

ゆらぎによって成立する非同期ライフゲームの論理回路

Logic Gates Formed by Perturbations in Asynchronous Game of Life

1W173030-5 大澤 慶彦
OHZAWA Yoshihiko

指導教員 郡司 幸夫 教授
Prof. GUNJI Yukio

二次元セルオートマトンであるライフゲームは、単純な仕組みで複雑な挙動を示すことから、広い分野で研究されてきた。中でも、ライフゲームを使った論理回路の構築は、計算概念の拡張の一助となった。従来提案された論理回路は、同期ライフゲームの決定論的な遷移を前提としている。しかし、そのような論理回路は、ゆらぎのある環境において期待された挙動を保つことができない。本研究では、非同期ライフゲームでのゆらぎを用いた確率的論理回路を構築した。これは、本研究で新たに発見された、連結相と不連結相の相転移を利用したものである。ライフゲームにおいて、ゆらぎは頑健性を検証するための道具として使われてきた。しかし、本研究の論理回路を起点に、演算自体を成立させるものとしてゆらぎを捉え直すことができる。これは、生物の群れにおいて、構造を破壊・生成し動勢とするような内的ゆらぎの描像に近い。

キーワード：セルオートマトン、非同期更新、ゆらぎ、相転移、論理回路

Keywords: cellular automaton, asynchronous updating, perturbation, phase transition, logic gate

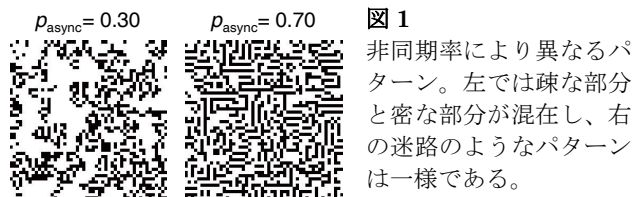
1. はじめに

Conwayは、二次元セルオートマトン(CA)の一種であるライフゲーム(GL)を提案した。GLの系では、格子状に配置された各セルが2種類の状態(0と1)のいずれかを有する。各セルは、自身と近傍のセルの状態から、次の状態を決定し、状態を更新する。これまで、GLを使って論理回路を構築しようとする試みがなされてきた^{1,2}。それらの多くに共通するのは、状態を更新する際に、同時刻の近傍の状態を用いることである。しかし、そのような同期更新による決定論的な遷移を前提とした論理回路は、ゆらぎのある環境において挙動を保つことができない。

本研究では、非同期GLでのゆらぎを用いた確率的論理回路を構築した。非同期GLとは、セルの状態を更新しない確率、非同期率 p_{async} を導入したものである。また、本研究におけるゆらぎとは、ゆらぎ率 p_{noise} でセルの状態を反転させることで与えられる。論理回路を構築するにあたっては、新たな相転移を利用した。

2. 連結相と不連結相

非同期GLには、遷移の末に状態が変化しなくなる凍結相と、変化が続く不凍結相の相転移がある³。本研究では、不凍結相の中にも図1のような差異があることに注目した。GLでは一般に状態1のセルを黒、



0のセルを白で表示する。右のパターンは迷路相として知られてはいたものの、不凍結相の中の相転移として定義した研究はない。本研究では、迷路のようなパターンを連結状態にあるとして定義した。

連結状態にあることは、状態1のセルが連なって作る「通路」によって決定される。図2のように、「通路」が系の上辺と下辺に達しているならば、二辺は連結しているとする。



図3は、上下辺と左右辺が同時に連結した試行の割合である。非同期率が小さい領域では連結が起きない不連結相が、非同期率が大きい領域では連結が起きやすい連結相があり、相転移が存在することが分かる。また、ゆらぎを加えた場合、相転移はより小さな非同期率で起こるようになる。

それにより、同じ非同期率にあっても連結が起きる割合は、ゆらぎ率によって変化する。例えば $p_{\text{async}} = 0.30$ 付近では、 p_{noise} が 0 に近い場合、連結はほとんど起きなかったが、ゆらぎ率が $p_{\text{noise}} = 2.00\%$ の場合、連結はほぼ全ての試行で起きた。

