

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11985

研究課題名(和文) 深層ニューラルネットワークにおけるカオスのダイナミクスの解析と情報処理への応用

研究課題名(英文) Chaotic dynamics in deep neural networks and its applications to information processing

研究代表者

山口 裕 (Yamaguti, Yutaka)

福岡工業大学・情報工学部・助教

研究者番号：80507236

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)：本研究は種々の深層学習モデルに現れ得るカオスのダイナミクスを解析し、情報処理への応用を考察し、よりダイナミクスを利用した動的な処理を用いる人工知能を実現すること目的としている。深層学習モデルにおけるカオスを利用した情報処理を実現するため、以下の3種の研究を行った。1) 深層連想モデルの開発とその力学系的性質の解析、2) 深層生成モデルにより生成された疑似カオス時系列の特徴付け、3) 3層の深層連想記憶モデルによる領野間の結合損傷に関わる機能低下の研究と、これを応用したレビー小体型認知症の数理モデルの提案と数理的解析。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義を以下の3点にまとめる。(1) 敵対生成ネットワークによる画像変換を力学系として分析し、連続的生成にカオスのダイナミクスを見出し、多数のアトラクタの存在を明らかにした。これは深層モデルの力学系的構造の研究に寄与する成果である。(2) 深層生成モデルにより生成された擬似的なカオス時系列と、真のカオス時系列との違いを非線形時系列解析手法により分析した。これは生成モデルの限界について非線形力学系からの観点を知見として加えるものである。(3) 多層連想記憶モデルをレビー小体型認知症のメカニズムを考察する際の数理モデルとして利用することができ、認知症研究発展に寄与する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to analyze the chaotic dynamics that can appear in various deep learning models, to consider its application to information processing, and to realize artificial intelligence that uses chaotic dynamics. In order to realize information processing using chaos in deep learning models, we conducted the following three studies: 1) development of deep associative models and analysis of their dynamical systems, 2) characterization of pseudo-chaotic time series generated by deep generative models, and 3) proposal and mathematical modeling of Lewy body dementia based on a three-layered deep associative memory model.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：深層学習 カオス 連想記憶 敵対生成ネットワーク 畳み込みネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

深層学習技術は近年飛躍的発展を遂げており、社会発展の基盤となりつつある。深層学習分野においてダイナミクスを利用する研究が提案されているが、これらのモデルのカオス性を考慮した研究は少ない。一方脳型情報処理においてカオスを利用した動的連想、追加学習などが提案されてきたが、深層学習技術の発展を取り込んだ研究は少ない。深層モデルに内在する筈の豊富なダイナミクスの理解は、深層学習の理論的理解や学習手法の改良に繋がると考えられる。過去のニューラルネット研究においては、カオス的ダイナミクスを利用した情報処理により柔軟な機能が実現できる可能性が示唆されてきたが、大量の学習データを利用する深層モデル系においてはカオス性を利用した情報処理は先行研究がなく、まだその可能性が探求されていない。

### 2. 研究の目的

本研究は種々の深層学習モデルに現れ得るカオス的ダイナミクスを解析し、情報処理への応用を考察し、よりダイナミクスを利用した動的な処理を用いる人工知能を実現すること目的としている。具体的には次の2点を当初目的とした。(1) Neural ODE や生成ネットワークにおけるカオス的時系列の学習を扱い、対象時系列やモデル自体の振る舞いにカオス的不安定性がある状況下でカオス性が学習に如何に影響するか数値実験と多様体構造の破壊の考察から分析し、学習手法の改良を行う。(2) 深層連想記憶モデルを2つの異なるアプローチにより構築する：(2)- Encoder-Decoder 型ネットワークに基づく深層相互連想モデル、(2)- 分担者の奈良らの先行研究 (Nara et al. 2019)で用いられたモデルを拡張した多層連想記憶モデル。そしてこれらのモデルを大規模データを用いて学習し、モデル内の記憶遷移の構造の解析やダイナミクスの特徴づけを非線形力学系の観点から行い、カオス力学系の特性を利用した新たな脳型学習技術、とくにパターン検索・生成、エピソード記憶圧縮等の応用技術の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

研究手法を(1)、(2)-、(2)-の項目毎に概説する。

#### (1) 深層モデルによるカオス時系列の学習の特徴付け

計画当初は Neural ODE を利用したカオス時系列の学習を計画していたが、近年の生成モデル研究の急速な発展を取り入れ、モデルとして敵対生成ネットワークを用いる研究も行った。

Neural ODE を用いた研究では ODE に識別タスクを学習させ、学習後の推論過程を軌道として可視化し、アトラクタの分析を行う。

敵対生成ネットワーク(Generative Adversarial Network, GAN) を用いた研究では、ロジスティック写像により生成されたカオス時系列を GAN により生成させる実験を行い、訓練済みの GAN の生成器が生成した擬似的なカオス時系列がどの程度決定論的カオス時系列と近い性質を示すかどうか、またどこに模倣できない部分があるかを、非線形時系列解析の手法を用いて調べた。とくに決定論的性質や最大リアプノフ指数の推定を行った。

