

# 観戦体験向上のための IMU センサを用いた空手技可視化システム

金 宏俊<sup>1</sup> 平井 重行<sup>2</sup>

**概要:** 本研究では、空手の組手試合における観戦体験の向上を目的として、IMU センサによる動作認識と映像への視覚効果提示を統合したリアルタイム空手技可視化システムを提案する。11名の協力者による合計28試合の組手試合において、両手首・両足首・腰部の計5箇所に装着した小型IMU センサを用いて加速度・角速度を計測し、実試合環境における組手技データセットを構築した。SVMを用いて四肢ごとに技／非技の2クラス分類モデルを学習した結果、正解率は0.811–0.956、Macro-F1は0.769–0.900であった。さらに、学習したモデルをリアルタイムシステムへ適用し、映像上の技発生部位に対して視覚効果を提示することで、動作中の技発生タイミングおよび発生部位を可視化可能とした。

## 1. はじめに

空手は日本発祥の伝統的な武道であり、同時に国際的なスポーツ競技として広く親しまれている。その競技には、大きく分けて二つの種目が存在する。一つは、選手1人があらかじめ定められた動作を行い、技の正確さや美しさ、力強さなどを評価する「型」である。もう一つは、選手2人が試合として攻防を繰り返す、制限時間内に獲得したポイント数を競う「組手」である。特に組手競技においては、突きや蹴りといった技の動作がきわめて高速であり、かつ選手同士の技が至近距離で交錯するため、観客が「どちらの選手の、どの技が有効だったのか」を瞬時に把握することが難しく、試合の状況が直感的に理解し辛くなる。

このような課題に対して、他の競技では視覚的な情報付与によって観戦体験を向上させる取り組みが行われている。例えば、フェンシングでは、複数台の4Kカメラを用いて試合映像を撮影し、剣先の位置や軌道を可視化するシステム [1] が導入されており、高速で視認が困難な攻防を視覚的に補助することで、観客が試合展開を理解しやすくなることが報告されている。このような視覚効果を用いた情報の可視化は、競技のルールや判定結果を直感的に伝える手段として有効であり [2], [3]、スポーツ放送や配信における観戦体験の向上に寄与している。

空手の組手競技においても、技の発生や有効性を視覚的に強調する表現を映像上に付与することで、試合展開の理解を支援し、観客にとってより魅力的な観戦体験を提供できる可能性がある。しかしながら、空手の組手競技における動作認識をカメラ映像のみに基づいて行うことは容易ではない。組手では選手と審判がコート内を自由に移動するため、単視点映像では選手の身体が他者によって遮蔽されるオクルージョンが頻繁に発生する。さらに、突きや蹴りの高速動作をカメラで安定して捉えることが難しいだけでなく、四肢の動きが技か非技かの区別を含め画像のみで安定して捉えることが難しい課題もある。

そこで本研究では選手の身体に6軸IMUセンサを取り付け、各選手の四肢の細かな動作を高精度に計測し、技としての動作の検出まで行う手法を導入する。そして、カメラで捉えた選手の推定骨格モデルと組み合わせ、繰り返した技に対して視覚効果を加えて組手試合の技を可視化する方法を提案する。小型・軽量のIMUセンサは選手に身体的負担少なく装着可能である点、選手の動作を遮蔽の影響を受けない点、高サンプリングレートかつ低レイテンシで動作情報が取得できる点が、提案手法の利点と言える。 [4], [5]。

本研究の目的は、空手組手競技における動作をIMUセンサを用いて認識し、その結果に基づいて技に対応した視覚効果をリアルタイムに付与する観戦支援システムを構築することである。具体的には、組手競技中の突きや蹴りの動作を対象にIMUセンサベースの動作データセットを構築するとともに、得られた動作認識結果を組手映像上に反映し、技の発生部位を視覚的に強調するリアルタイム技可視化システムを実装する。本研究により、高速かつ視認が

