

フェーズ分割に基づく熟達者との比較による 側転運動の差異検出手法の検討

寺本 直暉†

越智 洋司‡

1. はじめに

近年、スポーツや教育現場において、動作の習熟度を客観的に評価する技術の需要が高まっている。特に体操競技では、動作のタイミングや姿勢が競技結果に直結するため、正確な動作評価が重要である。機械学習技術や骨格情報の解析技術を活用することで、学習者の動作を詳細に分析し、客観的なフィードバックを提供することが可能である[1]。

本研究では、骨格推定技術によって得られた時系列関節角度データを用いて、熟達者（見本動画）と初心者の動作を比較し、その差異を定量的に分析・可視化する手法を提案する。本手法では、フェーズ別関節角度差に基づく段階的なラベリングを行い、学習者と見本動作との動作差を定量的に評価可能とする。

2. 研究内容

2.1 本研究の目的

本研究の目的は、側転動作を対象とし、骨格データを用いて熟達者と初心者の動作を比較し、フェーズごとの差異を明らかにすることである。主観的評価に依存せず、客観的な指標に基づくフィードバック手法を確立することで、効率的な指導支援を目指す。

2.2 研究アプローチ

本研究では、側転動作における熟達者と初心者の運動特性の差異を、客観的かつ定量的に評価するために、以下のアプローチに基づいて分析を行う。

(1) 側転動画からの骨格データの抽出

側転動画に対して、全身骨格の 3 次元座標を推定し、各関節の位置情報を時系列データとして抽出する。

(2) DTW による時系列データ補正

動作の進行速度やタイミングのばらつきを補正するため、関節角度の時系列データに対して動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping: DTW) を適用する。これにより、異なる時間スケールで実行された動作間でも正確な対応付けが可能となる。

(3) 側転動作フェーズ分割

側転動作全体を運動学的に意味のあるフェーズに分割し、対応する関節角度を抽出する。熟達者と初心者の差異を動作全体の時間的構造を考慮して分析可能となる。

(4) フェーズ間での角度差に着目した差異検出

フェーズごとに算出された関節角度の差異の程度を段階的に評価する。従来の主観的評価に依存するのではなく、動作精度を数値的に表現することで、明確かつ再現性の高い評価指標を構築する。

3. 提案手法

3.1 骨格データの抽出

本研究では MediaPipe Pose を用いて動画から 3 次元の骨格座標の推定を行い、そのデータを用いて、側転動作にお

いて重要 8 箇所の関節角度（ $\angle$ 左肘、 $\angle$ 右肘、 $\angle$ 左腰、 $\angle$ 右腰、 $\angle$ 左脇、 $\angle$ 右脇、 $\angle$ 左膝、 $\angle$ 右膝）を対象とした。これらをフレームごとに角度を算出し、動画ごとに関節角度のスムージング処理を行う。

3.2 自動フェーズ分割手法

各動画のフレーム数は動画ごとに異なるため、側転動画から得られる各関節角度の時系列データに対して DTW (Dynamic Time Warping) を適用し、時間軸を補正する。そして、側転動作を開始から終了までの 5 フェーズ (f0～f4) に自動分割するために、以下のチェックポイント (CP0～CP5) を定義した。

- CP0：両手が肩より高い時
- CP1：両手が地面につく直前
- CP2：足が浮き上がっている状態
- CP3：足が一番上の場面
- CP4：足が浮いた状態が終了する場面
- CP5：両手が肩より高い時（終了位置）

これらを用いて以下のフェーズに分割する。

- f0: 開始位置から両手が地面につくまで。（CP0～CP1）
- f1: 両手が地面につき、足が浮き上がるまで。（CP1～CP2）
- f2: 足が最も高い位置に達するまで。（CP2～CP3）
- f3: 足が降りて浮いた状態が終了するまで。（CP3～CP4）
- f4: 両手が肩より高い終了位置に戻るまで。（CP4～CP5）

動画に対して、これらのフェーズ情報をラベルづけることで、側転動作をフェーズごとに対応づけながら、側転動作を比較することが可能になる。

3.3 差異検出手法

本研究においては、フェーズごとの関節角度差に基づいて動作精度を評価するため、平均角度差の大きさに応じた差異評価ラベルを設けた。加藤 (1998) は学生による関節可動域の実測および目測の比較において、両者の平均的な差が約 5 度程度であると報告しており、5 度未満の差は信頼できる一致と判断可能な範囲であると結論づけている[2]。また、目視による姿勢評価では 10～15 度、実測においても 5～10 度のばらつきが確認されている。このことから、本研究では 15 度以上の角度差は実測・目視の両面から見ても「明らかな差異」と判断可能な基準とし、動作の逸脱を示す指標として採用した。

したがって、本研究でもこの知見を踏まえ、5 度を最小の評価単位として、評価段階の閾値を 5 度・10 度・15 度と設定した。そして、見本との平均角度差で、以下の 4 段階の差異評価ラベル (0～3) を設けた

- ラベル 0：角度差が 5 度未満
- ラベル 1：角度差が 5 度以上 10 度未満
- ラベル 2：角度差が 10 度以上 15 度未満
- ラベル 3：角度差が 15 度以上（差異と判定）

