

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：17501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19816

研究課題名（和文）視覚計算理論との融合による新たな位相的データ解析技術の開発

研究課題名（英文）Development of a new topological data analysis by integration with computational vision theory

研究代表者

末谷 大道（Suetani, Hiromichi）

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：40507167

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、様々な科学分野で計測されるデータのトポロジカルな性質を捉えるための研究アプローチを探索した。まず、生物学分野では、質量顕微鏡イメージングで計測したマウスの脳切片試料の画像データを使用し、image-to-image回帰の一つであるU-Netを用いたニューラルネットワークによるパーシステント図の生成を試みた。また、認知科学分野では、ニューラルネットワークが数感覚を獲得する上でのトポロジカルな情報の役割を考察した。そして、非線形動力学分野では自己駆動粒子集団で現れる様々な群れパターンをパーシステントホモロジーを用いて分類し、t-SNEによる相図の新たな可視化法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、数知覚の研究を通じて神経系がトポロジカルな特徴をどのように捉えるかを理解し、その知見を通じてトポロジカルな特徴抽出から予測や分類までを一続きのモデルに統合することを試みた。このアプローチが発展することにより、アクティブマターなど広範な科学分野でのデータ解析が進化して多様な応用が期待されるとともに、新たな技術の開発に貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we explored research approaches to capture the topological property of data recorded in various fields of science. First, in the field of biology, we used imaging data taken from slices of mouse brain using imaging mass spectroscopy to generate persistent diagrams by the using U-Net, a version of image-to-image regression. In the cognitive science field, we also considered the role of topological information in the acquisition of number sense using artificial neural networks. Alos, in the field of nonlinear dynamics, we classified various swarm patterns appearing in self-propelled particles using persistent homology and proposed a new visualization method of phase diagram through the combination of t-SNE.

研究分野：非線形動力学

キーワード：位相データ解析 ニューラルネットワーク 自己駆動粒子集団

### 1. 研究開始当初の背景

データ集合が持つトポロジカルな情報に着目して定量的に記述する位相データ解析 (Topological Data Analysis: TDA) が、様々な分野で注目を集めている。例えば、データの空間的解像度を滑らかに変化させたときの「穴」の生成・消滅に関するパーシステントホモロジー解析が材料科学の分野において大きな成果をあげている。一方、アクティブマターや生物集団の群れ運動などの動的な現象や、多数の要素で構成される銀河集団や神経細胞集団などの対象では、トポロジカルな特徴量を純粋に数学的な定義から計算することは大きな困難が予想される。

### 2. 研究の目的

上記の背景の下、ヒトが持つ高度な視覚情報処理能力に基づく神経計算モデルと TDA を融合した新たなデータ解析技術の提案を目指した。さらに、多様体学習などの機械学習を適用することにより、TDA から得られる情報の効果的な可視化法の確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

以下の方法に従って研究を遂行した。

- (1) 視覚計算モデルとして畳み込み型の深層ニューラルネットワークで数知覚を遂行する課題を通じて、ネットワークの内部状態についてパーシステントホモロジーなどのトポロジカルな特徴と刺激画像そのものが持つトポロジカルな特徴とを比較する。
- (2) (1)の結果に基づいて、神経計算モデルと TDA を融合した新たなデータ解析技術を開発する
- (3) 提案した解析モデルを複数の対象に適用し、その妥当性を検証する。

### 4. 研究成果

(1)については、一定の成果が得られ、分担者(赤穂)と共同で日本神経科学会の年会において成果を発表できたが(2)については当初の計画通りに進めることが出来なかった。また、各分担者も非線形時系列解析において広く用いられているリカレンスプロット法と TDA を融合させた研究(一宮)や、新たなシナプス学習則の導入による頑健な深層学習手法の開発(三浦)など個別の研究では成果をあげているが、連携した共同研究の成果を十分にあげることができなかった。そのため、(3)については従来の TDA 解析と多様体学習を融合させた方法によって、群れ運動の記述という研究に取り組んだ。以下、その群れ運動の研究成果(パーシステントホモロジーに基づく自己推進粒子集団の教師なし学習)について報告する。

群れの科学は、魚や、羊、鳥の群れなどの自然システムや、社会ネットワークにおける情報伝播、人間集団における意思決定プロセスなどの社会システムにおける集団行動の原理を理解する上で、近年大きな進歩を遂げている。統計力学の観点から、エージェントの局所的な密度や運動方向を扱う秩序パラメータを用いた群ダイナミクスの研究が数多く行われているが、物理的な直感に基づくこのような指標は、必ずしも群ダイナミクスの多様性全体を捉えるものではない。

本研究では、教師なし学習の一種である多様体学習(非線形の次元縮約) TDA を組み合わせることで、群れの集団パターンを解析する。我々は、D'Orsogna らによって提案されたモデルを、集団パターンを形成する自走粒子の集団として改変した。そして、PH から得られるパーシステントイメージ(PI)と多様体学習の一つである t-SNE を組み合わせ、モデルの分岐パラメータを変化させたときの群パターンの変化を可視化した(図1)。

