

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12143

研究課題名(和文)非同期で不均一なセルオートマトンを計算資源として用いる

研究課題名(英文)Using asynchronous and non-uniform cellular automata as computational resources

研究代表者

浦上 大輔 (URAGAMI, Daisuke)

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：40458196

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)：本研究の成果は、非同期で不均一な一次元セルオートマトンである非同期調整オートマトン(AT_ECA)を用いたリザーバーコンピューティング(RC)を実装し、時系列データの学習においてその有効性と普遍性を明らかにしたことである。あわせて、通常の一次元セルオートマトンである初等セルオートマトン(ECA)を用いたRCにおいて、クラス4と呼ばれる臨界的な時空間パターンがより高い学習能力を持つことを示した。くわえて、リザーバーの状態を可視化する指標を考案して、両者の高い学習能力は共にリザーバーの臨界的性質に起因す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

本研究の学術的意義は、「カオスの縁」から「普遍的臨界性」へと理解の方法を転換することを提唱して、その実践を提示したことにある。カオスの縁すなわち「生命システムのように臨界的な性質は、極めて限定されたパラメータ領域でのみ実現される」という描像は広く受け入れられているが、それは同期時間という特定の記述スタンスに依拠するものであり、非同期時間あるいは内部観測という別の記述スタンスにおいては臨界的な性質は普遍的に現れる。そのことをリザーバーコンピューティングという機械学習分野にとどまらない学際的な研究対象において実証したことは、様々なシステム構築における設計指針に影響を及ぼすものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：The results of this research are the implementation of reservoir computing (RC) using asynchronously tuned elementary cellular automata (AT_ECA), which are asynchronous and non-uniform one-dimensional cellular automata, and the clarification of their effectiveness and universality in learning time series data. In addition, we showed that critical space-time patterns called Class 4 have higher learning ability than those of RC using elementary cellular automata (ECA), which are ordinary one-dimensional cellular automata. Furthermore, we proposed an index to visualize the state of the reservoir, and showed that the higher learning ability of the both systems is due to the critical nature of the reservoir.

研究分野：複雑知能システム

キーワード：セルオートマトン リザーバーコンピューティング 非同期時間 カオスの縁 普遍的臨界性 時系列データ 機械学習 内部観測

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) セルオートマトンは、その単純さと生成される時空間パターンの多様さゆえに、多くの研究者を魅了してきた。なかでも Wolfram および Langton は、一次元セルオートマトンの網羅的な解析によって、生命システムのように複雑な時空間パターンを生成する局所ルールは極めて少数であることを示した [1, 2]。それはいわゆる「カオスの縁」と呼ばれる描像を具現化したもので、その描像はセルオートマトンに限らず、臨界的な性質をもつものの起源を理解するための方法として現在でも広く受け入れられている [3]。一方、Gunji が提案している非同期調整オートマトン (AT_ECA) ではカオスの縁とは全く異なるメカニズムで、臨界的な性質をもつ時空間パターンが普遍的に生成されることが報告されている [4, 5]。

(2) リザーブコンピューティング (RC) は、近年注目されている時系列データの学習システムで、リザーブと呼ばれる大自由度の結合力学系を利用することで、高速かつ安定な学習を実現することが知られている [6]。RC における学習はリザーブと出力の関係のみを調整し、リザーブ内の結合は固定であるため、様々なものがリザーブとして利用可能である。そのため、RC は機械学習分野にとどまらず学際的な研究対象となっている [7, 8]。超並列計算システムであるセルオートマトンもまたリザーブとして利用可能で、有力な候補であると考えられる [9, 10]。

(3) 実際に様々なものをリザーブとして利用する研究が進められているが、そのときリザーブとして望ましい性質を実現することが共通する課題となる。リザーブは時系列データを記憶し、かつ分類するという役割を担う。記憶容量という側面ではリザーブのダイナミクスは多様であることすなわちカオス的であることが望ましいが、安定性という側面ではカオス的であることは望ましくない。したがって、リザーブは臨界的な性質をもつことが求められる。そして、それは多くのシステムではカオスの縁として実現される [11, 12]。一方で、カオスの縁のようにパラメータの微調整によって実現される臨界性は、システムの頑健性という観点からは決して望ましいものではない。したがって、カオスの縁とは異なるメカニズムで臨界的な性質をもつシステムを実現することが、RC 研究の普遍的な課題となる。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、非同期で不均一な一次元セルオートマトンである AT_ECA をリザーブとして利用した RC を実装して、生命システムのように頑健で素早い学習システムを実現することである。また、それらを通じてカオスの縁とは異なる方法、より生命システムに即したスタンスを例示することである。

