動画画像処理によるスポーツ運動解析の研究*

—鉄棒競技の自動採点システムに向けて—

辛 貞 殷** 小 沢 慎 治***

A Study on Motion Analysis of an Artistic Gymnastics by using Dynamic Image Processing
- for a Development of Automatic Scoring System of Horizontal Bar -

Jeongeun SHIN and Shinji OZAWA

This research introduces an automatic scoring mechanism based on motion analysis of a player by video image processing and database of skills in gymnastics. The automatic scoring system will be made for the horizontal bar which is one of the gymnastics in particular. A scoring result is equivalent to scoring until now according to experience of a referee and the rulebook, or in order to perform highly precise scoring, it does not use the standard of scoring only with defined performance figure or a text. It is the new approach of this research to describe them as a program to be the databases which analyzed them. The result of this research considers scoring of a referee as a correct answer. Thereby, evaluation of a system can be performed, and if the system performance is enough, it will be considered to be useful that it can use for evaluation of a referee etc.

Key words: horizontal bar, automatic scoring, motion analysis

1. ま え が き

人間のジェスチャや姿勢を計測・認識する多くの研究は開発、実用化されており、それらを歩行者、スポーツ、ダンス、作業などの映像に適用した試みも行われている^{2)~5)}。人物の動作を解析する研究も数多くあり、すでに商品化されているものもある。これはフォーム解析を可能として技能向上や指導に有用であるが、システムは計測を行うだけであり、客観的に評価を行う研究はあまり行われていない。

このシステムの動作解析エンジンの多くは、関節などの部位の位置を3次元時系列として得るものであり、精度良く求めるためには必要な部位にマーカを貼る、ブルーバックのような単純な背景を用いるなどの制約があるものが多い。動作解析の目的は、CGによって動作を再現したり、模範動作とともに表示して、ユーザーが比較することによりフォームを改善するなどである。

また今までサッカーなどのようなゲーム映像も対象となっており、選手・ボールの存在と移動を追跡することが主たる研究要素であった。これは、画像処理を用いて検出された選手およびボールの軌跡に基づいてどのようなプレーが行われているかを判定するものであり、重要な場面または好みの画面だけを抽出してダイジェスト映像を作成したり、選手・監督の立場で戦術解析に利用することを目指している。

本研究では、スポーツの中で鉄棒競技のように選手が演技を行い審判が主観的に採点することによって順位が決定されるようなスポーツ(演技スポーツと名付ける)を新たな対象として、動画画像処理による選手の動作解析に基づいて、自動採点することを目的としている。

Fig.1 Objective of the research

これは現実の審判が規準にしているルールブックに基づいた客観的な採点結果を求める点が新しい視点である。また、採点結果が今までの審判員が経験とルールブックに従って採点を行うのと同様か、より高精度な採点を行うために、採点基準をキーポーズと文章のままではなく、それらを特徴量のデータベースと採点するプログラムとして記述することが本研究の新しいアプローチであると考えられる。

また他の演技スポーツでは、選手の演技が「正しく行われたかどうか」、すなわち安定して、かつ、正確な姿勢により行われたかどうかという「正確さ」を客観的に採点する技術点と、「美しく行われたかどうか」、さらには演技の全体的な組み合わせや雰囲気の主観的に採点する芸術点に分けているものもある。本研究では「正確さ」に重きが置かれている鉄棒競技を対象として、「正確さ」を自動採点することを目標としている。今後、他の競技にも適用するときには「美しさ」の採点も必要となるがこれについては今後の研究課題とする。

本稿では、図1に示す流れのように、まず競技映像を撮影する。

* 原稿受付 平成 20 年 6 月 2 日

** 慶應義塾大学院 理工学研究科

(神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

*** 愛知工科大学 (愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2)

Fig.2 The relationship between performance, skill and key-pose

次に動画画像処理による動作分析として一連の演技画像から技のセグメンテーションを行い、採点基準であるルールブックでのキーポーズに基づいて技の判定を行う。また、選手の姿勢を解析し、ルールブックでの採点規則により評価を行う。この結果から、鉄棒競技をコンピュータにより自動採点できる可能性を考察する。

