

# スポーツ映像を対象とした時系列データ分析による習熟度別トレーニング支援システムの開発

上野 太一<sup>†</sup> 清木 康<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科 〒252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322

<sup>††</sup> 慶應義塾大学環境情報学部 〒252-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322

E-mail: <sup>†,††</sup>{ta1,kiyoki}@sfc.keio.ac.jp

**あらまし** 本稿では、動作の姿勢が美しい・正しいということが定義されているスポーツを対象に、スポーツ学習者の動作映像を分析し、学習者のトレーニングに必要な情報を提示するシステムを提案する。本システムの特徴は、動作の習熟度を評価する関数を定義し、学習者動作の習熟度評価を行い、学習者動作の習熟度に応じたトレーニング情報の提示を Query-by-Video 環境により実現することにある。学習者は、本システムに学習者の動作映像を入力することで、学習者動作に応じたトレーニング情報を得ることができる。本稿では、剣道をスポーツトレーニングの対象とし、複数学習者によるプロトタイプシステムの利用実験を行った結果を示し、動作姿勢のトレーニングにおける提案方式の有効性を検証する。

**キーワード** スポーツ映像, 動作姿勢, スポーツトレーニング支援システム

## A Sports-training Support System with Time-series Analytical Functions for Sports-video Database

Taichi UENO<sup>†</sup> and Yasushi KIYOKI<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Media and Governance, Keio University, Endoh 5322, Fujisawa, Kanagawa, 252-8520 Japan

<sup>††</sup> Faculty of Environment and Information Studies, Keio University, Endoh 5322, Fujisawa, Kanagawa, 252-8520 Japan

E-mail: <sup>†,††</sup>{ta1,kiyoki}@sfc.keio.ac.jp

**Abstract** This study aims to improve the sports-trainee's skill by analyzing trainees' sports-video data and representing training information that indicate how trainee should move their body. The main feature of this study is that our system provides user with training information corresponding to her/his skill by a Query-by-Video function. This Query-by-Video function aims to measure trainee's skill and retrieve appropriated training information for users. To realize this function, the system analyzes trainee's proficiency by measuring the change of position of trainee's joint in time series of video data. We have implemented our prototype system for the kendo training and verified the validity of our prototype system. Our prototype system can improve trainee's skill by representing appropriated training information.

**Key words** sports-video, posture and movement, sports-training support system

### 1. はじめに

本研究では、動作の姿勢や型が正しいということが定義されているスポーツ、すなわち、武道を対象に、時系列データであるスポーツ動作映像を分析し、学習者の技能を計量することにより、学習者の動作トレーニングを支援するシステムを実現する。安価なハイスピードカメラなどの普及により、学習者のス

スポーツ動作映像を撮影し、撮影した映像をトレーニングに活用する環境が整っている。オンラインストレージの普及もあり、スポーツ動作映像データを学習者間でやりとりし、分析することが容易になっている。しかし、学習者がスポーツ動作映像の分析を行うには、対象スポーツにおける専門的知識が必要となり、学習者によっては、スポーツ動作映像のみからトレーニングに必要な情報を得ることが難しい。特に初学者は、スポーツ

における模範演技を提示されても、模範演技の特徴や状態を把握できないという視覚情報の課題が報告されている [2]. 専門的知識を有さない学習者が、スポーツ動作映像のみから学習者自身の課題を把握し、熟練者の特徴を認識するなど、学習者に必要なトレーニング情報を抽出するのは困難である。これまで、学習者がスポーツ動作映像からトレーニングに必要な情報を得るには、師範など指導者の指摘を受けるか、機械学習を用いて知識の抽出を行う必要があった。しかし、学習者は、常に指導者の指導を受けられるとは限らず、また、機械学習により知識抽出を行うにも、専門家の助言を必要とし、知識抽出を行うために複雑な検索式を記述しなければならない。そのため、本研究では、スポーツトレーニングを対象とし、学習者の運動動作情報の獲得、熟練者・習熟者との動作比較をスポーツ動作映像の分析による運動動作状態の計量により行い、それぞれ学習者動作に応じたトレーニング情報を提示することにより、学習者のスポーツ技能向上を支援するシステムを実現する。

