

モーションキャプチャを用いた

動作比較のための DP マッチング評価基準の検討

Study on Distance Metrics of DP Matching for Dancing Sports Motion Comparison

伊藤 陽脩^{*1}
Yoshu Ito丸谷 宜史^{*1}
Takafumi Marutani平山 高嗣^{*1}
Takatsugu Hirayama梶田 将司^{*2}
Shoji Kajita間瀬 健二^{*1}
Kenji Mase^{*1} 名古屋大学大学院情報科学研究科^{*2} 名古屋大学情報連携統括本部

Graduate School of Information Science, Nagoya University

Information and Communication Technology Services, Nagoya University

It is difficult to discover slight differences in appearance among players in sports and dance performance. The purpose of this study is to identify metrics of differences between players' motions on the data acquired by motion capture, and to display the differences effectively in order to assist player's exercise. In this paper, as preliminary steps, we examined various criteria to calculate the degree of similarity in DP matching to find the same motion among players.

1. はじめに

舞踊やダンスの要素を含むスポーツなどの分野において、技の成否に関わるわずかな所作の違いを見ただ目で発見し理解したり、目標への到達度を示すことは非常に困難である。そのため、技や動作などの解析を行い、動作の違いを顕在化したり、類似度を評価することを目的とした研究は数多く存在する。

動作解析のためのデータを取得する方法としては、光学式モーションキャプチャ、加速度モーションセンサ、DV カメラを用いた画像処理方式など様々な方法があるが、本研究では光学式モーションキャプチャを用いて動作の解析を行う。光学式モーションキャプチャを用いる場合、ユーザ間の局所相対位置がわかっているため、追跡済みのマーカの位置座標値から追跡未了のマーカの相対的な位置を高精度で割り出すことができる。またモーションキャプチャで取得したデータを用いて可視化することによって選手の各部位の位置や姿勢を直観的に表現できるため、解析によって得られるフィードバックも大きいと考えられる。これらの点でモーションキャプチャが、他の手法を用いる場合よりも優れているため、スポーツや舞踊などの精密な動作分析に最適であると考えられている。

本研究では、モーションキャプチャでデータを獲得して、ユーザ自身が動作の比較・分析を行えるようなシステムの構築を目指している。これを行うためには、まずシステムが、獲得した一連のデータを動作単位に分割し、比較データ間で類似動作を抽出し、類似動作間のわずかな違いを選手へわかりやすく提示することが必要である。このうち本稿では、モーションデータから手本との類似度の高い動作を抽出することを考える。そのため手段として、パターン間の時間的伸縮を考慮して比較できる DP マッチングを用いる。従来研究では、DP マッチングを用いた動作抽出を行う際、移動距離が最も大きい 1 マーカにおけるユークリッド距離を用いて比較動作間の類似度を計算している[吉村 01,04]。しかし、体の各部位につけられている複数のマーカを複合的に扱い、類似度を計算したものは見当たらない。実際の舞踊やスポーツなどにおける動作は、体の複数部位の動きが複雑に組み合わさって構成されている。そのため、複数のマー

カを複合的に扱い類似度を評価する方が適している。さらに、類似度計算のための評価基準として、ユークリッド距離を用いることが最適であるは限らない。様々な評価基準を比較し識別精度を比較することで、より精緻に動作の類似度を評価できる評価基準を発見できる可能性がある。

本研究では、ジャズダンスにおける 10 個の基本動作を対象にマッチングを行った。「距離」、「距離の分散」、「速度」、「加速度」、「角度」、「角度の分散」の計 6 種類を、DP マッチングのための評価基準として定義した。また、比較したい動作間の類似度を計算するために用いる着目マーカ数の評価も、実験的に検討した。これにより類似動作抽出に最適な評価基準とマッチング時に着目するマーカの位置や数に関する知見を得た。

