

姿勢推定を用いた弓道動作の自動分割による 早気検出手法の検討

佐竹 愁人^{†1} 小倉 加奈代^{†1}

概要：本研究では、単眼カメラ映像に基づく姿勢推定を用いて弓道動作を解析し、射法八節の枠組みに沿って射動作を自動的に分割する手法について検討する。射法八節において「会」は明確な一節として位置づけられていることから、その開始および終了時点を推定し、会の保持時間を早気検出のための指標として用いる。試作手法により、特別な計測機材を用いることなく、一般的な撮影環境において射法八節の自動分割および会の保持時間の算出が可能であることを確認した。本研究は、早気に対する客観的な振り返りを支援する手法の検討として、個人練習への応用可能性を示すものである。

1. はじめに

弓道は、的中の結果だけでなく、一連の所作である「射法八節（しゃほうはっせつ）」を重んじる武道である。射法八節は、一本の矢を射る際の基本的な動作手順を八つに整理した枠組みであり、射手は各節を明確に区別し、順序立てて行うことが求められる。しかし、その習熟過程において、多くの射手が「射癖」と呼ばれる不適切な動作習慣に直面する。

射癖の中でも「早気（はやげ）」は、会（弓を引き切った状態）を十分に保持できないまま、意図せず矢を放ってしまう状態を指す。早気は高校生や大学生をはじめとした幅広い射手に見られる課題であり、心理的要因が関与するイップス（不安や緊張などにより、意図した動作の遂行が困難になる症状）の一種として扱われることもある。このような特性から、射手自身の主観的感覚と実際の動作との間に乖離が生じやすく、早気の兆候を客観的に把握することは容易ではない。

従来の弓道指導では、指導者による目視観察や経験に基づく助言が中心であり、特に指導者不在時の個人練習においては、射手が自身の射を客観的に振り返ることが難しい。近年は映像解析やセンサ技術を用いた動作分析の研究も進められているが、専用機材の設置負担や装着による動作への影響といった課題が指摘されている。

そこで本研究では、汎用的な単眼カメラ映像に基づく姿勢推定を用いて弓道動作を解析し、射法八節の枠組みに沿って動作を自動的に分割することで、早気を検出する手法について検討する。射法八節には「会」が明確な一節として含まれており、その開始および終了時点を推定することで、会の成立状況や保持時間を捉えることが可能となる。本研究では、この時間的情報を早気検出の手がかりとして利用する。

2. 関連研究

本章では、弓道における動作解析および射形支援に関する既存研究を概観し、使用されている計測手法や提示方法の観点から整理する。特に、専用機材や装着型デバイスを用いた手法と映像解析に基づく手法に着目し、それぞれの特徴と課題を明らかにした上で、本研究の立ち位置を示す。

2.1 弓道における動作解析

近年、スポーツや武道の分野では、ICTを活用した動作解析やトレーニング支援に関する研究が進められている。弓道においても、射形の客観的把握や技術習得支援を目的とした動作解析の試みが報告されている。一方で、弓道には「真・善・美」を重んじる価値観があり[1]、技術の効率化のみを目的とした支援に対して慎重な立場が取られる場合もある。そのため、弓道におけるICT活用には、技術的有用性と伝統的価値観の両立が求められる。

2.2 深度センサを用いた動作解析

三次元的な身体動作を取得する手法として、深度センサを用いた研究が報告されている。武田らは、Kinectを用いて射手の骨格座標を取得し、足踏みや胴造りといった射法八節の一部に対する姿勢支援が可能であることを示した[2]。この手法は、詳細な姿勢情報を取得できる利点を有する一方で、専用機材の設置が必要であり、道場や個人練習の場において手軽に導入するには課題が残る。

2.3 ウェアラブル・XR技術を用いた支援

指導者不在時における個人練習を支援することを目的として、射手が自身の射形を計測・可視化し、一人でも振り返りや反復練習が可能となる環境の構築を目指す研究が報告されている。このようなアプローチでは、射手の動作を仮想空間内に提示することで、視覚的フィードバックを通じた射形理解の促進を狙っている。