#### (2)- 敵対生成ネットワークによる深層連想モデルの構築とその解析

敵対的生成モデルである CycleGAN を参考に、あるカテゴリの画像から他のカテゴリ画像変換と、その逆方向の変換をする生成器を学習により構築する。この2つの変換を繰り返し行う系は、写像力学系とみなすことができる。学習後のモデルを使って画像の系列を生成したときの、画像空間内での軌道を力学系の観点から分類する。まずアトラクタを同定するために、すべてのテスト画像を初期値とした軌道を計算し、それらの収束先を分類し、アトラクタの個数を数える。各アトラクタについて、周期性を判定し、固定点や周期解を同定する。さらにリアプノフ指数の計算を用いて、カオス的なアトラクタと準周期的なアトラクタを分類する。アトラクタがどの程度初期値を引き込んでいるかを数え、引き込む初期値の個数の分布を調べる。さらに、CycleGAN を用いて3つ以上のカテゴリの画像間を循環的に変換するモデルを構築、学習し、循環的に画像生成をすることにより、多様な画像が得られるかの実験を行う。

#### (2)- 多層連想記憶モデルにおける連想とネットワーク損傷の影響

連想記憶回路を3層組み合わせさせた神経回路モデルを構築し、それぞれの層にはランダムな記憶や特定の画像パターンを Hebb 則の形で埋め込む。層間の結合も相互連想のための Hebb 則に基づいて重みを決定する。それぞれの記憶パターンは、周期的な連想を行うように相互連想型の Hebb 則により関連付けられている。1つの層には感覚入力として外部入力を与える。一定の割合で一部の結合重みを0とした際、回路のダイナミクスにカオス的パターンが現れることを確認する。さらに層間の結合を領野間のボトムアップ・トップダウン結合と考え、一部の領野間結合の機能が低下した際にネットワークダイナミクスが変化し、正しい連想が行われなくなるかを検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 深層モデルによるカオス時系列の学習の特徴付け

Neural ODE モデルの研究では、画像認識を学習させた際の軌道进行分析し、クラス間で軌道が特徴毎に異なることを分析し、また軌道の時間発展を学習時より延長させた際のアトラクタへの収束を解析した。

GANによりカオス時系列を学習する実験では、ロジスティック写像を対象とし、深層畳み込み敵対生成ネットワークによりロジスティック写像が作る系列に類似した時系列を生成させることに成功した(図1)。生成時系列の決定論性をWaylandの手法により定量化した。生成時系列の決定論性は、訓練データとして用いた数値計算により得られた系列にノイズが入った系列と同程度であることを確認した。また、カオスの特徴である軌道不安定性を定量化するために、最大リアプノフ指数を時系列から推定し、生成時系列が正のリアプノフ指数を持つこと、訓練データと類似した推定値をとることを確認した。これらの結果により、GANを利用して生成した時系列も元の系列に存在する決定論的カオス性のある程度保持していることが明らかになった。

一方、真の時系列と生成時系列の誤差を分析すると、真の遷移からの誤差には希に大きな値が現れ、その分布は、単純なガウス分布や指数分布では表現できないことがわかった。誤差は小さな誤差を表現するガウスの分布と大きな誤差を表現する分布の混合的な分布として表現されることが示唆された。これはカオス時系列を生成モデルに学習させる上での限界の一端を示唆していると考えられる。この研究成果は原著論文として投稿中である。

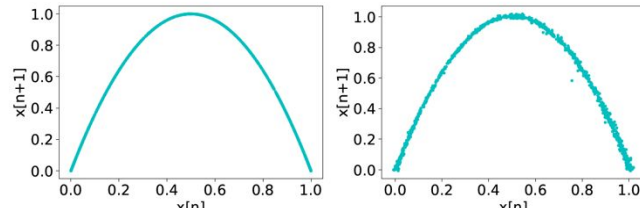


図1 (左)ロジスティック写像のリターンマップと(右)GANにより生成された時系列のリターンマップ。

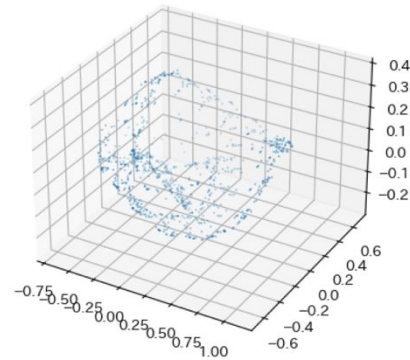


図2 PCAにより可視化されたCycleGANにみられるカオス的なアトラクタの例。

##### (2)- 敵対生成ネットワークによる深層連想モデルの構築とその解析

CycleGANの画像変換を繰り返すことにより、画像を連続的に生成することに成功した。画像の系列を力学系として分析すると、変換を繰り返すことにより画像はアトラクタに収束する。アトラクタは固定点、周期解、準周期解やカオス的なストレンジアトラクタなど、多様な種類が存在することを明らかにした。図2にストレンジアトラクタを主成分分析により可視化した例を示す。また、非常に多数のアトラクタが存在することや、それぞれのアトラクタが引き込む初期値の個数には大きな差があることがあきらかになった。約1000個のテスト画像をそれぞれ初期値として用いて時間発展させ、各アトラクタに収束した個数を調べ、アトラクタが引き込む初期値の分布を調べると、個数分布にべき則的な傾向が現れることを発見した。これは非常に大きな引き込み領域を持つ少数のアトラクタと、小さな引き込み領域を持つ多数のアトラクタがともに存在していることを示唆する。この性質は高次元力学系としても興味深い対象であるとともに、連続的な連想により、多様な画像を探索的に生成したり、またあるカテゴリの典型的な画像に引き込むダイナミクスを実装する際に考慮すべき重要な性質と考えられる。この研究成果は現在論文投稿準備中である。