<sup>1</sup> 京都産業大学大学院 先端情報学研究所  
Division of Frontier Informatics, Graduate School of Kyoto Sangyo University

<sup>2</sup> 京都産業大学 情報理工学部  
Faculty of Information Science and Engineering, Kyoto Sangyo University

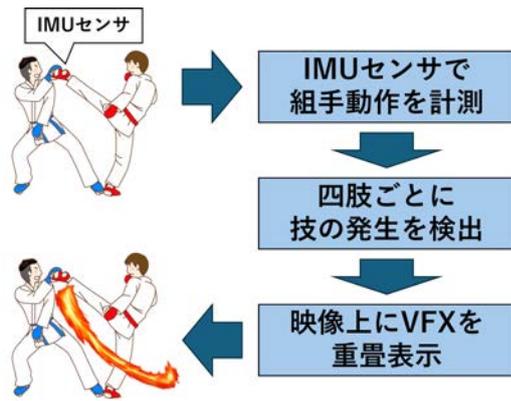


図 1 提案システム概要

困難な空手組手競技において、観客が試合展開を直感的に理解できる新たな観戦体験の実現を目指す。

## 2. 提案システム

本研究では、空手組手競技を対象として、IMU センサによる動作認識と視覚効果付与を組み合わせたリアルタイム観戦支援システムを提案する。図 1 にシステムの概要を示す。本システムでは、選手の両手首、両足首、および腰の計 5 部位に IMU センサを装着し、組手中の全身動作を計測する。取得した加速度および角速度信号に基づき、四肢ごとに対応する IMU センサと腰部の IMU センサを用いて急激な動作が生じた区間を、閾値処理によって抽出する。

抽出された動作区間を入力として、機械学習を用いた 2 クラス分類モデルにより、各部位について技/非技の判別を行う。技が検出された場合には、映像上の技発生フレームにおける該当部位に対して、視覚効果をリアルタイムに付与する。

視覚効果の付与には、入力映像から推定した人体の関節位置情報を用いる。映像中の各フレームにおいて関節位置を推定し、IMU センサによって技の発生が検出されたフレームに対応して、該当する身体部位に視覚効果を重畳表示する。視覚効果は、部位ごとに異なる色のオーラとして表現し、動作に伴う軌道を可視化することで、どの部位から技が放たれたのかを直感的に理解できるよう設計した。これにより、高速な攻防が展開される組手競技においても、技の発生を視覚的に強調することが可能となる。

## 3. IMU センサによる組手動作認識

### 3.1 データの計測と収集

データ計測と収集は、空手道部に所属する高校生および大学生、ならびに社会人空手チームの協力のもと、学校内の道場にて実施した。協力者は 10 代から 20 代の男女 11 名であり、空手歴は数か月の初心者から十数年の有段者まで様々であった。協力者は 2 人 1 組で実際の試合形式による組手試合を行い、試合時間は約 1 分半から 2 分間とした



