

# モーションキャプチャを用いたスポーツフォーム練習のための 特徴量・可視化手法の検討

稲尾拓海<sup>†1</sup> 尾下真樹<sup>†1</sup> 向井智彦<sup>†2</sup> 栗山繁<sup>†3</sup>

**概要:** 本研究の目的は、初心者向けのフォーム練習システムの開発である。モーションキャプチャ機器を用いて練習者の動作データを取得し、あらかじめ用意された手本動作との違いを可視化して練習者に示すことで、練習者が自身の動作を改善できるようにする。本研究では、フォーム練習全般に有効と考えられる特徴量の分類や一部の特徴量についての基本的な可視化手法の実装を行った。テニスのショット動作に対応したプロトタイプを開発しており、その評価実験の結果や今後の研究課題について述べる。

**キーワード:** モーションキャプチャ, スポーツトレーニング, 特徴量, 可視化

## Analysis of the Motion Feature and Visualize Techniques for Sports Form Training Using Motion Capture

Takumi Inao<sup>†1</sup> Masaki Oshita<sup>†1</sup>  
Tomohiko Mukai<sup>†2</sup> Shigeru Kuriyama<sup>†3</sup>

**Abstract:** In this paper, we present our project towards development of sports training system. We describe the motion features and visualization techniques that we have developed. We applied these methods for training of tennis shot motion. We present some results and discuss our future research.

**Keywords:** Motion Capture, Sports training, Feature, Visualize

### 1. はじめに

スポーツやダンスなどのトレーニングにおける基礎練習方法として、特定のフォームの動作を繰り返し行いながら理想的な動作に改善していくフォーム練習が用いられる。フォームとは、ダンスのステップや野球のスイングといった、特定の型を持った短い動作を指す言葉である。インストラクターが動作の悪い部分を指摘したり、自主練習として鏡で自身の動きを確認したりといったやり方があるが、インストラクターも練習者の動作の問題点や修正方法を練習者に的確に伝える事は困難な場合があり、自主練習の場合にはそもそも練習者が自身の動作の悪い点が分からないといった問題がある。

本研究の目的は、初心者向けのフォーム練習システムの開発である。モーションキャプチャ機器を用いて練習者の動作データを取得し、あらかじめ用意された手本動作との違いを可視化して練習者に示すことで、練習者が自身の動作を改善できるようにする。しかし、動作データは高次元の複雑なデータであり、単純に動作データの差分を示すだけでは動作をどのように修正すれば良いのかを把握するのは難しい。そこで、動作データを解析して特定タイミング

における特定部位の位置や速度といった特徴量を計算し、それらを可視化することによって、練習者に自身の動作の問題や改善方法を伝える。

本研究の最初の課題としては、フォーム練習に有効な特徴量やその可視化手法を明らかにすることである。一般に動作データから計算できる特徴量には多くの種類があり、有効な特徴量はフォームの種類や練習者の動作によっても異なる。本論文では、この第一段階として、フォーム練習全般に有効と考えられる特徴量の分類や一部の特徴量についての基本的な可視化手法の実装を行った。本研究で開発するトレーニングシステムは、将来的には様々な種類のスポーツやフォームに対応する予定であるが、現在はテニスのショット動作を対象としたプロトタイプを開発している。本論文では、プロトタイプを試用した結果を述べる。

本論文の構成は以下の通りである。2節では関連研究について述べる。3節では開発するシステムの概要、4節では動作特徴量の分類について述べ、5節で各特徴量に対応する可視化手法を説明する。6節でプロトタイプの評価実験とその結果について示し、7節でまとめを述べる。

<sup>†1</sup> 九州工業大学  
Kyushu Institute of technology

<sup>†2</sup> 東海大学  
Tokai University

<sup>†3</sup> 豊橋技術科学大学  
Toyohashi University of Technology

## 2. 関連研究

過去に既にモーションキャプチャを用いたトレーニングシステムの構築は行われている[1]。しかし、これらは取得した練習者の姿勢を単純に表示するようなシステムで、動作の問題や改善方法は分かりづらかった。

また、機械学習による動作の良し悪しの識別も行われている[2]。しかし、動作の良し悪しを決定する上で重要となる特徴量の説明や動作の改善方法の提示などは行われていなかった。

