

テクニカルノート

外乱によって自己組織化するセルオートマトンに基づく 普遍部品を用いた自律分散系の制御

岩瀬 雄祐^{1,a)} 鈴木 麗璽^{2,b)} 有田 隆也^{2,c)}

受付日 2012年3月5日, 採録日 2012年5月12日

概要: 本研究では, 外界との相互作用によって自己組織化するセルオートマトンの特性の理解と応用を目的とする研究の一環として, 外乱の発生をきっかけにして, 複数種のセルの状態からなる大域的な混合状態を任意の順序で出現させることのできるセルオートマトンを提示する. このセルオートマトンは混合状態の出現を制御する「普遍部品」を機械的に組み合わせることで構成できる. 本論文では, このセルオートマトンが進化的計算手法によって設計できること, および, それを構成する部品として普遍部品が得られたことを示す. こうした制御は自律分散システム一般の柔軟な制御法の開発に有用な知見をもたらすと期待できる.

キーワード: セルオートマトン, 外乱, 自己組織化, 遺伝的アルゴリズム, 人工生命

Control of Autonomous-decentralized Systems by Using a Universal Component Based on Cellular Automata that Exhibit Self-organizing Properties Induced by External Perturbations

YUSUKE IWASE^{1,a)} REIJI SUZUKI^{2,b)} TAKAYA ARITA^{2,c)}

Received: March 5, 2012, Accepted: May 12, 2012

Abstract: As part of the study of understanding and applying of self-organizing properties of cellular automata (CAs) interacting with external worlds, we propose CAs that can change its global-mixed states composed of multiple cell states in arbitrary order, induced by external perturbations. The CAs are composed of *universal components* (UCs), each of which can control the emergence of mixed state. In this paper, we designed the CAs by using evolutionary computation and then successfully found the UC as a component in the global transitions of the CAs. This kinds of control would offer new insight into the development of a flexible control method for autonomous decentralized systems in general.

Keywords: cellular automata, external perturbations, self-organization, genetic algorithms, artificial life

1. はじめに

セルオートマトン (以下 CA) はセルと呼ばれる有限オー

トマトンを規則的に配置することで構成される抽象システムである. 局所的な相互作用から生じる大域的な振舞いを理解するためのモデルとして知られ, 交通シミュレーション, 生態系モデリング等に加え, 近年, 特に分散型パーベイシブシステムの制御モデルの提案等 [1], [2] への応用がなされている. たとえば, Kwak らは非同期型のサイクリック CA を用いてセンサネットワークの省電力化を提案している [1]. 彼らは, 円環状の周期的成長パターンを複数のセンサの活動状態に対応づけ, センシング性能をある程度維持したままエネルギー消費を削減する方法を示している.

¹ 株式会社インターネットイニシアティブ
Internet Initiative Japan Inc., Chiyoda, Tokyo 101-0051, Japan

² 名古屋大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University,
Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

a) iwase@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp

b) reiji@nagoya-u.jp

c) arita@nagoya-u.jp

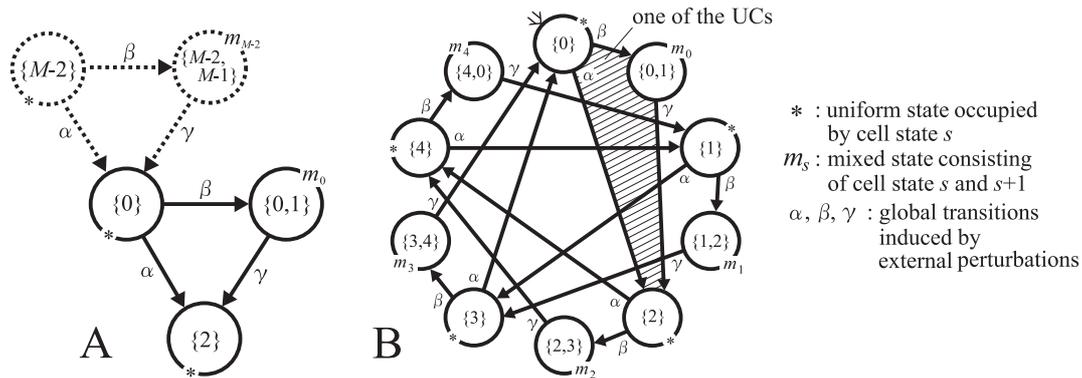


図 1 (A) 普遍部品と (B) 構成回路 ($M = 5$)
 Fig. 1 (A) Universal component (UC) and (B) constructed circuit (CC, $M = 5$).