図 2 データ計測の様子

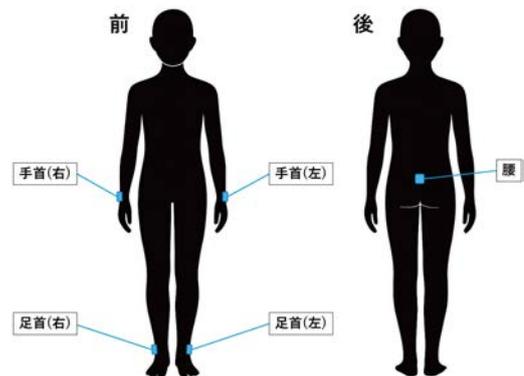


図 3 IMU センサ装着位置

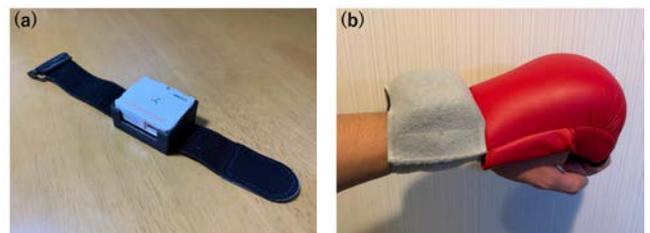


図 4 IMU の装着ホルダと装着した様子  
(a) センサホルダ (b) 手首への装着

(図 2)。競技協力者の動作計測には、小型無線多機能センサ AMWS020[6] (ATR Promotions 社製) を用い、サンプリング周波数を 1 kHz に設定した。協力者は両手首、両足首、および腰部の計 5 箇所にセンサを装着し (図 3)、試合中の 3 軸加速度および 3 軸角速度を計測した。また、試合映像を同時に撮影し、後述のラベル付け作業に利用した。

センサを手首・足首に装着するにあたっては、装着用のセンサホルダを 3D プリンタで作成した (図 4 (a))。その素材には柔軟性のある TPE 素材を利用し、身体への装着時や競技中に硬さや痛みを感じにくいものとした。そして、伸縮性のある面ファスナーをセンサホルダに通し、装着箇所に巻きつけた上で、その上からクッション性のあるバンドを巻きつけて計測を行った (図 4 (b))。

### 3.2 データセット構築

データセットの構築方法について述べる。本システムに

表 1 部位ごとのデータセットのクラス内訳

| 部位 | 非技  | 技   | 合計  |
|----|-----|-----|-----|
| 左手 | 535 | 102 | 637 |
| 右手 | 273 | 98  | 371 |
| 左足 | 276 | 40  | 316 |
| 右足 | 233 | 37  | 270 |

表 2 四肢別モデルの性能

| モデル | N   | 正解率   | Macro-F1 | 非技-F1 | 技-F1  |
|-----|-----|-------|----------|-------|-------|
| 左手  | 637 | 0.887 | 0.781    | 0.933 | 0.629 |
| 右手  | 371 | 0.811 | 0.769    | 0.868 | 0.670 |
| 左足  | 316 | 0.956 | 0.900    | 0.975 | 0.825 |
| 右足  | 270 | 0.919 | 0.819    | 0.953 | 0.686 |

おける組手動作認識ではイベントトリガ式の処理方式を採用しており、データセットの構築においても同様の方式を用いた。具体的には、取得した IMU の時系列データに対し、部位ごとに急激な動作を検知した時点とを起点として動作区間を切り出し、切り出された各区間に対してラベル付けを行った。

動作区間の抽出は次の手順で行った。まず、腰部の IMU センサを基準センサとし、これに各四肢の IMU センサ（左手、右手、左足、右足）を組み合わせた 4 つの独立した処理システムを構成した。各システムについて、各サンプリング時点における加速度ベクトルおよび角速度ベクトルのノルムを算出し、それらを合算した値を部位ごとの運動強度指標とした。次に、運動強度指標に対して異なる時間スケールの移動平均を逐次的に算出し、短時間平均と長時間平均の比率  $r$  を求める。比率  $r$  が所定の閾値を上回った時点とを動作開始と判定し、その後  $r$  が再び閾値を下回るまでの区間を 1 つの動作区間として抽出した。なお、閾値や移動平均の時間窓長といった検出パラメータは、正当な技動作の取りこぼしを最小化しつつ、過剰な誤検出を抑えることを目的として、部位ごとに調整した。そして、部位ごとに抽出された動作区間に対して、試合映像を参照しながらアノテーションを行った。区間内に当該部位による技動作の発生フレームが含まれている場合には、対応する四肢ラベルを付与し、それ以外の区間には非技ラベルを付与した。

表 1 に、各部位ごとに構築したデータセットのクラス内訳を示す。いずれの部位においても非技クラスが多数を占めており、特に下肢では技サンプル数が相対的に少ない不均衡な分布となっている。

### 3.3 四肢ごとの技判定モデルの構築

四肢ごとの技判定モデルの構築について述べる。本研究では、各部位に対応する IMU データから、その区間が技動作であるか否かを判定する 2 クラス分類問題として定式化した。各動作区間から得られる入力特徴量として、加速度および角速度の時系列データに基づく統計量を用いた。

