

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	KATO Shoma
氏名	加藤 祥真
学位の種類	博士 (経営情報科学)
学位記番号	博 甲 第 49 号
学位授与	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目	卓球競技映像解析に基づくラリー回数の自動計測とプレー記録 UI に関する研究 A Study on Automatic Rally Counting and a Play Recording UI Based on Table Tennis Match Video Analysis
論文審査委員	(主査) 教授 澤野 弘明 ¹ (審査委員) 教授 水野 慎士 ¹ 教授 北坂 孝幸 ¹

論文内容の要旨

卓球競技映像解析に基づくラリー回数の自動計測とプレー記録UIに関する研究 (A Study on Automatic Rally Counting and a Play Recording UI Based on Table Tennis Match Video Analysis)

卓球競技は、打球のスピードや回転量、打球コースの変化が速く、高度な戦術的駆け引きが求められるスポーツである。特に、ボールに与える回転の種類と量は戦術の核心を担い、選手は試合状況や対戦相手の特性に応じて打法や打球コースを使い分ける。このような高度な競技特性から、選手のパフォーマンス向上や効果的な戦術立案には、指導者や選手の経験や主観のみに頼るのではなく、客観的なデータに基づく定量的な分析が不可欠である。とりわけ、サービス (1 打目) から得点または失点が増えるまでの打球総数である「ラリー回数」は、戦術の有効性や選手の特徴を反映する重要な指標となる。ラリー回数に着目すべき理由は、サービスの有効性を評価する指標として用いることができる点にある。卓球においてサービスは、相手の打球の影響を受けずに自身で球質や打球コースを選択できる唯一の技術であり、戦術の起点となるため、分析の重要度は高い。例えば、サー

バーが短いラリー回数 (例えば 3 球目) で得点できた場合、サービスによって相手のレシーブを制限し、主導権を握って得点したことを示唆する。また、ラリーが長期化した場合は、サービスによる初期の優位性が失われ、互角の展開または守備的な展開に移行したことを示す。したがって、ラリー回数ごとの得失点率を分析することで、サービスの有効性や、選手が「短期決戦型」か、もしくは「ラリー持久型」かといった戦術的特性を客観的に評価できる。

しかしながら、既存のラリー回数分析は手動記録によるものであり、高速なラリーを目視で追跡し、打法や打球コース、ラリー回数を逐一記録する必要がある。そのため、プレーの記録には時間的コストと労力を要する。加えて、判定基準が記録者に委ねられるため、記録データに主観が含まれる可能性や、長時間作業による疲労から記録ミスが発生するリスクも存在する。手動による記録の時間的コストと労力を削減する方法として画像処理技術を用いた自動分析手法が挙げられる。自動分析手法を用いることで、対象の試合映像からラリー回数を自動で記録でき、長時間作業による記録ミスも減る。一方で、既存の自動分析手法は選手とボールが重ならない水平方向 (横方向) からの撮影映像 (以下、水平方向ラリーの映像) を前提としており、実際の公式試合映像の 9 割以

上を占める垂直方向（縦方向）から撮影された映像（以下、垂直方向ラリーの映像）に対して、水平方向ラリーの映像を対象とした自動分析手法は適用できない。垂直方向ラリーの映像では、手前の選手によるボールのオクルージョン（遮蔽）が頻発することや、カメラに対してボールが高速で移動するためモーションブラー（被写体ぶれ）が発生することから、垂直方向ラリーの映像を対象とした実用的な自動解析手法は確立されていなかった。特に、ラリー回数の自動計測においては、映像中に含まれる打球以外のノイズ（サービストスやネットミス、リプレイ中のボールなど）を識別する必要があり、既存の物体追跡手法のみでは実現が困難であった。

また、筆者が所属する研究室と連携している愛知工業大学卓球部に対する取材では、組織的なプレー分析は定着しておらず、選手個人による卓球ノートへのメモ書きや、指導者が必要に応じて行う一時的な手書き記録に依存していることが明らかになった。このようなアナログな手法はデータの蓄積や共有が困難であり、この課題を解決する方法として自動分析手法が開発されている。一方で、自動分析手法は垂直方向ラリーの映像に対する手法が確立されていない点や、分析対象の項目が限定される点から、手動分析と比較して、分析項目と分析精度に限界がある。すなわち、手動分析は、記録に時間を要するが、依然として有用である。

