング等に関してご指導いただきました。研究室の展示の手

伝いに出向いた際に、いろいろと気にかけていただいてありがとうございました。諏訪さんには研究に関してお話をさせていただいたことはほとんどありませんでしたが、修士論文がある中でも4年生の様子を気にかけていただきました。自分で精一杯であった身としては、諏訪さんのように周りに配慮できる余裕を持ちたいと思いました。永井さんには学生の中で最もよく研究の相談をさせていただいたように思います。同じプロジェクトに所属し、毎週の定例ミーティングにおいて学年が2つしか違わないとは到底思えないような能力の高さで的確な指摘をくださいました。中間試験では実装面で助けていただき、卒業論文の題目決めの際などには檜山さん、三浦さんと一緒に親身になって案を考えてくれました。ご自身が修士論文で忙しい中でも4年生の面倒を本当によく見ていただき、研究外でも気軽に話しかけていただきました。永井さんのご助力なしではこの論文は完成しなかったと思います。本当にありがとうございました。池田さんにも同じプロジェクトのメンバーとして度々目をかけていただきました。研究でアイデアをいただいたのはもちろんですが、池田さんには何度も美味しいご飯に連れて行っていただきました。2つ上の先輩ではありますが気さくに話していただき、プロジェクト内で肩の力を抜くことができたように思います。藤井さんのいつも朝早くから研究室にいらっしゃり黙々と研究を進めている姿は常々見習いたいと思っていました。一定の生活リズムを厳格に守るその姿勢は誰にでもできるものではなく、その意思の強さには驚かされます。わからないことがあっても藤井さんに聞くことができる、という安心感は4年生の誰もがもっていたのではないかと思います。日常的にトレーニングをされており、その深い知識はとてもためになるものでした。自分もしっかりとルーティンを守ってトレーニングを進めるように心がけたいと思います。吉田さんには卒論の相談グループでお世話になりました。吉田さんと話して質問に答えているうちに段々と自分の中でも研究のポイントが固まってきたところもあったように思います。いつも研究室にいらっしゃり、卒論提出が迫った時期には4年生の様子もよく気にかけていただきました。ご自身も修論で忙しい中で卒論を見ていただき、ありがとうございました。

修士課程1年の泉雅彦さん、国分新さん、鈴木瑛二さん、対間祐毅さん、中里直人さん、寺下翔太さん、白石英明さん、田崎亮平さんには非常にお世話になりました。泉さんは同じプロジェクトのメンバーとして普段から様々な面でお世話になり

ました。研究内容についても研究とは関係ない話についてもお話をさせていただくことがとても多く、泉さんから学んだことは数え切れないと思います。担当ではないにも関わらず論文の相談にも乗っていただき本当にありがとうございました。とても多くの仕事を抱えつつも全てを迅速にこなすその姿は見習いたいと常々思っています。国分さんには論文について非常に細かく見ていただきました。中間試問で校正を担当していただき、また卒論相談グループでも担当していただいたため年間を通して本当にお世話になりました。ご自身が忙しいときでも手を止めて相談に乗ってくださいり、4年生の誰もが国分さんを頼りにしていたように思います。普段からで遅くまで研究室で作業をしておられ、自分もその勤勉さを倣うように心がけることで何とか研究を進めることができたように思います。鈴木さんには直接研究内容についての指導をいただいたことはあまりありませんでしたが、対間さん経由でいただいたプログラムを中間試問の時期に参考にさせていただきました。他の4年生を熱心に指導しておられる姿を見て自分もしっかりしなくてはならないと気が引き締まりました。対間さんはUnity3Dを使ったゼミと一緒に担当させていただきました。対間さんが仕切ってくださったおかげでゼミが円滑に進んだように思います。また、HMDの改造に一緒に取り組ませていただいたりUnity周りの意見交換をさせていただいたり研究に関わる部分でもお世話になりました。自分も対間さんのようにいつも的確な意見を言えるようになりたいと思います。中里さんにも様々な面でお世話になりました。卒論については、相談グループで担当していただき論文に対して的確な指摘をくださいました。また卒論外の部分でも研究室のことを教えていただいたりご飯に連れて行っていただいたり、普段からよく面倒を見ていただきました。非常に頭の回転が速く、4年生の皆はもちろん上の学年の先輩方からもよく相談を持ちかけられている姿は頗もしく見えました。寺下さんはどこか飘々としたところがありながらも常々4年生のことを心配して下さいました。卒論提出が迫り気が滅入りがちな4年生に対して、気持ちが楽になるような言葉を何度もかけていただきました。寺下さんの作った卒論の進捗カウンタは正直嫌になった時期もありましたが、最終的にはかなり効果があったように思います。白石さんには卒論相談グループで担当していただき、非常にお世話になりました。朝早くから研究室にいらっしゃり研究を進めている姿には刺激を受けたように思います。実家の最寄りの駅が近いこともあって帰り道に何度もお話をさせていただき、様々なことを教えてい