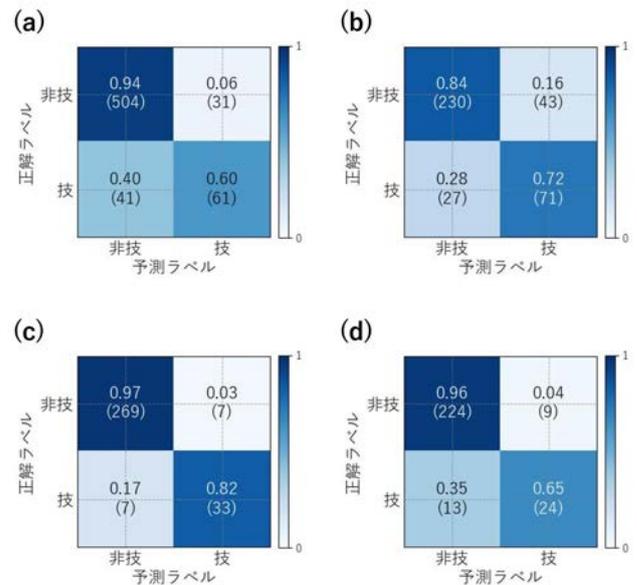


図 5 四肢別モデルの混同行列 (a) 左手 (b) 右手 (c) 左足 (d) 右足

具体的には、各軸成分に対して、平均値、標準偏差、最大値、最小値などの時間領域統計特徴量を算出し、これらを連結した 96 次元の特徴量ベクトルを SVM を分類器として機械学習させた。

表 2 に各四肢別モデルの性能を示す。いずれの部位においても正解率が高い値を示した一方で、Macro-F1 は部位によって差が見られた。これは、本タスクが「技/非技」の二値分類であり、データ数の多いクラス（非技）を優先した判定になりやすいことに加え、技クラスの誤判定が Macro-F1 に大きな影響を与えるためである。実際に図 5 の混同行列を確認すると、多くのサンプルは非技として正しく分類されている一方で、一部の技サンプルが非技に誤分類される傾向が確認できる。

部位間の比較では、足部 (LF, RF) のモデルは手部 (LH, RH) に比べて Macro-F1 が高く、特に技クラスの F1 が改善している。これは、蹴り動作は加速度・角速度の振幅が大きく、動作パターンも比較的明瞭であるため、統計特徴量でも技と非技の分離が行いやすかったことが要因として考えられる。一方で手部では、突き動作が短時間で完了しやすく、フェイントやブロックなど非技動作との波形の類似性が高いため、技クラスの取りこぼしが生じやすかったと考えられる。

以上より、本研究で構築した時間領域統計特徴量と SVM による四肢別 2 クラス分類モデルは、非技の識別に関しては高い性能を示しつつ、技クラスに対しては部位による難易度差が存在することが明らかとなった。

## 4. リアルタイム空手技可視化システムの実装

リアルタイム空手技可視化システムの実装について述べる。本システムでは、四肢毎に独立した 4 つのシステムを並列

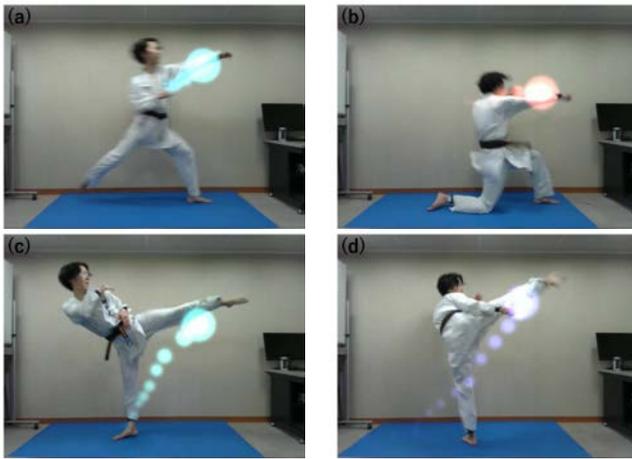


図 6 部位ごとの視覚効果付与例 (a) 左手 (b) 右手 (c) 左足 (d) 右足

に処理する。各システムにおいて運動強度指標を算出し、動作区間の抽出と学習済みモデルによる技／非技判定を行う。これにより、高速なコンビネーションが放たれた場合でも、複数部位に対する視覚効果を同時に描画することが可能となる。

