

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11338

研究課題名(和文) 自己駆動粒子系の映像解析によるデータ駆動型シミュレーション構築手法の研究

研究課題名(英文) Construction of data-driven simulations through video analysis of self-propelled particle systems

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：複雑な粒子系の運動のモデル化やパラメータ推定・シミュレーションの構築を目的として研究を実施した。まず、自己駆動粒子系の運動時系列を対象として分析し、動的モード分解を応用した手法によって運動の変化点を検出することができることを示した。さらに、実験映像を基にして時系列データの抽出を実施し、この運動を表現するための数理モデルの推定と、因果分析を含む統計解析を実施した。これにより、未知の運動現象に対しても映像から数理モデルの構築までの手順を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

画像処理技術は大きく進んでおり、特に、物体の自動認識技術は近年格段に進歩してきた。本研究では、この画像処理技術を複雑な運動の分析に応用し、時系列解析の技術と合わせて数理モデル化を実施した。本研究で対象とした自己駆動粒子系は、動物や人の動きを表現するモデルとして利用される場合もあり、監視カメラや車載カメラで記録された映像の自動分析などへと発展的に応用が可能な研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Research was conducted for the purpose of modeling complex particle systems and constructing simulation. First, we analyzed the time series of the self-driven particle system and showed that the change point of complex motion can be detected by a method applying dynamic mode decomposition. Furthermore, time-series data was extracted based on the experimental images, a mathematical model for expressing this motion was estimated, and statistical analysis including causal analysis was performed. As a result, we successfully established the procedure from video to the mathematical model even for unknown motion.

研究分野：計算科学

キーワード：自己駆動粒子 時系列解析 映像分析 動的モード分解

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

鳥や魚など能動的に動く動物の運動を再現する方法の一つとして有名な BOID モデルは、提案から 30 年が過ぎた現在でも広く利用されており、情報分野においては、個体群の運動を最適化問題・探索問題へ活用する方法として、粒子群最適化法などの応用研究が長年実施されてきている。これに対して、最近、物理学の領域において、非平衡統計との関連から、機能性分子の統計力学、微生物の集団運動などの研究が盛んになり、さらに、ナノマシン、マイクロマシンの医療での応用も計画され始めていることで工学的にも重要性が高まっている。

エネルギーや圧力、体積などの物理量を保存する統計力学的アンサンブルの元で受動的に運動する分子などミクロの粒子系については、理論的考察・実験データ・シミュレーションの比較によって分子動力学のための力場パラメータが決定されている。一方、自己駆動粒子系に関しては、対象とする系が多様であり、粒子間の相互作用も複雑になりうるため、データ主導でシミュレーションを構築する試みは知られていない。ただ、鳥や魚の群れの運動を表す BOID モデルが、現実の群れの運動とどのように異なるのかという点に関しては、STARFLAG プロジェクトとして複数のカメラによる立体映像解析を応用して研究され、ビデオ映像から抽出した運動を統計解析することによって、ムクドリは周りの 7 羽の個体との協調行動をしていることが明らかになっている。また、様々な自己駆動粒子系での相転移の解析や、GPGPU を使った大規模数値計算なども実施されている。

一方、近年のディープラーニングの発展により映像解析分野に大きな変革が起きており、従来型の特徴抽出やパターンマッチングの手法による画像処理に加えて、大量のデータを利用した機械学習により、データ科学的な方法で複雑な運動をモデル化することも可能な段階になってきていると考えられる。しかし、これまで実施されてきているモデル化の試みは、シミュレーションを効率よく実施するためのモデル化として満足のいくものではなく、データ同化としての数値モデル化や、単純な相関関係を仮定した中でのパラメータ推定の域を出ていない。つまり、物理系の解析に使うための数理モデル化としても、大規模で効率的なシミュレーションを構築するためのモデル化としても不十分である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、実験、あるいは、観察によって得られた自己駆動粒子の運動について、数理モデル化に加えてデータ主導でシミュレーションを構築する手法を確立することである。

分子動力学で扱われるようなミクロの物理系のモデル化については、統計力学による知見を加えた第一原理的な構築が広く行われているが、その複合系としての機能性タンパク質、細胞性粘菌のような単細胞の集合体の運動、あるいは、さらに大きな鳥・魚・昆虫などの集団運動では、各個体間の相互作用は複雑、かつ、個別的であるため、統一的なモデル化が困難である。

