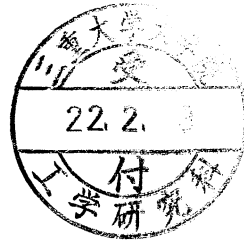


修士論文

頭部連携視点による  
身振り誘導情報表示システム



指導教員 野村 由司彦教授

平成 21 年度

三重大学大学院工学研究科 機械工学専攻

408M151 芳村友起

## 目次

第1章	はじめに.....	1
第2章	既存の動作教示システム.....	3
2.1	既存の動作教示システム.....	3
2.2	人体動作計測装置について.....	4
第3章	教示システムの開発.....	6
3.1	動作計測装置.....	6
3.2	教示情報表示装置.....	8
3.3	システムフロー.....	8
3.4	教示プログラム.....	9
3.4.1	開発環境.....	9
3.4.2	教示プログラムの各機能概要.....	9
3.4.3	3D 人体モデル.....	11
3.4.4	頭部連携視点.....	13
3.4.5	教示情報.....	15
第4章	静止姿勢の教示実験.....	17
4.1	評価実験と教示する姿勢の設定.....	17
4.2	頭部連携視点の教示に対する有効性の確認.....	18
4.3	実験結果と考察.....	19
4.4	教示情報の提示方法に関する評価実験.....	20
4.5	実験結果と考察.....	21
第5章	まとめ.....	22
参考文献	.....	23
謝辞	.....	24
付録	.....	25

# 第1章 はじめに

スポーツや踊りなどの高度な動作を行うには、身体各部位を動かすため多数の筋肉を同時にタイミング良く制御する必要がある。また、高度な動作の例としてはスポーツや踊り以外にも、字を書く時の運筆動作やお辞儀、ピアノといった楽器の演奏など、文化的な動作もある。このような高度な動作を個人で修得するためには、熟練者の動きを見本とし、それを真似しながら何度も何度も試行錯誤を繰り返すなど、多大な努力を重ねなければならない。また、そのような高度な動作だけでなく、“歩く”、“走る”、“投げる”など、誰もが行う基本的な動作であっても、すべての人が理想的な動作を修得しているとは限らない。これらの動作には“型”があり、その動作を理想的なものにするためにはこの“型”を修得することが重要である。

このように、理想的な動作の“型”を修得することは、様々な場面において有用であるが、当人だけでその“型”を修得することは困難である。そのため、一般的には、動作の習得にはインストラクターの“手取り足取り”による直接指導が有効であるといわれている[1]。つまり“インストラクターの目”によって生徒の動作の良し悪しを判断し、“インストラクターの手足や言葉”によって生徒の動作の矯正を行う学習法が有効であるということである。

しかし、インストラクターによる“手取り足取り”の指導は、常にインストラクターが傍に居なければ行うことができない。さらにインストラクターが実際に動作の見本を見せたり、口頭でポイントを伝えたりすることが一般的な指導方法であるが、その場合には、せいぜい手や足などの一箇所の動きをゆっくり伝えるのが精一杯であり、身体各部の動かし方を同時に教示することなどは困難である。

このような背景の下、筆者らは、インストラクターによる“手取り足取り”をロボットシステムにより再現し、スポーツのフォームや、文化的な身振り動作など、熟練者の理想的な動作を教示できる、直感的で理解しやすい体験型学習システム、すなわち「控えめに手取り足取りして、身振りの学習を支援するヒューマン・インターフェース」の開発を目的として研究を行ってきた[2]。

そのような研究の中で実現可能性の高いシステムとして、視覚的な情報によって教示を行うシステムがある。例えば、仮想空間内で目標となるCGモデルを追いかけるようにして学習を行うシステム[3][4]などが提案されているが、奥行き方向のずれの提示が困難なことや、教示の際にはどのような視点が適切かなど、三次元的な位置情報の最適な教示方法はまだ確立されていない。

そこで本研究では、モーションキャプチャ装置で計測された動作を、3D人体モデルを用いてヘッドマウントディスプレイ(以下HMD, Head Mounted Display)に立体視で表示し、そこに目標となる動作モデルや視覚的な教示情報を重ねて表示することで仮

想空間内において効率的に姿勢教示が行えるシステムを提案する。動作の計測には計測環境を選ばない慣性センサを用いたモーションキャプチャスーツ MVN (Xsens 社製) を使用し、目標となる動作モデルと現在の自分の動作モデルを HMD 上で重ねて表示させ、そこにリアルタイムに矢印等の教示情報を付加することにより、教示を行うシステムを開発した。

さらに教示の際の視点として、頭部の動きに連動して視点が動く視線の提示方法である頭部連携視点や、表示される教示情報として矢印やその表示条件など様々な手法を提案し、どのような情報をどのように提示すれば、動作の学習を効率的に支援することができるか、調査を行った。そして、実際に本システムを用いて静止した姿勢を教示する実験を行い、本論文で提案する頭部連携視点と矢印等による教示情報が静止姿勢の教示に対し有効であることを確認する。



## 第2章 既存の動作教示システム

### 2.1 既存の動作教示システム

仮想空間内で動作教示を行う既存の教示システムとしては、HMD 上で図 2.1 に示すような“ゴースト（メッシュ表示）”と呼ばれる目標動作モデルを追いかけながら学習を行うシステム[3]や、図 2.2 に示すような仮想空間内でゴルフスイングの学習を行うシステム[4]などが提案されている。しかし、前者では表示される目標をただ追いかけるだけであり、後者では各関節のずれを球体の大きさや色の変化で当該の各関節に重ねて提示しているものであった。このように、学習者の体を正しい姿勢に導くための適切な教示情報や、その提示方法はまだ確立されているとは言えない。

そこで本研究では、学習者がより効率的に姿勢を把握できるようにし、学習者を正しい姿勢に導くためには、どのような視点からの画像情報をどのような形で教示すれば効果的であるかについて検討を行う。

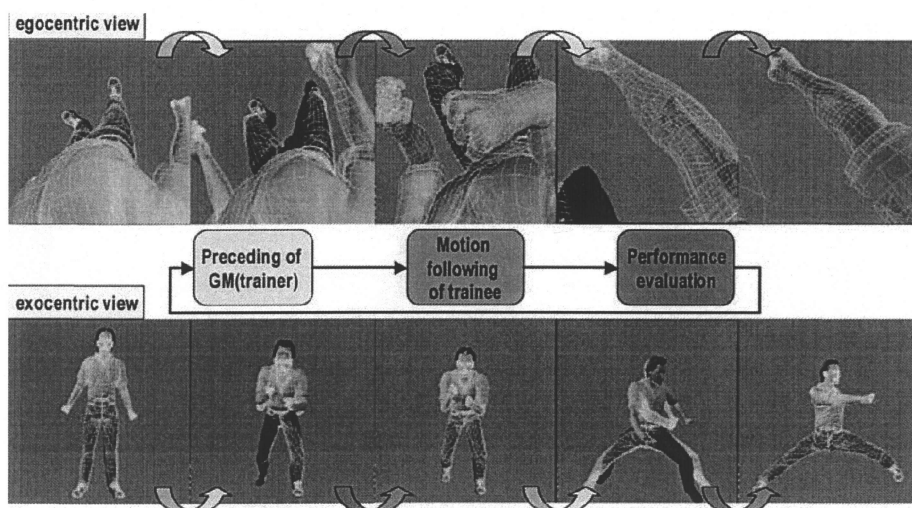


図 2.1 : “Just Follow Me” VR-Based Motion-Training System[3]