本研究の特徴は、Query-by-Video 環境を実現することにより、スポーツ動作映像をもとに学習者動作の技能を習熟度として評価し、学習者動作の習熟度に応じたトレーニング情報を提供することにある。そのために、スポーツ動作映像の学習者動作について、習熟度を動作の特徴データとして分析し、複数学習者間での動作の特徴データを比較する。それにより、本システムは、複数学習者間における人体モデルの近似化や、人体モデルへの正規化を行わずに、トレーニング情報を提供する。学習者は、学習者自身の動作における課題を把握していなくとも、動作映像をトレーニング情報獲得のためのクエリとすることで、本システムを用いて他学習者の動作映像との比較分析を行い、学習者が動作において気づいていない事象の発見や、今後のトレーニングメニュー改善を実現できる。

本システムは、スポーツ動作映像における学習者動作の分析について、学習者の動作における関節間の点や線、角度の関係を分析し、あらかじめ定義した評価関数を適用し、学習者動作の習熟度に関する分析データを生成する。学習者動作の姿勢変化に応じて、動作を時区間に分割することにより、学習者ごとに時間長の異なるスポーツ動作映像であっても、時系列を考慮した学習者動作の習熟度評価を行うことができる。本研究では、具体的なスポーツトレーニングの対象として、剣道の飛び込み面打ちを対象に、時系列データの分析、および、習熟度別トレーニングを行う。

## 2. 関連研究

動作姿勢を習得することは、武道において重要な要素である。有馬ら [3] は、姿勢・構えが正しくなければ、いくら精神を鍛えても無駄であることや、正しい姿勢・構えによって力強い動作が実現できるとしている。また、全日本剣道連盟は、剣道の試合における打突時有効認定の条件 [1] として、『適正な姿勢の維持』を要求している。

動作姿勢の習得に関する研究では、舞踊動作などスポーツ動作を対象に、モーションキャプチャシステムを用いて、動作の定量化や特徴を抽出し、動作解析を行う研究が行われている。

舞踊動作の研究については、音楽のリズムにあわせて踊るため、異なる学習者であっても共通の時間軸を有しており、時系列を取り扱う際の課題が少なく、動作の他者比較が容易である。また、光学式や磁気式モーションキャプチャシステムは、高価かつ、大掛かりであるため、主に熟練者のスキル抽出に用いられる。初学者が、そのようなモーションキャプチャシステムを用いて動作学習をする機会は少ない。

武道の学習に関する研究では、探索や機械学習を適用し、武道のスキル抽出を行う研究が行われている。齋藤ら [4] は、スポーツ動作映像から身体技能向上に役立つ知識を自動抽出するシステムを設計し、動作姿勢の矯正に適用した。動作映像から抽出した学習者に関する情報を決定木学習に与え、動作姿勢を指導するためのルールを学習させている。しかし、クラスの学習のために専門家の判断が必要になる。また、鈴木ら [5] は、動作映像などの解析に人工知能アルゴリズムを適用する課題として、分析から知識発見に時間を要すること、そのため指導現場に即時にフィードバックできないことを挙げ、剣道の正しい打突動作習得のために、大量のデータを短時間で処理できる加速度センサを用いた素振り評価システムを実現した。これら研究は、動作それ自体に関する定量的データを学習者にフィードバックし、トレーニング支援を実現している。本研究は、動作の時系列における物理的変化から、動作に関する特徴データを生成し、その特徴データを複数学習者間で比較する点で異なっている。

## 3. 実現システム

実現システムの全体構成図を図 1 に示す。本システムは、スポーツ動作映像から学習者の動作情報を抽出し動作姿勢テーブルを生成する機能、動作情報を動作姿勢に応じて時区間に分割し習熟度評価を行う機能、そして、学習者動作と熟練者・習熟者動作の習熟度を比較し、学習者のトレーニングに必要な情報を提示する機能から構成されている。