ただきました。とても気さくな性格で、肩肘張らずに気軽に話をさせていただける先輩として大きな存在でした。田崎さんのものづくりの能力にはいつも驚かされました。制作展での展示物は大掛かりなもので大変そうでしたが、日夜作業に打ち込む姿は自分も見習いたいと思わされました。研究について話すことはあまりありませんでしたが、家の方向が同じで帰りにお話させていただくこともあり、様々なことを教えていただきました。

学部4年の有田祥馬君、猪俣航希君、岡田直弥君、菊野智矢君、佐藤潤一君、鈴木智絵さん、藤繩英佑君には論文の進行に関して互いに影響し合うことが出来て、とても感謝しています。有田君は行動力が4年生の中でも随一で、誰から提案が出るとすぐに企画をしてくれました。有田君のおかげで楽しい一年間が過ごせたように思います。また水泳部の部員として精力的に活動している中でも研究を上手くこなしており、並行して物事を進めるのが苦手な自分としてはいつも見習いたいと思っていました。部活を引退してからめっきり朝早く起きられなくなってしまった自分としては、彼にはずっと朝型生活を貫き通して欲しいと思います。猪俣君は情報系の知識が深く、自分の知らないことをいろいろと教えてくれました。先輩方も手放しに認めるプログラミング能力を誇っており、少しだけでもその能力を分けてもらいたいと思ったものです。岡田君は研究室にいち早く馴染み、先輩方と他の4年生の最初の橋渡しのような存在でした。今でも研究室のことで何か知りたい場合はまず彼に聞くと思います。一緒にご飯を吃ることが多く、またゲーム機と一緒に買ったりもしてとても楽しかったです。家が遠くてフットワークが重い自分の頼み事を引き受けてもらうことも多く、心の広いその振る舞いは自分も見習いたいと思います。非常に知識が豊富でいろいろと教えてもらうことも多く、今後も頼りにさせてもらえばと思います。菊野君は同じプロジェクトのメンバーとして一緒に行動することが特に多かったように思います。早くに研究内容を決めた自分とは異なり、彼は興味の幅が広く最後まで研究内容に悩んでいました。結果的に非常に難しい研究内容となりましたが、短い時間でもしっかり研究を進めるその集中力の高さには脱帽でした。自分の研究についても意見をくれたり手伝ってくれることも多く、非常に大きな助けとなりました。研究外でも一緒に行動することが多く、研究室生活の中で大きな存在だったように思います。佐藤君は4年生の中で一番の努力家だったように思います。早くに決めた研究内容をブレることなく最後まで進め、