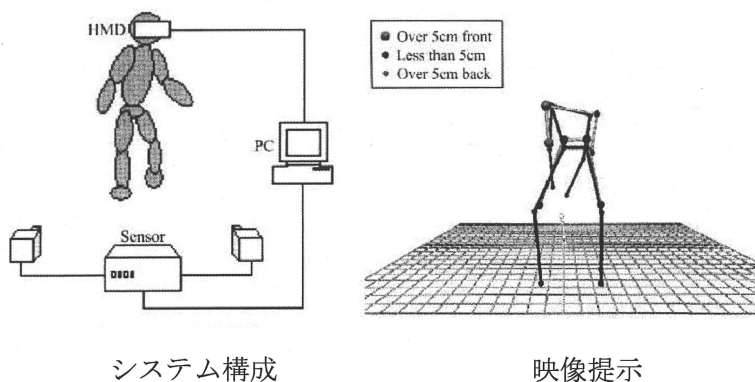


図 2.2 : HMD を用いたスポーツスキルの学習方法[4]

## 2.2 人体動作計測装置について

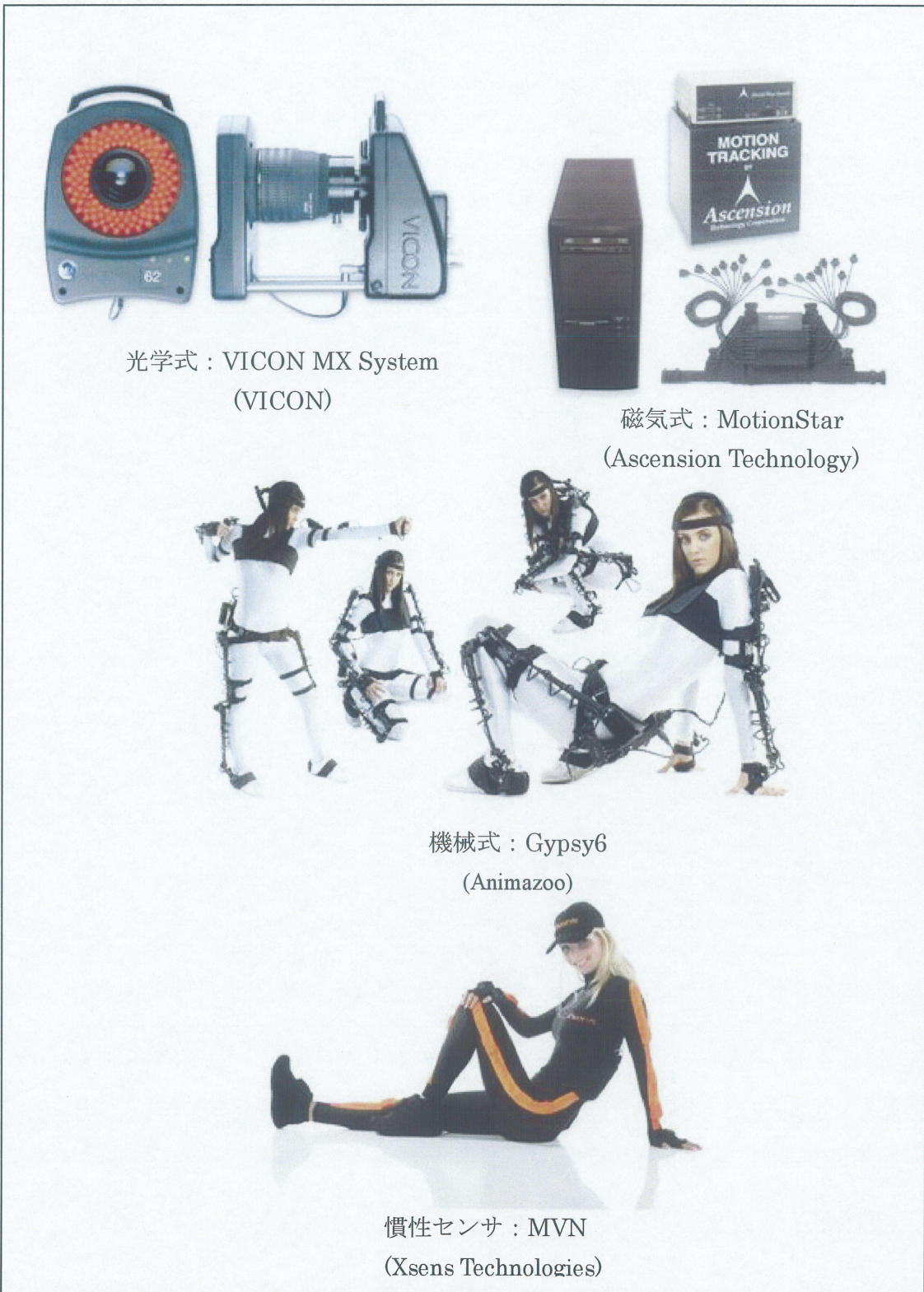
仮想空間内で教示を行うには、まず学習者や教示者の動作を計測する必要がある。そのために使用できる人体動作計測装置としては様々な方式が開発されている。それぞれの方式について表 2.1 にその特徴を簡単にまとめた。また、図 2.3 にそれぞれの外観を示す。

各方式にはそれぞれ長所と短所があるが、本研究では、教育用途での使用を想定しているため、様々な場所で使用することとなる。そのため、外部にカメラやトランスミッタといった装置が必要な光学式、磁気式のシステムは不向きである。したがって、外部に装置が不要で使用環境を選ばず、セッティングも簡単な慣性センサを使用した Xsens 社製 MVN モーションキャプチャスーツを用いた。

表 2.1 : 各方式の特徴比較

	動作計測装置	長所	短所	代表例
光学式	カメラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・精確な計測が可能</li> <li>・人体にはマーカを貼るだけなので、動作が制限されない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オクルージョンの発生</li> <li>・外部にカメラなどの大掛かりな装置が必要</li> <li>・計測場所、範囲に制限</li> </ul>	VICON MX System (VICON)
磁気式	磁気センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光学式とは違い、オクルージョンが生じない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・磁性体の近くでは計測精度が低下</li> <li>・磁場を発生させる装置が外部に必要.</li> <li>・計測範囲が狭い</li> </ul>	MotionStar (Ascension Technology)
機械式	ポテンシオメータ(外骨格)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計測環境を選ばない.</li> <li>・応答性が良い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外骨格の構造による動作範囲の制限</li> </ul>	Gypsy 6 (Animazoo)
	慣性センサ(加速度, ジャイロセンサ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計測環境を選ばない</li> <li>・小型かつ軽量</li> <li>・外部に装置が不要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・位置, 姿勢算出の計算が複雑</li> <li>・積分誤差</li> </ul>	MVN (Xsens Technologies)





光学式 : VICON MX System  
(VICON)

磁気式 : MotionStar  
(Ascension Technology)

機械式 : Gypsy6  
(Animazoo)

慣性センサ : MVN  
(Xsens Technologies)

図 2.3 : 既存の動作計測システム

## 第3章 教示システムの開発

### 3.1 動作計測装置

本研究では、学習者および目標となる動作の計測には Xsens 社製モーションキャプチャスーツ「MVN」を導入した。

これは図 3.1 に示すように、MTx と呼ばれる、3 軸加速度センサ、3 軸ジャイロセンサ、3D 地磁気センサを組み合わせることで 6 自由度の姿勢計測が可能な慣性センサを身体上に 17 個取り付け、その値から全身の動作を計測することができる。動作の計測、記録にはスーツ付属ソフトウェアの MVN Studio を使用し、計測されたデータはリアルタイムに今回開発した教示プログラムに送信される。

MVN Studio では人体を図 3.2 に示すような 23 個のセグメントに分かれた生体力学モデルをもち、センサの姿勢データとこの生体力学モデルの幾何学的な構造から装着者の全身の姿勢が推定される[6]。本研究でもこのモデルに基づいて 3D モデルを生成し、各セグメントの位置、角度情報などを利用して評価を行う。

