

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04075

研究課題名（和文）集団バイオメカニクスのためのデータ駆動的モデルに基づく利用しやすい情報提供技術

研究課題名（英文）Easily available information technology based on the data-driven models for social biomechanics

研究代表者

藤井 慶輔 (Fujii, Keisuke)

名古屋大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：70747401

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、集団スポーツの位置データを利用したデータ駆動的モデリングによる研究を行った。本研究の目的としては、チーム戦術の機能や原理を理解し、戦術的な評価を取り入れた予測モデルを開発することである。初年度では、サッカーの守備戦術を考慮した模倣学習による軌道予測モデルを開発し、守備指標の改善を示した。次年度以降では、バドミントンとサッカーの動き予測や選手評価に関する複数の研究を実施し、いくつかの国際会議や学術雑誌に採択された。特に、選手の行動価値関数をデータから推定し、意思決定を評価する新たなアプローチである。これらの研究成果は、集団スポーツのデータ解析とモデリングの進展に寄与する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究による集団スポーツのデータ駆動的モデリングは、チームの戦術的評価を取り入れた予測モデルの開発を実現し、スポーツ科学とデータ科学の横断的領域において重要な課題に取り組んだ。サッカーやバドミントンなどにおける戦術的予測モデルと選手評価は、コーチング戦略の最適化、選手パフォーマンスの向上、試合解析の精度を高めることに寄与することが期待される。また、意思決定プロセスの客観的評価手法の開発は、トレーニング方法の革新や戦術教育の向上にも貢献し、スポーツ界全体の競技レベルの向上を促進する社会的意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we conducted research using data-driven modeling with location data from team sports. The purpose of this research is to understand the functions and principles of team tactics and to develop a predictive model that incorporates tactical evaluation. In the first year, we developed a trajectory prediction model using imitation learning that takes into account soccer defensive tactics, and showed improvement in defensive indicators. From the following year onwards, we conducted multiple studies on movement prediction and player evaluation such as in badminton and soccer, which were accepted by several international conferences and journals. In particular, it is a new approach that estimates the player's action value function from data and evaluates decision making. These research results will contribute to advances in data analysis and modeling for team sports.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：機械学習 集団運動 マルチエージェント 深層学習

## 1. 研究開始当初の背景

計測技術の発展を背景に、実際の集団スポーツの位置計測が可能になり、そのバイオメカニクス解析手法の重要性が高まっている。バイオメカニクスとは、生物学的なシステムや関連するシステムの機能や構造のメカニカルな観点から研究を行う学術分野である。一方で実世界のヒトをはじめ社会的な生物は、生きるために仲間と協力し、外敵と争う相互作用を行う。しかし、従来の(スポーツ)バイオメカニクス分野においては、個人の動作に関する分析が圧倒的に多く、社会的な集団としての機能や構造(ここでは集団バイオメカニクスと呼ぶ)については、ほとんど注目されてこなかった。その主な理由としては、個体では筋骨格モデルに代表される規則に基づく運動の支配原理が、集団運動においては未知だからである。

実際の集団スポーツのゲームであれば(3対3などの小集団であっても)守備の突破やシュートが入るため選択肢が膨大になり、ルールに基づいてモデル化することは難しい。そのため多くのゲーム分析は、ある場面に切り取って三者の角度や二者の距離を分析するものが多く、解釈可能であるが数理的なモデル化を行うことが難しく、原理を解明することが難しかった。

計測データから規則やパラメータを学習してモデル化を行うデータ駆動的モデリングは、上記のルールに基づくモデル化とゲーム分析の両方の欠点を克服する重要なアプローチである。我々はこれまで、時空間的に問題を限定し、攻撃・守備の協力プレーの自動分類 [1]、得点やボール獲得選手の予測[2,3]などを行うデータ駆動的な手法を開発してきた。特に、非線形力学系の特徴を計測データから抽出する動的モード分解と呼ばれる方法を応用した手法を用いて、相互作用を行う集団運動のダイナミクスをモデル化してきた [1,3]。