## 3. システムの設計

### 3.1 システムの概要

本システムを利用するのは練習するフォームにおける初心者进行想定しており、一般的に手本とされる動きに近づけるように動作を改善する事になる。トレーニングシステムの主要機能として、手本動作の表示・モーションキャプチャによる動作記録・可視化する姿勢、及び特徴量と可視化手法の選択の3つを実装した。それぞれの詳細の説明については後述する。

また最終的には様々なフォームの練習に対応するつもりであるが、今回はテニスにおけるフォアハンドショット動作の練習を目的としたプロトタイプ構築を行った。手本となるフォアハンドショット動作のデータはテニスの経験者に実際に行ってもらいモーションキャプチャを用いて収集を行った。

### 3.2 システムの利用環境

今回作成したプロトタイプの利用環境を図1に示す。システムの利用にはPC、モーションキャプチャ、スクリーンの3つが必要となる。利用者はモーションキャプチャを装着し、スクリーンの前に立って動作を行う。スクリーン上に表示された自身の動作及び手本動作と可視化結果を見て動きの良し悪しを判断し、改善するという形になる。

今回モーションキャプチャとして PerceptionNeuron を利用しているが、これに限らず他のモーションキャプチャ装置を状況に応じて使い分ける事も可能である。私たちは PerceptionNeuron とは別に OptiTrack という光学式のモーションキャプチャを利用している。OptiTrack は PerceptionNeuron よりも高い精度で動作をキャプチャできるが屋外での利用が出来ないという欠点がある。そのため精密さが要求されるような動きの激しい動作をキャプチャする場合は OptiTrack を使い、屋外で動作を実行する必要がある場合には PerceptionNeuron を用いるといった形で使い分けている。

### 3.3 システムの利用手順

システムの利用の流れを以下に示す。

- (1) 手本動作の確認
- (2) 動作の実行
- (3) 可視化する特徴量の選択
- (4) 可視化結果の確認
- (5) 2-4 を繰り返す

システムは図2に示すように最初に入力として手本となる動作情報を与える必要がある。その後練習者は手本動作を確認した後に同じように動作を実行し、モーションキャプチャを用いて動作情報を得る。それぞれの動作情報から同じ特徴量を計算して差分を取り、それを可視化した結果を画面上に表示して練習者はそれを確認する事になる。

また、特徴量を可視化するにはいくつかの操作を行う必要がある。最初に、動作においてどの姿勢の時の特徴量を計算するかを選択する。利用者はフォームごとにあらかじめ設定されているいくつかのキー姿勢の中から選択を行う事になる。姿勢の選択を行ったら次は特徴量の選択を行う。選択した姿勢の種類によって対応する特徴量の候補を画面上に表示する。この中から1つを利用者は選択する事になる。特徴量を選択したら最後に可視化手法を選択する。特徴量毎に利用できる可視化手法の候補の中から任意の可視化手法を1つ選択すると最後に可視化結果が表示される。特徴量に対して可視化手法が一意に定まっている場合は指定された可視化結果を自動で表示する。また、可視化手法によっては視点の切り替えが必要になる場合があり、その場合にもメニューから操作可能となっている。

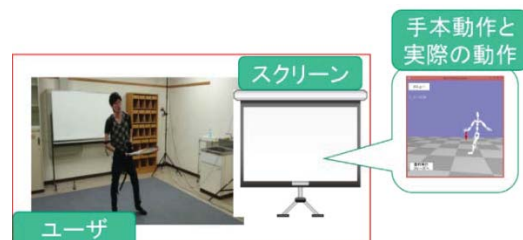


図1 システムの利用環境

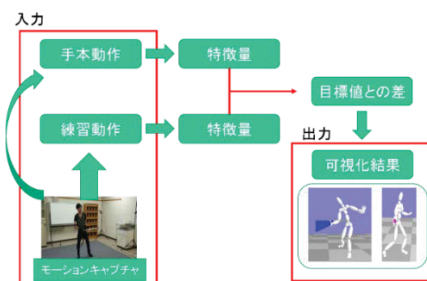


図2 システムの入出力

## 4. 特徴量

本節では、動作データから計算できる特徴量について検

討する。最初に動作データの表現について説明し(4.1節)、次に一般に動作データから計算できる特徴量の分類について述べる(4.3節)。その後、現在対象としているテニス動作について有効と考えられる特徴量について検討する。