この計測システムは、光学式や磁気式等、他のモーションキャプチャシステムに比べて、外部にカメラやトランスミッタなどの装置が不要であることや、動作環境に制限が少ないこと、セットアップが簡単で準備に 10 分程度しか時間がかからないことなどの特徴があり、本研究にとっても効果的な動作計測装置であるといえる。

以下に MTx と MVN の仕様とその外観を示す。

表 3.1 : MTx 仕様

3D 方位精度	0.5deg 未満
分解能	0.05deg
加速度幅	±1800m/s <sup>2</sup>
ジャイロスコープ幅	1200deg/s
寸法	38 x 53 x 21 mm

表 3.2 : MVN 仕様

MTx 慣性センサ	17 個
サンプルレート	最大 120Hz
スーツ全重量	1.930kg
バッテリー動作時間	3 時間



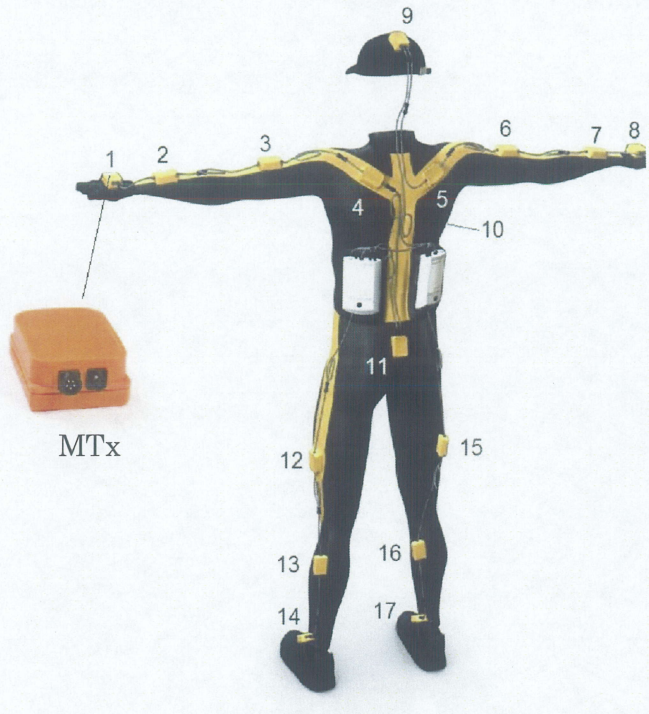


図 3.1 : MTx と MVN モーションキャプチャスーツ

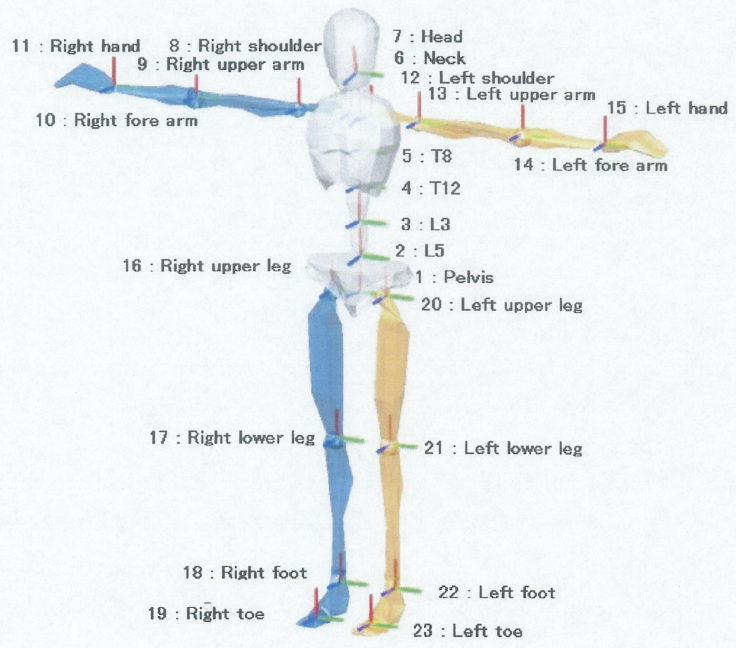


図 3.2 : 生体力学モデル



### 3.2 教示情報表示装置

学習者の現時点での動作（以下、現在動作とよぶ），および同じ時点での教示者のモデル動作（以下、目標動作という）の二つの動作の 3D モデルや教示情報を学習者に提示するためのデバイスとして VUZIX 社製のヘッドマウントディスプレイ「iWear VR920」を使用する．この HMD には左右の目で独立した 2 枚の液晶画面が搭載されており，左右それぞれに異なる映像を表示させることが可能である．そして nVidia 社製ステレオドライバによって左右の目の位置に合わせて少し視点のずれた映像をそれぞれの液晶画面に映し出すことによって立体視表示を行う．これにより奥行き方向の距離感が知覚しやすくなっており，平面のディスプレイ上の映像を見ながらの動作学習などに比べより直感的に姿勢を把握することが可能となることが期待される．



図 3.3 : iWear VR920

### 3.3 システムフロー

図 3.4 に本システムの処理の流れを示す．まず，MVN の各センサの値から学習者の動作が動作計測用 PC 上の MVN Studio によって計測される．そのデータは教示グラフィック作成用 PC へ UDP（User Datagram Protocol）通信で送信され，今回開発した教示プログラムによって HMD 上にリアルタイムに現在動作の 3D モデルが表示される．そこに目標となる動作モデルや，その姿勢に学習者を導くための様々な教示情報を付加して学習者に提示することで教示を行う．

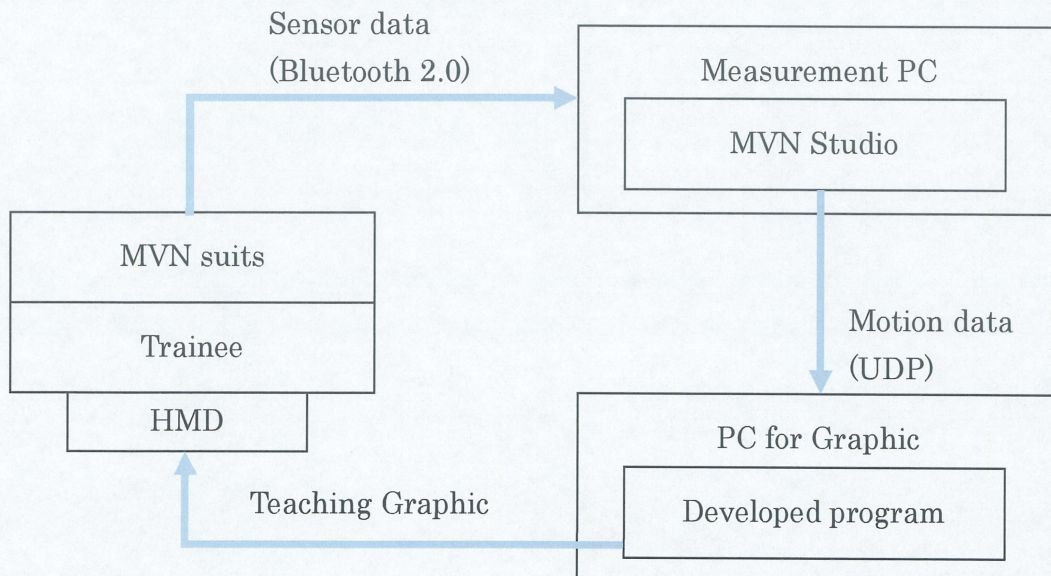


図 3.4 : システムフロー

### 3.4 教示プログラム

#### 3.4.1 開発環境

MVN Studio によって計測された動作データから教示のためのグラフィックを作成し、HMD を通して学習者に映像を提示して教示を行うためのプログラムを Microsoft Visual C# 2008 で作成した。表示されるグラフィックに関しては Managed Direct3D を使用し、高速な描画を実現している。