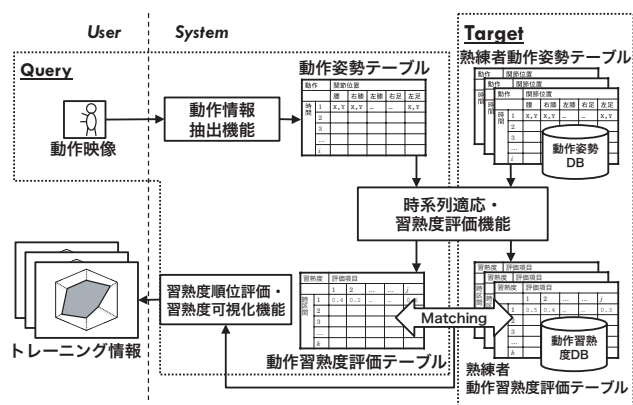


図 1 システム概要図

本システムの基本データ構造として、スポーツ動作映像という時系列データから、動作情報を抽出し格納するために、動作姿勢テーブル (表 1) と動作習熟度評価テーブル (表 2) を設計した。動作姿勢テーブルは、動作の時系列における物理的変

化を表し、横軸に学習者関節箇所、縦軸に時間をとる。動作習熟度テーブルは、動作の特徴データとして習熟度を表し、横軸に習熟度評価項目、縦軸に時区間をとる。表中、 $i$  はスポーツ動作映像の時間長、 $j$  は評価項目の総数、 $k$  は動作姿勢テーブルにおける時区間数を示す。

表 1 動作姿勢テーブルの構成とデータ例

		カラーマーカ装着位置				
		Point1	Point2	Point3	Point4	Point5
時間	1	(452,218)	(430,280)	(458,290)	(432,339)	(459,346)
	2	(451,219)	(430,280)	(457,290)	(432,340)	(459,346)
	3	(451,219)	(430,280)	(457,290)	(431,340)	(459,346)
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$i$					

((452,218): カラーマーカ装着位置・関節箇所の座標点)

表 2 習熟度評価関数にもとづく動作習熟度評価テーブルとデータ例

		評価項目				
		1	2	3	⋮	$j$
時区間	1	1.697	0.300	1.136	⋮	
	2	3.031	2.574	1.117	⋮	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	$k$					

(1.697: 評価関数により算出した習熟度)

本研究では、スポーツ動作映像から学習者の動作情報を抽出するために、具体的なトレーニング対象動作を剣道における飛び込み面打ちとし、学習者の関節箇所にカラーマーカを装着し、動作映像を撮影・分析する。複数の剣道学習者に、飛び込み面打ちのトレーニングにおいて心がけていることを伺ったところ、腰の高さを一定に維持することや、跳躍時に右足を上げすぎないという意見が得られた。そこで、本研究では、カラーマーカを学習者の下肢関節に装着し、動作の進行方向左側面から学習者を撮影し、その動作映像を分析するトレーニング支援システムを開発する。

### 3.1 スポーツ動作映像からの動作情報抽出機能

本システムは、スポーツ動作映像の1フレームごとに学習者の関節箇所を求め、時系列順に動作姿勢テーブルに格納することで、スポーツ動作映像をフレームごと静止画像の集合として分析し、学習者動作の情報を抽出する。カラーマーカから動作情報を抽出する方式について、寺田ら[6]が実現した方式を参考にした。本研究では、蛍光カラーマーカを用いることにより、スポーツ動作映像における背景とカラーマーカの識別精度を高めた。以下に手順の概要と概要図(図2)を示す。

**Step-1** 学習者の動作映像について、カラーマーカを装着した学習者を、動作の進行方向左側面から撮影する。

**Step-2** 動作映像をデコードし、スポーツ動作映像を1秒につき30フレームの静止画像群に変換する。

**Step-3** 静止画像それぞれについてHSV色空間に変換し、カラーマーカ検出の精度を高めるために、静止画像における色数を最大64色に減色する。

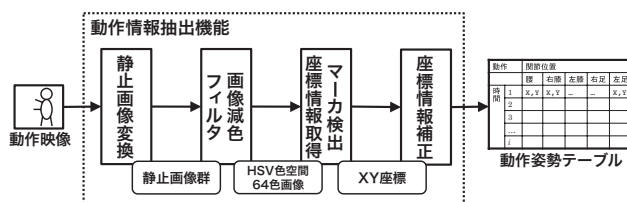


図 2 動作情報抽出プロセスの概要

**Step-4** 減色処理後の静止画像におけるカラーマーカ色を、カラーマーカごとに指定し、静止画像1データごとにカラーマーカ座標を検出する。

**Step-5** 各静止画像におけるカラーマーカ座標について、欠損や誤検出を補正し、時系列順に集約し、動作姿勢テーブルへ格納する。

これにより、学習者動作の動作姿勢情報について、スポーツ動作映像におけるカラーマーカ座標により表現することが可能となる。

### 3.2 時系列適応・習熟度評価機能

時系列適応・習熟度評価機能では、動作情報抽出機能により抽出された学習者動作の動作姿勢テーブルについて、あらかじめ定義した評価関数を用いて学習者動作の分析を行う。本方式では、学習者動作の分析について、スポーツ動作映像より抽出した動作姿勢テーブルを、学習者動作の動作姿勢の変化に応じて時区間に分割し、分割した時区間ごとに習熟度評価を行い、動作習熟度評価テーブルを生成する。