従来、このようなシステムを設計するうえでは、先にあげたセンサの故障やノイズのような外界からの影響は、基本的には排除されるべきものという観点に基づくものがほとんどであった。しかし、CA の自己組織的な振舞いは、非同期なセルの更新、境界条件、ノイズ等、外界からの影響によって変化しうることが知られており、近年、こうした CA と外界との相互作用を積極的に利用した自律分散システムの制御の可能性について議論されている [2], [3], [4].

Mamei らは、分散型パーベイシブシステムの制御に向けて、外的な影響によって大域パターンを生じる CA について論じている [2]. 彼らは、非同期 CA を局所的に相互作用する自律的な個体集団の抽象モデルと見なし、各セルの状態遷移へ確率的にノイズを加えている。彼らが設計したシステムでは、定常的なノイズが存在する場合にのみ安定的な大域状態（ストライプパターン等）が出現しており、外界からの確率的な影響によってシステム全体の振舞いを操作可能であることを示している。

その一方で、岩瀬らは外乱によって自己組織化する CA の遷移規則を遺伝的アルゴリズムで探索し、その振舞いを解析している [3], [4]. この研究においては、セルのとりうる状態の存在割合である密度分布を指標として、外乱（小さな確率で生じる各セルの状態値の増加）の発生をきっかけに大域状態を切り替える問題を設定し、外乱の影響の蓄積が一定量を超えるとその影響がシステム全体に広まる自己組織的な振舞いによって、セルの状態数を超える安定的な大域状態をサイクリックに出現させるシステムを得ている [3]. さらに、外乱の種類数を増やし、外乱の種類に応じて大域状態の遷移を分岐させ、1 種類のセルの状態が占める均一な大域状態を任意の順序で出現させられることを示している [4]. しかしながら、自律分散システムは一般に多様な要素間の相互作用によって自己組織的な振舞いや高度な機能が生じることが期待されるため、複数種のセルの状態からなる混合状態間の遷移を制御できることが課題であった。

そこで、本研究では、外界との相互作用によって自己組

織化するセルオートマトンの特性の理解と応用を目的とする研究の一環として、外乱を加えることにより大域的な混合状態を任意の順序で出現させることのできる CA を提示する。この CA は、実現したい大域的な混合状態の数 (M) だけ「普遍部品」を機械的に組み合わせることで構成できる。本論文では、 $M = 5$ の場合の CA が進化的計算手法によって設計できること、および、それを構成する部品として普遍部品が得られたことを示す。

2. 普遍部品による大域状態の制御

2次元 $M (\geq 5, M$ は奇数) 状態 $9 (= 3 \times 3)$ 近傍の非同期 CA を想定する。CA は周期境界条件を適用した $N \times N$ 個のセルで構成され、各セルは整数値の状態を持ち、1 ステップごとに確率 P_a で、近傍の状態を参照して遷移規則に従って状態遷移する。ここで、大域状態空間において、それぞれ 2 種類のセル状態からなる混合状態の出現を制御する「普遍部品」を図 1A のように定義する。普遍部品は次の 3 つの遷移を含む。外乱 α の発生によって、セル状態 0 が系全体を占める均一な大域状態 $\{0\}$ から状態 2 が占める均一状態 $\{2\}$ に遷移する^{*1}。また、外乱 β で $\{0\}$ からセル状態 0, 1 からなる混合状態 $\{0,1\}$ に遷移する。さらに、外乱 γ で $\{0,1\}$ から $\{2\}$ に遷移する（以降 α, β, γ 遷移と呼ぶ）。外乱は遷移規則とは別の状態遷移として各セルの状態を確率的に変化させる一時的な操作とする。具体的には、セルの状態値 (q) を 1 増やす ($q' = q + 1 \pmod M$) ものとし、外乱の種類 (α, β, γ) に応じて異なるステップ数の間、各セルへ確率 P_e で加える。同様にして、図 1A のすべてのセル状態を 1 増加させることを $M - 1$ 回繰り返し、状態 1 から $M - 1$ をそれぞれ起点にした $M - 1$ 個の普遍部品が定義される。ここで、CA の遷移規則に推移性を仮定する。推移性を持つ遷移規則では、各遷移パターン（ある近傍状態から次状態への対応関係）は、そのすべてのセルの状態値を 1 増加したパターンも同時に表すものと

