

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K20388

研究課題名（和文）真性粘菌の数理モデルをリザーバーとした極端な一般化能力を持つ機械学習手法の開発

研究課題名（英文）Reservoir computing using the model of true slime mold

研究代表者

谷 伊織 (Tani, iori)

神戸大学・DX・情報統括本部・助教

研究者番号：70751379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は真性粘菌 *Physarum polycephalum*（モジホコリカビ）変形体の数理モデルを用いたリザーバー計算による新しい機械学習手法を提案することを目的としている。リザーバー計算とは、再帰的ニューラルネットワークの一部を大自由度の力学系で置き換える手法を指し、一次元セル・オートマトンなどを用いたリザーバー計算手法がすでに知られている。本研究では真性粘菌数理モデルと初等セル・オートマトンを相互作用させることにより、クラスIVと呼ばれる高い計算能力を示す挙動が広く普遍的に得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真性粘菌は原初的な単細胞生物でありながら一種の情報処理能力をもち、生物を計算機素子として用いる研究において広く利用されている。本研究では、真性粘菌の数理モデルと初等セル・オートマトンを相互作用させ、真性粘菌を一種のメモリ領域として利用する方法を提案した。通常の初等セル・オートマトンにおいて、独立した88のルールに対して、クラスIVと呼ばれる複雑で高い計算能力を示すものはわずかに1ルールしか知られていないが、本提案手法ではほとんどのルールに対してパワースペクトルのべき分布によって特徴づけられるクラスIV的挙動が認められる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose a novel machine learning method based on reservoir computation using a mathematical model of a true slime mold *Physarum polycephalum*. Reservoir computation refers to a method in which a part of a recursive neural network is replaced by a large-degree-of-freedom dynamical system, and reservoir computation methods using one-dimensional cellular automata are already known. In this study, we show that the interaction of an elementary cellular automaton with a mathematical model of a true slime mold can produce a behavior with high computational power, called Class IV, in a broad and universal manner.

研究分野：感性情報学

キーワード：リザーバー計算 真性粘菌 生物計算機

1. 研究開始当初の背景

人工知能技術の飛躍的な発展の中で、特にニューラルネットワークによる機械学習手法においては過学習や勾配消失が課題とみなされており、特に教師データが少ない場合に大きな問題となる。リザバー計算は深層学習以前に提案された機械学習手法であり、リカレントニューラルネットワークの結合重みが固定されたよい性質のニューラルネットワークで置き換えることで、学習パラメータを抑制することが可能である。特に、リザバーとして実際の物理デバイスなど大自由度力学系を用いたものを物理リザバー計算と呼び、ロボティクスなどとの関連した研究が展開されている。

物理系をリザバーとして利用する上では、その物理系自体が潜在的に有する計算能力が重要である。真性粘菌 *Physarum polycephalum* (モジホコリカビ) の変形体は単細胞の原初的な生物であるが、一種の情報処理能力を有することが知られており、周囲の環境情報(誘引刺激・忌避刺激)の空間配置に応じて様々な探索行動を示す。したがって、真性粘菌変形体はその計算能力において物理リザバーとして利用できる可能性がある。

真性粘菌の挙動を再現する数理モデルは多く提案されているが、中でも非同期セル・オートマトンのモデルは原形質チューブによるネットワーク形成および探索的運動のどちらも再現することができる。

2. 研究の目的

本研究は真性粘菌 *Physarum polycephalum* (モジホコリカビ) の変形体の挙動を再現する数理モデルを用いたリザバー計算の手法を提案することである。真性粘菌は単細胞・多核体の原初的なアメーバ様生命体であるが、一種の情報処理能力を有することが知られている。一方で、真性粘菌およびそのモデルがリザバー計算においてどのような特性を持つかは明らかではない。そこで、本研究では真性粘菌モデルのリザバー計算における計算能力を確認することを主たる目的とし、その特性に応じた新しい機械学習手法の開発を目標とした。