†近畿大学大学院総合理工学研究科

‡近畿大学情報学部，近畿大学情報学研究所

このラベルにより、各フェーズ・各関節における動作の一致度を数値的に把握し、学習者の動作精度のばらつきや改善が必要な箇所を明確に抽出することが可能となる。

4. 評価実験

4.1 実験目的

本実験の目的は、側転動作における熟達者と初心者の動作の差異が、3.3 で提案した定量的な指標を用いて検出可能かを明らかにすることである。特に、フェーズごとに熟達者との差異が、検出可能であるかを検証する。

4.2 実験方法

本実験では5名を被験者とし、そのうち1名を熟達者とした。熟達者は器械体操の経験が10年以上ある者である。撮影はスマートフォンを用いて行い、動画形式は一般的な .mp4 ファイル、フレームレートは約 30fps とした。撮影環境は明るい室内とし、鏡やガラスなどの反射物が映り込まないように配慮した。動画には常に1名の被験者のみが映るようにし、カメラと被験者の距離は約3~5m とした。

本撮影により、合計9本の側転動画を用意した。そのうち2本は熟達者の動画であり、その1本を見本動画として以下の手順で分析を行った。

- 各動画から全身骨格の3次元座標を推定する。
- 得られた座標データに対して、動作フェーズの分割および関節角度の算出を行う。
- 時間軸のずれを補正するために動的時間伸縮法 DTW を適用し、フェーズ分割を行う。
- 熟達者との比較に基づき動作の差異を定量的に分析する。

4.3 実験結果

本節では熟達者同士、差の少ない初心者、差が大きい初心者の3名の被験者のケースを取り上げる。

(1) 熟達者との比較 (表1)

同じ熟達者だったためラベルが3はなく、結果は評価の正当性を示している。

(2) 差の小さい初心者との比較 (表2)

表2の被験者は目視において正しい側転の動きをしており、熟達者と差が小さい場合となる。しかし、最後の着地がこけたような着地になっているにも関わらず、本手法では差異を検出できなかった。

(3) 差の大きい初心者との比較 (表3)

序盤のフェーズから $\angle$ 左肘、 $\angle$ 左脇、 $\angle$ 左膝、 $\angle$ 右膝において差異が出た。以降もこれらの平均差異角度のほとんどが、20度以上角度が大きくなっており、序盤の差異が影響していると考えられる。

4.4 考察

4.3の実験結果は、差が小さい初心者、大きい初心者に関しても、差異の違いを示すことができ、本手法の正当性が示唆された。しかし、最後の着地点においての差異を検出できなかったケースもあり、それは今後の課題となる。また、それ以外の動画の結果はフェーズや角度もバラバラに差異が出る結果や、ある角度に集中的に差異が出たものもあった。それらも同じく結果として、下半身の差異、特定の関節の差異など特定することが可能になった。

	f0	f1	f2	f3	f4
$\angle$ 左肘	0	0	0	0	0
$\angle$ 右肘	2	0	0	0	0
$\angle$ 左腰	0	0	1	1	0
$\angle$ 右腰	1	0	0	0	1
$\angle$ 左脇	0	0	0	0	0
$\angle$ 右脇	1	0	0	0	0
$\angle$ 左膝	0	0	0	0	1
$\angle$ 右膝	0	0	0	0	0

表1 熟達者との比較 (同一人物)

	f0	f1	f2	f3	f4
$\angle$ 左肘	0	0	0	0	0
$\angle$ 右肘	0	0	0	0	0
$\angle$ 左腰	0	0	0	0	0
$\angle$ 右腰	1	0	0	0	0
$\angle$ 左脇	0	0	0	0	0
$\angle$ 右脇	0	0	0	0	0
$\angle$ 左膝	1	0	0	0	0
$\angle$ 右膝	0	0	0	0	0

表2 初心者との比較 (差が小)

	f0	f1	f2	f3	f4
$\angle$ 左肘	3	3	3	3	2
$\angle$ 右肘	1	2	0	0	0
$\angle$ 左腰	0	0	0	1	0
$\angle$ 右腰	0	0	2	0	0
$\angle$ 左脇	3	3	0	0	0
$\angle$ 右脇	0	0	0	0	3
$\angle$ 左膝	3	3	2	1	1
$\angle$ 右膝	3	3	3	1	3

表3 初心者との比較 (差が大)

5. おわりに

本研究では、側転動作における熟達者と初心者の違いを定量的に可視化するため、骨格データに基づく差異評価手法を提案した。今後の課題として、現段階では評価指標として関節角度の平均差を主に用いているが、動作の滑らかさや速度変化、姿勢の安定性など、他の運動学的特徴量を取り入れた多面的な差異検出手法の検討が求められる。さらに、大規模言語モデル (Large Language Model: LLM) を活用し、得られた差異情報を学習者に対して直感的かつ理解しやすい形で提示する仕組みを検討する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25K15376 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 山本峻介, 中西崇文, 岡田龍太郎, & 峰松彩子. (2022). 動画メディアコンテンツを対象としたサッカーにおけるキックモーション類似度計量方式. 第84回全国大会講演論文集, 2022(1), 119-120.
- [2] 加藤宗規. (1998). 学生が行う関節可動域測定における実測と目測の比較. 東京保健科学学会誌, 1(1), 71-73.