

研究終了報告書

「生物集団移動の専門家が利用可能な説明・意思決定のための基盤技術」

研究期間:2020年12月～2024年3月

研究者:藤井 慶輔

1. 研究のねらい

計測技術の発展によって様々な生物や人工物の集団移動の記録が可能になり、これを背景に様々な社会や科学分野への貢献が期待される。しかし、情報技術の利用が想定される実環境での集団運動の専門家、例えば生物学の研究者やスポーツチームの監督等にとって説明・操作・意思決定が難しい場合がある。本研究では、人間やその他生物の多様な集団移動運動を研究対象として、実環境での集団移動の専門家が説明・操作・意思決定可能な人工知能基盤技術を開発することを目的とした研究を行った。具体的には、(A)観察データからの集団運動の相互作用や運動規則などの情報を抽出する研究、(B)反事実予測に基づく、介入効果推定などの集団運動評価技術の開発を行う研究、(C)強化学習などのエージェントモデリングに基づく、集団運動をシミュレーションし、意思決定を評価する技術の研究、の3項目を主に遂行した。

2. 研究成果

(1) 概要

研究項目(A)の中核となる研究として、多種多様な生物の研究者と協力し、動物行動学の理論モデルとデータを組み合わせ、集団の移動軌跡から相互作用の規則を推定する機械学習技術を開発した研究が出版された。この技術は、シミュレーションデータや実際のコウモリ、カツオドリ、マウス、ハエのデータで評価されたが、様々なスポーツや動物の観察データに基づく情報抽出の研究に繋がり、多くの研究が出版された。

研究項目(B)の主要なテーマとして、マルチエージェントの複雑なシナリオでの反事実の経時的介入結果の推定手法を開発した。自動運転車のシミュレーションやスポーツの「介入」の効果を評価する上で非常に有用であり、従来の方法では考慮されていなかった共変量の反事実的予測とマルチエージェント関係の構造を組み入れた。その他にも反事実予測をデータから実現する様々な集団スポーツに関する評価手法に関する研究が出版された。

研究項目(C)では、スポーツのデータを使用して行動価値関数を推定する研究や、生物のような協力的な移動を行う自律型強化学習モデルのシミュレーションを行った。特に、実世界の生物学的マルチエージェントをモデル化する際の問題として、実世界と強化学習の仮想環境との間のドメインギャップが挙げられるが、この問題に対する新しい手法を提案し、現在投稿中である。

以上より、本研究は実環境での集団移動の専門家にとって有用な、機械学習手法の新しい原型を開発したと言える。

(2) 詳細

研究項目(A)では、観察データからの集団運動の相互作用や運動規則などの情報を抽出す

る研究を行った。核となる研究としては、多種多様な生物の研究者との共同研究で、これまで概念的であった動物行動学の理論モデルとデータから、集団の移動軌跡から相互作用の規則を推定できる機械学習技術を開発した[1]。実験ではまず、非線形振動子(蔵本)モデルと古典的な群(ボイド)モデルの合成データセットを使用し、提案手法がベースラインよりも優れた性能を達成することを示した(図1)。実世界の生物集団では、コウモリ、鳥、マウス、ハエの移動系列データセットを分析し、提案手法を使用して新しい生物学的洞察を得た。本研究により、人間を含むさまざまな生物の集団移動に関する一般的な法則や、その多様性の発見へとつながっていくことが期待できる。

本研究成果は、2021年12月の「Neural Information Processing Systems 2021 (NeurIPS'21)」で発表された[1]。