^{*1} ただし、普遍部品に含まれるセルの各状態の値はつねに M で除した余りとする。

する。この場合、状態0を起点とする普遍部品を表すCAは、同時に他の $M-1$ 個の普遍部品も表すことになる。 α 遷移が1つのサイクルとなるように奇数個の部品を組み合わせることで、たとえば $M=5$ の場合、図1Bのように5個の部品を円環状に組み合わせることによって構成回路ができる。この構成回路は均一状態(*)間は α 遷移のみで遷移でき、適当な均一状態から β 遷移によって任意の混合状態(m_s)へ遷移でき、また、任意の混合状態からは γ 遷移でいずれかの均一状態に遷移できることを表している。すなわち、 α 、 β 、 γ 遷移を適切に組み合わせることで、均一状態を介して異なる混合状態を任意の順序で出現させられる。たとえば、混合状態列 $m_2m_1m_4$ は初期状態 $\{0\} \xrightarrow{\alpha\beta} m_2 \xrightarrow{\gamma\alpha\beta} m_1 \xrightarrow{\gamma\alpha\beta} m_4$ で出現する。 M を変えた場合においても、図1Aのような部品が1種類あれば構成回路ができる。

3. 遺伝的アルゴリズムによる普遍部品の探索

普遍部品は3種類のセル状態からなるが、本論文で採用する外乱は各セル状態の値を最大2増加させるため、最大5種類のセル状態を生じうる。そこで、直接的に普遍部品を求めず、普遍部品5個から構成される5状態のCAの探索により求めることにする。本研究では、先行研究[3]、[4]で採用された、更新するセルの状態とその周囲8セルの状態に関する頻度分布に対して遷移後の状態を一意に定める遷移規則(δ)を用いる。 δ は更新するセルの状態(s)に応じて M 個の部分則(δ_s)に分けられ、 δ_s は推移性に基づいて δ_0 を構成するすべての状態値を巡回シフトすることで定める。

普遍部品に対応する振舞いが生じるかどうかを以下の手順で評価する。CAの大域状態を表す指標として、セルのとりうる状態(s)の発生頻度 $\rho(s)$ の組合せである密度分布 $\rho = \{\rho(0), \dots, \rho(M-1)\}$ を採用する。また、図1Aにおける混合状態 $\{0, 1\}$ をセル状態0と1がそれぞれ半数程度を占める大域状態とし、 α 、 β 、 γ の各遷移における外乱の発生ステップ数を L_α 、 L_β 、 L_γ とする。初期状態 $\{0\}$ の安定性を評価するため、CAの全セルを状態0として定め、安定性の評価のための基本ステップ数 L_{st} に小さな揺らぎを加えた $L_{st} + \text{rnd}(L_f)$ ステップ(ただし $\text{rnd}(x)$ は $-x$ から x までのランダムな整数値)の期間だけ状態遷移させて大域状態 S_{init} を得る。そして、 S_{init} から外乱 α もしくは β に対応した期間(L_α もしくは L_β)だけ外乱を加えながら状態遷移させ、 S_{init} の場合と同様に状態遷移させた後の大域状態をそれぞれ S_α 、 S_β とする。さらに、大域状態 S_α 、 S_β と同様にして、 S_β へ外乱 γ を加えて遷移させ大域状態 S_γ を得る。大域状態 S_{init} 、 S_α 、 S_β 、 S_γ について、図1Aにおいて期待される状態(具体的には $\{1, 0, 0, 0, 0\}$ 、 $\{0, 0, 1, 0, 0\}$ 、 $\{0.5, 0.5, 0, 0, 0\}$ 、 $\{0, 0, 1, 0, 0\}$)の密度分布との絶対差を求め、絶対差の小ささ($\{\sqrt{2} - \text{絶対差}\}/\sqrt{2}$)