#### 4.1 動作データの表現

モーションキャプチャ機器により取得できる動作データは大きく分けて骨格情報と姿勢情報の2つで構成される。

骨格情報は人体の構造を表す情報である(図3)。これには全身の関節と体節のつながりの情報や各体節の長さ(関節間の位置関係)の情報が含まれている。骨格情報は動作中に変化する事はなく固定の情報となる。本研究の実験では、関節数が49個の骨格モデルを用いている。

一方、姿勢情報は、動作中の角フレームの姿勢を表す情報である。動作中の姿勢変化は連続するフレームにより表される。本研究の実験では、秒間30フレームの動作データを試用している。各フレームの姿勢は、全関節の親体節の局所座標系に対する相対回転とルート体節(腰)の位置・向きにより表される。

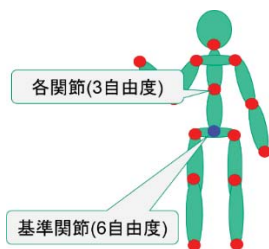


図3 骨格情報

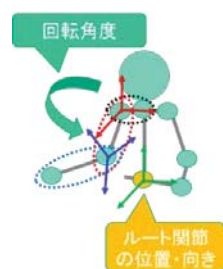


図4 姿勢情報

#### 4.2 特徴量の分類

一般に動作データから計算できる特徴量には多数のものがあり、その中からフォーム練習に有効と考えられる特徴量を明らかにする必要がある。ここでは、その泰一段階として、考えられる特徴量を整理・分類する。

##### 4.2.1 注目するタイミングによる分類

戦術の通り、動作データは連続する多数のフレームにより表される。しかしながら、動作全体(全フレーム)から計算した特徴量を用いるのは必ずしも有効ではなく、適切

なタイミングや区間に注目して特徴量を計算することが重要となる。一般にフォームにはキーとなるタイミングがいくつか存在する。例えば、ゴルフや野球のスイングで言うインパクトの瞬間などがそれにあたる。フォームにおける重要な特徴量を求める上で、このタイミングが重要であると考え、特徴量の計算に用いるタイミングにもとづき、特徴量全体を以下の3つに分類する。

- 1つのタイミングに注目した特徴量  
動作中のある1つのキーとなるタイミングの姿勢から計算される特徴量である。例えば、インパクト時の右手の位置やテイクバック時の右足の向きなどが計算できる。
- 2つのタイミングに注目した特徴量  
動作中の2つのタイミングに注目し、その2つのタイミング間での何らかの特徴量の変化量を特徴量とするものである。例えば、テイクバック時とインパクト時の右手位置の変位量などが計算できる。
- 複数のタイミング(動作区間)に注目した特徴量  
動作中の特定の区間に注目し、その区間中の特徴量の変化や統計的な解析結果を特徴量とするものである。以下、上記の3つの分類について、さらに詳しい分類を説明する。

##### 4.2.2 1つのタイミングに注目した特徴量

動作中の1つのタイミング(姿勢)から計算できる特徴量としては、各部位の位置や向き等の空間的な特徴量があげられる。また、ローカル座標系での位置・向きとワールド座標系での位置・向きとで値が異なるため別の特徴量として扱う必要がある。ローカル座標系での値は特定の部位を基準とした相対的な値を知りたい時に用いられ、ワールド座標系での値は絶対的な値を知りたい時に用いる。ワールド座標系での位置・向きは動作データをもとにFK計算を行うことにより求めることが可能である。更に位置や向きを微分することで、並進・回転速度や並進・回転加速度などの特徴量を求めることもできる。なお、これら空間的な特徴量は3次元の位置・回転の特徴量となる。

力学的な特徴量として、関節トルクや重心位置などの特徴量も用いることができる。これらは、あらかじめ練習者の骨格モデルの角部位の質量や慣性テンソルなどの情報が与えられていれば、動力学計算にもとづき求めることができる。

また、時間的な特徴量として、動作開始時からの時刻なども用いることができる。

これらの特徴量の分類を図5に示している。

##### 4.2.3 空間的な特徴量の次元分解

位置や向きなどの3次元の特徴量を可視化する際、単純に画面上に描画すると奥ゆきが目視では分かりづらく3次

元の値を把握しづらい事がある。そのため、特徴量の次元を削減し、特定の面や軸に対する1・2次元の位置。向きの特徴量とすることで、把握しやすくなる。例えば、3次元の位置は全方向、左右方向、上下方向などの任意の軸に投影することで、1次元の特徴量とする事が出来る。同様に、水平面や任意の垂直面に投影することで、2次元の特徴量とすることもできる。また、向きに関しても同様に水平面や任意の水平面や任意の垂直面に対する1次元の角度を計算して特徴量とすることができる。次元を削減して計算する際には入力として始点と終点を表す位置ベクトルに加え位置に関する特徴量の場合、基準となる軸を、向きに関する特徴量の場合基準となる面の情報を与える必要がある。