3. 研究の方法

本研究では基本的に数理モデルを用いたシミュレーションに基づく研究を実施した。当初は、真性粘菌モデルに情報を入力する方法として、フィールド上にランダムに配置されたポイントにおいて誘引刺激・忌避刺激などを加える手法を探索的に研究した。また、リカレントニューラルネットワークのみならず、画像認識用の階層型ニューラルネットワークにおいて、真性粘菌モデルが画像に対して出力するパターンを用いた分類実験を行った。この実験では真性粘菌モデルを一種のノイズ付加機構として用いている。これらについても一定程度の学習が可能であったが、既存手法を超えるような良好な結果は得られなかった。そこで、すでにリザバー計算において利用されている一次元セル・オートマトン、特に初等セル・オートマトンに着目し、真性粘菌モデルとこれらを相互作用させ、真性粘菌モデルを一次元セル・オートマトンの表現媒体として用いる手法を思いつき、これらについて様々な条件下でのシミュレーションを行った。

一次元セル・オートマトンは単純なモデルでありながら、ルールに応じて様々な挙動を示す。しかし、初等セル・オートマトンにおいて高い計算能力を示す複雑な挙動(クラス IV)は稀であり、このような挙動が普遍的に得られるかどうかは、リザバー計算において重要である。

4. 研究成果

一次元セル・オートマトンのうち、もっとも基本的な初等セル・オートマトンは独立した 88 のルールをもち、それぞれが異なる時間発展パターンを示す。この中で、特にリザバー計算において高い計算能力を持つクラス IV と呼ばれる挙動を示すルールはわずかに 1 つのみである。クラス IV はカオスの挙動と秩序的・周期的挙動の両者の特性をあわせもち、リザバー計算のみならず、セル・オートマトンの研究においても重要度が高い。

本研究では初等セル・オートマトンの各セルと真性粘菌モデルの運動領域を一对一で結びつけ、各セルにおける原型質量を二値化することでセル・オートマトンの状態に対応させる。以下の Fig. 1 で示すように、実験系は数珠つなぎに接続されたチャンバーから構成され、各チャンバーがセル・オートマトンのセルに対応付けられる。次にこの状態に初等セル・オートマトンのル

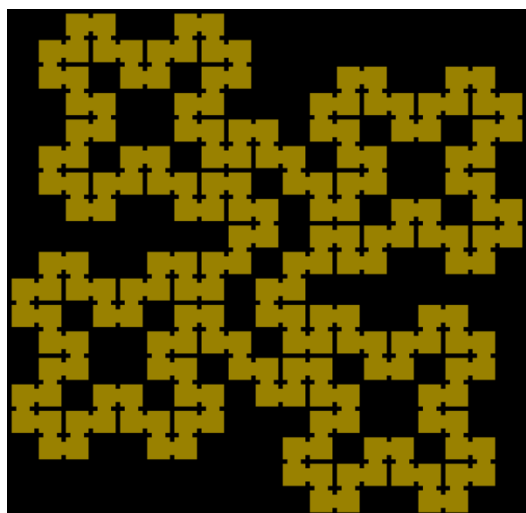


Figure 1. 実験系の概形（黄色い領域が真性粘菌の運動可能範囲）

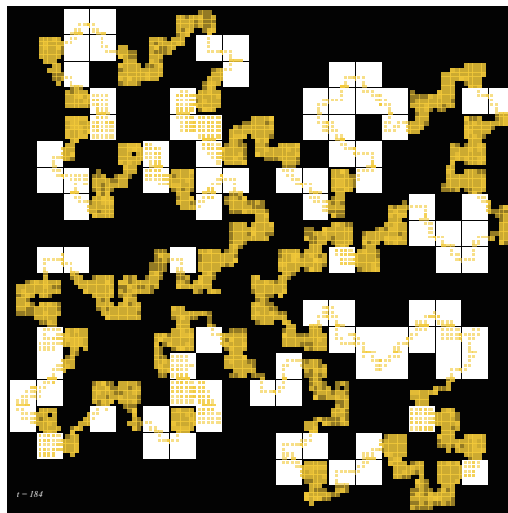


Figure 2 セル・オートマトンと真性粘菌モデルの相互作用

ールを適用した結果を誘引・忌避刺激の空間パターンとしてフィードバックし (Fig.2 の白色で示された領域は忌避刺激が与えられていることを意味している), セル・オートマトンの計算結果に従うように粘菌の移動が促進されるような機構を提案した. この方法において, 真性粘菌モデルはセル・オートマトンの状態を保存・表現する一種のメモリとして用いられる.