非常に洗練されたものとなったように思います。自分よりも遅くまで研究室に残っているのに次の日に自分よりも早く来ていることが日常茶飯事で、その姿を見て頑張る力をもらったように思います。しっかり者でなおかつ博識であり、4年生の中でも頼れる存在でした。彼のサークルの合唱を聞きに行くことが出来なかったのは非常に残念でした。鈴木さんは4年生の紅一点ながらも、佐藤君に匹敵する努力家だったと思います。研究の進みが遅い4年生が多い中で計画的に予備実験、実験を進めており、しっかりと研究を進めている様子はいつも見習いたいと思っていました。研究室への順応度が高く、まるで何年も研究室にいるように夜遅くまで先生方や先輩方と話しており、そういった交流から研究のアイデアが生まれてきたのだろうと思います。研究分野である食を始めとして趣味を沢山もっており、いろいろなことを教えてもらえて楽しかったです。藤繩君はものを作る能力が非常に高く、面白いものを何度も見せてくれました。菊野君と同様に彼も研究内容を決めるのに苦戦していましたが、試行錯誤の中で次々に新しいものを作っていく姿勢には皆が感心していましたように思います。また、自分の意見をしっかり持って発言するところは自分も見習いたいと思っていました。彼ともご飯と一緒に食べることが多く、つらい時期を乗り越える上で大きな存在だったと思います。

その他にも被験者の方々や部活の仲間たち、家族などの多くの方々の支えがあって本論文を執筆することができました。

最後に、もう一度お世話になりました皆様に感謝して謝辞といたします。

2014年1月31日 小嶋 泰平

参考文献

- [1] 檜山敦, 土山裕介, 宮下真理子, 江渕栄貫, 関正純, 廣瀬通孝. 一人称視点からの多感覚追体験による伝統技能教示支援 (j 特集: 教育・訓練・協調). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 643–652, 2011.
- [2] 古市久子, 横山勝彦. 身体学習における『模倣』の構造-幼児教育と武道の技能獲得過程の類似点を通して. 1996.
- [3] 田渕一真, 谷口忠大, 槿木哲夫. 模倣学習と強化学習の調和による効率的行動獲得. In *The 20th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, pp. 212–215, 2005.
- [4] Paul M Fitts. Perceptual-motor skill learning. *Categories of human learning*, Vol. 47, pp. 381–391, 1964.
- [5] グロッサー・ノイマイヤー. 選手とコーチのためのスポーツ技術のトレーニング, 朝岡正雄・佐野淳・渡辺良夫訳, 1995.
- [6] 宮本直樹. 身振り教示に用いるための運動学習支援システムに関する研究. 2008.
- [7] Denis Ertelt, Steven Small, Ana Solodkin, Christian Dettmers, Adam McNamee, Ferdinand Binkofski, and Giovanni Buccino. Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *Neuroimage*, Vol. 36, pp. T164–T173, 2007.
- [8] 柴田庄一, 遠山仁美. 技能の習得過程と身体知の獲得. 2003.
- [9] 綿貫啓一, 小島一恭. 没入型仮想共有環境システムにおける熟練技能伝承用力覚および触覚呈示装置の開発. 埼玉大学紀要. 工学部, 第1編 (第一部 論文集), Vol. 38, pp. 159–164, 2005.
- [10] 山本孝, 森健一. 認知科学手法による熟練技能伝承方策に関する研究. 日本経営工学会論文誌, Vol. 53, No. 2, pp. 161–169, 2002.
- [11] Katsu Yamane, Yusuke Fujita, and Yoshihiko Nakamura. Estimation of physically and physiologically valid somatosensory information. In *Robotics and*

- Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pp. 2624–2630. IEEE, 2005.
- [12] Mihoko OTAKE, Katsu YAMANE, and Yoshihiko NAKAMURA. 裂縫斬り動作の体性感覚に基づく主観評価と運動計測に基づく客観評価.
- [13] 室伏重信, 齊藤昌久, 湯浅景元. ハンマー投げのバイオメカニクス的研究: 投射時におけるハンマー頭部の初速度・投射角・投射高が飛距離に及ぼす影響. 中京体育学研究, Vol. 23, No. 1, pp. 38–43, 1982.
- [14] VICON 三次元動作分析システム・モーションキャプチャ. http://www.irc-web.co.jp/vicon_web/.
- [15] 河上奏太, 小林佳介, 土井祐貴, 北村和, 滋野井圓, 川端茜, 森祥寛. Kinect センサーと hmd (ヘッドマウントディスプレイ) を用いた簡易モーションキャプチャ環境の開発及びバーチャルリアリティへの応用. 学長研究奨励費研究成果論文集, Vol. 9, 平成 24 年度, pp. 36–40, 2013.
- [16] 小田伸午. 身体運動における右と左: 筋出力における運動制御メカニズム. 京都大学学術出版会, 2001.
- [17] 大島浩幸, 山田憲政. 運動技術レベルと運動観察能力の関連. スポーツ心理学研究, No. 0, p. 1004190012, 2010.
- [18] 田中雅人. 運動表象の形成における認知的ずれ. 愛媛大学教育学部紀要, Vol. 41, No. 2, pp. 85–95, 1995.
- [19] 宮本謙三, 岡部孝生, 宮本秀晃, 宅間豊, 井上佳和, 上野真美. 運動学習過程における主観的運動理解の変容. 理学療法学, Vol. 29, No. 4, pp. 105–112, jun 2002.
- [20] JC Rothwell, MM Traub, BL Day, JA Obeso, PK Thomas, and CD Marsden. Manual motor performance in a deafferented man. *Brain*, Vol. 105, No. 3, pp. 515–542, 1982.

- [21] H Asanuma and C Pavlides. Neurobiological basis of motor learning in mammals. *Neuroreport: An International Journal for the Rapid Communication of Research in Neuroscience*, 1997.
- [22] Takashi Sakamoto, Kostadinka Arissian, and Hiroshi Asanuma. Functional role of the sensory cortex in learning motor skills in cats. *Brain research*, Vol. 503, No. 2, pp. 258–264, 1989.
- [23] 藤原勝夫. 運動・認知機能改善へのアプローチ: 子どもと高齢者の健康・体力・脳科学. 市村出版, 2008.
- [24] 道免和久. 運動学習とリハビリテーション (j 特集; 運動学習). バイオメカニズム学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 177–182, 2001.
- [25] 川人光男. 脳の計算理論. 1996.
- [26] Frederic J Kottke, Daniel Halpern, JK Easton, AT Ozel, and CA Burrill. The training of coordination. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Vol. 59, No. 12, pp. 567–572, 1978.
- [27] Mamoun Nawahdah and Tomoo Inoue. Motion adaptive orientation adjustment of a virtual teacher to support physical task learning. *Journal of Information Processing*, Vol. 20, No. 1, pp. 277–286, 2012.
- [28] Fraser Anderson, Tovi Grossman, Justin Matejka, and George Fitzmaurice. Youmove: enhancing movement training with an augmented reality mirror. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 311–320. ACM, 2013.
- [29] Kyle Rector, Cynthia L Bennett, and Julie A Kientz. Eyes-free yoga: an exergame using depth cameras for blind & low vision exercise. In *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, p. 12. ACM, 2013.

- [30] Ajay Kapur, George Tzanetakis, Naznin Virji-Babul, Ge Wang, and Perry R Cook. A framework for sonification of vicon motion capture data. In *Conference on Digital Audio Effects*, pp. 47–52, 2005.
- [31] Philo Tan Chua, Rebecca Crivella, Bo Daly, Ning Hu, Russ Schaaf, David Ventura, Todd Camill, Jessica Hodgins, and Randy Pausch. Training for physical tasks in virtual environments: Tai chi. In *Virtual Reality, 2003. Proceedings. IEEE*, pp. 87–94. IEEE, 2003.
- [32] Ungyeon Yang and Gerard Joung hyun Kim. Implementation and evaluation of “just follow me”: An immersive, vr-based, motion-training system. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 11, No. 3, pp. 304–323, 2002.
- [33] 西野友泰, 曾我真人, 瀧寛和. 熟練者と学習者の視点を統合するスキル動作提示手法の提案. 情報処理学会シンポジウム: インタラクション, 2011.
- [34] 本荘直樹, 伊坂忠夫, 満田隆, 川村貞夫. Hmd を用いたスポーツスキルの学習方法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp. 63–69, 2005.
- [35] 米村朋子, 橋本悠希, 近藤大祐, 丹羽真隆, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎. 視野共有システムを用いた心肺蘇生法の訓練効果 (特集: 教育・訓練・協調). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 623–632, 2011.
- [36] 鬼丸寛之, 檜山敦, 宮下真理子, 江渕栄貫, 関正純, 廣瀬通孝. 観察困難な高度技能を教示する複合現実型伝統技能継承支援の検討 (一般, 複合現実感, 仮想都市, 及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 111, No. 235, pp. 69–74, 2011.
- [37] 桜井伸二, 池上康男, 矢部京之助, 岡本敦, 豊島進太郎. 野球の投手の投動作の3次元動作解析. 体育學研究, Vol. 35, No. 2, pp. 143–156, 1990.
- [38] Tennis :: Hawk-Eye. <http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/page/sports-officiating/tennis>.