このような取り組みの代表例として、モーションキャプチャとヘッドマウントディスプレイを組み合わせた没入型環境を用いる手法が提案されている[3]。この研究では、射

^{†1} 岩手県立大学ソフトウェア情報学部

手が場所を選ばずに射形練習を行える点や、視覚的フィードバックによる理解促進が示されている。一方で、装着型デバイスが弓道の繊細な動作に影響を与える可能性や、導入コストの高さといった課題も指摘されている。

2.4 本研究の立ち位置

これらの既存研究に対し、本研究では、汎用的な単眼カメラ映像に基づく姿勢推定を用い、射法八節という弓道固有の動作枠組みに沿って動作を自動的に分割し、早気検出への応用可能性を検討する。本手法は、専用機材や装着型デバイスを必要とせず、日常的な練習環境への導入を想定している。また、射法八節という人間中心の動作区分を計算機的に扱う枠組みを提示することで、早気の客観的把握に向けた基礎的知見を提供することを目指す。

3. 本研究における射法八節の位置づけ

本研究では、弓道における早気を検出するため、射手の一連の動作を時間的に分割して捉える必要がある。そこで、弓道における代表的な動作区分の枠組みである射法八節を、本研究における動作分割の基盤として用いる。

射法八節とは、一射の動作を八つの基本的な節に整理した弓道における代表的な動作区分の枠組みであり、初心者から熟練者まで広く共有され、射動作を理解・指導するための基準として用いられている。射法八節の構成を(図1)に示す。

本章では、手法検討の理解に必要な前提知識として、射法八節の構成と各節の概要を整理し、本研究においてどのように位置づけて扱うかを説明する。各節の具体的な判定条件や、姿勢推定結果を用いた分割方法については、次章にて手法の検討とともに述べる。



図 1 射法八節の構成 [1]

3.1 射法八節を用いた動作分割の考え方

弓道における早気は、「会」において十分な保持が行われないまま離れに至る現象として現れる。このような時間的特性を持つ射癖を検出するためには、射手の一連の動作を連続的に捉えるだけでなく、動作を意味のある区間に分割し、各区間の開始および終了を明確に定義する必要がある。

そこで本研究では、弓道における動作分割の枠組みとして射法八節を用いる。射法八節は、一射の流れを八つの節に整理した体系であり、「会」を独立した一節として明確に含んでいる点に特徴がある。この構造を時間的な動作モデルとして捉えることで、会の開始・終了時点や保持時間を定義することが可能となり、早気検出に必要な指標を導出しやすくなる。

本研究では、射法八節を姿勢推定に基づく動作解析と対応づけることで、射手の動作を時系列的に分割し、その分割結果を早気検出の基盤として利用することを目指す。

3.2 射法八節の構成と各節の概要

射法八節は、弓道における一連の射動作を以下の八つの節に分けて整理したものである(図1)。以下に示す各節の説明[4]は、後述する姿勢推定に基づく判定条件(表1)を設定する際の背景として、射法八節における一般的な動作内容を整理したものである。

- 足踏み：

執り弓の姿勢(弓矢を持ち腰に手を合わせた姿勢)から的を見据え、左足を的の中心に向かって半歩踏み出す。右足を右外側に扇形に開く。足幅は矢束とし、つま先の角度は約60度に開く。視線を戻し、重心を両足の中央に置く。
- 胴造り：

弓の本弭(弓の下部にある弦を掛ける部分)を左膝頭に置く。背筋を垂直に伸ばし、両足の線と腰、腰と両肩、両肩と首筋を十字(直角)に重ねる(三重十文字)。顎を引き、首筋を伸ばし、肩を落とす。尻の筋肉を締め、丹田に意識を置く。
- 弓構え：