このようなデータに即した集団運動シミュレーションの構築が可能になり、現実の集団運動を再現する精度が高まれば、その系自身に関する知見が深まるだけでなく、粒子群最適化法など工学的な応用にも資することが予想される。そこで、多様な集団運動の中から例を選び、これらの実験映像から画像処理により運動を抽出し、データ科学的な手法を利用しつつ数理モデル化を行い、大規模なシミュレーションを構築するための手法を研究することとする。

### 3. 研究の方法

研究の手順としては、映像解析の方法を応用して、集団運動を解析する手法を確立すること、比較的単純な自己駆動粒子系でのワークフローの確立、複雑な系への応用、大規模シミュレーションの構築という流れである。以下、順に説明する。

一次元の自己駆動粒子として、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って自動的に動き出す。これを一次元のガイドに浮かべると、ちょうど道路を走る自動車のように車間距離に応じて速度が変化し、渋滞現象なども観察できる。この実験をカメラで記録し、画像処理によって各樟脳船の運動を時系列として抽出するためのテスト系とする。この実験は研究分担者が実施し、映像を取得するところまでを担当する。

ここ 20 年ほどの間に画像処理の技術は飛躍的な進歩を遂げており、OpenCV というライブラリには、基本的な技術を利用するためのアプリケーション・プログラム・インタフェース(API)がまとめられている。ここでは、この中から画像の差分検出、特徴点抽出、座標変換などの基本ライブラリを利用して、映像から物理情報を得るためのプログラムを作成し、実験解析に利用する。また、複数のカメラを使って、エピポーラ幾何を利用した三次元位置座標復元のコードを作成し、鳥や魚の運動解析に利用する。これらの画像・映像処理のコードは、研究代表者が所属する大分大学の大学院生が担当して開発する。ここで、実験の高速度カメラで取得したビデオ映像を大量に解析するための高速処理技術の開発は、研究代表者がこれまで実施してきた高性能計算分野の経験を応用する。

以上のように、画像処理技術を利用した実験映像解析により取得した物理量の時系列を、数理的・数値的にモデル化してシミュレーションを構築する。

### 4. 研究成果

本研究の成果として、動的モード分解による運動変化点の検出手法の開発と実験映像分析による時系列取得と統計解析に関する内容を主に報告する。

### (1) 動的モード分解による運動変化点の検出手法の開発

Boid モデルのような群れのシミュレーションによって発現する運動パターンを分類する研究は既に行われており、動的モード分解(Dynamic Mode Decomposition、DMD)を使うことにより、運動パターンの分類が試みられている。しかし、これまでの研究では、ある運動パターンから別の運動パターンに時間的に遷移していくことは想定されていないため、DMD を用いて運動の遷移を検知する手法として、我々はTime-Shifted DMD(TS-DMD)を提案した。

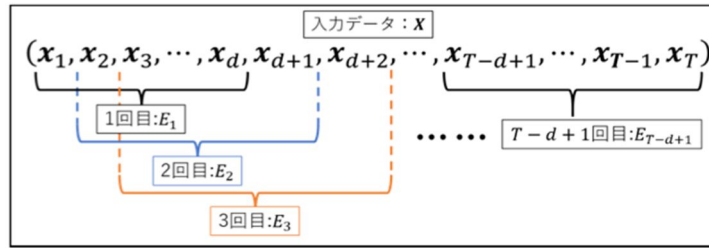


図 1 TS-DMD の入力データ

この手法は、図 2 のように、入力の時系列データを順にシフトした形で与え、DMD の手法により再構成誤差を求めるものである。(a)~(c)の三種類に変化する時系列に対してこれを適用すると、図 1 に示す通り、波形にピークが現れるタイミングと運動パターンが変化するタイミングが一致することがわかった。しかし、運動の変化に対してどの程度の感度があるか明らかでないため、規則的な時系列データを人為的に生成してテストを実施した(図 3)。このデータは概ね規則的であったが、 $t=300$  あたりで浮動小数点表現に依存する不連続点があったことが判明しており、この付近での再構成誤差のピークはこれによるものであったことがわかった。つまり、かなりの精度で運動の不連続点を捉えることが可能であるということが明らかになり、一般に複雑な自己駆動粒子系の遍歴的な運動の変化点を明示することが可能になった。