時系列適応では、動作姿勢テーブルを対象に、学習者動作の姿勢の変化、すなわち、学習者に装着したカラーマーカ座標の変化に応じて、動作姿勢テーブルを時区間に分割する。本研究では、学習者の下肢(腰、左右膝、左右足首)に装着したカラーマーカを直線で結び、カラーマーカ座標間の直線がなす多角形の面積を求め、その面積の変化に応じて学習者動作を時区間に分割する。剣道の飛び込み面打ちには、(1)竹刀を振り上げる、(2)左足を引きつける、(3)左足で床を蹴る、(4)竹刀を振り下ろす、(5)右足を着地する、(6)左足を引きつける、という一連の動作を構成する要素が存在する。実現システムでは、学習者の下肢に装着したカラーマーカがなす多角形の面積をもとに、(1)竹刀を振り上げる、(2)左足を引きつける という2つの動作要素を1時区間とし、(3)左足で床を蹴る、(4)竹刀を振り下ろすの2動作要素を1時区間、(5)右足を着地する、(6)左足を引きつけるの2動作要素を1時区間として、学習者動作の動作姿勢テーブルを3つの時区間に分割する(図3)。学習者動作を時区間に分割することにより、本システムは、複数の学習者の時間長が異なる動作を、共通した時区間を持つ動作とし、動作の時区間ごとに習熟度評価を行うことができる。

習熟度評価機能では、動作姿勢テーブルについて、スポーツ動作映像より検出したカラーマーカ座標間の点や線、角度の関係を分析することにより、学習者動作について動作習熟度の評価を行い、動作習熟度評価テーブルを生成する。動作習熟度の評価について、評価関数を用いて、複数の評価項目を時区間ごとに学習者動作の動作習熟度を評価し、動作習熟度評価テーブ

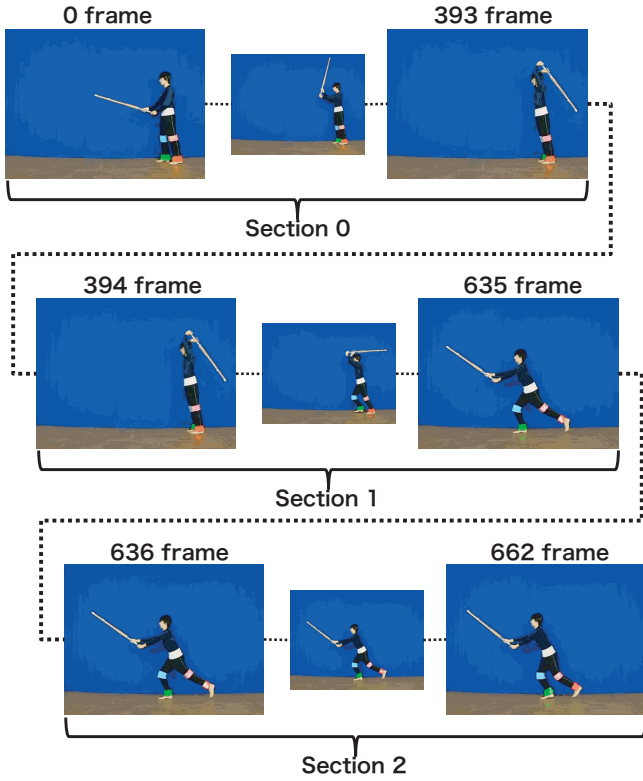


図3 動作姿勢に応じた時区間分割シーンの例

ルを生成する。本研究では、動作における美しい・正しい動作姿勢を満たすための要件として安定度を定義し、安定度を計量するための評価関数  $SL$  (Stability-Level) を定義する。本研究では、剣道学習者が飛び込み面打ちのトレーニングに際して普段から意識していることを、移動安定度評価関数と屈折安定度評価関数として定義した。