しかし、背後に単一の数学的なモデルを仮定する上記の方法では、複雑な挙動を示す実際のゲームのデータにおいて長期的かつ非線形な運動予測を行うことが原理的に難しい。特に、我々が以前ゲーム分析的に示した、状況依存的な選手の役割交替や重複[4]は、個人・部分集団・集団のような空間的な階層性や、過去の文脈、個人の戦術、チームの戦略のような時間的な階層性を持つ。そのため、上記の性質をデータから学習して、実用的なシミュレータとして予測性能の高い移動軌跡を生成するモデルが必要である。

## 2. 研究の目的

本研究は、集団スポーツの選手位置データを用いて、軌道生成や選手評価等の分析を行うデータ駆動的モデリング手法を開発する研究を行う。また現場の監督者や選手・観客等が理解可能、または利活用しやすい基盤的技術を開発することも応用的な目的とする。

## 3. 研究の方法

上記の大きな目的に基づき、初年度はサッカーの戦術評価を反映した模倣学習による軌道予測に関する研究を行った[5]。この研究の目的としては、予測誤差だけでなく戦術的評価も考慮した集団運動のシミュレーションを行うことにあり、戦術的評価を定義して模倣学習モデルに入力し、予測も戦術的に評価を行った。また、バスケットボールとサッカーに共通して適用可能な、人間らしい動きを考慮した模倣学習による軌道予測に関する研究を行った[6]。

次年度以降は、バドミントンを対象に、シャトル位置予測に寄与するスイング動作の抽出に関する研究[8]、選手の姿勢情報などを入力とした深層強化学習を用いたプレー評価の研究[9]を行った。サッカーについては、ボール奪取・被有効攻撃予測に基づくチームの守備評価に関する研究[10]、選手軌道予測に基づいたオフボールの得点機会を創出する選手の評価の研究 [11]を行った。

3年目以降は、バドミントンのダブルスにおいて、集団スポーツの時空間的な連携をシャトル落下位置に基づき、データ駆動的に定量化する研究を行った[12]。バスケットボールにおいては、注意機構を用いた深層学習モデルにより、攻撃が有効であったときとそうでなかったときの選手軌跡の違いをハイライトする手法を開発した[13]。また、サッカー選手を強化学習エージェントとしてデータから行動価値関数を推定することでオフボール選手の意思決定を初めて評価する研究を行った[14]。

## 4. 研究成果

初年度の[5]の研究については、サッカーの守備指標を用いて学習することで、守備指標を先行手法より改善した。この研究は、国際会議 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2020)に採択され、IEEE GCCE 2020 Excellent Student Paper Award (On-demand), Bronze Prizeを受賞した。[6]の研究については、部分観測と機械的制約を導入することで、誰を考慮して動いたか、および滑らかな動きをモデリングすることに成功し、ベースラインとなる単純な回帰型ニューラルネットワークよりも正確な長期予測を行うことを示した。この研究は Neural Networks誌にて成果が出版された。また、[7]集団スポーツのデータ解析に関するサーベイ論文を執筆し、Journal of Robotics and Mechatronics に採択された。

次年度以降のバドミントンの研究については、姿勢情報を機械学習の予測モデルに取り込むことで正確に次の打球位置を予測する研究を行い、人工知能の主要会議 IJCAI-21 のワークショップである AI for Sports Analytics (AISA)にて発表した[8]。また、バドミントンのストロークを行動とみなした強化学習モデルを構築し、行動価値関数を推定した研究が、IEEE Access に採択された [9]。サッカーに関する研究については、ボール奪取や被有効攻撃を正確に予測して守備を評価する指標を提案し、国際学術雑誌 PLoS One に採択された [10]。また、選手の軌道予測を標準的な動きとみなしその差分から上手さを評価する手法を提案し、日本統計学会スポーツデータサイエンスコンペティションのサッカー部門で優秀賞を獲得し、国際会議 ECML- PKDD の workshop ( MLSA ) に採択された [11]。

