

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18116

研究課題名（和文）支配法則が非自明なヒト集団運動における社会的行動の可視化技術

研究課題名（英文）Technologies for visualizing social behaviors in multi-human motions with non-trivial behavioral rules

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、身体運動を伴う社会的行動をデータ駆動的なモデル化によって可視化する技術を開発し、実践的にヒトが利活用できるための基礎を作ることを目的とした研究を行った。本研究の結果、（1）背後の数学的な構造を抽出（2）学習した表現などを可視化（3）構成要素をモデル化して運動を生成することなどによって、一般に解釈が難しい非線形な構造を持つ機械学習モデルを用いたとしても、集団運動の理解に役立つ手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義としては、様々な支配原理・法則が明確でない諸現象の中でも、より自由度の高い人間の集団運動を対象とするため、（1）背後の数学的な構造を抽出（2）学習した表現などを可視化（3）構成要素をモデル化して運動を生成する観点から、例えば人間以外の生物集団や、人工物の集団移動などにも応用可能である。社会的意義としては、本研究の研究対象である集団スポーツ解析はもちろん、子どもの集団遊びや、イベント時の移動軌跡などの上記の観点からの解析において役立つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project was to develop a technology for visualizing social behavior involving physical movement through data-driven modeling, and to create a basis for practical human use of the technology. As a result, we have developed a method that is useful for understanding multi-agent movements, even when using machine learning models with nonlinear structures that are generally difficult to interpret, such as by (1) extracting the mathematical structures behind them, (2) visualizing the learned representations, and (3) generating movements by modeling the components.

研究分野：知能情報学

キーワード：機械学習 集団運動 スポーツ科学 時系列データ

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトは多様な集団の中で競い協力し合い、未解明な法則を発見し新技術を開発して諸問題を解決してきた。さらに現代は情報技術の発展により、基礎研究から目的が明確な産業まで多くの問題を解決してきた。しかし、ヒトがより良く社会で生きていくための社会性のような性質に関しては文脈依存性から学術的に定義できず、支配原理も未解明であり、従って情報技術としても行動データからその特徴抽出が難しい。

その困難の背景には様々な学術領域の問題に関連し、その根本には非合目的な、知性・感性・嗜好性に関連するため、最適な解を求めるのは難しい。この難問に取り組むには、これまで音声・画像認識などの技術が歴史的に大きく発展したように、ターゲットを絞り、過程と結果が計測可能で、未解明度が十分高い対象を情報技術の開発課題に選ぶ必要がある。スポーツや遊びなどに見られるヒト集団の身体運動は、計測可能な空間内において、他者と競合しながら多様な協働を見せ、上記の要件を全て満たした課題である。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、身体運動を伴う社会的行動をデータ駆動的なモデル化によって可視化する技術を開発し、実践的にヒトが活用できるための基礎を作ることを目的とした研究を行う。対象は計測可能で社会性が十分複雑な、集団スポーツや子どもの遊び等の身体運動に関して研究を行う。

### 3. 研究の方法

近年機械学習分野で盛んに研究されているニューラルネットワークなどの複雑な非線形構造を持つ学習モデルは、モデリングの予測性能を優先するような場合は有効となる場合が多いが、このような複雑なモデルから(例えば、物理的、意味的な)解釈を得るのは、多くの場合困難を伴う。複雑な集団運動の場合は、例えば(1)背後の数学的な構造を抽出(2)学習した表現などを可視化(3)構成要素をモデル化して運動を生成することなどによって、非線形な構造を持つデータ駆動的モデルを用いたとしても、間接的に集団運動を理解することが可能だと考えられる。さらに、貴重でサンプルが少ないデータに関しては、(4)学習ベースの方法を用いない科学的知識ベースで複雑な集団運動を分析するための新しい方法を提案した。そこでこれら(1-4)に関する研究をそれぞれ行った。