2. 演技スポーツにおける採点

2.1 採点規則

演技スポーツにおいては審判が主観的に採点しているように見えるが、選手の演技を客観的に評価するために採点規則が細かく定められている。採点規則の目的は、それに基づいて選手を正しく評価することと、コーチと選手に対して競技会での演技構成の方向性を導くこと、そして審判・コーチ・選手が競技会で頻繁に必要とする専門的な情報や規則を提供することである¹⁾。

2.2 鉄棒競技における採点規則

本研究では、対象とする演技スポーツを「鉄棒競技」と決定した。

まず鉄棒競技の採点には、「A」と「B」の2つの得点がある。A審判(2名)は、技の種類、難度、要求グループのチェックなど演技の内容についてのAスコア(加点)を、B審判(4名)は、演技構成や技術、姿勢に関する演技の質についてのBスコア(減点)をそれぞれ算出する。

ここで画像処理としてのAとBのスコアの算出は、前者が、技のセグメンテーションや判定、後者が、選手の姿勢解析により可能となると考えられる。

2.3 鉄棒競技における演技

鉄棒競技のルールブックでは、車輪や蹴上がりなどの「技」の種類が141個定義されている。そして鉄棒競技での「演技」とは、これらのいくつかの「技」を30秒程度連続して行うことにより構成されるものである。

またルールブックに記述されている技には、その技を決定する重要な姿勢が時系列に図として定義されており(図2のkp:1-4)、技ごとに、難度、減点項目などが記されている。

これらの演技、技、キーポーズの関係は図1に示されている。

3. 提案手法

3.1 手法の概要

提案手法の全体の流れを図3に示す。

まず、「技」のキーポーズの記述法を確立し、技のデータベースを構築する。そのため、標準体型である選手の3次元人体データを用意し、「技」のキーポーズの関節点に適合するような3次元姿勢を定め、キーポーズに対応する3次元人体のシルエット画像を得る。このキーポーズのシルエット画像、3次元姿勢を技のデータベースの特徴量とする。

Fig.3 The flowchart of proposal method

Fig.4 The model which defined by joint point and joint angle

次に、これらのデータベースに基づいて選手の演技を採点する。そのため、動画画像での各フレームから選手のシルエット画像を抽出し、データベースでの各技のキーポーズのシルエット画像とマッチングを行うことにより技の判定を行う。

これにはあらかじめ実画像から技のセグメンテーションの処理をしておき、セグメント化された技でのマッチングを行う。このマッチングの相関がキーポーズの動作順番でピークが現れた技を判定結果とする。これにより、選手がどの技を行ったか判定することが可能となり、さらにデータベースからその技のグループチェックや難度が決定される(Aスコア)。

また判定された技が正確に行われたかを評価する。そのために、選手の動作を解析し、ルールブックである減点項目の採点規則に基づいて評価を行う。これにより、選手の演技が正しく行われたかどうか定量的に評価できる(Bスコア)。

本稿では、まず動画画像からセグメントされた技をデータベースに基づいて技の判定を行う。次に、選手の姿勢を解析し、評価のためにレベルの異なる選手の姿勢との比較を行い、採点規則により評価を行う。

本研究の実験結果により、選手の一連の演技動画から「技」の種類、難度およびどのように行われたかが定量的に評価され、ルールブックでの加点・減点要素の検出が可能となることを検討する。

3.2 技のデータベース生成

3.2.1 キーポーズから関節位置や関節角度算出

ルールブックで定義されている141個の技の画像をスキャナーにより獲得する。そして各技でのキーポーズの姿勢から関節位置(ρ)と関節角度(θ)を推定し、それらをデータベースの特徴量とする。

ここで関節位置(ρ)とは、鉄棒の棒の中心を原点からキーポーズでの関節位置までの距離であり、関節角度(θ)とは、関節位置から図4のxとなす角度を関節角度とする。

Fig.5 Silhouette image of key-pose (The example of Kip)

Fig.6 Displacement graph created from posture parameters of key-pose (The example of a Giant Swing)