#### 4.2.4 2つのタイミングに注目した特徴量

2つのタイミング（キーとなる姿勢）において、4.2.2節で述べた特徴量の差を計算することで、新たな特徴量を求めることができる。従って、2つのタイミングに注目した特徴量としても、空間的変化量・力学的変化量・時間的変化量の3つの分類が存在することになる（図5）。

#### 4.2.5 複数のタイミングに注目した特徴量

動作中の特定の区間に注目した場合、区間中の連続するフレームから特徴量を計算できる。このとき、連続する複数の特徴量をそのまま1つの特徴量として可視化することもできる。例えば、動作開始から終了までの右手の並進速度の推移などを特徴量として計算することが出来る。

あるいは、連続する複数の特徴量に対して統計的な計算を適用し、ある特徴量の平均や分散などを計算することもできる。例えば、右手の位置の平均・分散といった特徴量を計算することができる。

複数のタイミングに注目した特徴量としては、連続的な特徴量と統計的な特徴量の2種類に分類できる（図5）

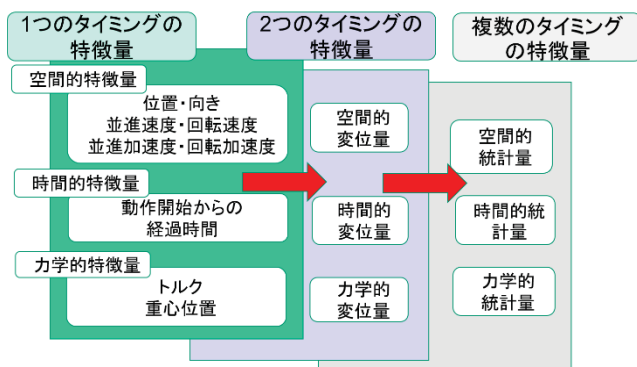


図5 特徴量の関係図

#### 4.3 テニスのショット動作のための特徴量

本節では、ここまで述べた特徴量の分類にもとづき、

テニスのショット動作のフォーム練習に有効と考えられる特徴量について述べる。まず、テニスのフォアハンドショットにおけるキー姿勢としては、テイクバック、インパクト、フォロースルーの3つのタイミングが非常に重要である。図6は3つの姿勢がどのようなものかを示すものである。テイクバックは振りかぶった時の姿勢、インパクトは打球時の姿勢、フォロースルーは振り終わり時の姿勢を指す。今回は、この3つのタイミングにもとづき、有効と考えられる特徴量を検討した。

テニスの熟練者の意見にもとづき、テニスのショット動作にお有効であると思われる特徴量を書き出した結果を表1に示す。フォアハンドショットではラケットを持つ利き手と下半身の動きが重要になってくる。そのため、利き手や両足位置、腰の位置や向き、それらの推移などを見る事が出来るような特徴量を用いることとした。

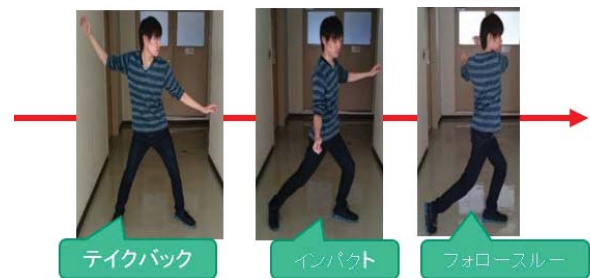


図6 フォアハンドショット動作

#### 4.4 キー姿勢の検出

特定のタイミングに注目した特徴量を計算するためには、練習者の動作が入力された時に各タイミングに対応する時刻・姿勢を判定することが必要となる。DTW(Dynamic Time Warping)[3]を用いることで、この処理を自動的に行うことが出来る。DTWは2つの類似した時系列データが入力されたときに、各データ間で対応するフレームを決定するための手法である。