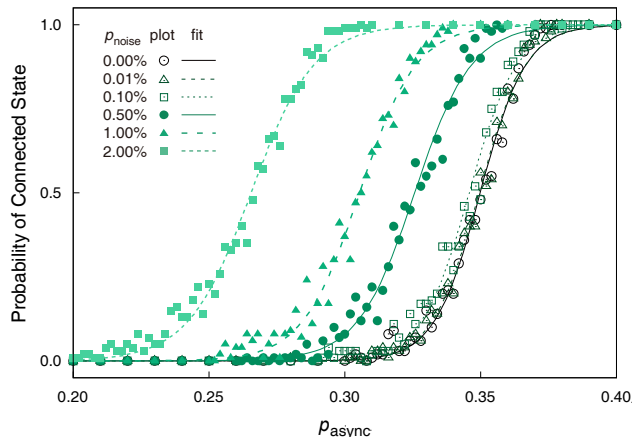


図 3 連結相と不連結相の相転移。系は 100×100 、周期境界条件、10000 タイムステップで、各 100 回試行した。

3. 論理回路モデル

本研究では連結を通電と見なし、電気回路の類比とすることで 2 入力の論理回路モデルを設計した。簡単に、ゆらぎがあれば連結する、と考えてみると、導体があれば通電する回路との対応が見出せる。図 4 は論理回路モデルである。入力 1 ならば入力領域にはゆらぎを与え、入力 0 ならば与えない。上下辺の連結を出力としてとれば、入力領域は直列であり、左右辺の連結を出力としてとれば、入力領域は並列である。電気回路では、導体の有無を入力 1/0 とし、電流が流れるか流れないかを出力 1/0 とすれば、直列回路はANDゲート、並列回路はORゲートとなる。提案した論理回路モデルが、ANDゲートやORゲートを実現できるかを確認した。

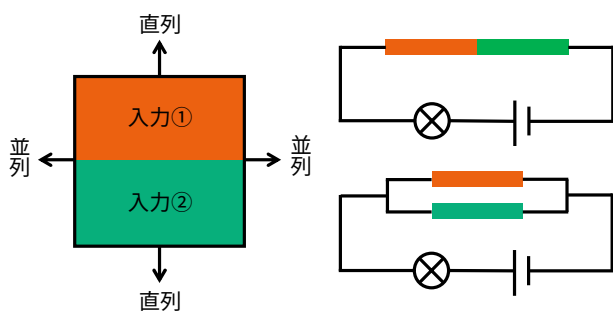


図 4 論理回路モデル。正方形の系の中に同面積の入力領域が 2 つある。出力のとり方を変えることで、直列・並列の 2 回路を 1 つの系で表現できる。

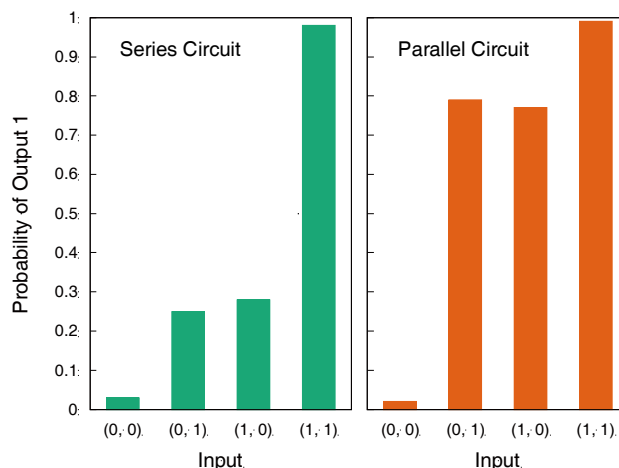


図 5 モデルの出力。系は 200×200 、周期境界条件、5000 タイムステップで、各 100 回試行した。

図 5 は、 $p_{\text{async}} = 0.35$ としたときの論理回路モデルの出力である。直列回路ではANDゲート、並列回路ではORゲートの挙動が得られているのが分かる。

4. おわりに

ナノテクノロジーの分野では、二次元材料を用いた論理回路が提案されている⁴。これは本研究のモデルと類似しているが、ゆらぎが論理回路の演算外部にある点では異なっている。本研究における演算において、ゆらぎは連結状態を破壊しつつ生成する。その上で成立する演算は、ゆらぎを欠かせない要素として内に抱えている。

生物の群れでは、外敵がいない状況でも絶え間なく個体が相対的な位置を入れ替えている。これは内的ゆらぎ(Inherent Noise)と呼ばれ、頑健な群れの形成に欠かせない要素であることが示唆されている⁵。本研究は、生物の群れにおける内的ゆらぎがCAにおいて実現される可能性を示すものである。

参考文献

- 1) J.-P. Rennard, Collision-Based Comput., pp. 491–512, 2002.
- 2) G. J. Martínez, A. Adamatzky, K. Morita, and M. Margenstern, Game Life Cell. Autom., pp. 547–572, 2010.
- 3) Y.-P. Gunji, Y. Ohzawa, and T. Tanaka, In: Alternative Computing (Adamatzky, A. ed.), World Scientific, Singapore.
- 4) C. Liu et al., Nat. Nanotechnol., vol. 14, no. 7, pp. 662–667, 2019.
- 5) H. Murakami, T. Niizato, T. Tomaru, Y. Nishiyama, and Y. P. Gunji, Sci. Rep., vol. 5, pp. 1–11, 2015.