真性粘菌モデルによるセル・オートマトンの状態表現は局所的に失敗しうる. 通常の計算の文脈においては, これは単なるエラーであるが, この手法ではこのエラーに積極的な意味を見出すことが可能である. 例えば, ルール 30 はカオス的発展を示す典型的なルールであるが, エラーによってカオス的領域の爆発的な成長が阻害されることで, 成長領域と白色の背景からなるクラス IV 的挙動が出現する. 一方, 秩序相へ収束するルールにおいては, 局所的なエラー=ノイズの発生によって周期状態の移行が阻害されることになり, やはり秩序的な背景と成長領域が生じる. これによって, 結果的に多くのルールに対して普遍的にカオス的な成長領域と静的な背景領域からなるクラス IV 的挙動が現れることが確認された.

Fig. 3 は初等セル・オートマトンのルール 30 と真性粘菌モデルを相互作用させた時間発展パターンの例である. 右図の黒い領域は原型質量が大きいセルを意味しており, 図の上から下に向かって時間経過している. 時間発展パターンは枝状に伸びる成長領域と明確な背景領域から構成され, いわゆるクラス IV の特徴を示している. またそのパワースペクトル分布を示したものが左図であり, クラス IV の特徴である冪分布を示しており, その傾きは-1 に近い値を示すものが多く見られた. これは提案手法がリザバーとして高い計算能力を持つことを示している.

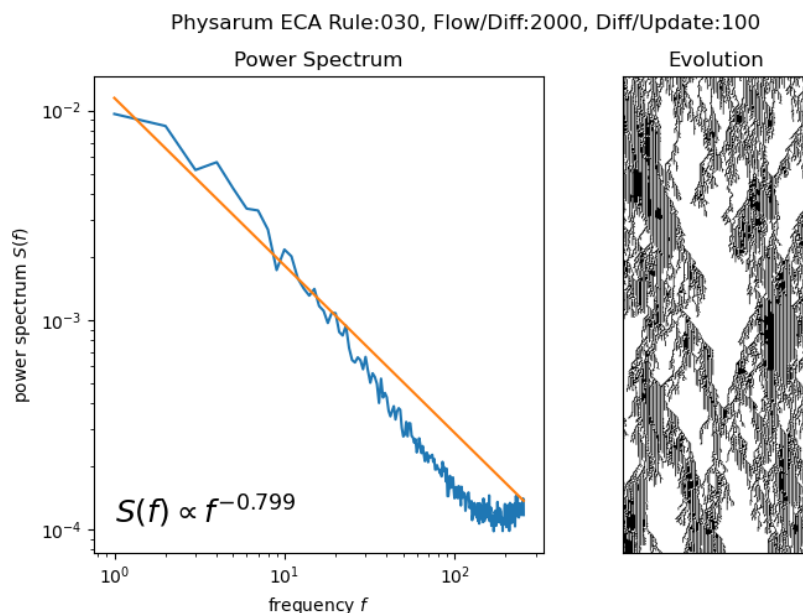


Figure 3 真性粘菌・セル・オートマトン相互作用リザバーの挙動. パワースペクトルはクラス IV に特徴的な冪分布を示す.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷 伊織
2. 発表標題 真性粘菌モデルと創造的計算
3. 学会等名 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷 伊織
2. 発表標題 真性粘菌と知能
3. 学会等名 共創学会 第三回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷 伊織
2. 発表標題 粘菌モデルを用いたリザーバ計算
3. 学会等名 第33回SICE共創システム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 iori Tani
2. 発表標題 Asynchronous Physarum Cellular Automata and Interaction with ECA
3. 学会等名 AROB 2024
4. 発表年 2024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
---------	---------