#### < 引用文献 >

- [1] Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Motokazu Hojo, Yuki Inaba & Yoshinobu Kawahara, Physically-interpretable classification of network dynamics for complex collective motions, Scientific Reports, 10, 3005, 2020
- [2] Keisuke Fujii, Takeshi Kawasaki, Yuki Inaba & Yoshinobu Kawahara, Prediction and classification in equation-free collective motion dynamics, PLoS Computational Biology, 14(11), e1006545, 2018.
- [3] Motokazu Hojo, Keisuke Fujii & Yoshinobu Kawahara, Analysis of factors predicting who obtains a ball in basketball rebounding situations, International Journal of Performance Analysis in Sport, 19(2), 192-205, 2019.
- [4] Keisuke Fujii, Keiko Yokoyama, Takeshi Koyama, Akira Rikukawa, Hiroshi Yamada & Yuji Yamamoto, Resilient help to switch and overlap hierarchical subsystems in a small human group, Scientific Reports, 6(23991), 2016.
- [5] Masakiyo Teranishi, Keisuke Fujii, Kazuya Takeda, Trajectory prediction with imitation learning reflecting defensive evaluation in team sports, IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2020), 2020
- [6] Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda, Decentralized policy learning with partial observation and mechanical constraints for multiperson modeling, Neural Networks, 171, 40-52, 2024
- [7] Keisuke Fujii, Data-driven Analysis for Understanding Team Sports Behaviors (survey paper), Journal of Robotics and Mechatronics, 33(3) 505-514, 2021
- [8] Tatsuya Yoshikawa, Kazushi Tsutsui, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii, Extraction of swing motion contributing to prediction of shuttle drop position in badminton, 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21) workshop on AI for Sports Analytics (AISA), 2021
- [9] Ding Ning, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii, Deep reinforcement learning in a racket sport for player evaluation with technical and tactical contexts, IEEE Access, 10, 54764 - 54772, 2022
- [10] Kosuke Toda, Masakiyo Teranishi, Keisuke Kushiro & Keisuke Fujii, Evaluation of soccer team defense based on prediction models of ball recovery and being attacked: A pilot study, PLoS One, 17(1) e0263051, 2022
- [11] Masakiyo Teranishi, Kazushi Tsutsui, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii, Evaluation of creating scoring opportunities for teammates in soccer via trajectory prediction, 9th Workshop on Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics 2022 (MLSA'22) co-located with the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery (ECML-PKDD'22), 53-73, 2022

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 9件）

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Ning Ding, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii  | 4. 巻<br>10                  |
| 2. 論文標題<br>Deep Reinforcement Learning in a Racket Sport for Player Evaluation With Technical and Tactical Contexts. | 5. 発行年<br>2022年             |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Access  | 6. 最初と最後の頁<br>54764 - 54772 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/ACCESS.2022.3175314  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-                   |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Masakiyo Teranishi, Kazushi Tsutsui, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii   | 4. 巻<br>1783        |
| 2. 論文標題<br>Evaluation of creating scoring opportunities for teammates in soccer via trajectory prediction                   | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>9th Workshop on Machine Learning and Data Mining for Sports Analytics 2022 (MLSA'22) co-located with ECML-PKDD'22 | 6. 最初と最後の頁<br>53-73 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-031-27527-2_5   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-           |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Tatsuya Yoshikawa, Kazushi Tsutsui, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii   | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Extraction of swing motion contributing to prediction of shuttle drop position in badminton                         | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21) workshop on AI for Sports Analytics (AISA) | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-       |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Bunker Rory, Fujii Keisuke, Hanada Hiroyuki, Takeuchi Ichiro  | 4. 巻<br>16             |
| 2. 論文標題<br>Supervised sequential pattern mining of event sequences in sport to identify important patterns of play: An application to rugby union | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>PLOS ONE  | 6. 最初と最後の頁<br>e0256329 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1371/journal.pone.0256329  | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-              |

|  |                        |
|--|------------------------|
| 1. 著者名<br>Toda Kosuke, Teranishi Masakiyo, Kushiro Keisuke, Fujii Keisuke  | 4. 巻<br>17             |
| 2. 論文標題<br>Evaluation of soccer team defense based on prediction models of ball recovery and being attacked: A pilot study | 5. 発行年<br>2022年        |
| 3. 雑誌名<br>PLOS ONE   | 6. 最初と最後の頁<br>e0263051 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1371/journal.pone.0263051   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-              |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Takeuchi Koh, Imaizumi Masaaki, Kanda Shunsuke, Tabei Yasuo, Fujii Keisuke, Yoda Ken, Ishihata Masakazu, Maekawa Takuya | 4. 巻<br>-             |
| 2. 論文標題<br>Frechet Kernel for Trajectory Data Analysis  | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>SIGSPATIAL '21: Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems          | 6. 最初と最後の頁<br>221-224 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1145/3474717.3483949   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Fujii Keisuke, Yoshihara Yujiro, Matsumoto Yukiko, Tose Keima, Takeuchi Hideaki, Isobe Masanori, Mizuta Hiroto, Maniwa Daisuke, Okamura Takehiko, Murai Toshiya, Kawahara Yoshinobu, Takahashi Hidehiko | 4. 巻<br>15             |
| 2. 論文標題<br>Cognition and interpersonal coordination of patients with schizophrenia who have sports habits   | 5. 発行年<br>2020年        |
| 3. 雑誌名<br>PLOS ONE  | 6. 最初と最後の頁<br>e0241863 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1371/journal.pone.0241863  | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-              |