2. 技術支援のための枠組み

2.1 関連研究

吉村ら[吉村 01]は、日本舞踊における熟練者と非熟練者のモーションデータについて、移動距離の大きいマーカの軌跡に着目した DP マッチングを用いて注目動作の抽出を行った。そして、抽出した動作を定量的に評価し熟練者と非熟練者の相違を解析した。しかし、舞踊動作は身体の各部位における様々な動作が重なって構成されているにも関わらず、着目したマーカ 1 つのみを用いて注目動作の抽出・評価を行っているため、動作の類似度を評価するには不十分であると考えられる。

大崎ら[大崎 00]は、モーションデータに対して速度変化点に基づく動作分割とクラスタリングによるシンボル化を提案した。また分割化された時系列データを対象に、DP マッチングを用いた最近傍法によるクラスタリングを用いてシンボルの割り当てを行うことで、モーションデータからシンボル列への変換を行った。しかし、体の各部位ごとの動作を個別に検索して動作抽出を行っているため、複数部位からなる動作には向かず、全体的なバランスを考慮した類似度を測っていない。

2.2 システム概要

モーションキャプチャを用いて撮影したデータをもとに選手の技術支援を行うための全体的な枠組みを図 1 に示す。システムは入力されたデータに適切な処理を加え、動作に対する評価を選手に提示することで、選手に自身の動作を改善するためのきっかけを与える。上記システムを実現するために本研究では以

下に示す三つの処理部を備えた構成を考える。その中でも本稿では、マッチング部について検討した。

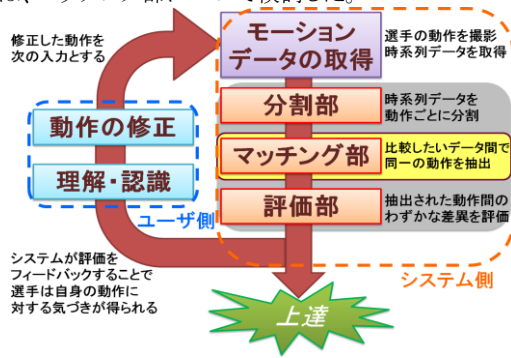


図 1: 技術支援のための枠組み

(1) 分割部

分割部では、ある動作の行われている区間を取り出す処理を行う。本稿では、ある一つの動作が「どの時刻からどの時刻までで行われたか」についてはあらかじめ与えるものとする。

(2) マッチング部

マッチング部では、比較する二つの動作間で最も類似する動作を抽出する処理を行う。具体的には、分割部で切り出した参照データ中の任意の一動作をマッチングの参照とし、分割部で切り出した対象データ中の動作を一つずつ比較し、参照した動作との類似度が高い対象動作を抽出する。

(3) 評価部

評価部では、類似動作として抽出された両動作を比較して、それらの動作の違いを評価する処理を行う。参照データとして上級者の動きを用い、対象データとして初心者の動きを入力する。両動作の違いを客観的に評価し、数値化、可視化、言語化等を実施し、差異のある部分を強調して、選手にわかりやすく表示することができれば、技術習得の参考になると考えられる。

以上のようなシステムを提供することで、選手は技の成否につながるわずかな所作の違いを詳細に把握することができる。選手はシステムからフィードバックを得ることで、自身の動作の改善しようと試行錯誤する。選手が手本の動作と類似するように修正した動作を、システムの新たな入力として与え、再び評価を返すことで、選手は新たなフィードバックが得られる。このように、図 1 に示すようなサイクルを繰り返すことで、本システムが選手の技術向上に貢献できると考えられる。

