

令和 6 年 6 月 1 0 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11789

研究課題名（和文）統計モデルと数理モデルを融合した集団運動時系列分析手法の開発

研究課題名（英文）A New Analytic Approach to Time-series of Collective Motion with Integrated Statistical and Mathematical Modeling Strategy

研究代表者

高見 利也（Takami, Toshiya）

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：10270472

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：集団運動など複雑な運動をモデル化し、時系列を解析する手法について、一定の成果を上げることができた。まず、研究分担者による集団運動の実験的研究では、複数の自己駆動粒子の運動における分岐現象について明らかにした。研究代表者を中心として実施した時系列のモデル化については、リザーバーとして群れの運動を利用したシステムを実装し、精度向上のための集団運動の要件を求めた。研究代表者のグループによる、ビデオ映像と音など異なる表現方法の時系列に対するモデル化・分析手法の検討では、深層学習によるモデル化と統計処理を組み合わせることで分析を実施し、同期の判定手法に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで群れの運動は粒子群最適化などの最適化問題を解くための手法の一つとして考えられていたが、本研究では時系列予測などのより難しいタスクに対しての応用を検討した。集団運動をリザーバーとして取り入れたエコーステートネットワークによる時系列予測に関して、高精度の成果を得るための要件を研究することを通して、より広い問題に応用する道を開いた。

研究成果の概要（英文）：Certain results were obtained regarding the modeling of complex collective motion and methods for time series analysis. In the experimental study of collective motion, the bifurcation phenomenon in the motion of multiple self-driven particles was clarified. In time series modeling, we implemented a reservoir computing system with swarms and studied the requirements for improving the accuracy of time series analysis. In the study of modeling and analysis methods for time series of different representations such as video images and audio, a deep learning approach combined with statistical processing was implemented to determine synchronization.

研究分野：非線形物理学

キーワード：時系列解析 数理モデリング 統計分析 リザーバーコンピューティング 動的時間伸縮法 動的モード分解

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

我々が手にする時系列データの多くは、多数の要素が関係する複雑な運動の結果として得られるものである。例えば、心臓の拍動は心筋の協同的な収縮現象であるが、心電図はこの電気信号を体表面で測定したものであり、不整脈等の異常は、心筋の集団運動に乱れが生じた結果である。一般に、複雑な運動を時系列として記録したデータを分析することで、その運動の論理や性質を理解し、状態の変化を観測できる場合があるが、観測された時系列データから背後の運動状態を正確に推定するためには、運動のモデル化が十分な精度を持ってなされている必要がある。

モデル化のアプローチとしては、大きく分けて、データ主導のものとミクロの論理主導のものが存在する。データ主導アプローチとしては、各種の統計的モデリングが知られており、純粹に時系列データからモデルを構築するもので、ビッグデータと呼ばれるほど大量のデータが存在する現在、さまざまな場面で利用されるようになっている。ミクロの論理主導のものは、対象系を構成する微小要素間の相互作用を仮定して微分方程式などの数学的な表現を手に入れ、それらを組み合わせることでマクロスケールの運動モデルとして利用するものであり、伝統的に物理学分野で利用されてきたモデリング手法である。しかし、一般に複雑系と呼ばれる多数の物体の運動では、ミクロレベルの記述からマクロなレベルの論理を理解することは困難であり、自己駆動粒子の集団運動を含むこのような系の運動状態を理解するためには、マクロスケールでの数理モデルの構築が望まれることになる。

一方で、複雑な運動をデータ主導で解析する手法として、動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition, 以下 DMD)が利用されている。これは、線形近似した時間推進演算子から運動モードを求める手法で、線形計算(特異値分解)を利用することで、空間・時間の両面から分析する手法である。自己駆動粒子系に対する DMD は、まだそれほど多くの適用例がないが、DMD の応用で運動の変化点を求めることが可能であり、時系列データと運動状態の対応を分析するための手法として有力である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、集団運動を対象とした実験・観察から得られた時系列に対して、マクロレベルでの数理モデル化を実現するような、効果的な時系列分析手法を構築することである。このために、DMD を軸とした分析手法を確立し、データ主導の統計モデルと数理モデルを融合する形の、新たな分析手法を検討していく。

## 3. 研究の方法

本研究では、自己駆動粒子の実験解析グループと、時系列データの解析グループに分かれて、それぞれの時系列に関する統計モデル化と数理モデル化を実施し、両グループ間で協力しつつ、これらの間に位置するべき新たな分析手法を開発する。以下、本研究で明らかにする点について説明する。