|  |                        |
|--|------------------------|
| 1. 著者名<br>Ichikawa Jun, Fujii Keisuke, Nagai Takayuki, Omori Takashi, Oka Natsuki                              | 4. 巻<br>16             |
| 2. 論文標題<br>Quantitative analysis of spontaneous sociality in children's group behavior during nursery activity | 5. 発行年<br>2021年        |
| 3. 雑誌名<br>PLOS ONE   | 6. 最初と最後の頁<br>e0246041 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1371/journal.pone.0246041   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-              |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>TERANISHI Masakiyo, FUJII Keisuke, TAKEDA Kazuya  | 4. 巻<br>1             |
| 2. 論文標題<br>Trajectory prediction with imitation learning reflecting defensive evaluation in team sports | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)                                | 6. 最初と最後の頁<br>124-125 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/GCCE50665.2020.9291841  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-             |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Keisuke Fujii   | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Data-driven Analysis for Understanding Team Sports Behaviors | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Robotics and Mechatronics                          | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                                  | 国際共著<br>-       |

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ning DING, Kazuya TAKEDA, Keisuke FUJII  |
| 2. 発表標題<br>Player evaluation in a racket sport via deep reinforcement learning with technical and tactical contexts |
| 3. 学会等名<br>The 36th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence (JSAI 2022)               |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ziyi Zhang, Kazuya Takeda, Keisuke Fujii   |
| 2. 発表標題<br>Automatic screen-play classification in basketball via semi-supervised learning, |
| 3. 学会等名<br>MathSport International (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉川達也, 藤井慶輔, 武田一哉                   |
| 2. 発表標題<br>バドミントンにおけるシャトル落下位置予測に寄与するスイング動作の抽出 |
| 3. 学会等名<br>第3回慧ひろば(バイオメカニクス研究会)               |
| 4. 発表年<br>2021年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>戸田康介, 寺西真聖, 久代恵介, 藤井慶輔          |
| 2. 発表標題<br>予測に基づく集団行動系列の評価: サッカーのチーム守備への適用 |
| 3. 学会等名<br>2021年度人工知能学会全国大会(第35回)          |
| 4. 発表年<br>2021年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>寺西真聖, 筒井和詩, 武田一哉, 藤井慶輔               |
| 2. 発表標題<br>軌道予測に基づいたオフボールの得点機会を創出する選手の評価        |
| 3. 学会等名<br>第11回日本統計学会スポーツ統計分科会スポーツデータ解析コンペティション |
| 4. 発表年<br>2022年                                 |

|                                  |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>藤井 慶輔                 |
| 2. 発表標題<br>集団スポーツの戦術に関するデータ解析手法  |
| 3. 学会等名<br>第6回愛媛大学DS研究セミナー(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤井慶輔   |
| 2. 発表標題<br>部分観測過程におけるデータ駆動的エージェントモデリング                    |
| 3. 学会等名<br>日本認知科学会第37回大会 OS2 認知的インタラクションフレームワークの構築 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤井慶輔   |
| 2. 発表標題<br>Data-driven modeling in complex collective motions for social biomechanics |
| 3. 学会等名<br>第2回慧ひろば (バイオメカニクス研究会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Masakiyo Teranishi, Keisuke Fujii, Kazuya Takeda   |
| 2. 発表標題<br>Trajectory prediction with imitation learning reflecting defensive evaluation in team sports |
| 3. 学会等名<br>IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2020) (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2020年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                          | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究<br>分担者 | 石黒 祥生<br><br>(Ishiguro Yoshio)<br><br>(20769418) | 東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・准教授<br><br><br><br>(12601) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|