(2) 超並列計算システムであるセルオートマトンを計算資源として利用する方法を探究することにより、並列化計算システムに普遍的に内在する非同期性と不均一性への対処方法を考察する。本研究で提案する学習システムは非同期性と不均一性を積極的に組み入れていることに特徴がある。それらは自然界に実在するシステムや大規模な人工システムを計算資源として活用する際には避けられないものであり、むしろ情報処理システムに頑健性や創造性をもたらす可能性を秘めたものである。

3. 研究の方法

(1) 本研究でリザーブとして利用する AT_ECA は、1 次元 2 状態 3 近傍のセルオートマトンすなわち初等セルオートマトン (ECA) に、非同期時間と局所ルールを調整する機構を導入したものである [4]。ここで、非同期時間とは局所ルールを適用してセルの状態を更新する際に、異なる時間ステップの状態を参照することを許容することを意味する。そのとき、更新の順序によって結果が異なるという事態が生じることになるのが、それを局所的につじつま合わせするように局所ルールを変更する。その結果、複数の局所ルールが混雑するという不均一性が生じる。その不均一性と非同期時間が相殺される過程において自己組織化的に (元の局所ルールに依存せず) 臨界的な時空間パターンを創出する [4, 5]。

(2) ECA をリザーブとする RC は、Yilmaz および Nichele らによって提案されている [9, 10]。本研究では、Nichele らが提案しているリカレントな方法をもとに、AT_ECA をリザーブとして利用した学習システムを構築する。学習システムは、各時間ステップの入力データをセルの状態にコピーする部分 (ランダム結合)、入力データがコピーされたセルを初期状態として数ステップ分の時空間パターンを生成する部分 (リザーブ)、各時間ステップの入力データに対応する時間空間パターンから出力を決定する部分 (リードアウト)、これら 3 つの部分から構成される。本研究で提案する学習システムでは、リザーブで時空間パターンを生成する際に AT_ECA を用いる。ランダム結合は一試行の学習過程では固定である。リードアウトは線形 SVM を用いて学習する。学習対象となる時系列データは、5 ビット・タスクと呼ばれる時系列データを主に使用する。

4. 研究成果

(1) 通常のセルオートマトンである ECA をリザーブとして用いた場合について、臨界的な時空間パターンを生成する局所ルール(クラス4)の優位性を明らかにした[13]. 臨界的な性質をもつものがリザーブとして優れているということは予想されていたが、セルオートマトンをリザーブとして用いた先行研究では、カオス的な時空間パターンを生成する局所ルール(クラス3)と臨界的な時空間パターンを生成する局所ルール(クラス4)の学習能力の違いは明らかではなかった. 本研究では、時系列データに含まれるディストラクタに該当する入力を長くすることにより、両者の違いを明示することに成功した(図1).

(2) AT_ECA をリザーブとして用いた場合について、ECA のクラス4と同程度の学習能力を有することを明らかにした(図1)[14]. ここで重要なことは、AT_ECA では最初に設定した局所ルールに関わらず、高い学習能力を有することである. 図1に示した結果では、局所ルールをルール60に設定したAT_ECA は同じ局所ルールのECA よりもはるかに学習の成功率が高く、ルール110(クラス4)のECA と同程度の学習能力を有すること示している.

(3) 時系列データが入力されているときにリザーブの状態がどのように変化しているかを解析するために、下記のような解析指標を提案した[15].

$$d(X_j, X_k) = \frac{|X_j - X_k|}{N}$$

$$D(j) = \min_{0 \leq k < j} (d(X_j, X_k))$$

ここで、 $|X_j - X_k|$ は2つのリザーブ状態について状態値が異なるセルの数、 N はリザーブに含まれるセルの総数である. したがって、 $d(X_j, X_k)$ は2つのリザーブの状態がどの程度離れているかを意味し、 $D(j)$ は入力データの時間ステップ j におけるリザーブ状態が過去のリザーブ状態と異なる程度を表す. 図2は、解析結果の一例である. ECA ルール110(クラス4)とAT_ECA ルール60は、リザーブ状態の推移が類似していることが分かる. この解析結果からも、AT_ECA の高い学習能力はその臨界性によるものであることが推察できる.