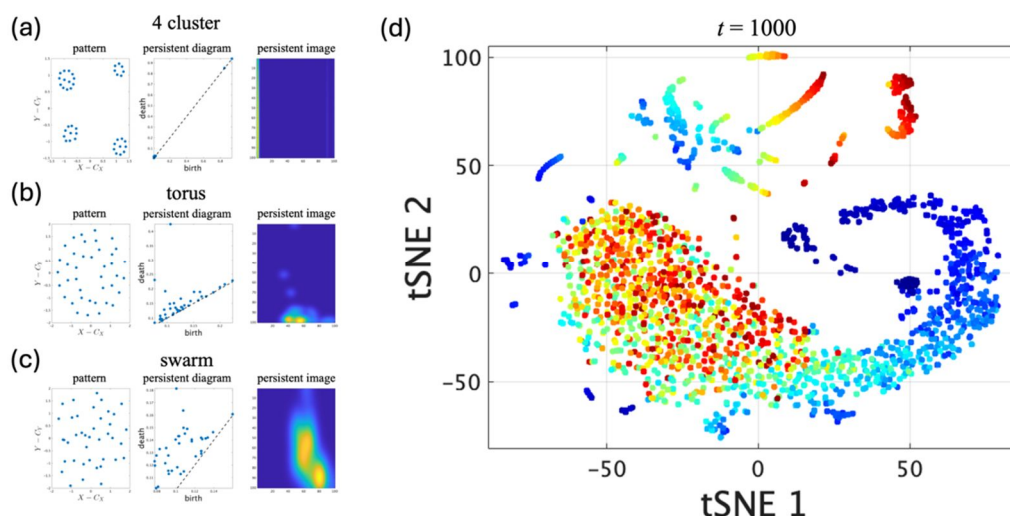


図 1

図 1 (a)~(c)は、3つの異なるパラメタ値について、時間が十分経過した後のある瞬間における粒子配置(各パネルの左)、対応するパーシステント・ダイアグラム(PD)(中央)、対応するパーシステント・イメージ(PI)(右)を示す。そして、図 1 (d)は、PI の集合に対して t-SNE を行った結果である。ここで、各サンプル点の色はパラメタ値に対応している。スナップショットのトポロジカルな変化に従って、サンプルが t-SNE 空間上に配置されていることがわかる。いくつかのサンプルは、パラメタの同じ値に対して異なる位置に配置されている場合もあるが、これは系が異なる初期条件に対して質的に異なる集合パターンを形成する可能性がある(巨視的レベルでの多アトラクタ性)ことを示している。このような相図は、分岐パラメタと初期条件の変化に対する PH の変化に注目することで初めて得られるものであり、従来の統計物理的なアプローチでは得られない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ichinomiya Takashi	4. 巻 14
2. 論文標題 Time series analysis using persistent homology of distance matrix	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 79 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.14.79	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 Konishi Masataka, Igarashi Kei M., Miura Keiji	4. 巻 17
2. 論文標題 Biologically plausible local synaptic learning rules robustly implement deep supervised learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnins.2023.1160899	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 Yoshida Ruriko, Miura Keiji, Barnhill David	4. 巻 14
2. 論文標題 Hit and run sampling from tropically convex sets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Algebraic Statistics	6. 最初と最後の頁 37 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2140/astat.2023.14.37	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 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 末谷大道
2. 発表標題 ランダム神経回路における入力に誘起されたアトラクターの次元と一般化同期との関係
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 末谷大道、赤穂昭太郎
2. 発表標題 人工ニューラルネットワークと計算トポロジーの統合による数覚の獲得過程の探求
3. 学会等名 第46回神経科学大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiromichi Suetani
2. 発表標題 Unsupervised learning of collective patterns in self-propelled particles through persistent homology
3. 学会等名 25th Seminar Strukturbildung in Chemie und Biophysik (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takashi Ichinomiya
2. 発表標題 Quantification of recurrence plot using persistent homology
3. 学会等名 TDA Week 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Ichinomiya
2. 発表標題 Dissection of chaotic trajectories using persistent homology
3. 学会等名 STATPHYS28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小西 正隆, 五十嵐 啓, 三浦 佳二
2. 発表標題 全層に共通するシナプス三つ巴学習則により教師あり深層学習は頑健に実現できる
3. 学会等名 第46回神経科学大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keiji Miura
2. 発表標題 Judging unlearnability from structures of deep neural networks for low dimensional inputs
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究分担者	赤穂 昭太郎 (Akaho Shotaro) (40356340)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・上級主任研究員  (82626)	
研究分担者	一宮 尚志 (Ichinomiya Takashi) (90455618)	岐阜大学・大学院医学系研究科・准教授  (13701)	
研究分担者	矢尾 育子 (Yao Ikuko) (60399681)	関西学院大学・生命環境学部・教授  (34504)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	三浦 佳二  (Miura Keiji)  (60520096)	関西学院大学・生命環境学部・教授    (34504)	
研究分担者	松木 俊貴  (Matsuki Toshitaka)  (00915928)	防衛大学校・電気情報学群情報工学科・助教    (17501)	

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