3.2.2 3次元人体データによるキーポーズのシルエット画像生成

本研究では、あらかじめ標準的な体型である選手の3次元人体スキャンデータを用意する。この3次元人体データをキーポーズから得た関節点に適合するように姿勢を定め、3次元位置(関節位置、関節角度)を定める。

キーポーズにおける3次元姿勢を、図5のように3次元人体に基づいてキーポーズのシルエット画像に変換しておく。

3.2.3 キーポーズの関節位置変位グラフ生成

本研究では、キーポーズの動作を解析するため、キーポーズでの関節位置と関節角度の変位グラフを生成する。 kp は、キーポーズの順番であり、 j は、キーポーズでの関節位置番号(Joint-point)である。

このグラフ(図6)により、技でのキーポーズの動作がどのように変化しているかがわかる。このグラフは、動画像での選手の動作からも作成するので、正しい姿勢となるキーポーズの動作と比較することも可能となる。

以上のキーポーズの姿勢を解析した結果(キーポーズの関節位置と関節角度および選手のシルエット画像)を用いて記述法を検討し、データベースを構築する。そしてこれらの特徴量に基づいて動画像での選手の演技から技を判定し、姿勢を解析する。

3.3 競技映像の解析

3.3.1 選手のシルエット画像生成

本研究では背景差分をベースとして実画像から選手のシルエットを抽出する。

3.3.2 シルエットマッチングによる技の判定

一技の判定(Aスコア)

各フレームで抽出された選手のシルエット画像と比較対象となる技のキーポーズのシルエット画像とマッチングを行い、技の判定を行う(図7)。

判定方法は、まずキーポーズごとに相関値が極大となったフレームを $f(kp)$ とする。 $f(kp)$ がすべてしきい値(th)より高く

Fig.7 Matching for skill determination

Fig.8 the frames of section fs1, fs2 and fs3 in a giant swing for each player

なり、かつ、 $f(1) < f(2) < \dots < f(kp1)$ となった時、比較したキーポーズの技と一致したと判定する。

3.3.3 シルエット画像から選手の関節位置や角度算出 一姿勢解析(Bスコア)

抽出された選手のシルエット画像から選手の関節位置や関節角度を推定する。対象部位である、頭部($jp=2$)、首($jp=3$)、腰($jp=4$)、膝($jp=5$)や足($jp=6$)の関節点の位置を以下の流れにより求める。

- (1)最初のフレームで選手の関節位置を指定
- (2)前フレームの関節位置に基づいてテンプレート画像生成
- (3)現在フレームと前フレームでのテンプレート画像との正規化相関マッチング
- (4)各フレームで抽出された選手の関節位置と角度を保存

3.3.4 選手の関節位置の変位グラフ生成

キーポーズと同様に、セグメントされた技ごとに各フレームでの選手の関節位置や関節角度の変位グラフを生成し、選手の姿勢を解析する。

また関節位置の変位グラフにより解析した選手の姿勢を、定量的に評価する。そのため、レベルが異なる選手の姿勢の差を関節位置(jp)ごとに、以下の式により算出する。(n:正しい演技 n' :採点対象演技)($f \in fs_{kp}$)

$$D_{\rho(jp, kp)}^{(p_n, p_{n'})} = \sum_f \sqrt{(\rho_{(jp, kp)}^{p_n}(f) - \rho_{(jp, kp)}^{p_{n'}}(f))^2}$$

$$D_{\theta(jp, kp)}^{(p_n, p_{n'})} = \sum_f \sqrt{(\theta_{(jp, kp)}^{p_n}(f) - \theta_{(jp, kp)}^{p_{n'}}(f))^2}$$

ここで、選手の動きは同じ動作でも選手のレベルによって動作の速度が異なる。そこで同じ動作での姿勢の差を正しく算出するために、各選手の動作でのフレームからキーポーズとマッチするフレーム $f(kp)$ を基準とし、その基準となるフレームの前後数フレームをサンプリングすることにより各選手のマッチングの区間($fs1 \sim fs4$)を決定しておく(図8)。