### 4. 研究成果

まず(1)(2)のアプローチとして、明示的な事前知識を必要とせずに、データから非線形動的システムの大域的なモード記述を得る方法として、動的モード分解と呼ばれる手法に着目した。まず、(1)背後の数学的な構造を抽出するため、物理的な解釈が可能な力学系の特徴を用いて類似度を計算する方法を開発し、集団スポーツ選手の動きを用いて目標達成確率を推定するシステムを開発した。この成果は、Plos Computational Biology 誌にて出版された[7]。次に、観測量間で構造を持つ非線形動的システムを対象に、ベクトル値再生核ヒルベルト空間で定義されたKoopman作用素のスペクトル解析を定式化し、その推定アルゴリズムを開発した。本手法は自転車シェアリングデータと群運動のシミュレーションデータを用いて検証され、Neural Network 誌にて出版された[6]。次の研究では、上記のグラフ動的モード分解と呼ばれる手法をスポーツ分類に応用する研究を行った。(2)学習した表現などを可視化するため、データ空間における分解を行う目的で、より簡潔に再定式化し、各スライド窓で分解する手法を適用して、物理的・意味的に解釈可能な動的構造を抽出し、複雑な集団運動の自動分類を行った。この研究成果は、Scientific Reports 誌にて出版された[4]。

次に、(3)構成要素をモデル化して運動を生成するために、スポーツ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。この研究は、国際会議 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2020)に採択された[3]。また、複数人の移動軌跡の方策をモデリングするための部分観測と機械的制約による機械学習手法を開発した(Fujii, Takeishi, Kawahara & Takeda, Policy learning with partial observation and mechanical constraints for multi-person modeling, arXiv preprint arXiv:2007.03155, 2020)。この研究は現在学術雑誌に投稿中である。

最後に、(4)学習ベースの方法を用いない科学的知識ベースで複雑な集団運動を分析するために、スポーツ習慣のある統合失調症患者の認知機能と、3対1の対人協調運動課題の成績の関係について明らかにした。この研究成果は、PLoS One 誌に採択された[2]。さらに共同研究として、子供の集団遊びに関する年齢の影響を調べた研究が、PLoS One 誌に採択された[1]。

本研究の学術的意義としては、様々な支配原理・法則が明確でない諸現象の中でも、より自由度の高い人間の集団運動を対象とするため、(1)背後の数学的な構造を抽出(2)学習した表現などを可視化(3)構成要素をモデル化して運動を生成する観点からは、例えば人間以外の生物集団や、人工物の集団移動などにも応用可能である。社会的意義としては、本研究の研究対象である集団スポーツ解析はもちろん、子どもの集団遊びや、イベント時の移動軌跡などの上記の観点

からの解析において役立つことが期待される。

- [1] Keisuke Fujii, Yujiro Yoshihara, Yukiko Matsumoto, Keima Tose, Hideaki Takeuchi, Masanori Isobe, Hiroto Mizuta, Daisuke Maniwa, Takehiko Okamura, Toshiya Murai, Yoshinobu Kawahara & Hidehiko Takahashi, Cognition and interpersonal coordination of patients with schizophrenia who have sports habits, PLoS One 15(11), e0241863, 2020.11.
- [2] Jun Ichikawa, Keisuke Fujii, Takayuki Nagai, Takashi Omori & Natsuki Oka, Quantitative analysis of spontaneous sociality in children's group behavior during nursery activity, PLoS One, 16(2): e0246041, 2021.2.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Benio Kibushi, Motoki Kouzaki, Yoshinobu Kawahara, Data-driven spectral analysis for coordinative structures in periodic human locomotion, Scientific Reports, 9, 16755, 2019
- [6] Keisuke Fujii, Yoshinobu Kawahara, Dynamic mode decomposition in vector-valued reproducing kernel Hilbert spaces for extracting dynamical structure among observables, Neural Networks, 117 94-103 2019
- [7] Keisuke Fujii, Takeshi Kawasaki, Yuki Inaba, Yoshinobu Kawahara. Prediction and classification in equation-free collective motion dynamics. PLoS Computational Biology 14(11) e1006545 2018.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 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 15
2. 論文標題 Cognition and interpersonal coordination of patients with schizophrenia who have sports habits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0241863
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0241863	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