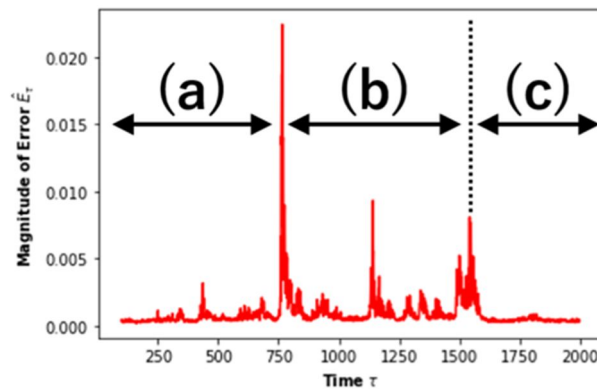


図 2 TS-DMD による再構成誤差

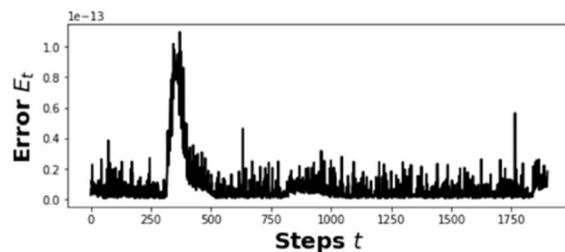


図 3 TS-DMD の感度検証

### (2) 実験映像の分析による時系列取得と統計解析

自己駆動粒子に対する実験映像を入力として、画像処理技術を利用して時系列データを取得し、そのデータに対する統計分析と数理モデルとの比較を実施した。実験映像としては分担者側で取得したビデオ映像を用いた。実験の対象は、最も簡単な自己駆動粒子のモデルとしてよく使われている、樟脳船の一次元運動である(図 4)。

本研究では、映像解析により次の 3 つの時系列データを抽出した。

- 樟脳船の速度
- 前方の個体との距離
- 後方の個体との距離

尚、速度の算出の際、ノイズ軽減のため 10 フレーム間隔で位置座標の差分をとっている。それに伴い、前方の個体  $i=1$  との距離と後方の個体との距離も 10 フレーム間隔で抽出を行ったため、実験映像の総フレーム数は 5400 であるが、分析に使用するデータ長は 540 となっている。

このようにして求めた時系列データに対して、ベクトル自己回帰モデル(VAR)を使って統計分析するとともに、変数間に因果的な関係があるかを見るために、Granger 因果性検定を実施した。また、自動車の渋滞のモデルとして知られている最適速度モデル(OV モデル)を数理モデルとして仮定した場合のパラメータ推定を実施し、数理モデルと統計モデルによる予測を行った。

図 5 は統計モデルを利用し速度予測の結果である。青と赤の線があるが、これらはそれぞれ変数として前方の船との距離と後方の船との距離を利用したもので、このデータに対してはほぼ同じ程度の予測精度となっている。図 6 は、数理モデルとして利用した OV モデルのパラメータを実験データからあらかじめ推定した上で、速度予測を実施した結果である。データ取得の際の誤差なども考慮すれば、どちらのモデルの予測も十分に機能していると判断できる。

実験映像からのデータ抽出による分析の例として、1次元運動を採用したが、もっと複雑な運動になると適切な数理モデルを導入することが難しくなる。しかし、効率的なシミュレーションの実施を想定すると、数理モデルを適切に設定することが重要である。数理モデルと統計モデルを効果的に組み合わせる手法は、今後の研究に期待したい。