- [39] ZDK For Unity3D. <http://zigfu.com/en/zdk/unity3d/>.
- [40] 手塚一志. ピッチングの正体. ベースボール・マガジン社, 1998.
- [41] Kinect for Windows — Voice, Movement & Gesture Recognition Technology.
<http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>.

付録A

実験に利用したアンケート用紙

本実験について

本日は実験への協力ありがとうございます。只今より卒業論文「身体運動に同期した三次元教示モデルを用いた動作獲得システム」に関する被験者実験を行います。
途中で気分が悪くなった・身体が痛くなったということがあれば直ちに伝えるようにしてください。

実験概要

本実験は、スポーツ競技等における身体運動動作を初心者が学習する局面において効率的な学習成果をあげるために構築したシステムの有効性を検証するための実験です。
題材は野球における投球動作となります。初心者の学習を検証しやすくするため、また被験者間の経験差を少なくするために利き腕とは逆の腕を使った投球動作を対象とします。(右利きであれば左投げになります。)

実験手順

0. 実験前アンケートへの回答
1. 投球能力の測定,測定後アンケート
防球ネット目掛けて投球していただきます。距離計測と精度計測を行います。
2. 構築したシステムによる学習/動画を用いた観察学習
被験者の方々を振り分けます。
VRを利用した動作獲得システムによる運動学習/動画観察による運動学習 のどちらかで学習を行っていただきます。
3. 再度投球能力の測定
1. 同様の計測を行います.
4. 実験後アンケートへの回答
5. 終了

飛距離計測時の注意点

- ・利き腕と逆の腕で投げてください。
 - ・投げ始めから終わりまで線を踏み越えてはいけません。
 - ・天井に当たった場合一回まで投げ直しです、二回目以降は天井に当たった位置を飛距離の計測点とします。
 - ・横の範囲はネットの幅とします。届かなかった場合もネットの幅を基準として範囲内かどうか判定します。
- ※力を入れすぎるとかえって良くないのでリラックスして投げることをオススメします

命中精度計測時の注意点

- ・利き腕と逆の腕で投げてください。
 - ・的の中央を目掛けて投げてください。
 - ・天井に当たった場合一回まで投げ直しです。
 - ・的に届かなかった場合は飛距離で評価するので諦めずに投げてください。
 - ・的の中央からの距離を用いて評価します。
- ※力を入れすぎずにボールの描く放物線を意識して投げることをオススメします。

全てのアンケートについて回答及び個人情報はアンケート目的以外には使用しません。

実験前アンケート

お名前 _____

本格的な(半年間週に3日以上の頻度)野球経験があるか、ある場合はいつのことか
ない ある() (年齢あるいは学年)

投球動作について指導を受けたり訓練した経験があるか
ない ある

利き腕
右 左

利き腕と逆の腕でボールを投げる練習をしたことがあるか
ない ある

四肢の運動に問題のない健康状態か
問題ない 問題ある

初回計測後アンケート

お名前

思わない, 感じない 1 ⇔ 7 思う, 感じる

精度よく投げられたと思うか
1 2 3 4 5 6 7十分な距離を投げられたと思うか
1 2 3 4 5 6 7正しい投げ方ができていたと思うか
1 2 3 4 5 6 7

何が難しかったか(1つ以上2つまで, ○で囲む形で回答お願いします)

足の踏み出し方 腰の回し方 肩の回し方
肘の位置 手首の軌道 投げるタイミング

これから行う学習では上記六点を意識した学習を行っていただきます

実験後アンケート(提案システム利用者)

お名前 _____

思わない、感じない 1 ⇔ 7 思う、感じる

二回目の計測について

精度よく投げられたと思うか
1 2 3 4 5 6 7十分な距離を投げられたと思うか
1 2 3 4 5 6 7正しい投げ方ができていたと思うか
1 2 3 4 5 6 7

何が難しかったか(1つ以上2つまで、○で囲む形で回答お願ひします)

足の踏み出し方 腰の回し方 肩の回し方
肘の位置 手首の軌道 投げるタイミング

学習について

見本の投げ方の全体像を把握できたと思うか
1 2 3 4 5 6 7

下記の要素について見本の投げ方を把握できたと思うか

足の踏み出し方 1 2 3 4 5 6 7

腰の回し方 1 2 3 4 5 6 7

肩の回し方 1 2 3 4 5 6 7

肘の位置 1 2 3 4 5 6 7

手首の軌道 1 2 3 4 5 6 7

投げる瞬間 1 2 3 4 5 6 7

見本の投げ方を自分で模倣できるようになったと思うか
1 2 3 4 5 6 7模倣を試みることで実際の投球能力が向上したと思うか
1 2 3 4 5 6 7

提案システムについて

単に投球動作を録画した動画を観察するよりわかりやすい学習だと思うか
1 2 3 4 5 6 7仮想空間で自分の身体を動かしているように感じたか
1 2 3 4 5 6 7見本を自分の身体に重ねて見ることで見本と自分の姿勢を合わせやすいと感じたか
1 2 3 4 5 6 7見本が自分の姿勢に応じて動くことで見本と自分の姿勢を合わせやすいと感じたか
1 2 3 4 5 6 7身体のどの部分に注意して見本の模倣をすれば良いかわかりやすいと感じたか
1 2 3 4 5 6 7本システムの学習が能力向上に結びつくと思うか
1 2 3 4 5 6 7

本システムが効果をあげるための改善案があれば自由記述お願ひ致します

本システムをその他の用途に利用する案があれば自由記述お願ひ致します

実験後アンケート(観察学習利用者)

お名前 _____

思わない、感じない 1 ⇔ 7 思う、感じる

二回目の計測について

精度よく投げられたと思うか
1 2 3 4 5 6 7十分な距離を投げられたと思うか
1 2 3 4 5 6 7正しい投げ方ができていたと思うか
1 2 3 4 5 6 7

何が難しかったか(1つ以上2つまで、○で囲む形で回答お願いします)

足の踏み出し方 腰の回し方 肩の回し方
肘の位置 手首の軌道 投げるタイミング

学習について

見本の投げ方の全体像を把握できたと思うか
1 2 3 4 5 6 7

下記の要素について見本の投げ方を把握できたと思うか

足の踏み出し方 1 2 3 4 5 6 7

腰の回し方 1 2 3 4 5 6 7

肩の回し方 1 2 3 4 5 6 7

肘の位置 1 2 3 4 5 6 7

手首の軌道 1 2 3 4 5 6 7

投げる瞬間 1 2 3 4 5 6 7

見本の投げ方を自分で模倣できるようになったと思うか
1 2 3 4 5 6 7模倣を試みることで実際の投球能力が向上したと思うか
1 2 3 4 5 6 7

観察学習について

自分の身体をイメージして見本と比較することができたか
1 2 3 4 5 6 7見本と自分の身体の全体像を一致させるイメージをもつことができたか
1 2 3 4 5 6 7身体のどの部分に注意して見本の観察をすれば良いかわかりやすいと感じたか
1 2 3 4 5 6 7この形式の学習が能力向上に結びつくと思うか
1 2 3 4 5 6 7

以上

1p ∼ 86p 完

卒業論文

平成26年1月31日 提出

東京大学 工学部 機械情報工学科
120270 小嶋泰平