そこで本論文では、垂直方向ラリーの放送用卓球映像を対象として、プレー分析の効率化と客観性の向上を目的とし、画像解析技術に基づく「ラリー回数の自動計測手法」と、自動分析技術を活用して手動記録によるプレー分析を効率的にする「プレー記録ユーザインタフェース（UI）」（以下、プレー記録UI）を提案した。

第2章では、垂直方向ラリーの映像からラリー回数を自動で計測する手法について述べた。本手法は、画像処理と音声処理を統合することで、オクルージョンやノイズが頻発する環境下においてもラリー回数を計測できる。具体的には、まずリプレイや休憩のシーンを含む放送用の映像からラリーシーンを抽出し、卓球台領域を特定する。つぎに、卓球台とボールの画素値差を利用した差分検出により、モーションブラーが発生した高速なボールをロバストに検出する。さらに、検出されたボール候補から打球のみを特定するために、音声処理を用いて打球音の有無を判定し、打球音を伴わないサービストスを除去した。また、ボールの軌道特徴（卓球台領域での滞在

時間やボールの軌道）に基づいてネットミスを除去した。加えて、卓球台領域を通過しない打球（台外での処理）に関しては、前後の打球の進行方向からその存在を推定して補間し、最終打者と得点者の不整合からオーバーミスを判定するアルゴリズムを構築した。

第3章では、自動解析技術と手動記録を融合させた「プレー記録UI」の提案について述べた。プレー分析の完全自動化が困難な項目（打法や打球コースの判定）に関しては、依然として人間の判断が必要となる。しかし、既存のプレー記録ツールでは、記録時の映像視聴における映像の操作（一時停止や巻き戻し）に時間を要することが課題であった。そこで本研究では、画像処理によって推定された「ラリーシーン開始時刻」および「スイング時刻」に基づき、映像を効率的に視聴できる機能を備えたUIを開発した。具体的には、試合映像中の非ラリー区間（リプレイ、休憩、選手交代など）を自動でスキップし、つぎのラリー開始直前まで映像を遷移させる「ラリースキップ機能」と、特定のスイング動作区間を自動で繰り返し再生する「スインググループ機能」を実装した。これにより、記録者は映像操作の負担から解放され、打法や打球コースの判定・入力作業に集中することが可能になった。

第4章では、提案したラリー回数計測手法およびプレー記録UIの有効性を検証するための評価実験について述べた。まず、ラリー回数計測に関しては、各処理（音声除去、ネットミス除去、補間処理）の有無による精度変化を検証するアブレーションスタディを実施した。評価実験の結果、提案手法は最高87.0%の精度でラリー回数を計測できることを示した。また、計測されたラリー回数をを用いて得失点率を算出した結果、先行研究で報告されている手動記録による分析結果と同様の傾向（男性選手のラリー回数の少なさや、2・4打目の重要性など）が得られ、プレー分析における有効性を確認した。つぎに、プレー記録UIに関しては、卓球経験者6名を対象としてプレー記録時間と記録精度に関して比較実験を行った。その結果、ラリースキップ機能を導入したUIでは、従来手法と比較して記録時間が短縮され（初心者で12.4パーセントポイント、経験者で17.0パーセントポイントの効率化）、動画長の実時間に近い時間（動画長の約1.3倍）で記録できることを示した。また、記録精度に関しては、記録者間の一致度（Fleiss' Kappa値）を用いて評価した。実験の結果、ラリーシーンのスキップ機能やスイングル

ープ機能を導入することで、Fleiss' Kappa 値が向上することを確認した。これらの結果から、提案手法は記録の効率性と客観性の双方を向上させる有効な手段であると結論付けた。