本方式では、安定度評価について、動作姿勢テーブルの時区間におけるカラーマーカ座標の変化量を求める。移動安定度について、動作姿勢テーブルの1時区間において、学習者動作の上下移動が少なく、かつ、前進していると高い移動安定度を算出する。すなわち、移動安定度評価関数は、時区間においてY軸方向の移動量が少なく、かつ、X軸方向における移動距離が多いと、学習者動作は高い移動安定度を有していると評価する。移動安定度評価関数を以下に示す。

$$SL = \frac{\sum_{i=0}^{i<g} \Delta \vec{x}_i}{\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \vec{y}_i|} \quad (1)$$

ここで、

- $g$ : 動作姿勢テーブルの時区間におけるフレーム間数
- $i$ : 動作姿勢テーブルの時区間における、時間  $T_n$  フレームと時間  $T_{n+1}$  フレームの間隔識別子
- $\sum_{i=0}^{i<g} \Delta \vec{x}_i$ : 動作姿勢テーブルの時区間の開始時と終了時における、学習者に装着したカラーマーカのX軸方向への移動距離
- $\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \vec{y}_i|$ : 動作姿勢テーブルの時区間のフレームごとにおける、学習者に装着したカラーマーカのY方向への移動量とする。移動安定度評価関数では、X軸方向への変化について、

時区間の開始時と終了時における移動距離に着目しているが、Y軸方向への変化について、時区間におけるフレームごとの移動量に着目している。なお、移動安定度評価関数  $SL$  について、カラーマーカ座標 Y 軸方向において、時区間の開始時から終了時における移動距離では、時区間内における Y 軸方向への移動量を求めることができない。カラーマーカ座標の Y 軸方向における変化として、時区間の開始時と終了時において、同じ Y 座標であっても、時区間内のフレームごとに着目したとき、Y 軸方向へ上下移動している可能性がある。そのため、1 時区間内においてどれだけ Y 軸方向へ移動したか、すなわち、1 時区間におけるフレームごとの Y 軸方向への移動量を求める必要がある。また、(1) 式において、 $\sum_{i=0}^{i<g} \Delta \vec{x}_i = 0$  の時と、 $\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \vec{y}_i| = 0$  の時を、それぞれ

$$SL = \begin{cases} -\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \vec{y}_i| & (\sum_{i=0}^{i<g} \Delta \vec{x}_i = 0) \\ \sum_{i=0}^{i<g} \Delta \vec{x}_i & (\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \vec{y}_i| = 0) \end{cases} \quad (2)$$

とする。屈折安定度  $SL$  について、学習者動作において左ひざ角度を維持することとし、以下のように定義する。

$$SL = \frac{1}{\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \theta_i|} \quad (3)$$

ここで、

- $g$ : 動作姿勢テーブルの時区間におけるフレーム間数
  - $i$ : 動作姿勢テーブルの時区間における、時間  $T_n$  フレームと時間  $T_{n+1}$  フレームの間隔識別子
  - $\sum_{i=0}^{i<g} |\Delta \theta_i|$ : 動作姿勢テーブルの時区間のフレームごとにおける左ひざ角度の変化量の総和
- とする。屈折安定度評価関数は、学習者動作が左ひざの角度を一定に維持している場合、高い屈折安定度を算出する。本研究では、学習者に装着した全てのカラーマーカについての移動安定度と、左ひざの屈折安定度を求めるため、評価項目の総数は6である。動作習熟度評価テーブル  $T$  は以下のとおりである。

$$T = \begin{bmatrix} SL_{11} & \cdots & SL_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SL_{k1} & \cdots & SL_{kj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、

- $k$ : 動作姿勢テーブルにおける時区間の総数
  - $j$ : 評価項目の総数
  - $SL_{kj}$ : 評価関数により算出された安定度
- とする。時系列適応・習熟度評価機能により、スポーツ動作映像を入力した学習者は、スポーツ動作映像データを用いて、学習者自身の技能状態を習熟度として表現でき、トレーニング情報獲得のためのクエリとすることができる。
- なお、これらの評価関数は、動作における美しい・正しい動作姿勢を満たす複数の要件のうちの一つである。本来、スポーツ動作の習熟度は、これらの安定度評価関数が示す習熟度のみによって、一意的に決定されるものではない。そのため、本システムは、熟練者や経験者の動作習熟度について、初学者の動作習熟度より低い値を算出することがある。これは、熟練者や