3. データの収集と前処理

3.1 データの収集方法

本研究では、Motion Analysis 社製の光学式モーションキャプチャ MAC3D システムを用いた。被験者の体に装着した各マーカを追跡し、それぞれの軌跡を 3 次元時系列データとして出力する。各マーカの 3 次元座標値は $\{X(t), Y(t), Z(t); t=1, 2, 3, \dots\}$ として表され、mm 単位で測定される。t は動作開始時からの時間を表すフレーム番号である。データ収集時には、約 5m×4m からなる撮影領域を、11 台の赤外線カメラ(サンプリング周波数 200Hz)を円形に囲むように配置して撮影した。3 次元時系列の原点は、実験前に行うキャリブレーション時に配置した基準立体の位置によって定められる。ここでは、撮影領域の中心を原点とし、床面に対して垂直な方向を z 軸の正方向とする右手系座標として定義した。これが本研究における絶対座標系である。

3.2 データの前処理方法

モーションキャプチャで得られた 3 次元座標値の全フレーム区間に対して、ローパスフィルタの一種であるバターワースフィルタ[六田 00]を適用して平滑化処理を行う。これによって高周波成分を取り除き、ノイズを除去した。なお、カットオフ周波数は 6Hz とした。

動作のマッチングを行う際、絶対座標系のまま値を評価してしまうと、同じ動作であるにもかかわらず、向きが異なるだけで別の動作であると誤認識されてしまう。体の重心に対して、体の各部位がどのような動きをしているかという相対的な位置関係を用いた方が、マッチングの精度が向上し、動作の類似度を評価する上で有用であると考えられる。そこで本研究では、吉村ら[吉村 04]の方法に倣って、各フレームに対する全マーカの値を、腰部を中心とする動座標系へと変換する。以下、この動座標系を「腰部動座標系」と呼ぶ。腰部動座標系への変換手法は、以下に述べる第一変換、第二変換を行うことで得られる。

第一変換として、腰部 4 マーカの重心を原点とし、各マーカを絶対座標系から、体の正面右方向を x 軸、前方向を y 軸、上方向を z 軸とする右手系が成立する動座標系へ変換する。なお、ここでいう腰部 4 マーカとは、腰の右前、左前、右後、左後に設置したマーカであり、それぞれの絶対座標を $\mathbf{X}_{rf}, \mathbf{X}_{lf}, \mathbf{X}_{rb}, \mathbf{X}_{lb}$ とする。これを行うために、以下の手順で適切な変換行列を求める。任意のフレーム i に対する腰部 4 マーカの位置ベクトルを式(1)のように定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{rf}(i) &= (X_{rf}(i), Y_{rf}(i), Z_{rf}(i)) \\ \mathbf{X}_{lf}(i) &= (X_{lf}(i), Y_{lf}(i), Z_{lf}(i)) \\ \mathbf{X}_{rb}(i) &= (X_{rb}(i), Y_{rb}(i), Z_{rb}(i)) \\ \mathbf{X}_{lb}(i) &= (X_{lb}(i), Y_{lb}(i), Z_{lb}(i)) \end{aligned} \quad (1)$$

腰部 4 マーカの重心を $\mathbf{G}(i) = \{X_G(i), Y_G(i), Z_G(i)\}$ とし、これをフレーム i に対する腰部動座標系の原点とする。

次に、i 番目のフレームにおけるマーカ j の変換前の位置を $\{X_j(i), Y_j(i), Z_j(i), 1\}$ 、第一変換後の位置を $\{X'_j(i), Y'_j(i), Z'_j(i), 1\}$ とする同次座標系で表す。このとき、線形変換のための変換行列を、次の式(2)から式(5)を利用して求める。

$$\mathbf{z}\text{軸:} \quad \mathbf{z}(i) = (\mathbf{X}_{lf}(i) - \mathbf{X}_{lb}(i)) \times (\mathbf{X}_{rb}(i) - \mathbf{X}_{lb}(i)) \quad (2)$$

$$\mathbf{x}\text{軸:} \quad \mathbf{x}(i) = \mathbf{X}_{rb}(i) - \mathbf{X}_{lb}(i) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}\text{軸:} \quad \mathbf{ny}(i) = \mathbf{nz}(i) \times \mathbf{nx}(i) \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X'_j(i) \\ Y'_j(i) \\ Z'_j(i) \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}(i)^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E} & -\mathbf{G}(i) \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_j(i) \\ Y_j(i) \\ Z_j(i) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}(i) = \begin{pmatrix} nx_x(i) & ny_x(i) & nz_x(i) \\ nx_y(i) & ny_y(i) & nz_y(i) \\ nx_z(i) & ny_z(i) & nz_z(i) \end{pmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}(i) = \begin{pmatrix} X_G(i) \\ Y_G(i) \\ Z_G(i) \end{pmatrix}$$