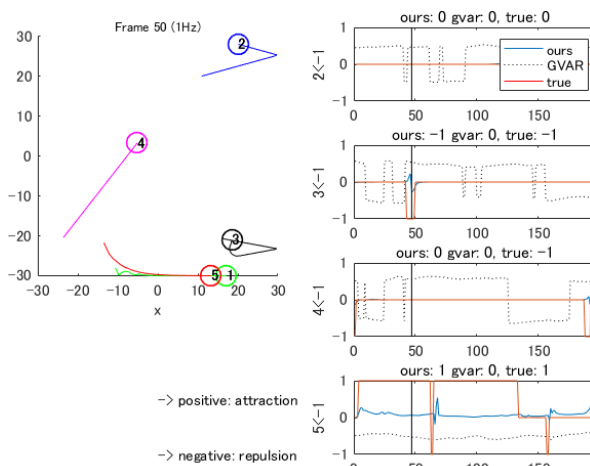
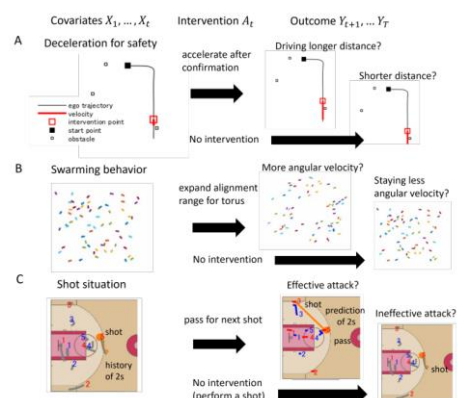


図1 ボイドモデルの結果例。左: 5つのボイド(エージェント)が動く。軌跡は動きの履歴である。右: 原因(boid 1)と結果(他の boid 2-5)の関係を、私たちの手法(青)と GVAR (黒)で表した結果。二値の関係はプロットの上側に記述されている。1, 0, -1はそれぞれ、引力、相互作用なし、反発を示す。なお、我々の手法と GVAR の大きさは、それぞれの最大値で正規化されている(そのため、手法間や赤の Ground Truth で値の比較はできない)。

研究項目(B)では、反事実予測に基づく、介入効果推定などの集団運動評価技術の開発を行う研究を行った。核となる研究としては、マルチエージェントの複雑なシナリオにおける反事実の経時的介入結果の推定手法を開発した(自動運転シミュレーションの結果について、まず ACM SIGSPATIAL'22 に出版され、Best Poster Award を受賞した)。反事実的長期予測を用いて個々の治療効果を推定することは、自動運転車における人間の介入、スポーツにおけるパスなどの「介入」の効果を推定する際に重要である(図2)が、従来は、共変量の反事実的予測とマルチエージェント関係の構造が考慮されていなかった。そこでこの研究では、マルチエージェントにおける解釈可能な反事実的リカレントネットワークを提案した。さらに、動物の群れモデルのシミュレータによる検証や、集団スポーツの実データを用いて検証した結果が国際学術雑誌に採択さ

図2: 研究項目(B)で扱った、(A) 自動運転車両シミュレーション、(B) 魚群シミュレーション、および (C) 実際のバスケットボールにおける介入の例。



れた[2] (Fujii et al, IEEE TNNLS, 2024)。

研究項目(C)では、強化学習などのエージェントモデリングに基づく、集団運動のシミュレーションや、データから意思決定を評価する技術の研究を行った。順問題では最近、学習が難しい下位の運動機構を理論モデルで、上位の意思決定を強化学習でモデル化した研究[Tsutsui et al. 2023, ICML workshop]が出版され、逆問題では、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意思決定を初めて評価した研究が現在投稿中である[Nakahara et al. 2023, IEEE Access]。一方、根本的な問題として、実世界の生物学的マルチエージェントを強化学習でモデル化する場合、ソース (実世界のデータ) とターゲット (つまり、強化学習環境) の間にドメインギャップがあるため、ターゲットダイナミクスを未知のソースダイナミクスに適応させることが必要である(図3)。そこで、実世界の demonstration から、マルチエージェント強化学習におけるドメイン適応のための方法として、ソースの行動をターゲットの行動に適応させた情報を教師として用いる強化学習手法を提案し、エージェントの国際会議に採択された[3](Fujii et al., ICAART 2024)。2対1の追跡-逃避や、2対2および4対8などの限定的な状況においては、ベースラインと比べてデータを模倣し、かつ報酬を獲得できるエージェントを学習したことを示した