右手で弦を取り掛け、左手で手の内を整える。両手を腰の前で円を描くように構える。正面で呼吸を整えた後、顔だけを首筋を伸ばしたまま的の方へ向ける。
- 打起し：

弓構えの状態を保ったまま、両拳を同じ高さで静かに持ち上げる。高さは額より少し上、角度は身体に対して約45度前方とする。この際、肩が上がらないよう両腕を上げる。
- 引分け：

左手を的の方へ押し出しつつ、右拳を額の右斜め上へ運ぶ。そこから左右均等に押し開く。左手は的へ一直線に押し、右手は肘を使って弦を右肩の後ろへ引く。矢を常に水平に保ち、頬の近くを通して引き込む。
- 会：

矢を頬付け(鼻先以下かつ、唇以上の高さ)に合わせ、

弦を胸に軽く触れさせる。右目で矢の延長線が的の中心に向いているか確認する。形を維持したまま、天地左右に伸び続ける。

- 離れ

伸合いにより弦が右手から外れる。左腕は的の方へ鋭く伸び、右腕は裏的（背中側）の方へ大きく開く。胸郭を左右に大きく開く。

- 残心

離れた直後の姿勢を 3~5 秒間保つ。視線は的を見つめ続ける。その後、呼吸に合わせて弓を倒し、足を閉じる。

本研究では、射法八節を弓道における理想的な射形を評価する基準としてではなく、射動作を時間的に分割するための枠組みとして用いる。そのため、精神的・美的な観点には踏み込まず、姿勢推定により客観的に扱える情報に基づいて、各節の開始および終了を定義することを重視する。

3.3 本研究で着目する動作区間

射法八節は一射全体を網羅する枠組みであり、本研究ではすべての節を対象として動作の自動分割を行う。その上で、早気検出においては「会」に着目し、会の状態維持時間を主要な指標として用いる。

会の状態維持時間を算出するためには、会の開始時点および終了時点を適切に推定する必要がある。そこで本研究では、「引分け」から「会」への遷移を会の開始として、「会」から「離れ」への遷移を会の終了として捉えることで、会区間を同定する。本研究では、この会区間の時間的情報を用いて早気の判定を行う。

各節の具体的な判定条件や、姿勢推定結果を用いた分割方法については、次章にて説明する。

4. 早気検出手法の検討

本章では、姿勢推定に基づいて弓道動作を解析し、射法八節の枠組みに沿って動作を自動分割する手法について検討する。本研究では、この分割結果から「会」に対応する区間を抽出し、その保持時間に基づいて早気を判定する。

4.1 処理の全体構成

本研究では、一般的なスマートフォン等で撮影した単眼カメラ映像を入力とし、姿勢推定に基づいて弓道の射動作を解析する処理構成を採用する。本手法は、Web アプリケーションとして実装し、撮影環境に依存しない形で射動作の解析を行うことを想定する。

処理の流れとして、まず入力された射形映像に対してフレーム単位で姿勢推定を行い、射手の全身関節位置からなる時系列データを取得する。取得した関節位置情報は、身体スケールに基づいて正規化された後、幾何学的特徴量として扱われる。これらの特徴量を用いて、射法八節の各節に対応する姿勢的特徴や動作の遷移をフレーム単位で判定し、射動作を八つの節に自動分割する。分

割処理においては、時系列フィルタを用いたノイズ除去を行い、姿勢推定誤差による誤検知の影響を低減している。

射法八節の自動分割結果から、「会」に対応する区間を抽出し、当該区間の開始時点から終了時点までの時間を会の保持時間として算出する。本研究では、この会の保持時間を用いて早気の判定を行う。

処理結果は、射手が自身の射動作を振り返るための情報として提示される。具体的には、推定された射法八節の区間や、各節に要した時間といった分析結果が可視化される。これにより、射手は自身の射動作の時間的特徴を客観的に把握することが可能となる。

4.2 姿勢推定に基づく射法八節の自動分割

本節では、姿勢推定結果を用いて射法八節に沿った射動作をフレーム単位で自動分割する方法について述べる。本研究では、単眼カメラ映像から抽出された骨格ランドマークの 2 次元座標 (x, y) を入力とし、これらを時系列データとして扱う。