第一変換で得られる座標 $\{X'_j(i), Y'_j(i), Z'_j(i)\}$ は、あらかじめマーカを装着した際に生じるマーカの位置ずれによって、腰部マーカの成す平面が必ずしも地面と水平にならない。そのため、腰部マーカが成す平面を水平に戻す作業を第二変換として、第一変換で得られた座標に対して、さらなる変換を行う。これによって、DP マッチングにおける識別精度の向上が期待できる。この第二変換のための手順を以下に示す。

動作中のある任意のフレームにおける姿勢を基準姿勢と定め、基準姿勢に対して、式(2)から式(4)を用いて、腰部マーカを基

本とした座標軸 $\mathbf{nx}(0)$, $\mathbf{ny}(0)$, $\mathbf{nz}(0)$ を得る。なお、ここでいうフレーム番号 0 とは、基準姿勢に定めたフレームを表す疑似的な番号である。この時、式(6)を用いて、 $\mathbf{nx}(0)$ の z 成分を 0 として水平面に射影し、長さを 1 に正規化したベクトル $\mathbf{ex}(0)$ を計算する。

$$\mathbf{ex}(0) = \frac{1}{\sqrt{nx_x(0)^2 + nx_y(0)^2}} (nx_x(0), nx_y(0), 0) \quad (6)$$

また、絶対座標系での z 軸方向の単位ベクトルを $\mathbf{ez}(0)$ とする。さらに、 $\mathbf{ey}(0)$ を次の式(7)を用いて計算する。

$$\mathbf{ey}(0) = \mathbf{ez}(0) \times \mathbf{ex}(0) \quad (7)$$

座標軸 $\mathbf{nx}(0)$, $\mathbf{ny}(0)$, $\mathbf{nz}(0)$ による座標を、座標軸 $\mathbf{ex}(0)$, $\mathbf{ey}(0)$, $\mathbf{ez}(0)$ による座標に変換する線形変換行列を \mathbf{T}_0 とすると、 \mathbf{T}_0 は以下の式(8)によって得られる。

$$\mathbf{B} = \mathbf{T}_0 \mathbf{A} \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} nx_x(0) & ny_x(0) & nz_x(0) \\ nx_y(0) & ny_y(0) & nz_y(0) \\ nx_z(0) & ny_z(0) & nz_z(0) \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} ex_x(0) & ey_x(0) & ez_x(0) \\ ex_y(0) & ey_y(0) & ez_y(0) \\ ex_z(0) & ey_z(0) & ez_z(0) \end{pmatrix}$$

この時、行列 \mathbf{A} の逆行列 \mathbf{A}^{-1} を、両辺の右側から掛けることで、一次変換行列 \mathbf{T}_0 を求めることができる。得られた一次変換行列 \mathbf{T}_0 を用いて、第一変換で得られた座標値をさらに変換する。第二変換後の位置を $\{X_j''(i), Y_j''(i), Z_j''(i)\}$ とすると、以下の式(9)によって得られる。こうして得られた $\{X_j''(i), Y_j''(i), Z_j''(i)\}$ が、腰部動座標系における座標値である。

$$\begin{pmatrix} X_j''(i) \\ Y_j''(i) \\ Z_j''(i) \end{pmatrix} = \mathbf{T}_0 \begin{pmatrix} X_j'(i) \\ Y_j'(i) \\ Z_j'(i) \end{pmatrix} \quad (\mathbf{T}_0 = \mathbf{BA}^{-1}) \quad (9)$$