自己駆動粒子の実験解析グループでは、樟脳船の実験を対象とする。防虫剤として使われる樟脳を水に浮かべると、溶け出す樟脳分子による表面張力の変化によって自動的に動き出す。運動を一次元に制限した場合の集団的な運動は、映像解析と統計モデリングを利用して、最適速度モデルによる記述が可能であることが明らかになっている。本研究では、二次元の領域での集団運動について解析を行う。この実験は研究分担者が実施し、研究代表者の所属する大分大学において統計的解析を試みる。

時系列データの解析グループでは、ビデオなど大自由度の映像時系列データの分析において、画像認識に使われる CNN や自己符号化器など深層学習の手法を取り入れて次元削減を実施すること、および、リカレントニューラルネットワークを利用して時系列のモデル化を実施するというアプローチをとる。時系列データの各次元が特定の意味を持つとして固定されている場合ではなく、互いに対応する次元が存在しないような複数の時系列間の同期・非同期を分析の対象としてモデル化することを考える。

## 4. 研究成果

(1) 本研究によって得られた成果のうち、時系列解析に関する部分を中心に報告する。まず、時系列のモデリングのためのリザーブ計算に関する成果である。集団運動をリザーブとして利用した時系列解析システムが提案されており、本研究においてもこれを取り入れて分析に利用した。ただし、すでに提案されているシステムの構成方法にそのまま従うのではなく、より広い範囲で適用可能性を調べるために独自に粒子間相互作用・入力的方式・読み出しの学習・フィード

バックの有無等を考慮して実装した。その上で、さまざまな時系列を入力して予測性能ができるだけ向上するようなパラメータの探索を行なった。右に挙げるのはその一例で、粒子速度をパラメータとして時系列の予測誤差をプロットしたものである。粒子数と時系列シグナルの周波数によって変動はあるが基本的には誤差が比較的小さい領域が一定の幅を持って存在しており、特定の入力に対して最適なパラメータを厳密に求める必要はなく、ある程度広い適用範囲を持っていることがわかる。つまり、大まかなパラメータ調整は必要なものの、集団運動によるリザーブコンピューティングが一定の汎用性を持つことが示された。

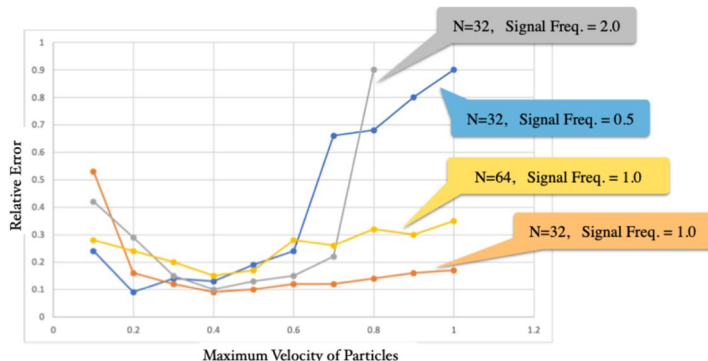


図1 粒子速度による時系列予測誤差の変化

(2) ビデオのような大自由度の次元を持つ時系列の同期分析結果について報告する。ビデオ映像を画像のピクセルデータの時間変化とみなすと、数万次元を持つ時系列データということになるが、問題は高次元時系列が扱いにくいというだけではない。例えば、ビデオに記録された人や動物の運動の間の関係を調べる場合を想定すると、多次元数値データ中の特定次元のデータに特定の意味がないため、それらの間の類似度や同期・非同期の判定をすることは簡単ではないことがわかる。図2は、二つのビデオ映像で捉えられている運動の時間的なズレの評価についての結果である。この場合は、単純なピクセル値の時系列間で差を求めても同期・非同期の判定ができないため、深層学習技術の一つである自己符号化器による特徴抽出を利用して、低次元化された特徴量の時系列として同期分析を実施するという方法をとる。あらかじめ特定分野の運動中の画像を大量に集めてトレーニングした自己符号化器を特徴抽出器として利用し、元の数万次元のデータを数十次元に圧縮しておく(図2)。圧縮後のデータも多次元の時系列データであるが、それぞれの次元は何らかの特徴を表していると想定され、特に運動中に変化する部分は被写体の動作あるいは姿勢に関する特徴であると考えられる。この特徴抽出によって、時系列間の距離を測定可能なデータ表現に変換されたため、動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping)を応用することによって、時系列内のズレを詳細に求めることが可能になった。