第5章では、本研究の成果を踏まえた今後の課題について述べ、本論文の総括を行った。今後の課題として、自動解析では、スイング動作そのものの認識によるラリー回数の記録精度向上、試合中のタイムアウト時などに即座にデータを提示するリアルタイム処理への対応、撮影アングルや得点板の形式に依存しない汎用的な解析手法の確立、およびボール回転量の計測などを述べた。また、プレー記録 UI に関しては、長いラリーにおける入力箇所の見失防止機能の実装や、入力ミスの修正機能、さらに蓄積されたデータを用いた、つぎのプレーの予測モデルの開発を今後の課題で挙げた。総括として、本研究では、手動に依存していた卓球のプレー分析に対し、垂直方向ラリーの卓球映像というボールのオクルージョンやモーションブラーが発生する映像を対象とした自動解析技術と、手動記録と自動分析を融合したプレー記録 UI を提案した。提案手法により、膨大な垂直方向ラリーの放送用映像からの効率的なデータ収集が可能となり、データに基づく科学的な指導や戦術立案の普及に貢献するものと期待される。

論文審査の結果の要旨

加藤祥真君の論文「卓球競技映像解析に基づくラリー回数の自動計測とプレー記録 UI に関する研究」は、試合映像から打球を識別しラリー回数を自動的に計測する手法、ならびに画像処理技術を導入したプレー記録ユーザーインターフェース (UI) を開発し、それらの有効性および実用性について検証を行った研究である。

本研究は、選手が映像の上下に立つ「垂直方向ラリー」の卓球映像を解析対象としている。垂直方向ラリーの映像では、オクルージョンやモーションブラーが頻繁に発生するため、YOLO、DeepSort などの汎用的な物体検出・追跡手法をそのまま適用することは困難であった。本研究では、卓球競技の物理的制約および競技ルールに基づく制約に着目し、画像処理と音声処理を統合的に用いることで、学習データに依存せずにこれらの技術的課題に対応している。

本論文は全5章で構成されている。

第1章では、本研究に至った背景および研究目的について述べている。戦術分析においては定量的なデータに基づく分析が重要であり、特に、サービスの有効性や戦術特性を評価する指標としてラリー回数に着目している。一方で、既存の手動記録では高速なラリーを目視で追跡し続ける必要があり、1試合あたり動画長の2~3倍の時間を要することや、記録者の熟練度や疲労に起因する誤差が生じるという課題を指摘している。また、愛知工業大学卓球部への取材から、組織的なデータ分析は定着しておらず、選手個人による卓球ノートへのメモ書きや指導者による一時的な手書き記録に依存している状況を明らかにしている。これらを踏まえ、本研究では実用的なプレー分析システムが満たすべき要件として、短時間でのプレー分析、高精度な分析、多様な分析項目への対応の3点を提示し、ラリー回数の自動計測を実現するとともに、打法や打球コースといった専門的判断を要する分析項目において、人間の映像操作負担を軽減する半自動分析システムを構築することを目的としている。

第2章では、本研究の中核となるラリー回数の自動計測手法について詳述している。ラリー回数とは、サービスから得点までに選手がボールを打った回数を指し、奇数回はサーバー、偶数回はレシーバーが打ったボールを意味する。本手法では、まず先行研究の手法を用いて試合映像からラリーシーンを抽出し、ラリーシーン内で卓球台領域を検出する。つぎに、卓球台とボールの画素値差に基づく画像処理を用いることで、モーションブラーが発生した高速移動ボールを検出する。検出されたボール候補の中から実際の打球のみを抽出するために音声処理を導入し、打球音の振幅や時間的特徴を利用することで、画像情報のみでは識別が困難な投げ上げサービスのトスを除去する。具体的には、卓球台上におけるボールのバウンド音の有無に基づいてトスを判定する。さらに、連続検出されたボールの区間長さと y 座標の変化を利用して卓球台領域内におけるネットに衝突したボールを検出し、ボールの進行方向変化を用いて卓球台領域を通過しない打球を補間する。最後に、得点板の数値を画像認識により取得し、最終打者と得点者の不一致を検出することでオーバーミスを判定する。これらの処理を段階的に組み合わせることで、垂直方向映像から打球とそれ以外のボール（トス、ネットミス後のボール）を識別し、ミスショットを除外した正確なラリー回数の計測を実現している。