4. DP マッチングにおける各種評価基準の比較

DP マッチングとは、参照とする時系列データと対象とする時系列データ間の各要素の対応付けを行いながら、比較したい両パターン間の類似度を効率良く計算するマッチング手法のことである。アルゴリズムの実装が容易で、適切な経路を選択することで時間伸縮に頑健な対応付けを行うことができるという特長を持つ。本研究ではこの DP マッチングを用いて、類似動作の抽出を行うことを考える。

4.1 各種評価基準の提案

DP マッチングにおけるひずみ関数の評価基準として以下の6種類を定義した。

(1) 評価基準「距離」

比較動作における着目マーカ間のユークリッド距離の差の絶対値を着目マーカごとに計算した値全ての累積値で定義する。この評価基準を適用する際に用いる 3 次元座標値は腰部動座標系に変換した値を用いて評価した。この評価基準は、着目マーカにおける両データ間の軌跡のずれ具合を評価できる。

(2) 評価基準「距離の分散」

比較動作における着目マーカ間のユークリッド距離の差の絶対値の分散を評価基準「距離の分散」とした。この評価基準を適用する際に用いる腰部動座標系に変換した値を用いて評価した。この評価基準は、参照データと対象データ間における着目マーカ全体の散らばり具合を評価できる。

(3) 評価基準「速度」

比較動作における着目マーカ間の速度の大きさの差の絶対値を着目マーカごとに計算した値全ての累積値で定義する。この評価基準は、着目マーカにおける両データ間の速度の違いを評価できる。

(4) 評価基準「加速度」

比較動作における着目マーカ間の加速度の大きさの差の絶対値を着目マーカごとに計算した値全ての累積値で定義する。この評価基準は、着目マーカにおける両データ間の加速度の違いを評価できる。

(5) 評価基準「角度」

比較動作における着目マーカ間の角度の大きさの差の絶対値を着目マーカごとに計算した値全ての累積値で定義する。この評価基準は、着目マーカにおける両データ間の角度のずれ具合を評価できる。

(6) 評価基準「角度の分散」

比較動作における着目マーカ間の角度の大きさの差の絶対値の分散を評価基準「角度の分散」とした。この評価基準は、参照データと対象データにおける着目マーカ間の角度のばらつき具合を評価できる。

4.2 比較方法

被験者はジャズダンス上級者・初級者各 1 名であり、表 1 に示す 10 種類の基本動作からなる基礎ダンスのデータを用いた。

表 1: 基礎ダンスを構成する 10 種類の基本動作

	基本動作名	動作内容
1	アイソレーション(1)	上半身を左右前後へ動かす
2	アイソレーション(2)	上半身を円形に動かす
3	アイソレーション(3)	腰のみを円形に動かす
4	ウェーブ	体全体で波を描くように動く
5	アップ	BGM の裏拍で膝を曲げ伸ばす
6	ダウン	BGM の表拍で膝を曲げ伸ばす
7	左右	ダウンの動きで左右に移動する
8	ターン	前進してターンをし、後退する
9	ジャンプターン	ジャンプターンをし、後退する
10	ロッキング	鍵をかけるように体を停止させる

また一つの基本動作は、同じ動作を 2 回繰り返すことでも構成されている。そこで、それぞれ基本動作一回分とみなし、計 20 個のデータに分割した。参照データ \mathbf{R} を上級者のデータ、対象データ \mathbf{T} を初心者のデータとした。参照データ \mathbf{R} の基本動作を 1 つ選び、対象データ \mathbf{T} の基本動作全 20 個に対して DP マッチングを行い、各動作ごとに類似度が高い上位 2 つを選び、マッチングの結果とした。2 つを識別結果とする理由は、各基本動作 2 回のいずれかに類似すればよしとするためである。識別率は各識別結果をもとに以下の式(10)で求めた。

$$\text{識別率}[\%] = \frac{(\text{正しく識別できた個数の合計})}{(\text{参照データ数} \times 2)} \times 100 \quad (10)$$