(4) AT_ECA をリザーブとして用いることの優位性は特定の局所ルールに依存したのではないことを、局所ルールのルール空間を網羅的にシミュレーションすることによって明らかにした[16]. 図3は、ECA またはAT_ECA において学習の成功率が0でない28個の局所ルールについてのシミュレーション結果である. 横軸の

パラメータは局所ルールに対して割り当てられるオーダ・パラメータで、遷移状態が0(静止状態)にならない割合として算出される. ECA の場合はパラメータが中程度のときに学習の成功率が高くなる傾向があるのに対して、AT_ECA についてパラメータに依存せず高い学習能力を有することが分かる. つまり、ECA ではカオスの縁が確認できるのに対して、AT_ECA では「普遍的臨界性」と呼ぶべき様相が示されている. この結果は、臨界性を有する学習システム一般の起源として、カオスの縁とは異なるパラダイムを提示するものであり、そのようなシステムを理解する/構築

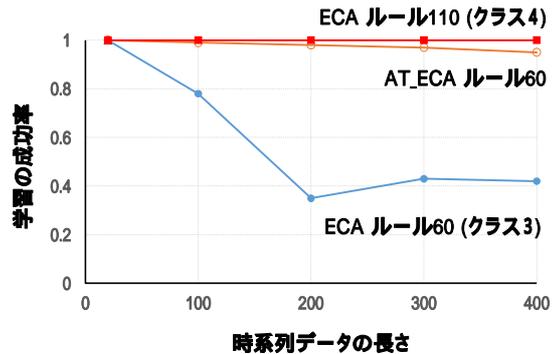


図1. 時系列データの長さと学習の成功率

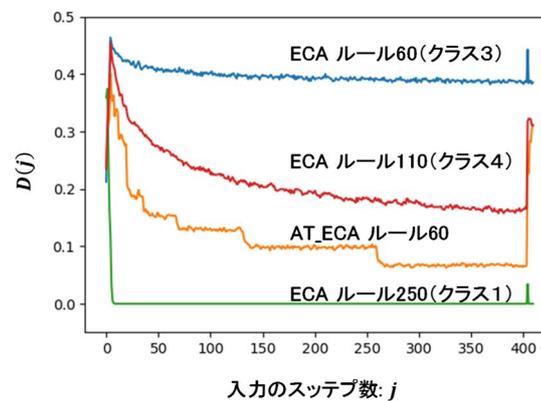


図2. リザーブ状態の推移

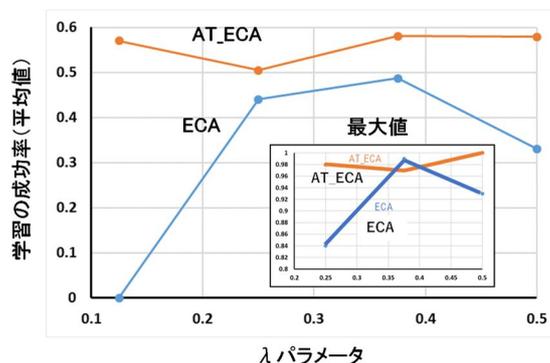


図3. パラメータと学習の成功率

する方法として、大きなインパクトを与えるものと期待される。

<引用文献>

- [1] Wolfram, S., *Universality and Complexity in Cellular Automata*, Physica D, 1984.
- [2] Langton, C. G., *Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation*, Physica D, 1990.
- [3] Walker, S. I., Davies, P. C. W., *The “Hard Problem” of Life, From Matter to Life: Information and Causality*, New York: Cambridge University Press, 2017.
- [4] Gunji, Y.-P., *Self-Organized Criticality in Asynchronously Tuned Elementary Cellular Automata*, Complex Systems, 2014.
- [5] Uragami, D., Gunji, Y.-P., *Universal Emergence of 1/f Noise in Asynchronously Tuned Elementary Cellular Automata*, Complex Systems, 2018.
- [6] Jaeger, H., *The “Echo State” Approach to Analysing and Training Recurrent Neural Networks*, GMD Report, 2001.
- [7] 中嶋 浩平, やわらかい身体のダイナミクスに計算をアウトソースする, 人工知能学会誌, 2018.
- [8] 田中 剛平, リザーバーコンピューティングの概念と最近の動向, 電子情報通信学会誌, 2019.
- [9] Yilmaz, O.: *Reservoir Computing Using Cellular Automata*, arxiv.org/abs/1410.0162, 2014.
- [10] Nichele, S., Gundersen, M. S., *Reservoir Computing Using Nonuniform Binary Cellular Automata*, Complex Systems, 2017.
- [11] Bertschinger, N., Natschläger, T., *Real-Time Computation at the Edge of Chaos in Recurrent Neural Networks*, Neural Computation, 2004.
- [12] 伊藤 浩之, 青柳 富誌生, 非線形物理学から見たニューラルネットワークの学習, 人工知能学会誌, 2018.
- [13] 浦上大輔, 郡司ペギオ幸夫, 非同期セルオートマトンとレザバーコンピューティング, 信学技報, 2019.
- [14] 浦上 大輔, 郡司ペギオ幸夫, 非同期セルオートマトンによるリザーバーコンピューティング, 計測自動制御学会論文集, 2020.
- [15] 浦上 大輔, 郡司ペギオ幸夫, 非同期セルオートマトンを利用したリザーバーコンピューティングと普遍的臨界性, 人工知能学会全国大会(第35回), 2021.
- [16] Uragami, D., Gunji, Y.-P., *Universal Criticality in Reservoir Computing Using Asynchronous Cellular Automata*, Complex Systems, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 4件）

1. 著者名 Uragami Daisuke, Gunji Yukio-Pegio	4. 巻 31