本研究のシステムでは、あらかじめ手本動作にキー姿勢となるタイミングを指定しておき、取得した練習者の動作との間でDTWを計算する事で、手本動作の各キー姿勢に対応する練習動作のキー姿勢を得ることができる。DTWの計算では、手本動作と練習動作の各フレーム同士の姿勢間距離を計算し、動作全体での距離が最も小さくなるようなフレーム間の対応を求める。

表 1 特徴量の例

特徴量	具体例
特定部位の角度(水平面に対する角度)	テイクバック時の右足の角度(水平面)
	インパクト時の右かかとの角度(水平面)
特定部位間の相対距離(上下方向)	インパクト時の右手と腰の差(上下方向)
	フォロースルー時の右手と胸の差(上下方向)
特定部位間の相対距離(左右方向)	インパクト時の右上腕と胸の差(左右方向)
特定部位間の相対距離(前後方向)	右足と左足の距離(前後方向)
特定部位の並進速度(前後方向)	インパクト時の右手の並進速度(前後方向)
特定部位間の相対距離(前後方向)	テイクバック時の左足の位置とインパクト時の右足の位置の差(前後方向)
特定部位の位置の変位量(上下方向)	テイクバック時の利き手位置とインパクト時の利き手位置の差(1次元:上下)
特定部位の角変位量(水平方向)	テイクバック時の腰の向きとフォロースルー時の腰の向きの差(水平方向の回転量)
複数のタイミングでの特定部位の位置(上下方向)	スイングにおける利き手位置の推移
複数のタイミングでの特定部位の回転(水平面)	スイング全体での利き手の回転量
複数のタイミングでの特定部位の並進速度(前後方向)	スイングにおける振りの早さの推移
特定部位の角度(水平面に対する角度)	テイクバック時の右足の角度(水平面)

## 5. 可視化

### 5.1 可視化手法の分類

可視化手法についても特徴量と同じように分類することができ、3次元空間上に可視化する方法と時間軸による可視化の2種類が存在する。3次元空間上の可視化は1つのタイミングの特徴量、2つのタイミング、複数のタイミングの全ての場合に利用する事が可能である。タイムラインによる可視化は複数のタイミングの特徴量のみにも適用する事が出来る。実際に実装した可視化手法と特徴量の対応関係を表2に示す。この表には各種可視化手法とそれに対応する特徴量の種類を示している。また、各可視化手法には可視化に必要な情報が特徴量とは別に存在する場合がある。それらについては必要情報の欄に示している。加えて追加パラメータを入力することで対応する特徴量の目標値との差などを視覚的に表現することが出来るようになる。

表 2 特徴量と可視化の対応表

可視化手法	対応する特徴量	必要情報	追加パラメータ
球体描画	位置(3次元特徴量)	なし	描画色 大きさ
矢印描画	相対距離 速度 加速度(3次元)	始点位置	描画色 太さ
	相対距離 速度 加速度(1次元)	始点位置 基準軸	描画色 太さ
三角形描画	角度(1次元特徴量)	基準面 基準点	描画色
タイムライン	位置 向き 速度 加速度(複数の1次元特徴量)	なし	なし

### 5.2 球体描画による可視化

右手の位置など3次元の位置情報を可視化する際には対応する部位に球体を描画することで表現する。追加のパラメータとして描画色の変更や球の大きさの指定をすることができ、これによって位置の目標値との差や速度などの異なる特徴量を追加で表現する事ができる。図7は球体描画による可視化の図である。右手の位置と目標値との差に応じて描画色が変更されており、左図の球体が青い状態は目標より高い状態、右図の赤い状態は目標値よりも低い状態となっている。

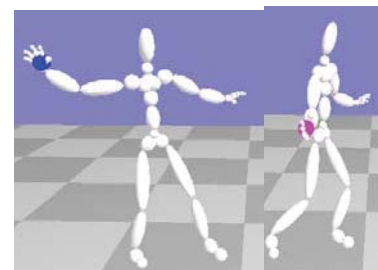


図 7 球体描画による可視化

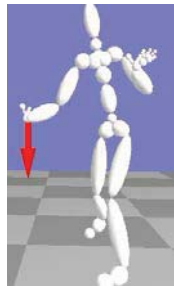


図 8 矢印描画による可視化

### 5.3 矢印描画による可視化

相対距離や速度などの特徴量を可視化するには矢印を描画する。始点となる位置を入力する必要があり、球体の時と同様に描画色の変更や太さの指定など追加のパラメータを入力する事で異なる特徴量も表現する事ができる。また、1次元の特徴量が対象の場合には基準となる軸を指定する必要がある。