個人差（身長や撮影距離）の影響を低減するため、本研究では胴体長に基づく正規化を行う。左右の肩と腰の垂直距離（左/右肩の垂直距離： $y(L/R).shoulder$ 、左/右腰の垂直距離： $y(L/R).hip$ ）の平均を基準長 $S.body$ として定義し、以下の式で算出する。以降の距離や位置関係に関する判定閾値は、この $S.body$ に対する比率として設定する。

$$S.body = \frac{|yL.hip - yL.shoulder| + |yR.hip - yR.shoulder|}{2}$$

各フレームにおける射法八節の状態判定は、関節角度、関節間距離、および部位間の相対位置関係に基づいて行う。各節の判定に用いる主な条件を表 1 に示す。姿勢推定結果の微細な揺らぎによる誤検知を抑制するため、同一の判定結果が N フレーム連続して観測された場合のみ、内部状態を更新する時系列安定化フィルタを導入する (N は約 0.2 ~ 0.4 秒相当)。

静的な姿勢条件のみでは判別が困難な節間遷移については、動作の時間変化に着目した判定を行う。以下に代表的な遷移判定の例を示す。

弓構えから打起しへの遷移では、静止状態からの動作開始を検出するため、手首の高さ $y.wrist(t)$ の時間変化に着目する。射法八節の姿勢条件を満たした状態下で、手首位置が基準長の 1.5% 以上上昇した場合に、次状態への遷移を確定する。これにより、低速動作や一時的な揺らぎによる誤検知を防ぐ。

打起しから引分けへの遷移では、動作の方向転換を捉えるため二段階の判定を行う。両手首が鼻の高さを越えた時点を打起しの頂点として検出し、その後、左右手首間距離の拡大、または左手首が左肘位置を超える動作が観測された場合に、引分けへの遷移を確定する。

引分けから会への遷移では、左右非対称な関節角度条件を用いる。左肘の伸展角 θ_L が 145° を超え、かつ右肘の屈曲角 θ_R が 90° 未満である状態が一定時間連続して維持された場合に「会」と判定する。加えて、矢束が十分に取れていることを確認するため、左右手首間距離が肩幅の1.5倍以上であることを条件に含める。

以上の手順により、射法八節の八つすべての節を時系列上の連続した区間として自動的に同定する。なお、各状態は、姿勢に基づく状態条件、動作変化を捉える遷移条件、またはその両方によって定義されるものとする。

表 1 射法八節の状態判定条件一覧

状態 (State)	判定部位	状態条件 (論理積) / 遷移条件
1. 足踏み	足首, 肩	・両足首の幅 $W_{ankle} > 0.85 \times W_{shoulder}$ ・肩幅が一定以上検出され、身体が正面を向いている
2. 胴造り	鼻, 肩	(状態条件) ・足踏み状態から、両足位置が静止している ・鼻の X 座標と両肩中点の水平距離 $< 0.2 \times W_{shoulder}$
3. 弓構え	手首, 腰, 肩	・右手首の Y 座標が右腰より上、かつ右肩より下 ・左手首の Y 座標が左肩より下
4. 打起し	手首, 肩, 肘	(状態条件) ・両手首の Y 座標が両肩より上 ・左右肘角度 $\theta_L > 100^\circ$ かつ $\theta_R > 100^\circ$ (遷移条件) ・前状態が弓構えで、手首の高さが S_{body} の 1.5% 以上上昇
5. 引分け	肘	(遷移条件) ・打起し状態を経過している ・左肘伸展角 $\theta_L > 145^\circ$ かつ 右肘伸展角 $\theta_R > 130^\circ$
6. 会	肘, 手首	(状態条件) ・左肘伸展角 $\theta_L > 145^\circ$ ・右肘屈曲角 $\theta_R < 90^\circ$ ・右肘と右肩の高さの差が小さい ・左右手首間距離 $D_{wrist} > 1.5 \times W_{shoulder}$
7. 離れ	右手首	(遷移条件) ・会状態であること ・右手首の移動速度 $V_{wrist} > 0.15$
8. 残心	時間経過	(遷移条件) ・離れ検知時刻から 1.0 秒以上経過