2. 論文標題 Universal Criticality in Reservoir Computing Using Asynchronous	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Complex Systems	6. 最初と最後の頁 103 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25088/ComplexSystems.31.1.103	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 浦上大輔, 郡司ベギオ幸夫	4. 巻 56
2. 論文標題 非同期セルオートマトンによるリザーバコンピューティング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 8 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.8	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 Gunji Yukio-Pegio, Uragami Daisuke	4. 巻 22
2. 論文標題 Breaking of the Trade-Off Principle between Computational Universality and Efficiency by Asynchronous Updating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 1049 ~ 1049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e22091049	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 Gunji Yukio-Pegio, Uragami Daisuke	4. 巻 23
2. 論文標題 Computational Power of Asynchronously Tuned Automata Enhancing the Unfolded Edge of Chaos	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 1376 ~ 1376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e23111376	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 浦上大輔, 郡司ペギオ幸夫	4. 巻 NLP2019-20, CCS2019-3
2. 論文標題 非同期セルオートマトンとレザバーコンピューティング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 11-14
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 無
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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Daisuke Uragami, Yukio-Pegio Gunji
2. 発表標題 Asynchronously Tuned Elementary Cellular Automata and Reservoir Computing
3. 学会等名 Conference on Complex Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦上大輔
2. 発表標題 非同期セルオートマトンの記憶について
3. 学会等名 第14回内部観測研究会・第33回計測自動制御学会SI部門共創システム部会研究会 (共催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浦上 大輔, 郡司ペギオ幸夫
2. 発表標題 非同期セルオートマトンを利用したリザバーコンピューティングと普遍的臨界性
3. 学会等名 2021年度 人工知能学会全国大会 (第35回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浦上 大輔, 郡司ペギオ幸夫
2. 発表標題 非同期セルオートマトンとレザパーコンピューティング
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会 / 複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (共催)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浦上大輔
2. 発表標題 非同期セルオートマトンによるリザパーコンピューティングと社会的強化学習
3. 学会等名 NUAIS設立シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 浦上 大輔, 郡司 ペギオ幸夫	4. 発行年 2021年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 256
3. 書名 セルオートマトンによる知能シミュレーション	

〔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