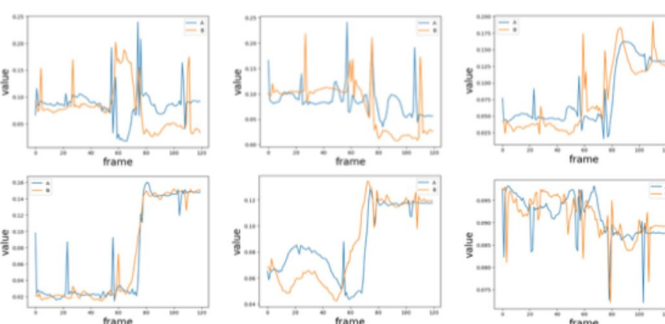


図2 自己符号化器で特徴抽出された時系列

(3) 運動映像と音楽のように、全く異なる対象から得られた時系列間の同期に関する分析結果を説明する。ダンスやフィギュアスケートなど音楽に合わせて運動する競技では、同期の定量的な評価が必要な場合が多いが、一般的な自動評価手法は確立されていない。ここで検討するのはこのような異なる時系列間の関係を分析する手法である。

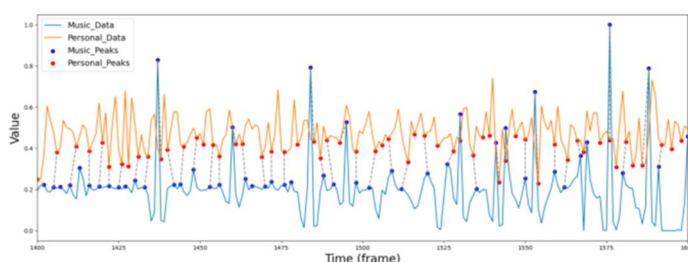


図3 映像と音楽から得られた同期点の対応

映像は先の自己符号化器による特徴抽出で低次元化することができるが、もう一方の音楽(音の時系列)は、全く異なる時系列データであり、何らかの方法で特徴抽出しても、各次元が同じ意味を持つベクトル時系列に表現を変更することは不可能である。ここでは、同期ポイントという考え方から分析した結果を示す。一般に、音楽に合わせて体を動かす場合に何と何を同期させているかを分析すると、音楽中の音響的振幅が大きい時点と姿勢の停止時点を一致させることによって同期を取ることが比較的多いことがわかる。図3は、運動の特徴抽出後の時系列から変化量(時間方向の微分量)の小さい場所(赤点)と、音楽の時系列から振幅の大きい場所(青点)をプロットしたものである。これらの対応関係の分析から、運動が音楽に同期できているかを定量的に判定することが可能になった。一般に異なる時系列間の同期判定について解決ができたわけではないが、ここでは特徴抽出の方法の工夫によって分析が可能になる場合の一例を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Michiko Shimokawa, Junma Arimitsu, Hiroyuki Kitahata, Hidetsugu Sakaguch	4. 巻 93
2. 論文標題 Transition of the Bifurcations in the Rotation of a Camphor-Coated Elliptical Paper Disk	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 034002-1,8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.93.034002	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 Michiko Shimokawa, Hidetsugu Sakaguch	4. 巻 91
2. 論文標題 Hula-Hoop-Like Motion and Subcritical Bifurcation of the Rotation of an Elliptical Paper Disk Coated with Camphor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 074002-1,8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.91.074002	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6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 原ゆう奈, 行天啓二, 大城英裕, 高見利也
2. 発表標題 人物動作における同時性の評価方法
3. 学会等名 映像情報メディア学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Oyama, Toshiya Takami
2. 発表標題 Estimation of pedestrian crossing intentions in in-vehicle video
3. 学会等名 Traffic and Granular Flow 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1．発表者名 大山勇人、行天啓二、大城英裕、高見利也
2．発表標題 車載映像に映る人物の意図推測手法に関する研究
3．学会等名 第74回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 原ゆう奈、行天啓二、大城英裕、高見利也
2．発表標題 時系列データ解析による音楽と動作の同期判定指標の提案
3．学会等名 映像情報メディア学会2023年冬季大会
4．発表年 2023年

1．発表者名 Toshiya Takami, Toshitaka Matsuki, and Hiromichi Suetani
2．発表標題 Swarm Dynamics Driven by an External Field
3．学会等名 Dynamics Days Europe 2023 ( 国際学会 )
4．発表年 2023年

1．発表者名 Toshiya Takami and Hiromichi Suetani
2．発表標題 Response and Efficiency of Self-propelled Particle Systems as a Physical Reservoir Computing System
3．学会等名 Statphys28 ( 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	大城 英裕  (Ohki Hidehiro)  (80194091)	大分大学・理工学部・助教   (17501)	
研究 分担者	行天 啓二  (Gyohten Keiji)  (80305028)	大分大学・理工学部・准教授   (17501)	
研究 分担者	下川 倫子  (Michiko Shimokawa)  (80554419)	奈良女子大学・自然科学系・准教授   (14602)	

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
---------	---------