経験者の動作が稚拙なことを示すのではなく、安定度という動作を評価する要素に着目したとき、初学者の方が習熟度が高いことを示す。評価関数の主な目的は、学習者動作ごとに、習熟度の向上を計量することである。すなわち、評価関数は、学習者のトレーニング前とトレーニング後の動作習熟度の変化において、習熟度の度合いが高くなることにより、トレーニングの効果を検証するための関数として用いるものである。

### 3.3 習熟度順位評価・習熟度可視化機能

習熟度順位評価・習熟度可視化機能では、時系列適応・習熟度評価機能により評価された学習者動作について、熟練者動作の動作習熟度評価テーブルをもとに習熟度の順位付けを行い、熟練者動作や学習者動作を比較分析し、学習者動作の習熟度に応じたトレーニング情報を提示する。本研究では、熟練者動作の動作習熟度評価テーブルについて、あらかじめ、熟練者のスポーツ動作映像を分析し、熟練者の動作習熟度評価テーブルを生成しておく。

習熟度順位評価では、動作習熟度評価テーブルについて、熟練者動作の動作習熟度評価テーブルと、複数の学習者動作の動作習熟度評価テーブルの差を評価し、その差が少ない動作習熟度評価テーブルに高順位を付与することで、複数の動作習熟度評価テーブルを順位付けする。熟練者動作にもとづく習熟度順位評価を、動作習熟度評価テーブル間の差  $D$  として、以下のように定義する。

$$D = \sum_{n=0}^{n < k} \sum_{m=0}^{m < j} \sqrt{(T_{nm} - Q_{nm})^2} \quad (5)$$

ここで、

- $n$ : 動作習熟度評価テーブルにおける時区間
- $m$ : 動作習熟度評価テーブルにおける評価項目
- $k$ : 動作習熟度評価テーブルにおける時区間の総数
- $j$ : 動作習熟度評価テーブルにおける評価項目の総数
- $T_{nm}$ : 熟練者動作の動作習熟度評価テーブル
- $Q_{nm}$ : 学習者動作の動作習熟度評価テーブル

とする。本稿では、トレーニング情報を検索する学習者よりも習熟度順位が上位の学習者動作を習熟者動作とする。

習熟度可視化機能では、熟練者動作や習熟者動作の動作習熟度評価テーブルをもとに、学習者動作の動作習熟度評価テーブルに応じたトレーニング情報を生成する。本システムでは、学習者動作の動作習熟度、および、熟練者動作・複数習熟者動作の動作習熟度を、グラフに描写し提示する。そのために本方式では、学習者が、現在の学習者の動作習熟度と、熟練者動作・複数習熟者動作の動作習熟度を比較できるように、熟練者動作・複数習熟者動作の動作習熟度評価テーブル  $M$  を1テーブル生成する。テーブル  $M$  は、熟練者動作・複数習熟者動作の動作習熟度評価テーブルを対象に、時区間ごとにそれぞれの評価項目について、平均値を求め格納する。

$$M = \begin{bmatrix} \overline{T_{11}} & \cdots & \overline{T_{1j}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{T_{k1}} & \cdots & \overline{T_{kj}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、

- $k$ : 動作習熟度評価テーブルにおける時区間の総数
- $j$ : 動作習熟度評価テーブルにおける評価項目の総数
- $\overline{T_{kj}}$ : 動作習熟度評価テーブルにおける熟練者動作・複数習熟者動作の各評価項目の平均値

これにより、本システムは、熟練者動作・複数習熟者動作の動作習熟度平均値と、学習者動作の動作習熟度を比較し、学習者動作の習熟度に応じたトレーニング情報を提示する。

## 4. 評価実験

実現システムについて、プロトタイプシステムの実装を行った。評価実験では、学習者にプロトタイプシステムを用いて剣道動作のトレーニングを行ってもらい、トレーニング前後の学習者動作の習熟度順位について、どのような変化があるか確認することにより、提案方式の有効性を検証する。