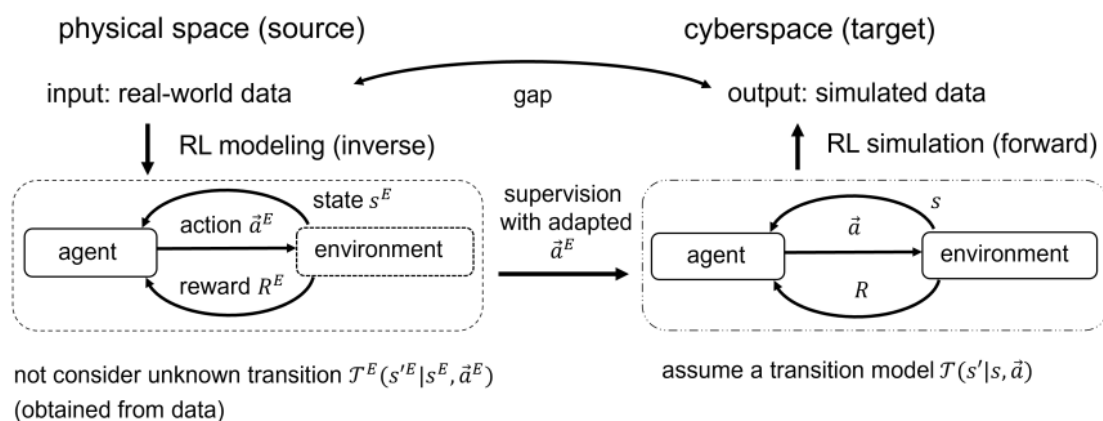


図3：研究項目(C)の問題設定と解決策。ソースとターゲットがそれぞれ物理空間の実世界データとサイバー空間のシミュレートされたデータである Real-to-Sim ドメイン適応問題を検討する。まず実世界のデータから逆方向の強化学習モデルを学習後、順方向の強化学習シミュレーションを実行するが、ドメインギャップが存在する。この研究では、観測された action をサイバー空間で適応させた adapted action supervision を用いることによりこの問題の解決を試みた。

以上より、実環境での集団移動の専門家（例えばスポーツの監督や生物学の研究者など）にとって、説明・操作・意思決定に寄与する機械学習手法の原型を、本研究により開発することができたと考えられる。

3. 今後の展開

今後の研究の展開と社会実装に繋がるためのシナリオとして、以下の短・長期的なタイムス

ンにおいて、それぞれ考えられる。

短期(1-3 年程度)

まず、実世界のデータを使用し、技術の有効性を確認するための追加研究が必要である。ただし、スポーツや動物行動のデータは、いわゆる共通のフォーマットに基づきデータベースに大量にあるような種類のものではなく、各自がそれぞれ蓄積されているため、データ基盤を整えたり計測したデータを共通の手続きで取り出せるような技術が必要である。この点に関してはまず、少数の生物種やスポーツのデータから始めることが短期的な目標になる。

技術的には、項目(1)について、より現象を正確にモデル化するために、ルールベースと学習モデルの融合モデルを開発する、あるいは大規模時系列モデリングを活用することにより、集団移動の観察データから仮説検証・新たな知見を発見する方向性が考えられる。項目(2)については、集団移動(時空間)データから反事実予測をより正確に行う手法を開発することで、人間の介入の効果をより正確に検証する方向性が考えられる。より正確な反事実予測を行うために、外挿に強い理論モデルや、エージェント同士の戦略の均衡を仮定するゲーム理論の導入などが考えられる。

これらの技術の有効性検証については、実世界データを記録する団体や企業との共同研究を積極的に推進し、社会実装に繋がるための知見を蓄積していきたいと考えている。

長期(3-7 年程度)

データ基盤やフォーマットについては、特定の団体が使うというよりは多くの人々が利用できるほうが望ましいので、オープンソース化することにより配布する。それにより、自分たちで処理できる量を超えて、更なる動物種やスポーツデータを含むデータベースの拡大が期待される。実世界マルチエージェントデータとしては、動物やスポーツ以外にも、交通やイベント時の人流など、その他の応用先も見つかる可能性があり、積極的に拡大を考える。企業と連携、あるいは起業することにより、実世界の集団移動の分析ツールとしての商業化も目指す。

技術的には項目(3)について、(1)(2)をベースに、様々な目標達成(例:誘発が難しい新規行動)を報酬に、改善方策を自動決定する強化学習モデルを開発・実装・評価することなどが考えられる。