第3章では、自動解析技術と手動記録を組み合わせたプレー記録UIの設計思想および実装について述べている。打法や打球コースといった完全自動化が困難な分析項目において、記録者の映像操作負担を軽減することを目的として、画像処理により推定したラリーシーン開始時刻およびスイング時刻に基づく映像のスキップ再生機能やループ再生機能を提案している。ラリーシーン開始時刻に着目したプレー記録UIでは、先行研究によりラリーシーン開始時刻を推定し、リプレイや休憩などの非ラリー区間を自動的にスキップする機能を実装している。これにより、記録者は「前のラリー」「次のラリー」ボタンでラリー間を効率的に移動できる。また、スイング時刻に着目したプレー記録UIでは、ボール検出手法を用いて選手がスイングを開始してから終わるまでの動作区間を推定し、特定のスイング動作区間を繰り返し再生するループ再生機能を導入することで、一時停止や巻き戻しといった煩雑な操作を行うことなく、記録者が打法や打球コースの判定に集中できる記録環境を構築している。記録者は、「前のスイング」「次のスイング」ボタンで各スイング動作を繰り返し視聴できる。プレー記録UIでは、サーブ打法8種類（下回転、上回転、横回転、ナックルなど）、レシーブ打法10種類（ツッツキ、ドライブ、スマッシュ、ブロックなど）から選択し、九分割された卓球台ボタンで打球コースを記録する仕組みとなっている。

第4章では、提案したラリー回数計測手法およびプレー記録UIの有効性を評価実験により検証している。垂直方向ラリーの卓球映像11本のうち10本を評価に用いたラリー回数計測実験では、アブレーションスタディにより各処理要素の寄与度を分析した。ボール検出のみでは49.18%の計測精度であったが、音声処理によるトスの除去を追加することで65.76%に向上し、ネットミス検出により79.19%まで向上した。最終的にミスショット除去を含む完全な提案手法では87.0%の計測精度を達成し、音声解析によるトス除去が16.58%、ネット衝突の除去が13.43%、ミスショットの除去が7.81%の精度向上に寄与していることを示している。また、戦型別の分析では、攻撃型の試合とカットマンを含む試合で同等の精度が得られ、提案手法の汎用性を示している。プレー記録UIの評価実験では、一般社団法人Tリーグから公開されている卓球競技映像14本を用いて、卓球経験者6名による記録作業を実施している。ラリーシーンのスキップ再生を追加したUIは従来手法と比較して、初心者で12.4パーセ

ントポイント、経験者で17.0パーセントポイントの記録時間短縮を示している。記録精度の評価では、Fleiss' Kappaを用いて記録者間の一致度を評価し、3打目以降のレシーブ打法においてスイングのループ再生を追加したUIで最も高い値(0.674)を示し、提案UIが従来手法と比較して短時間かつ正確にプレーを記録できることを示している。

第5章では、本研究のまとめと今後の課題について述べている。本研究の成果により、ラリー回数の自動計測手法では87.0%の計測精度を達成し、プレー記録UIでは従来手法と比較して記録時間を最大17.0パーセントポイント短縮できることが実証されている。今後の課題として、スイング動作に着目したラリー回数計測手法の検討、スイング動作の認識精度向上、試合中の分析を想定したリアルタイム処理への対応、深層学習を活用したオーバーミス判定の改善、ボール回転量の計測手法の検討などを挙げている。また、本研究で用いた解析手法は、卓球競技に限らず、テニスやバドミントンなど他のネット型スポーツにおける試合映像解析への応用可能性を有している。

以上、博士後期課程において発表された本論文は、当該専門分野の学会等において学術的価値を認められ、その成果は社会的意義が大きく、今後の社会貢献にも寄与するものであることから、筆頭著者は専門分野の全般的な知識を有し、独立した研究者として評価できる。また、本学の論文審査項目である「新規性」「進歩性」「有用性」「論理性」「明確性」「信頼性」の各観点において高く評価でき、本論文はこれまでの研究成果の集大成として、博士の称号を授与するのにふさわしい水準に達していると判断する。