##### (2)- 多層連想記憶モデルにおける連想とネットワーク損傷の影響

連想記憶回路を3層組み合わせさせた神経回路モデルを構築し、それぞれの層にはランダムな記憶や特定の画像パターンを相互連想型Hebb則を用いて周期的に循環する記憶パターンを埋め込んだ。層間の結合も相互連想のためのHebb則に基づいて重みを決定した。1つの層には感覚入力として外部入力を与え、3層それぞれで対応したパターンがあらわれることを確認した。一定の割合で一部の結合重みを0とした際、回路のダイナミクスにカオス的なパターンが現れることを確認した。さらに層間の結合を領野間のボトムアップ・トップダウン結合と考え、一部の領野間結合の機能が低下した際にネットワークダイナミクスが変化し、正しい連想が行われなくなることを確認した。このモデルは、レビー小体型認知症の幻覚症状を説明するための数理モデルとして利用することができる。それぞれの損傷の部位により、どの程度連想機能の損傷が起こり、正しくない記憶パターンが生まれるかを分析し、ダイナミクスの不安定化にともなう連想機能の喪失が幻覚症状の説明となりうる可能性を議論した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsuda Ichiro, Watanabe Hiroshi, Tsukada Hiromichi, Yamaguti Yutaka	4. 巻 24
2. 論文標題 On the Nature of Functional Differentiation: The Role of Self-Organization with Constraints	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 240 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e24020240	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 津田一郎	4. 巻 39
2. 論文標題 動的ヘテラルキー構造の神経情報機構に対する分化数理モデル	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CLINICAL NEUROSCIENCE	6. 最初と最後の頁 822 ~ 826
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Letellier Christophe, Abraham Ralph, Shepelyansky Dima L., Rossler Otto E., Holmes Philip, Lozi Rene, Glass Leon, Pikovsky Arkady, Olsen Lars F., Tsuda Ichiro, Grebogi Celso, Parlitz Ulrich, Gilmore Robert, Pecora Louis M., Carroll Thomas L.	4. 巻 31
2. 論文標題 Some elements for a history of the dynamical systems theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 053110 ~ 053110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0047851	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 該当する

1. 著者名 Shigetoshi Nara	4. 巻 (VII)
2. 論文標題 Time Delayed Effect Can Bring Novel Hierarchical Complex Dynamics to Neural Network?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Cognitive Neurodynamics	6. 最初と最後の頁 95-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-16-0317-4	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 Nara Shigetoshi, Yamaguti Yutaka, Tsuda Ichiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Review: Nicotinic acetylcholine receptors to regulate important brain activity--what occurs at the molecular level?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Cognitive Neurodynamics	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) 10.1007/s11571-023-09975-7	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 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 遠原 由規, 山口 裕
2. 発表標題 CycleGANの反復変換により生成される力学系軌道のカオス性
3. 学会等名 日本応用数理学会第18回研究部会連合発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 悠貴, 山口 明宏, 山口 裕
2. 発表標題 GANを用いて生成した擬似カオス時系列の統計的性質
3. 学会等名 日本応用数理学会第18回研究部会連合発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 悠貴, 山口 裕
2. 発表標題 GANを用いたカオス時系列生成
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠原 由規, 山口 裕
2. 発表標題 CycleGANを用いた繰り返し画像変換に現れるアトラクタダイナミクスの分析
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海老原端馬、津田一郎、山口裕
2. 発表標題 リザーブコンピューティングにおける教師の動的な選択
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津田一郎
2. 発表標題 拘束条件付き自己組織化理論に基づく機能分化に関する数理的・情報論的基盤
3. 学会等名 第62回日本神経学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱地優輝, 平川翼, 山下隆義, 藤吉弘亘, 山口 裕, 津田一郎
2. 発表標題 Hessian-Free 法を用いた Echo State Network の構造探索
3. 学会等名 情報処理学会第20回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口裕, 津田一郎
2. 発表標題 相互情報量最小化による機能分化の誘導
3. 学会等名 生理研研究会 第3回力学系の始点からの脳・神経回路の理解
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角田 千哉, 山口 裕
2. 発表標題 Neural ODEによる画像認識過程の可視化
3. 学会等名 応用数学会2020年度年会
4. 発表年 2020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	奈良 重俊  (Nara Shigetoshi)  (60231495)	岡山大学・環境生命自然科学研究科・特命教授   (15301)	
研究 分担者	津田 一郎  (Tsuda Ichiro)  (10207384)	中部大学・創発学術院・教授   (33910)	

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