4.3 会の保持時間に基づく早気判定

本節では、射法八節の自動分割結果に基づき、会の保持時間を用いた早気判定方法について述べる。本研究では、「会」の状態が成立してから「離れ」が検知されるまでの時間を会の保持時間 T_{kai} と定義する。具体的には T_{kai} は

引分けの終了時刻から、離れの開始時刻までの所要時間として算出する。

一般に、弓道における会の保持時間はおよそ 5 ± 2 秒と経験的に言及されることが多い[4]が、公式に定められた明確な基準は存在しない。そのため本研究では、早気検出手法の検討を目的として、会の保持時間に基づく暫定的な判定基準を設定する。

本研究で用いる早気判定基準を(表 2)に示す。会の保持時間が極端に短い場合には早気のリスクが高い状態として扱い、中間的な時間帯については早気の予兆がある状態として分類する。これらの判定結果は、射手が自身の射を振り返る際の注意喚起やフィードバックの手がかりとしての利用を想定している。

表 2 早気判定基準

判定区分	条件式	判定結果
早気リスク高	$T_{kai} < 0.5 \text{ sec}$	危険
予兆あり	$0.5 \text{ sec} \leq T_{kai} < 3.0 \text{ sec}$	注意
良好	$T_{kai} \geq 3.0 \text{ sec}$	正常

5. 今後の展望

本研究では、姿勢推定に基づく弓道動作の自動分割および、会の保持時間を用いた早気検出手法の検討を行った。現時点では、定量的な評価実験は予備段階に留まっているが、5名の協力者による試行動画を用いた予備的な検証を行っている。

予備検証の結果、身体のラインが隠れるゆとりのある衣服や、背景色と類似した色彩の衣服を着用した場合において、骨格推定の誤検知が増加する傾向が確認された。これらの知見は、実環境での運用を想定した際の撮影条件や利用上の制約を検討する上で重要な課題であると考えられる。

今後の展望として、高校生および大学生を対象とした実証実験を計画している。同実験では、多様な撮影条件下における射法八節の自動分割精度の検証、および会の保持時間に基づく早気判定結果が、射手の自己理解や振り返りにどのように寄与するかを検討する予定である。これにより、本研究で提案する手法の実用性や適用可能性について、より具体的な知見を得ることを目指す。

6. まとめ

本研究では、弓道において多くの射手が直面する課題である「早気」に着目し、単眼カメラ映像に基づく姿勢推定を用いた射動作解析手法について検討した。射法八節を動作分割の枠組みとして用いることで、射動作を時系列的に捉え、「会」に対応する区間の保持時間を客観的に算出する方法を示した。

本手法により、特別な計測機材を用いることなく、一般的な撮影環境において射法八節の自動分割および会の保持時間の算出が可能であることを確認した。これらの時間的情報は、射手が自身の射を振り返るための一つの客観的な手がかりとして利用できる可能性がある。

今後は、より多様な射手や撮影条件を対象とした検証を通じて、本手法の適用可能性や課題を明らかにするとともに、弓道における個人練習支援への活用について検討を進める。

参考文献

- [1] 公益財団法人全日本弓道連盟:弓道の心
<https://www.kyudo.jp/howto/> (参照日:2025年12月16日)
- [2] 武田 宗, 岩館 健司, 鈴木 育男, 渡辺 美知子, 弓道における射法八節の学習支援に関する基礎研究, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2017S 巻, 2017年度精密工学会春季大会, セッション ID A18, p.25-26, 2017.
- [3] Kase, S. and Nakajima, T. VR Shooting Form Practice System for Inexperienced Kyudo Players. In Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2025 (AHs '25). pp.436-438, 2025.
- [4] 平安弓具: 簡単解説! 射法八節
<https://www.heianyumigu.com/c/tokusyu/tokusyu002> (参照日: 2025年12月16日)