Table 1 About experiment environment

撮影機器	ビデオカメラ (DV)
撮影場所	体育館などの室内
背景条件	自然に近い背景
服装条件	実際の競技時の服装
対象動作	競技会での鉄棒演技
対象人物	上・中・初級選手

Fig.9 The example of front and side images

4. 実験

4.1 映像撮影

すでに行っている予備実験の結果に基づいて、表1のような撮影環境により鉄棒演技を撮影し、正面と側面からの映像を入力とする。映像例を図9に示す。

撮影での演技は、競技会で行うものと同等な内容を、上・中・初級の選手が演技することを実験対象とする。

実験では、まず動画画像での選手のシルエット画像とデータベースでのキーポーズのシルエット画像とのマッチングにより技の判定を行う。それから判定された技での選手の姿勢を、選手の関節位置の変位グラフにて解析し、ルールブックに基づいて評価を行う。なお、あらかじめ予備実験として実画像から技のセグメンテーションは手動で指定してある。

4.2 技の判定(Aスコア)

予備実験により動画画像での選手の一連の演技から、技ごとにセグメントしたフレーム区間において、データベースにある各技のキーポーズとのマッチングを行うことにより技の判定を行った。

実験は、選手の演じた技が車輪の場合、データベースにある車輪(図10)と蹴上がり(図11)のキーポーズのシルエット画像とのマッチングを行い、 $f(kp)$ を算出した実験結果である。

図11は、図10と同じ演技について蹴上がりのキーポーズとのマッチングにより $f(kp)$ を算出した実験結果である。

また、これらの判定処理を上級、中級、初級選手に対して行った結果を表2に表す。表2での車輪のキーポーズとマッチングした結果、3つの演技とも相関の極大値 $f(kp)$ がすべてしきい値(th)より高くなっており、 $f(kp)$ が昇順であることが確認できた(表2での□は、しきい値より高くなったフレームである)。

その一方、蹴上がりのキーポーズとマッチングした結果、kpすべてがしきい値より相関が高くなっておらず、また相関のピークがキーポーズの順番ではない不規則な順番となった。この判定処理により、車輪の技が行っていることが確認でき、車輪として正しく判定できた。

4.3 姿勢解析(Bスコア)

本稿では選手の姿勢を解析するため、同じ演技を行っている上級、中級、初級選手の姿勢を関節位置変位グラフにて解析し、比較を行った。

Fig.10 Matching result for skill determination (the example of a giant swing)

Fig.11 Matching result for skill determination (the example of a kip)

Table 2 Score A: $f(kp)$ and Scoring

	技(演技1)		技(演技2)		技(演技3)	
車輪(4): $f(kp)$	4 19 50 66	○	4 18 40 56	○	6 18 42 59	○
蹴上がり (5): $f(kp)$	2 13 53 45	×	3 8 44 32 41	×	3 8 45 33 42	×
	40					

演技1: 上級選手, 演技2: 中級選手, 演技3: 初級選手

○は、マッチングしたキーポーズと一致したと判定

×は、マッチングしたキーポーズと一致しないと判定

Fig.12 The displacement graph of a high level, a middle level and a low level player in a giant swing

図12では車輪の技を行っている選手の姿勢(ρ , θ)をグラフにした結果である。

本研究では上級選手の姿勢を正しい姿勢と見做し、上級選手と中級選手、上級選手と初級選手の姿勢の差をそれぞれ算出し、評価を行った。

図12のグラフを見ると、上級選手と初級選手のグラフで関節位置が大きくずれており、このずれを指標化することにより、選手の姿勢を点数に変換することができる。

Table 3 Example of demerit point item

欠点項目	小(0.10)	中(0.30)	大(0.50)
正しい静止姿勢からの角度の逸脱	15° まで	16° -30°	31- 45° を越える

Fig.13 The difference graph of posture of three players (upper : The difference of joint position, down : The difference of joint angles)

Table 4. Example of Scoring score B (in a giant swing)

	fs1	fs2	fs3	fs4	合計
2 : 中級	小(-0.1)	小(-0.1)	小(-0.1)	小(-0.1)	(-0.4)
3 : 初級	大(-0.5)	大(-0.5)	小(-0.1)	小(-0.1)	(-1.8)
	中(-0.3)	小(-0.1)	×2	×2	

さらに、表3は、ルールブックでの減点項目の例であり、選手同士の関節角度の差が算出できれば、表3のような採点規則により減点採点が可能となる。

具体的に選手の関節角度の差をグラフとして表したものが図13である。図13は、図8の車輪での各選手のマッチングの区間(fs1~fs4)で、関節(jp=1~5)ごとに関節角度の差を算出し平均を計算してグラフにしたものである。図13では、特にfs1, fs2の区間で初級選手(P3)の膝(jp=4)と足(jp=5)の関節角度を上級(P1)の関節角度と比べた結果、姿勢の差が大きいことがわかる。そして、これらの差は欠点項目の例(表3)により、初級選手の膝や足の姿勢が中と小の減点となった。

最後に、車輪での上級選手の姿勢を正しい姿勢として中級、初級選手の姿勢を評価し、減点処理(Bスコア)を行った結果を表4に表す。本研究の実験結果により、演技が上手ではない選手などレベルが異なる選手の姿勢を比較することができ、採点規則による姿勢の評価が可能となったと考えられる。

5. 結 論

本研究は鉄棒競技において動画画像処理による自動採点システムを構築することを目的とした。本研究では、動作が簡単な技である車輪を対象技とし、評価を行うために上・中・初級選手を採点対象とした。

まずAスコアを算出するため、動画画像での選手のシルエ

ット画像と採点基準であるルールブックでのキーポーズのシルエット画像とのマッチングを行い、技の判定を行った。次に選手の姿勢を解析しBスコアを算出するため、各フレームから選手の関節位置と関節角度を算出し関節位置の変位グラフを作成した。

さらに上級選手の姿勢を正しい姿勢とし、レベルが異なる選手の姿勢をグラフにより解析し、ルールブックでの採点規則により評価することができた。

そこで本研究の実験結果により、鉄棒競技をコンピュータにより自動採点することが可能となると考えられる。また本研究の結果は、実際の審判員の採点を正解と見做して、システムの評価が可能であり、システムの性能が十分であれば審判員の評価に用いることも可能となるなど、有用性が大きい期待できる。

今後の課題としては、画像処理として試合会場という選手領域の抽出が困難な背景のもとでより正確な選手のシルエットを抽出すること、技のセグメンテーションを自動化することがある。また、システムを完全に近づけるために、鉄棒の正面からの映像も用いて、捻りなどより複雑な動作が含まれているすべての「技」を解析すること、また「Bスコア」に含まれている、技や演技のスピードに関する時間的な要素の採点を追加することが必要である。さらに本研究では、「正しさ」の評価を「上級者の演技」と比較しているが、最終的には絶対的な評価のシステムを構築することを目指している。そのために、ルールブックにあるキーポーズの離散的時系列動画画像から満点の「演技動画画像」を生成することが必要である。また、将来的には感性情報処理を用いて姿勢のパラメータから「美しい」、「優しい」といった感性的な事柄をコンピュータにより自動的に処理するシステムを構築したい。

謝 辞

本研究に当たり、多くの貴重なご教示を頂くとともに、演技の実演、撮影などご協力を頂いた、中京大学中山彰規教授と体操部員の皆さんに深く感謝の意を表します。

また本研究の一部はグローバル COE プログラム「アクセス空間支援基盤技術の高度国際連携」により行われました。

参 考 文 献

- 1) 日本体操協会：男子体操競技採点規則 2006 年版。
- 2) 近藤拓也，山際貴志，山中光司，山本正信：動画画像からの動作感性情報の抽出，電子情報通信学会論文誌，J80-D-II，1 (1997) 247。
- 3) 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，34，3，(2005) 220。
- 4) 瀧剛志，長谷川純一：チームスポーツにおける集団行動解析のための特徴量とその応用，電子情報通信学会論文誌 D-II，J81-D2，8，(1998) 1802。
- 5) 藤村光，杉原厚吉：優勢領域に基づいたスポーツチームワークの定量的評価，電子情報通信学会論文誌 D-II，J87-D2，3，(2004) 818。