#### 3.4.2 教示プログラムの各機能概要

目標動作モデルと現在動作モデル、さらに様々な教示情報をリアルタイムに重ね合わせて HMD 上に立体視で表示させることが可能となっている。

目標となる姿勢、動作は MVN Studio によって記録されたモーションデータ MVNX ファイルを読み込むことで生成でき、記録されたデータのフレームレートに合わせ任意の速度で動作を再生することでこれを目標動作として使用することができる。

現在動作は、動作計測用 PC 上の MVN Studio によって計測されたリアルタイム動作データを MVN Studio のネットストリーミング機能を利用して取得する。これは UDP 通信で現在の装着者の動作データを動作教示用 PC へ送信し、その動作データを教示プログラムで受信して利用することで、ほぼ遅延無く HMD 上に現在動作を 3D モデルによって再現することができる。さらに受信したデータから現在の姿勢と目標となる姿勢との誤差をリアルタイムに計算し、その誤差データから教示情報を作成する。また、誤差データや教示結果などを記録し CSV ファイル形式で出力することもでき、教示実験後の結果の解析等に利用することができる。

また、視点の切り替え、モデルの表示/非表示切り替え、各教示情報、教示方法の切り替えなど、様々な設定は操作パネルにより動作中にも一括して行えるようになっている。

図 3.5 にプログラム操作パネルの外観を示す。



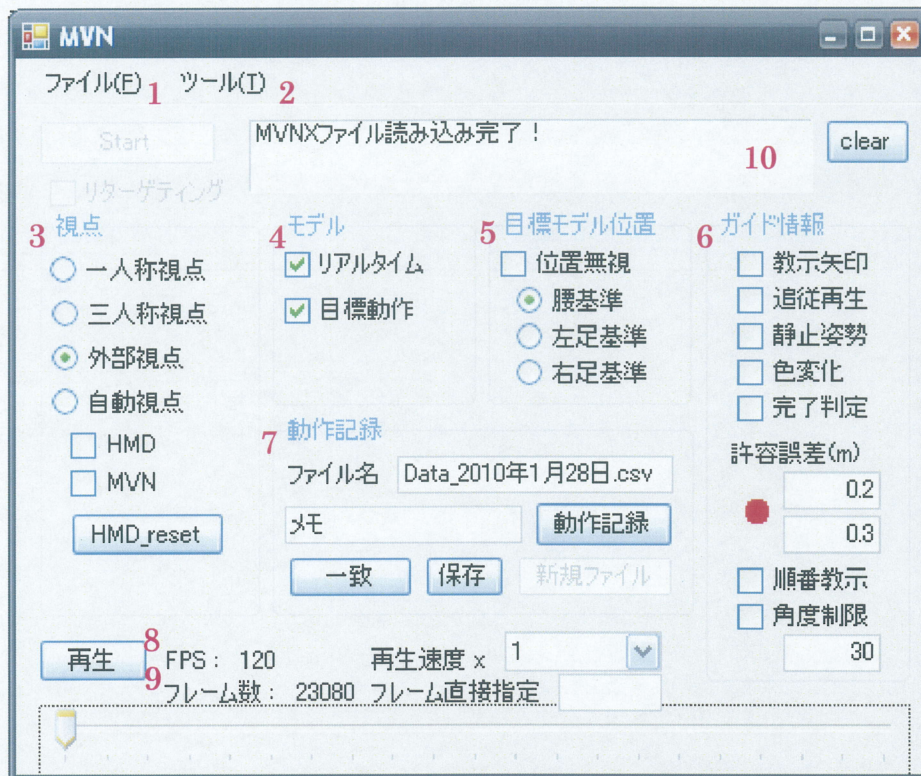


図 3.5 プログラム操作パネル外観

1. 目標動作用 MVNX ファイルを開く
2. 各種設定ツール
3. 視点の切り替え
4. モデルの表示/非表示切り替え
5. 目標モデル基準位置の切り替え
6. 教示情報の選択, 設定
7. データ記録操作部
8. 目標動作フレームレート
9. 総フレーム数
10. メッセージウインドウ



### 3.4.3 3D 人体モデル

目標となる姿勢や現在の学習者の姿勢は HMD 上に図 3.6 に示すような簡単な 3D 人体モデルで表示される。人体モデルに関しては、現実に近いリアルなモデルよりも単純なモデルの方が動作を把握しやすい場合もある[5]ということや、モデルの扱いやすさなどの観点から、このような単純なモデルを使用する。

また、目標動作モデルは青色，現在動作モデルは黄色とし，どちらも半透過色にすることで，重なる部分があっても，ある程度その位置を把握することができるようになっている。

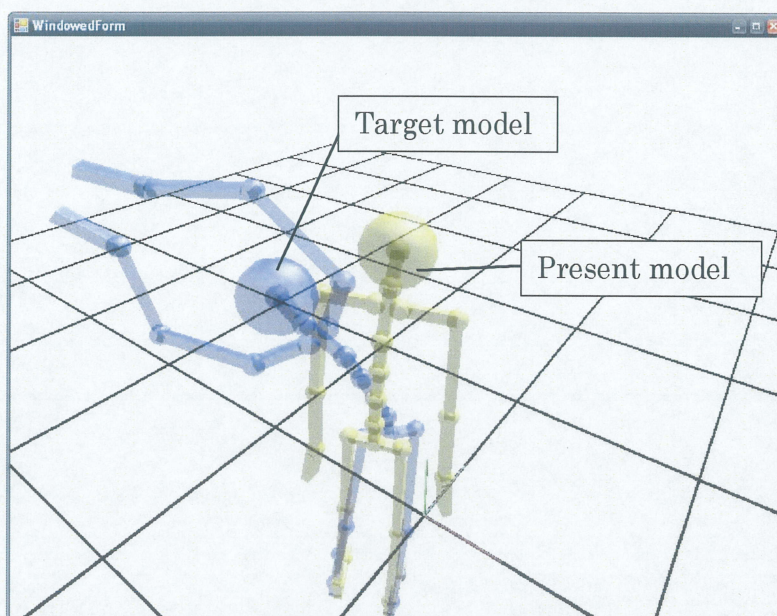
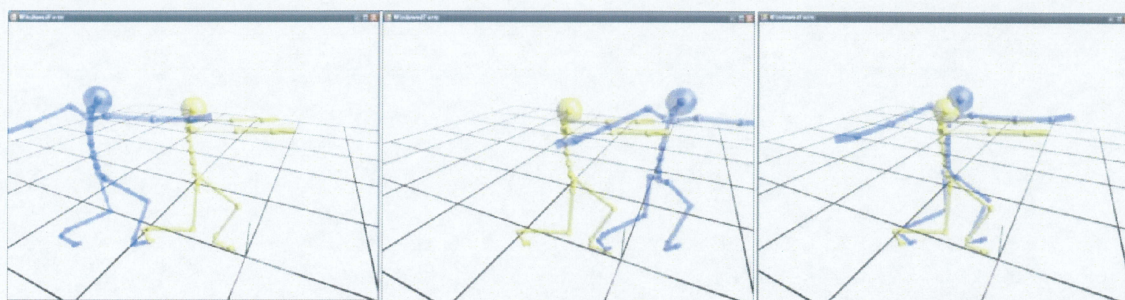


図 3.6 : 3D 人体モデル

現在動作モデルの各部位の寸法は MVNX ファイルに含まれる体型データから決定される。これは MVN スーツを学習者が装着した際，キャリブレーションを行うが，その時に入力した身長などの値から生成されたものであり，目標動作モデルも現在動作モデルと同じくこの体型データから生成される。そして目標動作，姿勢における各関節の角度のみをモデルに与えることで学習者の体型に合わせた目標動作，姿勢を再現する。ただし，単純に角度のみを与えた時，学習者と教示者とで各部位の長さが違う場合には正確に動作が再現されないという問題がある[8]。今回のシステムでは学習者と教示者でそれほど体型に差がないとし，この問題については考慮していない。