両データに対し、先に述べた 6 種類の評価基準をそれぞれ採用した n 次元 DP マッチングを行い、類似度の計算を行った。なおここでいう次元数 n はマッチングのために用いるマーカ数を表す。算出した類似度によって、参照した動作が、対象としたデータ群の中から正しく識別できているかどうかを調べた。

4.3 着目マーカの定め方

まず評価基準として「距離」、「距離の分散」、「速度」、「加速度」を用いた DP マッチングの際は、着目マーカとして参照データ中で動作の開始から終了までの間の移動距離の長いマーカ上位 n 個を選択した。これは、よく動く部位に装着されたマーカに着目した DP マッチングの評価値は大きくその範囲も広いが、動きの少ない部位では評価値が小さくその範囲も狭くなる傾向

があるという過去の知見に基づいている[吉村 04]。一方、評価基準として「角度」、「角度の分散」を用いた DP マッチングの際は、着目マーカとして参照データ中で動作の開始から終了までの間に角度変化量の累積値が大きいマーカ上位 n 個を用いた。

4.4 実験結果

従来の手法である「距離」を用いた 1 次元($n=1$)DP マッチングにおける識別率が 62.5%であった(図 2)。一方、今回提案した評価基準「角度」を用いると一番識別精度の良かった 2 次元($n=2$)の場合では識別率 85.0%が得られた(図 3)。この結果、従来手法と比べて 22.5%の識別率の向上が確認された。また各評価基準を用いた DP マッチングによる識別率の推移を図 4に示す。図 4より、「角度」は各次元で高い識別率が得られていることが見て取れる。

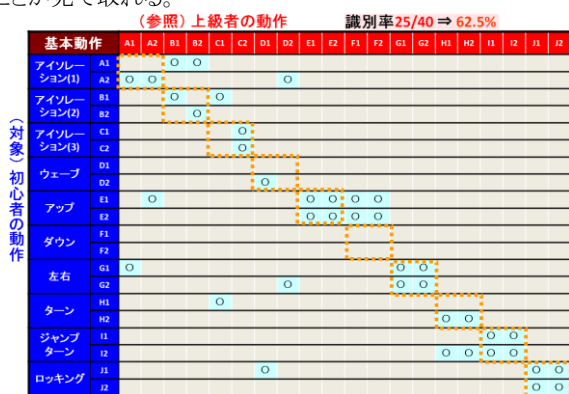


図 2: 「距離」を用いた 1 次元 DP の識別結果

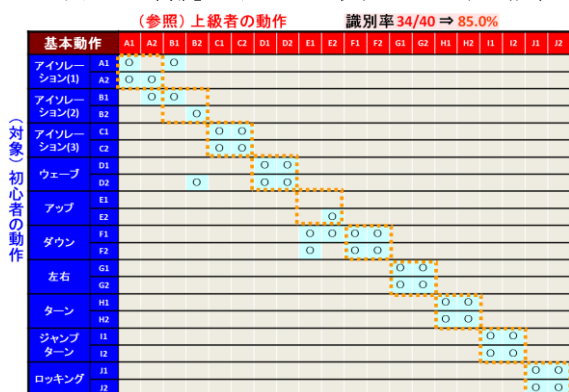


図 3: 「角度」を用いた 2 次元 DP の識別結果

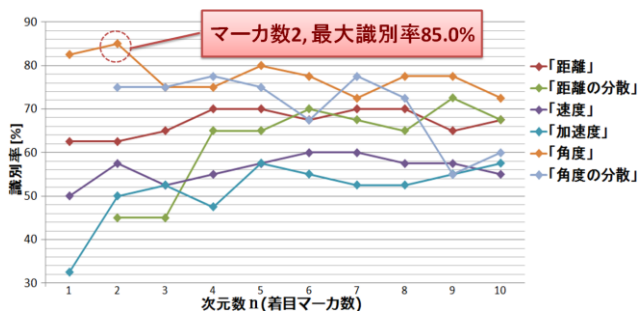


図 4: 各評価基準における識別率の推移

図 3を詳しく見てみると、アイソレーション(1)と(2)を相互に誤識別しやすいことがわかる。これは、アイソレーション時に着目したマーカが右肩と左肩の二つの角度であったため、両動作における角度変化が類似していたことが原因であると考えられる。