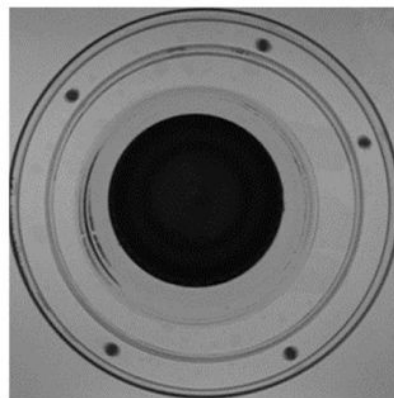


図 4 樟脳船の実験映像

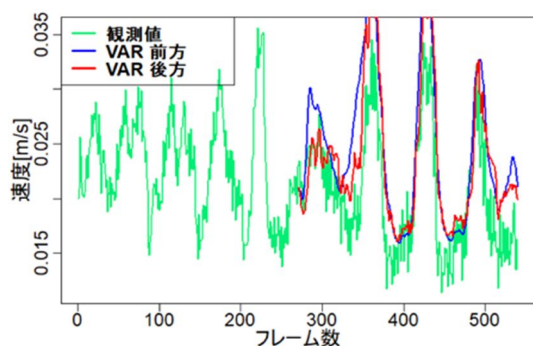


図 5 VAR モデルによる予測

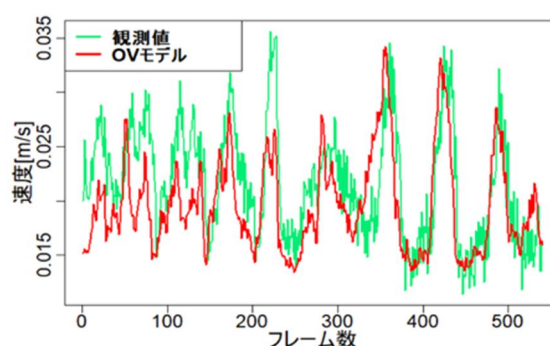


図 6 OV モデルによる予測

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Inomata Yoshinari, Takami Toshiya              | 4. 巻<br>252             |
| 2. 論文標題<br>Analysis of the Collective Behavior of Boids  | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Springer Proceedings in Physics                | 6. 最初と最後の頁<br>373 ~ 379 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-030-55973-1_46 | 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>猪股能成, 高見利也                   | 4. 巻<br>26          |
| 2. 論文標題<br>動的モード分解を用いた集団運動変化点の検出       | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>第26回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集     | 6. 最初と最後の頁<br>1 ~ 4 |
| 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>-           |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Shimokawa Michiko, Kitahata Hiroyuki, Sakaguchi Hidetsugu                                       | 4. 巻<br>132                 |
| 2. 論文標題<br>Star-shaped patterns caused by colloidal aggregation during the spreading process of a droplet | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>EPL (Europhysics Letters)   | 6. 最初と最後の頁<br>18002 ~ 18002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1209/0295-5075/132/18002   | 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>SHIMOKAWA Michiko   | 4. 巻<br>34              |
| 2. 論文標題<br>Pattern Formation in Glass Caused by Rayleigh-Taylor Instability | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW                               | 6. 最初と最後の頁<br>411 ~ 418 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3811/jjmf.2020.T013                          | 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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yoshinari Inomata and Toshiya Takami                   |
| 2. 発表標題<br>Analysis of group behavior of Boids using PCA          |
| 3. 学会等名<br>Traffic and Granular Flow 2019, Pamplona, Spain (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Toshiya Takami  |
| 2. 発表標題<br>Construction of data-driven simulations and multi-scale analysis of complex systems |
| 3. 学会等名<br>Dynamics Days Europe 2019, Rostock, Germany (国際学会)                                  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>猪股能成, 高見利也                    |
| 2. 発表標題<br>動的モード分解による集団運動データの解析          |
| 3. 学会等名<br>電気・情報関係学会九州支部第72回連合大会, 九州工業大学 |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>猪股能成, 高見利也                     |
| 2. 発表標題<br>動的モード分解を用いた集団運動データの自動分類        |
| 3. 学会等名<br>情報処理学会九州支部 若手の会セミナー, 虹の松原, 佐賀県 |
| 4. 発表年<br>2019年                           |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>猪股能成, 高見利也               |
| 2. 発表標題<br>探索領域の分割を導入した挿入操作PSO戦略の提案 |
| 3. 学会等名<br>火の国情報シンポジウム2020          |
| 4. 発表年<br>2020年                     |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>猪股能成, 高見利也          |
| 2. 発表標題<br>挿入操作PSO戦略に対する高速化の検討 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会総合大会        |
| 4. 発表年<br>2020年                |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>猪股 能成, 高見 利也      |
| 2. 発表標題<br>Boidモデルを用いた渦運動の解析 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2018年秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2018年              |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>猪股能成, 高見利也               |
| 2. 発表標題<br>エージェントの群行動を制御・解析するツールの開発 |
| 3. 学会等名<br>電気・情報関係学会九州支部第71回連合大会    |
| 4. 発表年<br>2018年                     |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>猪股 能成, 高見 利也             |
| 2. 発表標題<br>主成分分析を用いた Boid モデルの群行動解析 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第74回年次大会           |
| 4. 発表年<br>2018年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大山 勇人, 下川 倫子, 高見 利也           |
| 2. 発表標題<br>VARモデルを用いた自己駆動粒子の相互作用に関する因果分析 |
| 3. 学会等名<br>火の国情報シンポジウム2021               |
| 4. 発表年<br>2021年                          |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>猪股能成, 高見利也              |
| 2. 発表標題<br>粒子群最適化における集団運動データの解析    |
| 3. 学会等名<br>2020年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 |
| 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 | 下川 倫子<br><br>(Shimokawa Michiko)<br><br>(80554419) | 福岡工業大学・工学部・助教<br><br><br><br>(37112) |    |



6. 研究組織（つづき）

|                   | 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<br>担<br>者 | 小林 泰三<br><br>(Kobayashi Taizo)<br><br>(20467880) | 九州大学・情報基盤研究開発センター・学術研究員<br><br><br><br>(17102) |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |