

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K17638

研究課題名(和文)ハイブリッド力学系としての二足歩行の吸引領域の形成メカニズムに注目した解析

研究課題名(英文) Analysis of bipedal walking models as a hybrid system from the viewpoint of the basin of attraction

研究代表者

大林 一平 (Obayashi, Ippei)

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員

研究者番号：30583455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：二足歩行の数値モデルの研究を行い、2つの論文を出版した。これらの結果はともに単純なコンパス型と呼ばれる受動歩行(坂を駆動力代わりにした歩行運動)モデルを解析した結果である。このモデルは単純であるが「倒立振り子構造による歩行の実現」という歩行の基本メカニズムを含み、歩行の力学的な理解に重要なモデルである。数学の力学系理論を用い、歩行の安定性に深く関係した吸引領域と呼ばれる構造の形成メカニズムを明らかにした。計算トポロジーについてはパーシステントホモロジーのより便利な活用法に関する研究を行った。パーシステントホモロジーはデータの形の定量化を位相幾何という数学を応用して行うものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二足歩行の安定性を理解することは理論的な興味関心にとどまらない。二足歩行ロボットを転倒させずに歩き続けさせるための理論的基盤となる。またヒトの二足歩行への展開としては怪我や病気で歩行に困難が生じた人々への支援などへの応用も期待される。本研究成果がそういった応用に直接つながるものではないが、より現実的な歩行モデルの解析やヒトやロボットから得られたデータの解析に本研究の成果が有効に活用できることができればロボット設計などの実利的な方向にもつながっていくことが期待される。計算トポロジーの結果はデータ解析の新たなツールとして有用であると期待される。

研究成果の概要(英文)：I have researched mathematical models of bipedal walking and published two papers. These results are based on the analysis of a simple compass-type model of passive walking (walking motion using a hill without driving force). Although this model is simple, it contains the basic mechanism of walking, the "inverted pendulum model," and is important for understanding the dynamics of walking. Using the mathematical theory of dynamical systems, the formation mechanism of the basin of attraction, which is deeply related to the stability of walking, is clarified. For computational topology, I studied persistent homology. Persistent homology enables us to characterize the shape of data quantitatively. The method obtained in this research is helpful for data analysis by persistent homology.

研究分野：応用数学

キーワード：力学系 二足歩行 数値モデル 計算トポロジー

1. 研究開始当初の背景

歩行運動における安定性は重要な問題である。これはロボットの歩行の安定性、ヒトの歩行支援といった課題を解決するための理論的基盤となる問題である。この問題を数学/数理モデルの視点から考えると安定性を理解する一つの方法はアトラクタの吸引領域の形状を調べることであるといえる。吸引領域に関する研究は主に数値計算により調べられてきたが、その形成に関する数理メカニズムは不明な点が多かった。

大林はこの研究を開始する時点で倒立状態に由来する安定多様体、不安定多様体といった力学系理論の数学的概念がこの形成メカニズムに関係しているという結果を得ていた。また力学系と計算トポロジーを複合した手法による解析を進めていた。計算トポロジーというツールが歩行モデルに解析に有効かどうかは難しい問題であったが、ツールそのものは将来性の高い道具であるように思われた。

2. 研究の目的

本研究の目標は (1) 力学系理論を活用した歩行の数理モデルのより深い解析 (2) 歩行モデル研究を通じたハイブリッド系のアトラクタの吸引領域の形成メカニズムの一般論の考察 (3) 計算トポロジーの研究、である。歩行の数理モデルはハイブリッド系と呼ばれる連続な運動と離散的な運動が複合した系で、既存の力学系理論の直接的適用が難しい挑戦的な系であり、こういった系の解析や手法開発などは力学系の応用的な側面に寄与すると期待される。

3. 研究の方法

歩行の数理モデルの研究に関しては数値計算とその結果の理論的考察を中心として進める。倒立状態に対応する平衡点/周期点から延びる余次元1の不変多様体に特に注目して考察を行う。二足歩行は倒立振子の動きがその運動の基本となっており、倒立状態というのはモデルによらず普遍的な存在であるため、ここに注目するのは自然だと考えられる。

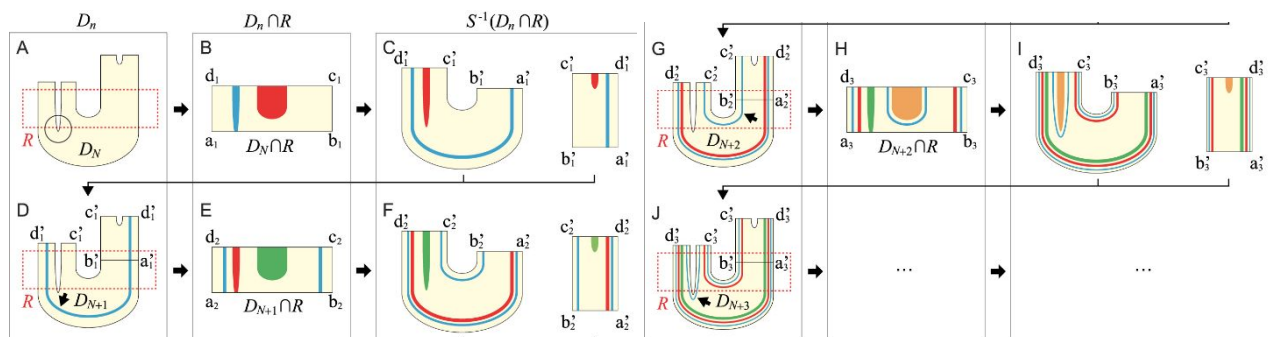
計算トポロジーに関しては応用に際して生じた問題の数学へといかに翻訳するか、という面に注目して研究を進める。

4. 研究成果

(1) の歩行モデル研究に関しては Obayashi et al. (2016) や Okamoto et al. (2020) などの結果が出版された。これらの結果はともにシンプルなコンパス型受動歩行モデルで、非常にシンプルでありながら、「倒立振子構造による重力による位置エネルギーと運動エネルギーの交換による歩行の実現」という歩行の最も基本的で重要なメカニズムがそこに含まれていると考えられ、二足歩行の特に力学的な観点から重要だと考えられている。

2016年の論文では力学系の安定多様体や 補題という概念を用いて吸引領域の形成メカニズムの基本を明らかにした。この系に特徴的な細長い吸引領域は倒立静止状態から延びる安定多様体によって特徴付けられ、その領域の内側のV字構造やスリットによるフラクタル構造は系のハイブリッド性と倒立静止状態の点の双曲性が複合して得られるということを明らかにした。

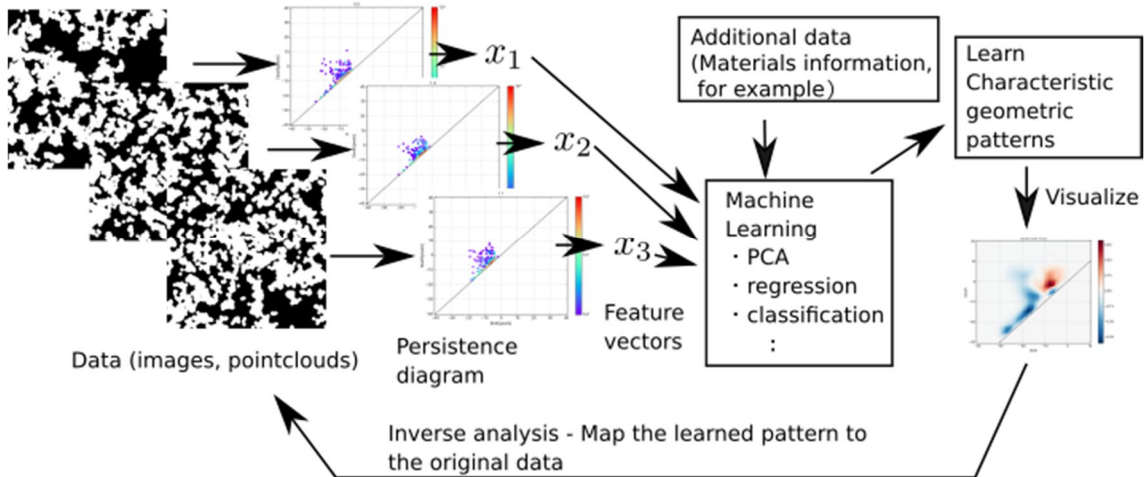
2020年の論文はこの形成メカニズムをさらに精緻に調べた。まず数値計算により吸引領域のフラクタル構造はパラメータ(坂の角度)の変化により段階的に変化していくということが明らかとなった。そしてこの段階的变化の数理メカニズムを明らかにした。このフラクタル構造はポアンカレ写像の逆像が領域内の切れ込み構造を繰り返し引き伸ばしと折り畳みをすることで実現されているということは2016年の論文で示されていたことであるが、さらにこの切れ込みとポアンカレ写像の順像と位置関係が形成メカニズムの鍵であることを示した。



図：フラクタル構造の形成に関する模式図 Okamoto et al. (2020)

(3) の応用トポロジーについては Obayashi et al. (2018) や Obayashi (2018) などの結果がある。これらはパーシステントホモロジーと呼ばれるトポロジーの応用分野に関する結果で、データの形の定量化という問題に便利な数学的手法を開発した。

Obayashi et al. (2018) はパーシステントホモロジーと機械学習の組み合わせに関する論文である。パーシステントホモロジーによって形の情報を定量化し、それに機械学習を適用することでデータの特徴的幾何パターンを抽出する手法である。この組み合わせは盛んに研究されているが、本論文では結果の解釈性を高めるため、精度を多少犠牲にしても単純な手法を利用し、以下の図のようなフレームワークを提唱した。



Obayashi et al. (2018) で提唱したフレームワークの概要図
(大林の Web サイトより)

Obayashi (2018) ではパーシステントホモロジーによるデータ解析で有用な「逆解析」と呼ばれる手法の一種を開発した。パーシステントホモロジーの出力(パーシステント図と呼ばれる)の情報に対応する元データの幾何構造を抽出するアルゴリズムを開発した。数学的にはホモロジー代数上の最適化問題として定式化されるものである。他の類似手法と比べると (a) 次元に制限があった手法を一般化することに成功した (b) 他の手法よりもパーシステントホモロジーに適しており、+ の情報を得られる、という長所がある。

またパーシステントホモロジーの応用に関する研究もいくつかある。材料科学への応用が中心であるが地質学への応用なども含まれている。これらの研究には上の機械学習と逆解析が効果的に組み合わせられて利用されている。

(2) のハイブリッド系のアトラクタの吸引領域の形成メカニズムの一般論の考察は目標が野心的すぎてこの期間では成果と言えるものはなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7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 Obayashi Ippei, Hiraoka Yasuaki, Kimura Masao	4. 巻 1
2. 論文標題 Persistence diagrams with linear machine learning models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied and Computational Topology	6. 最初と最後の頁 421 ~ 449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41468-018-0013-5	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 Obayashi Ippei	4. 巻 2
2. 論文標題 Volume-Optimal Cycle: Tightest Representative Cycle of a Generator in Persistent Homology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry	6. 最初と最後の頁 508 ~ 534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/17M1159439	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 Kimura Masao, Obayashi Ippei, Takeichi Yasuo, Muraio Reiko, Hiraoka Yasuaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Non-empirical identification of trigger sites in heterogeneous processes using persistent homology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-21867-z	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 Ippei Obayashi, Shinya Aoi, Kazuo Tsuchiya, Hiroshi Kokubu	4. 巻 472 (2190)
2. 論文標題 Formation Mechanism of a Basin of Attraction for Passive Dynamic Walking Induced by Intrinsic Hyperbolicity	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society A	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) 10.1098/rspa.2016.0028	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 Okamoto Kota, Aoi Shinya, Obayashi Ippei, Kokubu Hiroshi, Senda Kei, Tsuchiya Kazuo	4. 巻 15
2. 論文標題 Fractal mechanism of basin of attraction in passive dynamic walking	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 055002 ~ 055002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-3190/ab9283	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 Suzuki A., Miyazawa M., Okamoto A., Shimizu H., Obayashi I., Hiraoka Y., Tsuji T., Kang P.K., Ito T.	4. 巻 143
2. 論文標題 Inferring fracture forming processes by characterizing fracture network patterns with persistent homology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Geosciences	6. 最初と最後の頁 104550 ~ 104550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cageo.2020.104550	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 Hirata Akihiko, Wada Tomohide, Obayashi Ippei, Hiraoka Yasuaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Structural changes during glass formation extracted by computational homology with machine learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-00100-3	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10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 大林一平, 吉脇理雄
2. 発表標題 パーシステントホモロジーの体の問題
3. 学会等名 2019年度応用数学合同研究集会
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 大林一平, 吉脇理雄
2. 発表標題 Field choice problem on persistent homology
3. 学会等名 日本数学会 2020 年度年会
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 大林一平
2. 発表標題 パーシステントホモロジー - 数学と情報科学の融合による「かたち」のデータ解析
3. 学会等名 日本数学会 2018 年度秋季総合分科会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ippei Obayashi
2. 発表標題 Topological Data Analysis for Materials Science
3. 学会等名 ICMMA 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大林一平
2. 発表標題 パーシステントホモロジーと機械学習を用いたデータ解析
3. 学会等名 日本数学会 2017 年度秋季総合分科会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ippei Obayashi
2. 発表標題 Digital Image Analysis using Persistent Homology and Machine Learning (Poster)
3. 学会等名 Applied Algebraic Topology 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大林一平
2. 発表標題 Volume optimal cycles for persistent homology
3. 学会等名 日本数学会 2018 年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ippei Obayashi
2. 発表標題 Formation mechanism of the basin of attraction of bipedal walking models
3. 学会等名 Applied Nonlinear Mathematics Seminar, University of Bristol (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ippei Obayashi
2. 発表標題 Inverse Problems on persistent homology
3. 学会等名 RIMS共同研究偏微分方程式における逆問題とその応用のさらなる展開 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 大林一平, 吉脇理雄
2. 発表標題 Field choice problem on persistent homology
3. 学会等名 日本数学会2020年度秋季総合分科会
4. 発表年 2020年 ~ 2021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