### 4.1 プロトタイプシステムによるトレーニング情報

3.3にて述べたトレーニング情報について、グラフを用いて描写する(図4)。プロトタイプシステムでは、時区間ごとに1つのグラフを生成するため、剣道の飛び込み面打ちを対象としたトレーニング情報については、3枚のグラフを提示する。グラフは、動作習熟度評価テーブルの評価項目を軸として、学習者動作の習熟度と、熟練者・複数習熟者動作の習熟度平均値を表示する。青色の線が熟練者・複数習熟者動作の習熟度、赤色の線が学習者動作の習熟度である。学習者動作の習熟度が、熟練者・複数習熟者動作の習熟度に近づくことが望ましい。また、グラフにおけるそれぞれの評価項目について、グラフ外周に近づくほど高い習熟度を示す。

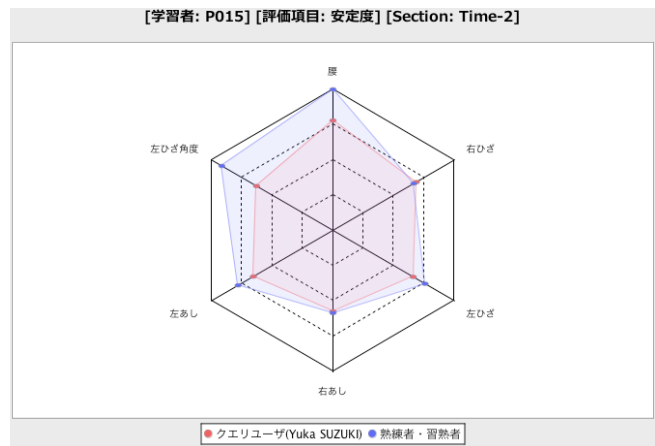


図4 学習者動作の習熟度に応じたトレーニング情報の例

### 4.2 実験

本実験では、学習者が本システムを用いて動作習熟度を向上させることができるか確認するため、10代から20代の剣道学習者4名(表3)を対象に実験を行った。

まず、学習者4名は、それぞれトレーニング前剣道動作を10回ずつ撮影し、本システムに動作映像を入力する。学習者は、本システムにより提示されたトレーニング情報を参照し、剣道動作のトレーニングを任意の時間行う。その後、それぞれ学習

表3 本システムを利用しトレーニングを行う学習者の概要

学習者	段位	最近の稽古回数・年数
初学者1	無段	週3回・3ヶ月
初学者2	無段	週0回・3年
経験者1	三段	週2回・9年
経験者2	三段	週3回・8年

者は、トレーニング後の剣道動作を10回撮影し、本システムに動作映像を入力する。全ての学習者の動作映像が揃った時点で、学習者のトレーニング後動作について、習熟度が向上したか確認する。学習者の動作について、デジタルカメラ CASIO EX-F1 のハイスピードモード 300fps と三脚を用いて、カラーマーカーを装着した学習者の左側面を撮影した。動作映像は、被写体である学習者の体が動き始める 30 フレーム前を動作開始、跳躍後の右足着地時から 30 フレーム後を動作終了とし、映像の動作部分を手動で切り抜いた。なお、本システムがトレーニング情報を生成するために、あらかじめ熟練者動作 1 データ、経験者動作 30 データを本システムに入力する。本システム内に存在する動作データの合計は、学習者 4 名のトレーニング前とトレーニング後それぞれ動作 10 回を含め、111 データである。

#### 4.3 結果

経験者 2 名を対象としたトレーニング支援では、学習者動作の習熟度順位の向上を確認できた。一方、初学者 2 名について、本システムを用いたトレーニング支援では、動作習熟度の向上を確認できなかった。表 4 に、本システムを利用しトレーニングを行った学習者の習熟度順位を示す。順位は、トレーニング前後それぞれ 10 回の動作について、習熟度順位の平均値を示す。

表4 本システムを利用した学習者動作の習熟度順位

学習者	トレーニング前	トレーニング後
初学者1	49.5 位	81.0 位
初学者2	42.2 位	47.0 位
経験者1	59.0 位	51.5 位
経験者2	74.8 位	71.2 位

(トレーニング前後動作 10 回の習熟度順位平均値/111 データ中)

#### 4.4 考察

初学者のトレーニング後動作習熟度順位が低下していることについて、初学者が、本システムにより提示されたトレーニング情報を閲覧し、以後どのように動作を行うか意識できたにもかかわらず、初学者の意図したとおり体を動かさないことに起因すると考える。初学者のトレーニング前後 10 回の習熟度順位について、表 5 に示したとおり、トレーニング後の方が標準偏差が大きくなっている。経験者 2 名は、トレーニング後の習熟度順位が向上し、習熟度順位の標準偏差も小さくなっている。このことから、初学者について、プロトタイプシステムによるトレーニング情報を提供されても、動作習熟度を即座に向上させることが困難であると考えられる。

本システムが提示したトレーニング情報は、熟練者や習熟者と学習者との動作習熟度について、相対的な比較を示したのみ

表5 トレーニング前後動作 10 回の習熟度順位における標準偏差

学習者	トレーニング前	トレーニング後
初学者1	29.10994485	37.87992726
初学者2	26.66583332	34.07181957
経験者1	34.28637565	20.53317100
経験者2	36.00246905	21.72965204

である。学習者は、動作習熟度向上のために、具体的な改善方法を学習者自身で考えなければならない。そのため、本システムのトレーニング情報について、熟練者や習熟者と、学習者との動作の差異を具体的に示す必要がある。

また、表 4 に示したとおり、初学者の習熟度順位が、経験者の習熟度順位よりも高くなっていることから、評価関数と習熟度の相関性を検証し、もしくは、さらに評価関数を増やすことにより、学習者動作の習熟度算出の精度を高めることが今後の課題である。

## 5. おわりに

本稿では、動作の姿勢が美しい・正しいということが定義されているスポーツ、武道を対象として、学習者の動作映像を分析し、動作の習熟度に応じたトレーニング情報を提供するシステムを示した。本システムは、学習者よりスポーツ動作映像が入力されると、あらかじめ定義された評価関数を用いて、動作映像における学習者の関節位置の変化から、動作の特徴データとして動作習熟度評価テーブルを生成する。そして、熟練者の動作習熟度評価テーブルをもとに、データベース内に存在する全ての動作習熟度評価テーブルについて、動作の技能、すなわち、習熟度による順位付けを行う。スポーツ動作映像を入力した学習者動作の習熟度順位よりも、上位の動作習熟度評価テーブルの評価項目を分析することにより、学習者にトレーニング情報を提示する。

本研究の特徴は、トレーニング支援システムを Query-by-Video 環境として実現したことにある。本システムは、スポーツ動作映像から、評価関数を用いて動作の特徴データを生成することにより、複数学習者間における人体モデルの近似などを行わずに、トレーニング情報を提示できる。本システムのユーザは、複雑なトレーニング情報検索式を記述すること無く、ユーザ自身の動作映像を入力するのみで、ユーザの動作習熟度に応じたトレーニング情報を得られる。実現システムの有効性について、トレーニング対象スポーツ領域における経験者が、本システムを利用しトレーニングを行う場合、学習者動作の習熟度を向上できることを、実験により確認できた。

## 文献

- [1] 全日本剣道連盟, “剣道試合審判規則,” 第 2 章試合 第 2 節有効打突 第 12 条, <http://www.kendo.or.jp/kendo/rules/rule1.html>

- [2] 恵土孝吉, “剣道の科学的上達手法,” スキージャーナル社, 剣道日本, 2007.
- [3] 有馬佳代, 前坂茂樹, 大坪壽, “剣道における勝負の構造について ～剣の理法より～,” 鹿屋体育大学学術研究紀要, 第 20 号, pp.1-6, 1998.
- [4] 齋藤真也, 小森麻央, 杉山岳弘, 佐治斉, 杉山融, 山口高平, “少年剣士のフォーム矯正のためのイメージデータマイニング,” 情報科学技術フォーラム一般講演論文集, 2002(3), pp.5-6, 2002.
- [5] 鈴木文菜, 吉田泰将, 村山光義, 内山孝憲, “加速度センサを用いた剣道竹刀の素振り評価システムの開発,” 電子情報通信学会技術研究報告 ME とバイオサイバネティクス (MBE), Vol.108, No.98, pp.11-16, 2008.
- [6] 寺田賢治, 宮原宏幸, 久保靖, “阿波踊りの動作の定量化の試み,” 画像電子学会誌, 第 34 巻 第 3 号, pp.220-227, 2005.