また、目標動作モデルを、その目標動作モデルが記録された際の絶対位置に表示した場合、学習者の位置がずれていれば、学習者も同じ位置へ移動しなければならないことになる。しかし、位置自体は重要でなく、姿勢のみが重要な場合には、絶対位置のずれを補償して、目標モデルを現在モデルと同じ位置に移動させて表示することで姿勢のみを教示することができる。その際に基準とする点は以下の図 3.7 に示すように右足、左足、腰のいずれかとし、常にその部位の水平面上の位置が一致するように目標動作モデルが表示される。



右足基準

左足基準

腰基準

図 3.7 : 目標動作モデル基準位置



### 3.4.4 頭部連携視点

教示の際の視点としては、図 3.8 に示すように、1 人称視点、可動性の高い 3 人称視点、可動性が低い固定的な外部視点などが選択できるようになっている。

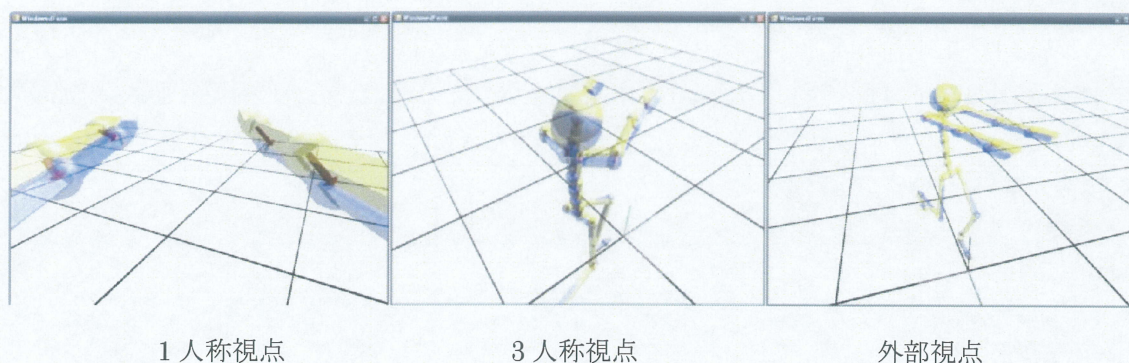


図 3.8 : 教示の際の視点

従来の教示システムにおける視点では、後方や側面からなどの外部に固定された外部視点や、現在動作モデルと目標動作モデルの頭の位置が一致している 1 人称視点のものが多く、しかし、外部から目標となる姿勢や現在の自分の姿勢全体を見下ろすような視点では、全体的な姿勢は把握しやすいが、手先などの細かい部分が見えにくいことがある。また、視線の向きが一致していないことにより、頭の中で目標姿勢との向きを交換して考えなければならず、姿勢の把握が困難な場合がある[7]。また、1 人称視点では実際に自分が見ているのと同じ視点であるため、手先、足先といった特定の部位の動きに関しては把握しやすいが、全体的な姿勢は把握しにくいことや、一般的に入手できる HMD では視野角が狭すぎるといった問題がある。

そこで、本研究では、従来の枠組みでは 3 人称視点と呼ばれるものであるが、特に頭の動きに合わせて頭を中心としてカメラが回るような視点を用いる。これにより、全体の姿勢を把握でき、かつ 1 人称視点と同じように、常に視線の方向が学習者と一致した視点を用いることができる。これを頭部連携視点と呼ぶ。これは、例えば図 3.9 に示すように(a)から(b)のように学習者が首を左に回すと、仮想空間上では(c)のようにカメラが動き、動いたカメラからの映像が HMD 上に表示される。この視点により学習者は自らが見たい方向から自身の動作モデルを見ることができ、その際に表示される映像は常に実際の視線の向きと一致しており直感的に自らの姿勢を把握することができる。



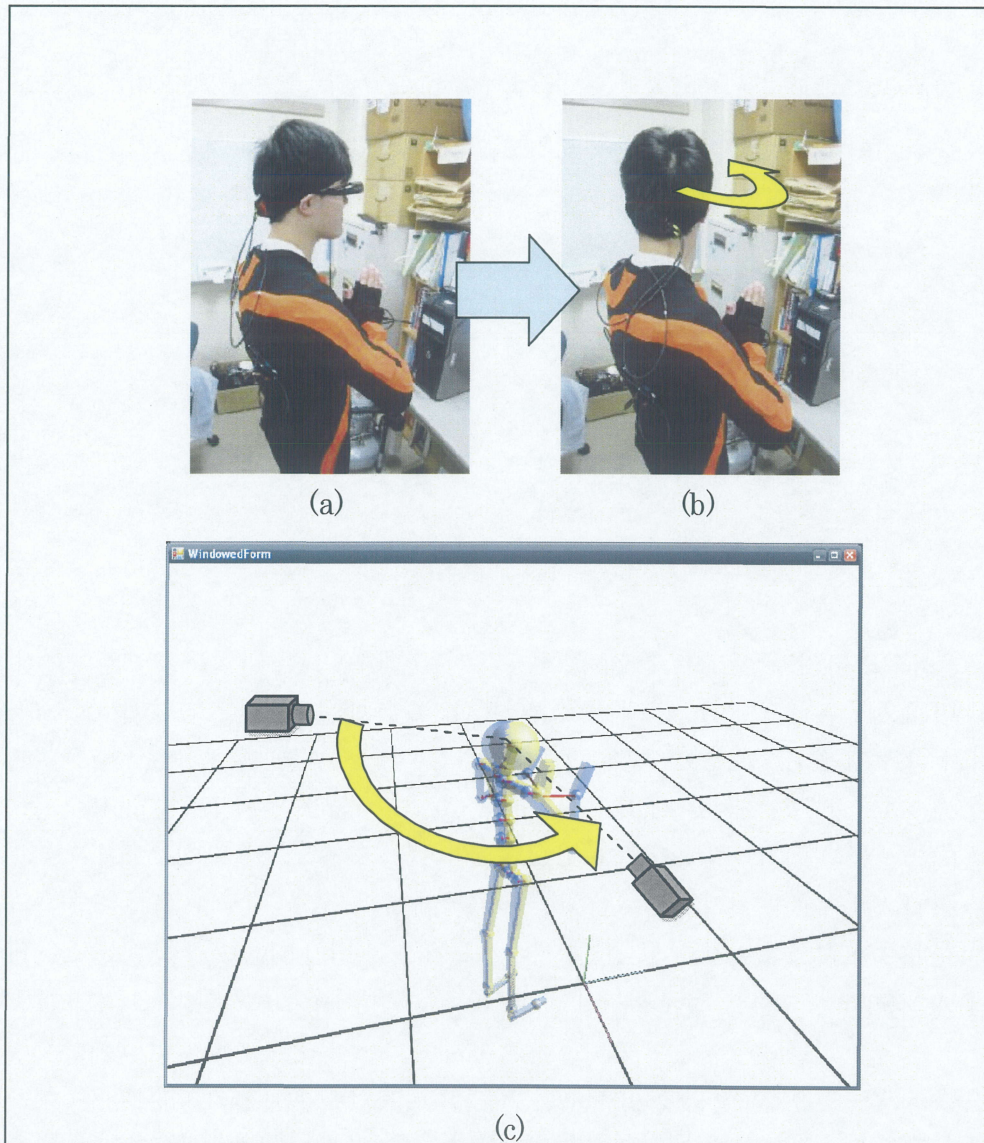


図 3.9 : 頭部連携視点におけるカメラの動き



### 3.4.5 教示情報

目標となる姿勢に近づくために各関節の位置をどのように動かせばいいかを示すために、教示情報として現在動作のモデルから目標動作の対応する各関節に向かって図 3.10 のように赤い矢印を表示する。

角度の提示には図 3.11(a)のように各関節を回転角度で表示する方法もあるが、人体の関節は肘や膝などを除き多くが球体関節であり、3 次元的な回転を画面上において回転角で提示することは困難である。そこで今回提案する教示矢印では図 3.11(b)に示すように、現在モデルと目標モデルの教示を行いたい関節の一つ先にある関節同士を結ぶように矢印を表示し、その位置を合わせるように動かすことで 3 次元的な姿勢を提示する。

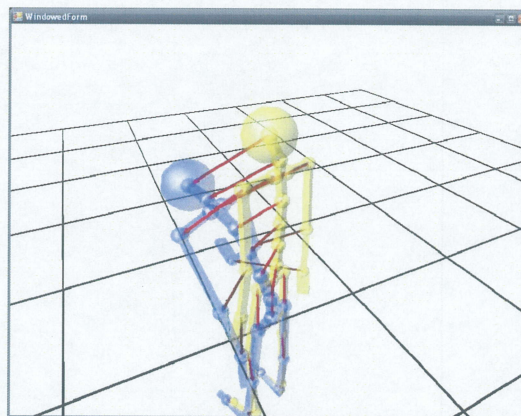
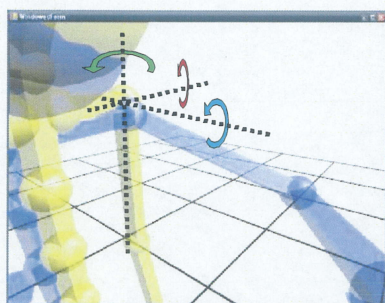
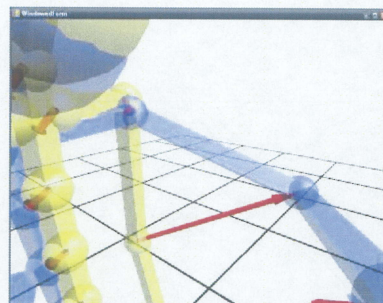


図 3.10 : 教示矢印



(a)回転角度による提示



(b)矢印による提示

図 3.11 : 関節角の提示方法

また、各関節の位置が目標姿勢と一致したことを示すため、目標モデルと現在モデルの対応する各関節位置の誤差が事前に設定した閾値以内になると図 3.12 に示すようにその関節部分の球体の色が黄から緑に変化する。

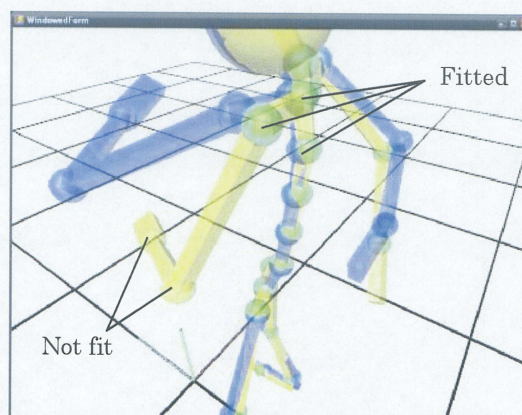


図 3.12 : 一致判定

ところで、図 3.10 から分かるように、すべての関節に対して教示矢印が表示されてしまうと非常に見にくくなってしまいう問題がある。そこで、以下のように矢印の表示数を制限する手法を 2 通り提案する。

- **角度制限**

これは教示する関節の角度のずれが設定した閾値より大きかった場合のみ、その関節に対応した矢印を表示する方法である。これにより動かす必要のない関節に対応する矢印は表示されなくなり、動かす必要のある関節をのみを動かすよう誘導できる。しかし、このままでは目標姿勢に近づくとつれ全ての矢印が表示されなくなってしまうため、各関節間位置の誤差が事前に設定した閾値以内になった場合はその関節に対応する矢印は表示するものとする。

- **順次教示**

これは足先から順に矢印を表示していく方法で、まずは足先のみ矢印が表示されており、矢印の表示されている関節の位置が一致すると、その親関節の矢印が表示されるようになる。これを繰り返して、足先から手先に向かって順に位置を合わせていくものである。これにより同時に多くの矢印が出現することを防ぐ方法ことができる。



## 第4章 静止姿勢の教示実験

### 4.1 評価実験と教示する姿勢の設定

前章までで説明したシステムを用い、実際にどのような教示情報をどのように提示することが最も効率よく姿勢を教示できるかを調べる。

今回、目標姿勢として教示する姿勢には、ヨガのポーズを参考として MVN スーツによって記録された全 24 種類の姿勢を用いる。これらはそれぞれ姿勢によって難易度がかわらないようにするため、あまりにも簡単すぎる姿勢は採用せず、ある程度、全身の各部位を動かさなければとれない姿勢とした。以下、図 4.1 に実際の実験風景を、図 4.2 に目標姿勢一覧を示す。

また、被験者は男子大学生 4 名。評価方法は目標姿勢を提示されてから、学習者が自身で「目標姿勢に到達した」と判断するまでの時間を計測する。そして、その姿勢のまま 2 秒間静止してもらい、2 秒間にわたる各関節の位置の目標姿勢からの誤差の平均値を求める。これらの目標姿勢に対する到達時間と位置のずれの平均値を評価値とする。

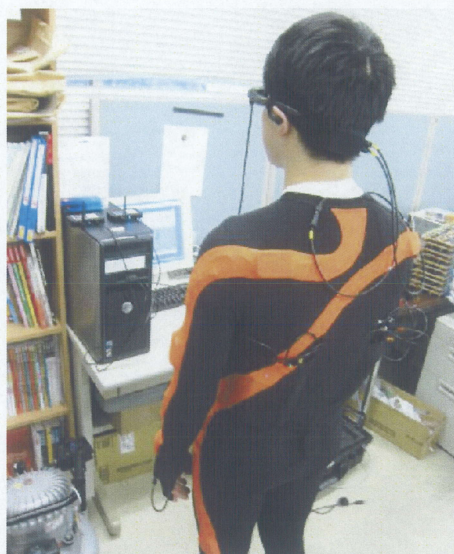


図 4.1：実験風景



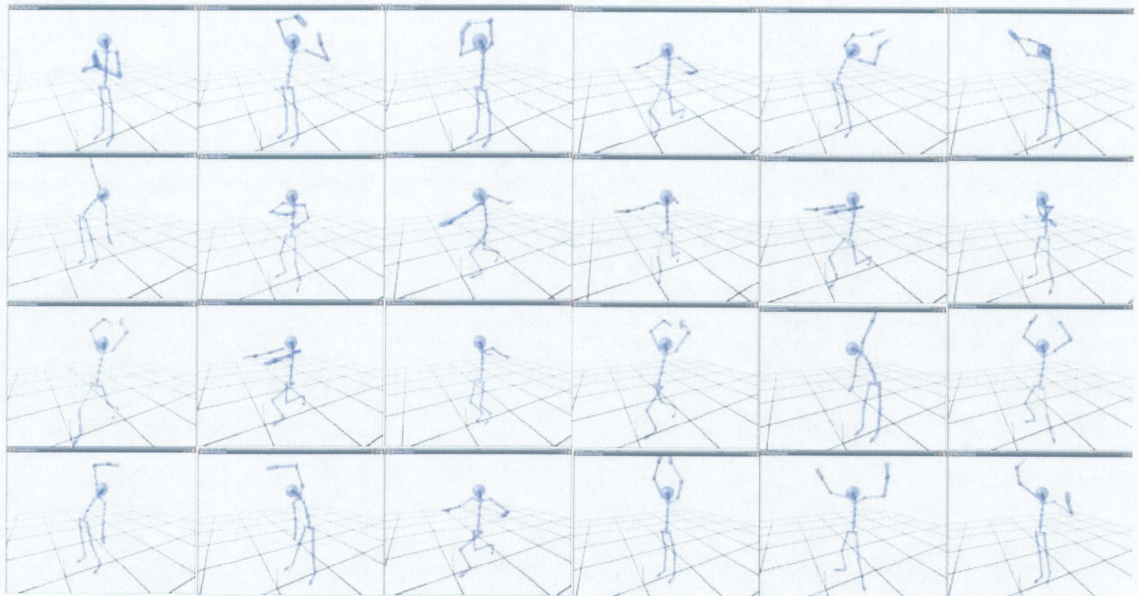


図 4.2 : 目標姿勢一覧

## 4.2 頭部連携視点の教示に対する有効性の確認

まず、仮想空間内において姿勢を教示する際に、今回提案する頭部連携視点の有効であることを確認するため、以下の3つの条件について静止姿勢を教示する実験を行った。  
実験条件

### 1. 液晶画面への表示

これは机などの上に置かれた固定画面上に表示された教示映像を見ながら学習を行う方法で、ビデオ映像などを使った一般的な学習方法である。

### 2. HMD 上での提示（視点の変化なし）

HMD 上に立体視で教示情報が表示される。ただし、視点は固定とし、表示される教示映像も条件1の場合と同じとする。

### 3. 頭部連携視点（提案手法）

2の条件に加え、頭の動きに合わせて視点が動く頭部連携視点を用いて教示映像を提示する。

試行回数は、それぞれの条件につき4回ずつとし、図4.2の目標姿勢群からランダムに選択して教示を行う。条件1, 2においては、表示される映像の視点は後方からの視点に固定し、1~3の全ての条件において表示される教示情報は目標モデルと現在モデルのみであり、矢印や関節位置の一致を示す色の変化などは一切表示されないものとする。



### 4.3 実験結果と考察

各実験条件において、各被験者が目標姿勢をとるまでにかかった時間とその時の各関節の誤差の平均値のグラフを図 4.3, 4.4 に示す。

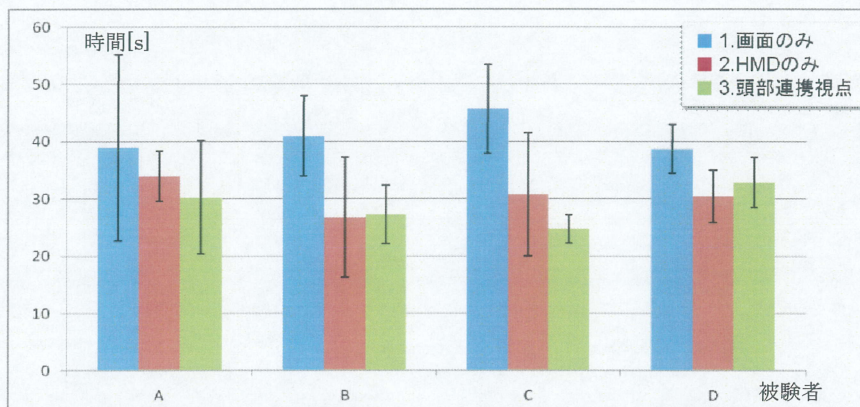


図 4.3 : 姿勢を取るまでにかかった時間

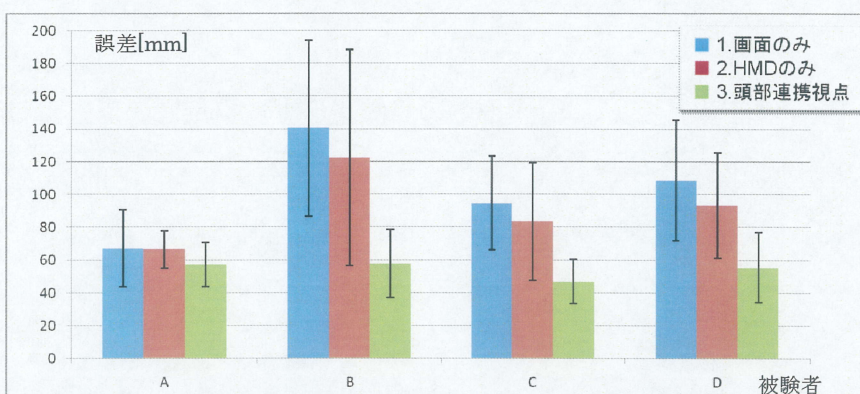


図 4.4 : 最終的な姿勢における各関節の誤差の平均値

図 4.3 より、目標姿勢を取るまでにかかった時間は、画面のみの場合に比べ HMD を使用した場合の方が早くなっていることが分かる。これは立体視による奥行き感の向上のためと考えられるが、HMD のみと頭部連携視点ではそれほど差がない結果となった。これは頭部連携視点では頭の動きで視線を操作しながら学習動作を行うため条件 1,2 に比べ余分に時間がかかるためであると考えられる。

しかし、最終的な姿勢における誤差については、すべての被験者で頭部連携視点が一番小さい結果となった。特に、被験者 1 以外では画面のみに比べほぼ半分の値となり固定視点では把握しにくい姿勢でも、頭の動きで角度を変えて自分の姿勢が見られることによって、より効果的に姿勢の学習が行えていることが分かる。以上により、特に位置決め精度の観点で、頭部連携視点は姿勢の教示に対し非常に有効であることが示された。

#### 4.4 教示情報の提示方法に関する評価実験

矢印による誘導は有効であると期待されるが、全関節について、矢印が一斉に表示されると、目標モデル、現在モデル、矢印の3つのオブジェクトが重なって表示され、非常に見にくくなるという問題がある。

そこで、本論文では、前章で説明した回転角度のズレの大きい関節に関する矢印だけを表示する「角度制限」と足先から順番に教示を行う「順次教示」の手法を用いることで、矢印の見やすさが姿勢の教示性能に影響するかを調べる。そのために、以下の3つの条件について静止姿勢を教示する実験を行い、提示された姿勢を取るまでにかかった時間と最終的な姿勢における目標姿勢との各関節の位置のずれの平均値を求め評価を行った。

試行回数はそれぞれの条件につき4回ずつとし、全ての条件において視点は頭部連携視点とし、目標モデル、現在モデル、教示情報や関節位置の一致を示す色の変化全てが表示される。