4. 自己評価

本研究は、大まかには上記の 3 項目については計画通りに進んだと考えられる。研究実施体制については、技術補佐員や博士・修士学生を RA とし、多様な研究を遂行して成果を上げることができた。上記より本研究は、実環境での集団移動の専門家(例えばスポーツの監督や生物学の研究者など)にとって、説明・操作・意思決定に寄与する機械学習手法の原型を開発することができたと考えられる。この、様々な生物や移動体集団の複雑な移動のメカニズム発見や解釈可能なモデリング技術は、実世界マルチエージェント分野におけるイノベーションを促進すると期待される。一方で、集団運動のモデル化の本質的な難しさ(利用可能なデータの制限、モデルの複雑さ、時空間相互作用の組合せの多さ)から、理論的な側面において、今後の研究が必要である。今後は各領域の応用面での発展とともに、理論的な面でも貢献でき、広く利用可能な方法論および社会実装についても考えたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:37件

1. Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Kazushi Tsutsui, Emyo Fujioka, Nozomi Nishiumi, Ryoya Tanaka, Mika Fukushima, Kaoru Ide, Hiroyoshi Kohno, Ken Yoda, Susumu Takahashi, Shizuko Hiryu, Yoshinobu Kawahara, Learning interaction rules from multi-animal trajectories via augmented behavioral models, Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS'21), 34, 2021
この研究では、動物行動学の抽象的な方程式のモデルに基づき、残りの不明な関数や変数を、計測データから機械学習を用いて推定することで、理論とデータの両方に基づいて「誰を見てどう動いたか」に関する情報を取得可能にした。コウモリ、マウス、鳥、ハエの集団移動データから、個体間の有向相互作用を抽出し、それぞれの領域で新たな知見を得た。
2. Keisuke Fujii, Koh Takeuchi, Atsushi Kuribayashi, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda, Estimating counterfactual treatment outcomes over time in complex multiagent scenarios, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024
この研究では、マルチエージェントシステムへの介入の効果を推定するために、解釈可能で反事実的なりカレントネットワークを提案した。理論ベースの計算を活用した、共変量と結果の長期予測に基づく介入効果推定フレームワークを提案することで、時変交絡因子を備えた自動運転車両や魚群のシミュレートされたモデルにおいて、反事実共変量と結果を正確に予測したことを示した。さらにバスケットボールの実データにおけるシュートの状況で、もしパスをしたら良い攻撃にどれくらい繋がるかという反事実予測を行った。
3. Keisuke Fujii, Kazushi Tsutsui, Atom Scott, Hiroshi Nakahara, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Adaptive action supervision in reinforcement learning from real-world multi-agent demonstrations, International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2024), 2, 27-39, 2024
この研究では、マルチエージェントシナリオでの実世界のデモンストレーションに基づいて、エージェントのパラメータが異なる強化学習における adaptive action supervision を行う方法を提案した。実験では、未知のソース環境とターゲット環境の間で異なるダイナミクスを伴う追跡・逃避およびサッカーのタスクを使用して、提案手法がベースラインと比較して再現性と汎化能力のバランスを達成していることを示した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件(特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	藤井慶輔・寺西真聖・筒井和詩・武田一哉
	発 明 の 名 称	情報処理装置、情報処理方法、および、コンピュータプログラム
	出 願 人	東海国立大学機構 名古屋大学

	出 願 日	2021.7.14
	出 願 番 号	特願 2021-116076
	概 要	集団スポーツにおける間接的攻撃側選手の評価手法

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な受賞

4. 2023 年 3 月 藤井慶輔, 名古屋大学令和 4 年度赤崎賞
5. 2022 年 11 月 Keisuke Fujii, Koh Takeuchi, Atsushi Kuribayashi, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda, Best Poster Award, ACM SIGSPATIAL 2022

プレスリリース・メディア報道など

6. 名大・理研・JST など、生物集団の移動軌跡から相互作用の規則を理論とデータから推定できる機械学習技術、2021 年 12 月、日本経済新聞
7. <Meet STEAM>部活動の指導者不足の問題を解決へ 集団スポーツの「戦術」を科学的に評価する研究、2023 年 3 月、中日新聞
8. サッカー戦術分析で起業へ 名大准教授、自動運転も応用、2023 年 5 月、日本経済新聞