視覚効果の付与にあたっては、リアルタイム処理が可能な姿勢推定手法である MediaPipe Pose[7] を用いて、入力映像に対して姿勢推定を行い、手首および足首の関節位置を取得する。そして、IMU センサによって検出された部位ラベルを、対応する関節位置に紐付けることで、技区間に応じたオーラおよび軌跡の視覚効果を重畳表示した。

なお、技区間の決定には、IMU センサ側で得られた技区間の開始・終了時刻を用い、該当時刻に対応する映像フレームに対して視覚効果を付与した。ここで、映像を 1 秒遅延させて表示することで、技の出し始めから出し終わりまで、安定した視覚効果の付与が可能となった。これは、テレビの放送やインターネットでの動画配信であれば、技の視覚効果表示の処理に少しのレイテンシがあっても特に問題がないことを想定している。実際には、IMU の信号処理やカメラ画像の選手の姿勢推定にかかる時間は用いる計算機の性能にも依存するため、現時点ではひとまず 1 秒としている。

図 6 に提案システムによる部位毎の視覚効果付与の例を示す。各例では、IMU センサによって技の発生が検出された部位に対応して、手部または足部の関節位置を基準に、オーラおよび動作軌跡の視覚効果が重畳表示されている。部位ごとに視覚効果の色を固定することで、どの四肢から技が放たれたかを明確に可視化できている。

## 5. おわりに

本研究では、空手組手競技における観戦体験の向上を目的として、IMU センサによる動作認識と映像への視覚効果提示を統合したリアルタイム空手技可視化システムを提案した。実試合環境で計測した IMU データを用いて四肢ご

との技／非技判定モデルを構築し、その結果を映像上にリアルタイムに反映することで、技の発生タイミングおよび発生部位を直感的に把握可能であることを示した。

本システムは、高速な攻防が展開される組手競技においても、観戦者が試合状況を理解しやすくする表現手法として有効であり、スポーツ観戦支援や演出表現への応用が期待される。今後は、技の種類判定への拡張や、視覚効果表現の多様化を通じて、より没入感の高い観戦体験の実現を目指す。

## 参考文献

- [1] Hanai, Y., Manabe, D., McDonald, K., Horii, S., Kera, F., Tanaka, K. and Ishibashi, M.: Fencing Tracking and Visualization System, *SIGGRAPH Asia 2021 Real-Time Live!*, (2021).
- [2] Azuma, R. T.: A Survey of Augmented Reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, (1997).
- [3] Billinghurst, M., Clark, A. and Lee, G.: A Survey of Augmented Reality, *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, Vol. 8, No. 2–3, pp. 73–272, (2015).
- [4] Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S. and Vannozzi, G.: Trends Supporting the In-Field Use of Wearable Inertial Sensors for Sport Performance Evaluation: A Systematic Review, *Sensors*, Vol. 18, No. 3, 873, (2018).
- [5] Ward, J. A., Lukowicz, P., Tröster, G. and Starner, T. E.: Activity Recognition of Assembly Tasks Using Body-Worn Microphones and Accelerometers, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 28, No. 10, pp. 1553–1567, (2006).
- [6] ATR Promotions Inc.: AMWS020 Product Information (online), 入手先 (<https://www.atr-p.com/>) (参照 2025.10.24).
- [7] Lugaresi, C. et al.: *MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines*, arXiv preprint arXiv:1906.08172, (2019).