##### 実験条件

1. 全ての矢印を一度に表示
2. 角度制限
3. 順番教示



## 4.5 実験結果と考察

図 4.5, 4.6 に各被験者の各実験条件における姿勢をとるまでにかかった時間とその時の各関節の誤差の平均値のグラフを示す。

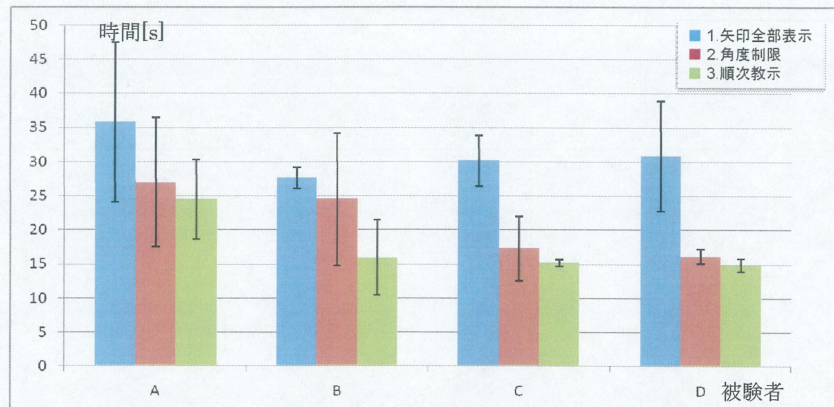


図 4.5：姿勢を取るまでにかかった時間

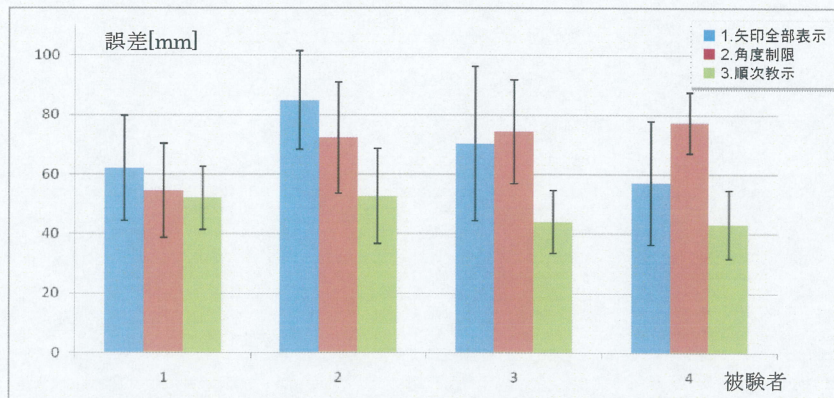


図 4.6：最終的な姿勢における各関節の誤差の平均値

図 4.5 より、矢印がすべて表示されている条件 1 に比べ、表示される矢印の数を制限した条件 2, および条件 3 は、より素早く目標姿勢をとれていることが分かる。また、最終的な姿勢における誤差については、それぞれの被験者において各条件で 1~2cm 程度しか、差のない結果となったが、これは最終的には全ての矢印が表示されているためであると考えられる。

しかし、誤差が大きい関節部が多く、大量の矢印が表示されるような状況では、動かす必要のある部位の矢印のみが表示されることで迷うことなく素早く目標姿勢を取ることができる結果となった。

以上の結果から、表示される矢印の数を減らすことで学習者の混乱を減らすことができ、姿勢をより効率的に教示できることが示された。

## 第5章 まとめ

本論文では、視覚的な情報に基づいて動作学習を支援するためのシステムとして、姿勢計測にモーションキャプチャスーツを、姿勢教示に HMD を利用するハードウェア構成の下で、仮想空間内で目標となる動作モデルと現在の動作モデルを重ね合わせて表示することで姿勢を教示する姿勢表示ソフトウェアを製作した。そして、その際の視点として、頭の動きに合わせて、頭を中心にしてカメラが動く頭部連携視点や、学習者の各部位を目標姿勢へ誘導するための矢印等の提示方法などを提案した。この頭部連携視点により、学習者が自分の見たい方向から自分の姿勢を見ることができるようになった。

そして、提案したシステムを用いて、実際に静止した姿勢を教示する実験を行った。その結果、固定された画面などによる従来の教示方法に比べ、今回提案した頭部連携視点が姿勢の教示に有効であることを示した。また、教示情報においても、ただ表示するだけではなく、状況に合わせて表示する情報を制限することで、学習者は提示された情報をよりの確に把握しやすくなり、姿勢を効率的に学習できることが示された。今後の課題としては、静止した姿勢だけではなく動的な動作の教示も行えるようにすることなどがあげられる。

## 参考文献

- [1] グレッサー, イノマイアー: 選手とコーチのためのスポーツ技術のトレーニング, 大修館書店, (1995)
- [2] 水谷友彦, 野村由司彦, 杉浦徳宏, 松井博和, 加藤典彦: 身振り動作教示に用いるための装着型動作計測システムの開発, 日本機械学会 IIP2007 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, pp. 177-180, (2007)
- [3] Ungeon Yang, Gerard Jounghyum Kim : “Implementation and Evaluation of “Just Follow Me”: an Immersive, VR-based, Motion-Training System”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments”, MIT, Vol.11, No.3, pp.304-323, 2002.
- [4] 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)
- [5] 宮西智久, 身体動作 3 次元 CG アニメーションを用いたスポーツ技術学習支援モデルの提案, 仙台大学紀要 Vol.36, No.2, pp1-10, 2005
- [6] Daniel Roetenberg, Henk Luinge, Per slycke : Moven Full 6DOF Human Motion Tracking Using Miniature Inertial Sensors, XSENS TECHNOLOGIES – Version December 10, 2007
- [7] Atsunobu Kimura, Tomohiro Kuroda, Yoshitsugu Manabe, Kunihiro Chihara : A study of display of visualization of motion instruction supporting, Educational technology research, Vol.30, pp.45-51, 2007
- [8] Seongmin Beak, Seungyoung Lee, Gerard Jounghyum Kim : Motion Evaluation for VR-based Motion Training, EUROGRAPHICS, Vol.20, No.3, 2001

## 謝辞

本研究の機会を与えてくださり、終始適切な御指導、御討論頂いた野村由司彦教授、および杉浦徳宏准教授、また学位論文の審査委員として御指導いただいた加藤典彦准教授、早川聡一郎准教授に深く感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、熱心に討論頂き、協力して下さった三重大学メカトロニクス研究室の皆様にご心よりお礼申し上げます。

# 付録

頭部連携視点の教示に対する有効性の確認

実験結果データ

完了時間[s]

被験者	画面のみ	HMDのみ	頭部連携視点
1	58.973	28.813	36.125
	13.813	40.781	37.578
	40.141	33.063	34.016
	42.782	33.11	13.297
2	32.734	27.781	19.672
	52.063	27.8981	27.125
	40.218	11.047	34.015
	38.703	40.578	28.172
3	59.14	31.266	22.765
	40.36	14.469	23.891
	41.563	32.796	23.375
	41.672	44.578	28.891
4	43.734	23.312	31.109
	39.312	29.812	26.485
	40	33.171	37.75
	32.015	35.547	36.078

最終誤差[mm]

被験者	画面のみ	HMDのみ	頭部連携視点
1	54.89	54.64	76.00
	40.09	65.19	59.57
	103.05	61.33	54.82
	70.48	85.02	38.55
2	70.52	216.44	51.53
	221.52	136.64	35.97
	138.15	33.34	51.46
	131.95	103.58	92.49
3	57.23	114.93	66.86
	133.66	38.30	43.95
	106.44	58.81	29.09
	81.10	122.17	47.67
4	81.91	89.13	26.14
	170.86	98.63	57.25
	81.64	47.91	53.74
	100.74	137.89	85.98



教示情報の提示方法に関する評価実験

実験結果データ

完了時間[s]

被験者	矢印全部	角度制限	順次教示
1	26.812	23.328	29.547
	27.75	22.532	17.625
	55.703	43.094	30.781
	32.828	19.097	19.953
2	28.422	11.469	12.359
	24.937	19.797	10.844
	28.187	36.969	24.828
	28.89	29.797	15.781
3	32.437	17.89	15.36
	24.922	9.562	14.328
	28.625	20.125	15.359
	34.516	21.625	15.765
4	30.906	15.828	13.422
	26.531	16.579	14.891
	43.813	14.672	15.969
	22.188	17.625	15.156

最終誤差[mm]

被験者	矢印全部	角度制限	順次教示
1	50.12	42.64	69.07
	46.44	44.50	51.37
	60.75	49.09	40.30
	91.15	81.45	47.42
2	97.29	98.49	56.28
	87.82	57.60	36.22
	56.85	81.01	41.24
	97.19	52.24	76.90
3	113.63	103.56	32.08
	55.97	67.88	50.44
	46.53	57.85	57.79
	65.26	67.83	35.52
4	63.40	66.58	42.77
	44.26	71.25	34.17
	33.04	77.52	33.61
	87.59	93.55	62.11