矢印描画による可視化は目標値との差分を表すが目標値との差が小さかった場合目視しづらくなってしまいうので実際に描画する矢印の長さは目標値との差に定数をかけたものになっている。図 8 は矢印描画による可視化の図である。この例では矢印は下を向いており、利用者は右手を下に下げの必要があることを表している。

### 5.4 三角形描画による可視化

部位の特定面に対する角度などを可視化するには三角形の描画を行う。これには基準となる面と基準となる部位の位置を指定する必要がある。追加で描画色の変更を行う事が可能である。図 9 は三角形描画による可視化の図である。黄色い円が指定した基準面を表し、青い三角形が目標となる腕の角度との差を表している。

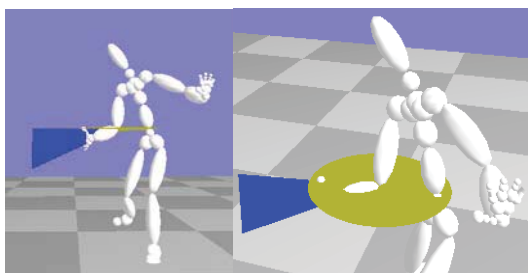


図 9 三角形描画による可視化

### 5.5 タイムラインによる可視化

これまで 3次元空間上の可視化手法を説明してきたが、複数の 1次元特徴量を可視化する場合はタイムラインによる可視化も可能である。図 10 はタイムラインによる可視化画面である。横軸は動作開始から終了までの時間を表しており、各時刻において目標値との差が大きかった部分の描画色を変更してグラデーションをかけている。これによ

って動作の流れにおいてどの部分が目標値と異なっているのかを把握することができる。また、タイムラインだけでは各時刻での姿勢がどのようなものか分からないので、タイムラインと一緒に各時刻での姿勢を上部に表示するようにした。これによってより利用者は動作の改善点を把握しやすくなる。

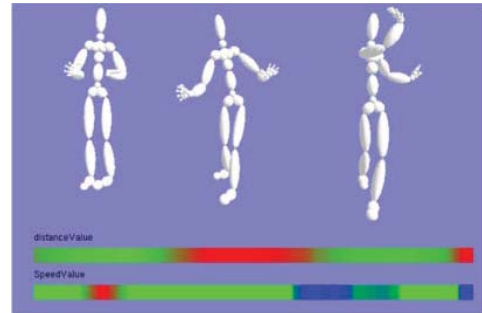


図 10 タイムラインによる可視化

## 6. プロトタイプシステムの評価実験

テニスのフォアハンドショット動作に対応したプロトタイプを開発した。実装した一部の特徴量と可視化手法が練習に有効であるかどうかを検証するため、テニスの初心者システムを利用してもらった。

### 6.1 実験方法

本実験では、テニスの熟練者から取得したショット動作を手本動作とし、テニスの初心者 1名を被験者として手本動作を再現するショット動作を行えるようになるかを検証した。

本実験では、4.2 節で示した特徴量の分類のうち、テニスにおいて特に重要であると思われる以下の 2つの特徴量と対応する可視化手法にみを用いた。

- 特徴量 1: インパクト時の右手の位置 (上下方向)  
ショットのフォームにおいてインパクト時のラケットを持つ手の高さは腰の高さと同じになることが理想とされているため本特徴量を用いた。  
インパクト時の右手位置を基点とし、手本動作との右手の高さの差を上下方向の矢印として可視化する (図 11)。
- 特徴量 2: テイクバック時からインパクト時の左足位置の変位量 (前後方向)  
ショットフォームにおいて、左足の踏み込みの大きさが重要とされているため本特徴量を用いた、インパクト時の左足の位置を基点とし、手本動作との左足の前後方向の変位量の差を前後方向の矢印として可視化する (図 12)。

実験の手順は以下の通りである。

- (1) 被験者に手本動作と同じ動作を行ってもらおう
- (2) 上記の2つの特徴量の可視化結果を順番に被験者に確認してもらおう
- (3) 被験者に、可視化結果を踏まえて再度フォーム動作を行ってもらい、フォーム動作が改善されたかどうかを検証する。
- (4) (2) (3) を繰り返し行ってもらい、手本動作に近い動作が実現できたら終了する。