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

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

1. 著者名 Fujii Keisuke, Takeishi Naoya, Hojo Motokazu, Inaba Yuki, Kawahara Yoshinobu	4. 巻 10
2. 論文標題 Physically-interpretable classification of biological network dynamics for complex collective motions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-58064-w	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fujii Keisuke, Takeishi Naoya, Kibushi Benio, Kouzaki Motoki, Kawahara Yoshinobu	4. 巻 9
2. 論文標題 Data-driven spectral analysis for coordinative structures in periodic human locomotion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-53187-1	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fujii Keisuke, Kawahara Yoshinobu	4. 巻 117
2. 論文標題 Dynamic mode decomposition in vector-valued reproducing kernel Hilbert spaces for extracting dynamical structure among observables	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 94 ~ 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2019.04.020	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Ichikawa Jun, Fujii Keisuke, Nagai Takayuki, Omori Takashi, Oka Natsuki	4. 巻 なし
2. 論文標題 Quantitative Analysis and Visualization of Children's Group Behavior from the Perspective of Development of Spontaneity and Sociality	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 24th Conference of Collaboration Researchers International Working Group (CRIWG'18)	6. 最初と最後の頁 169 ~ 176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-99504-5_13	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Isao Ishikawa, Keisuke Fujii, Masahiro Ikeda, Yuka Hashimoto, Yoshinobu Kawahara	4. 巻 31
2. 論文標題 Metric on Nonlinear Dynamical Systems with Perron-Frobenius Operators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems 31 (NeurIPS'18)	6. 最初と最後の頁 2858, 2868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fujii Keisuke, Kawasaki Takeshi, Inaba Yuki, Kawahara Yoshinobu	4. 巻 14
2. 論文標題 Prediction and classification in equation-free collective motion dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1006545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pcbi.1006545	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Hojo Motokazu, Fujii Keisuke, Inaba Yuki, Motoyasu Yoichi, Kawahara Yoshinobu	4. 巻 13
2. 論文標題 Automatically recognizing strategic cooperative behaviors in various situations of a team sport	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0209247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0209247	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Fujii Keisuke, Kawahara Yoshinobu	4. 巻 122
2. 論文標題 Supervised dynamic mode decomposition via multitask learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Pattern Recognition Letters	6. 最初と最後の頁 7~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.patrec.2019.02.010	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara
2. 発表標題 Interpretable classification of complex collective motions using graph dynamic mode decomposition.
3. 学会等名 11th Asian Conference on Machine Learning (ACML2019) Workshop on Machine Learning for Trajectory, Activity, and Behavior (ACML-TAB) ( (国際学会) )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 慶輔、武石直也、河原 吉伸
2. 発表標題 観測量間の動的構造を抽出するグラフ動的モード分解と集団スポーツデータへの応用
3. 学会等名 第22回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井慶輔
2. 発表標題 集団スポーツにおける機械学習を用いたデータ駆動科学
3. 学会等名 第18回認知的コミュニケーションワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Fujii
2. 発表標題 Dynamic mode decomposition and its applications (I), (II)
3. 学会等名 2019 Distinguished Lecture and International Interdisciplinary Workshop(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井慶輔、武石直也、稲葉優希、木伏紅緒、神崎素樹、河原吉伸
2. 発表標題 Data-driven spectral analysis for social biomechanics
3. 学会等名 第1回替ひろば(バイオメカニクス研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 慶輔、河原 吉伸
2. 発表標題 観測量間の動的構造を抽出するベクトル値再生核ヒルベルト空間における動的モード分解
3. 学会等名 第21回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井 慶輔
2. 発表標題 スポーツの得点等に関わる集団運動の人工知能を用いた評価システム
3. 学会等名 新技術説明会，科学技術振興機構，（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

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