また「距離」や「角度」の評価基準を用いた場合も、ダウンとアップの基本動作の識別結果が悪いことがわかる。他の評価基準

を用いた場合も同様に識別結果が悪かった。これらの動作は BGM に合わせて身体を動かすタイミングが異なるだけで、本質的に同じ動作を指す。タイミングのずれは、DP マッチングにおける経路選択時の時間伸縮によって吸収されてしまうため、両動作の識別が正しく行えなかったと考えられる。ダウンとアップを識別率の計算から除いた場合、最も識別率の高かった最大識別率は評価基準「角度」を用いた 2 次元 DP マッチングの場合で 90.6%の識別率が得られ、大半の基本動作を高精度で識別できることがわかった。これは、他の評価基準に比べ、評価基準「角度」は身体的特徴差の影響が少ないことによると考えられる。以上の結果より、動作抽出を行うための DP マッチングでは、評価基準「角度」が、最適な評価基準であることがわかった。

本稿は比較データを各基本動作 1 回としたが、実際の基本動作は、複数の要素的な動きやその反復によって構成されている。そのため、動作の大半は類似しているが、一部の区間は著しく類似していないということが考えられる。この部分的な不一致が識別結果に大きく影響すると同時に、技の成否に関わる違いである可能性がある。そのためマッチングの単位をより細分化する分割部の役割が重要であると言える。これによってわずかな違いをより発見しやすくなり、技術支援につながると考える。

5. おわりに

本研究では、モーションキャプチャを用いて獲得したデータをもとに、選手の技術支援を行うシステムを設計することを目標とした。その前段階として、DP マッチングを用いて比較したい動作間の類似度を計算することを考えた。そして DP マッチングのための評価基準として各 6 種類を定義し、それぞれを用いてマッチングを行った場合の識別率について比較検討した。その結果全ての次元数において安定して高い識別率の得られた評価基準「角度」が、今回のサンプルでは最適な評価基準であることがわかった。評価基準を適切に定めることができれば抽出した動作が似ているものであるという信頼度が増すことになる。

一方で、一部の評価基準は選手間の身体的特徴差が識別率に大きく影響していると考えられる。そのため類似度を計算する上で、各特徴量に対してあらかじめ身体的特徴差を考慮した正規化を行うことが今後の課題である。また、比較したい動作の内容に合わせて評価基準を動的に変更したり、複数の評価基準を複合的に扱い、類似度を計算することを考える。

謝辞

本研究の一部は独立行政法人科学技術振興機構 CREST の支援による。

参考文献

[吉村 01] 吉村 ミツ, 酒井 由美子, 甲斐 民子, 吉村 功: “本舞踊の「振り」部分抽出とその特性の定量化の試み”, 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol. J84-D-2, No. 12, pp. 2644-2653, 2001

[吉村 04] 吉村 ミツ, 村里 英樹, 甲斐 民子, 黒宮 明, 横山 清子, 八村 広三郎: “赤外線追跡装置による日本舞踊動作の解析”, 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol. J87-D-2, No. 3, pp. 779-788, 2004

[大崎 00] 大崎 竜太, 嶋田 光臣, 上原 邦昭: “速度に基づく切り出しとクラスタリングによる基本動作の抽出”, 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 5, pp. 878-886, 2000

[六田 00] 六田 嘉明: “アナログフィルタの合成特性 1. バタワースフィルタ”, 奈良教育大学紀要(自然科学), Vol.49, No.2, pp.65-73, 2000