## 6.2 結果

一回の実験における2つの特徴量の手本動作との差分の変化を表3に、またそれぞれの可視化結果の変化を図11、図12に示す。1つ目の特徴量に関しては最初の動作の時点で比較的手本動作と近い値であった。一方、2つ目の特徴量に関しては、左足の踏み込みが浅く手本動作の値から大幅に離れていた。この理由は、被験者がショット動作において手の動きが重要であると考えており、足の動きの重要性を知らなかったためであった。そのため手本動作を確認する際に手元に注視しておりその結果右手位置は最初から正しい位置にあったが右足の位置は間違っただけとなっていた。よって開発したシステムはショット動作のどこに注目すべきか、またどう改善すべきかを利用者に伝えることが出来ていると考えられる。いずれの特徴量についても、可視化結果にもとづいて動作を繰り返すことで徐々に改善され、3回目には手本動作とほぼ同じ動作が実現できた。

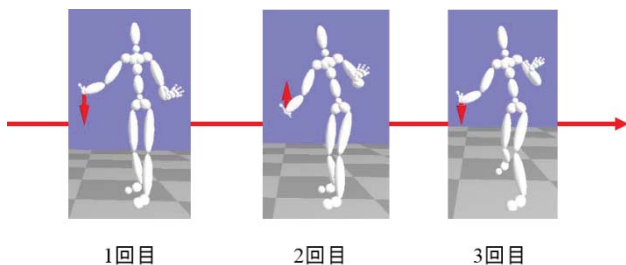


図11 インパクト時の右手位置

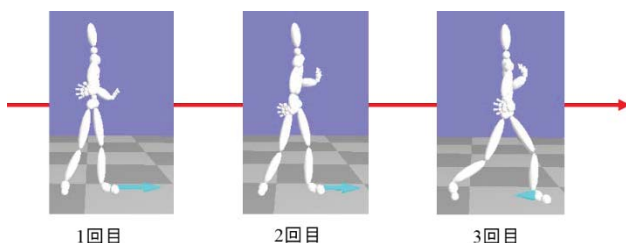


図12 テイクバック時からインパクト時にかけての右足位置変位量

表3 各試行での目標値との差

特徴量	1回目	2回目	3回目
インパクト時の右手位置（上下方向）	+9.24cm	-6.49cm	+3.85cm
テイクバック時からインパクト時にかけての右足位置変位量	-40.43cm	-30.95cm	+1.15cm

## 6.3 考察

今回の2つの特徴量のみで動作全体として見たときに手本動作と同じ動作は実現出来ているといえるが、他にも腰の回転量など手本動作から外れている部分があり、この2つの特徴量だけでは不十分であると思われる。また、被験者に本システムを利用した感想を聞いたところ、どこに注意して動作をするべきなのかはすぐに把握することが出来たとのことだった。しかし、2つの特徴量を同時に意識しながら改善するのは大変であったとのことだった。今後さらに用いる特徴量の数を増やす場合、重要なものだけに絞らなければ利用者にとって負担になると思われる。

## 7. おわりに

本研究では、フォーム練習システムに必要な特徴量や可視化手法について検討し、テニスのショット動作に注目したプロトタイプの開発や評価を行った。今回の実験で検証した範囲では、開発システムはフォームの悪い部分や改善方法を伝える事が出来ており有用であると考えられる。今後は、本論文で分類したほかの特徴量についても評価を行い、有用な特徴量や可視化手法を明らかにしていく必要がある。

## 参考文献

- [1] Jacky C.P. Chan, Howard Leung, Jeff K.T. Tang, and Taku Komura. A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology. IEEE Transactions on Learning Technologies. vol.4, no.2, pp. 187-195, 2011.
- [2] Aftab Khan, Sebastian Mellor, Eugen Berlin, Robin Thompson, Roisin McNaney, Patrick Olivier, and Thomas Plots. Beyond Activity Recognition: Skill Assessment from Accelerometer Data. UBIComp, pp. 1166, 2015.
- [3] Eugene Hsu, Marco da Silva, and Jovan Popovic. Guided Time Warping for Motion Editing. ACM SIG GRAPH/Eurographics Symposium on Computer animation, pp. 5-52, 2007.