を各評価値 e_{init} 、 e_α 、 e_β 、 e_γ とする。そして、先行する評価期間の評価値で重み付けした各評価値の平均として、遷移規則の適応度 f を定める。

$$f = \frac{1}{4} e_{init} (1 + e_\alpha + e_\beta (1 + e_\gamma)) \quad (1)$$

遺伝的アルゴリズムを用いて、普遍部品を出現させる5状態の部分則 δ_0 を探索する。遷移後のセルの状態を遺伝子として、各個体は遷移規則を表現する。 I 個体のすべての遺伝子を状態0として初期集団を定める。各個体の適応度(式(1))を求め、集団から適応度の高い順番に E 個のエリート個体を選択し、また、集団から適応度に比例した確率で重複を許して $I-E$ 個の非エリート個体を選択し、非エリート個体は2個体を1組の親として交叉率 $P_{crossover}$ に従い2点交叉させ、全遺伝子へ突然変異率 $P_{mutation}$ に従ってランダムに選ばれた現在とは異なるセルの状態へ切り替えることを G 世代繰り返して集団を進化させる。

探索で求められた5状態のCAの普遍部品は、図1Aの5状態間の関係を維持しつつセル状態を新たに追加することで、任意の M 状態CAの普遍部品に拡張できる。

4. 実験結果と解析

以下のパラメータを用いて、普遍部品を出現させるCAの遷移規則(δ_0)を遺伝的アルゴリズムで探索した。CAと普遍部品について、 $M=5$ 、 $N \times N = 64 \times 64$ 、 $P_a = 0.2$ 、 $P_e = 0.08$ 、 $L_{st} = 2,048$ 、 $L_\alpha = 2$ 、 $L_\beta = L_\gamma = 1$ 、 $L_f = 64$ とした。また、遺伝的アルゴリズムについて、 $I = 32$ 、 $E = 8$ 、 $P_{crossover} = 0.75$ 、 $P_{mutation} = 0.005$ 、 $G = 2,048$ として、32試行の実験を行った。

全32試行中12試行において、最終世代の集団中の最大適応度が0.99以上になり、普遍部品を実現する遷移規則が得られた。最終世代において集団中で適応度が最大値1を示した個体の振舞いの一例を図2に示す。セル状態0が占める初期状態 $\{0\}$ は遷移規則による状態遷移においても変化しなかった(1)。 β 遷移では、外乱が発生した後(9)、外乱によって生じたセル状態1が大域状態へ広がり(10)–(13)、混合状態としてストライプ構造が出現した(14)。 γ 遷移では、さらなる外乱によってセル状態2が発生し(15)、ストライプ構造を崩しながらセル状態2の領域が広がった(16)–(21)。遷移規則へ導入された推移性によって、セル状態1、2だけが存在すると混合状態として安定化しセル状態1が消えなくなる可能性がある。しかしながら、セル状態2を背景としてセル状態0、1がクラスタを形成することによって、セル状態1の周囲ではセル状態0、1、2が混在する状況になり(19, 20)、セル状態1、2で混合状態を生じることなくセル状態0、1が消えて、セル状態2が占める均一状態 $\{2\}$ へ遷移したと考えられる(21)。 α 遷移では、 β と γ 遷移が混在したような遷移が生じた。2ステップの外乱によって、大域状態にはセル状態1と微量

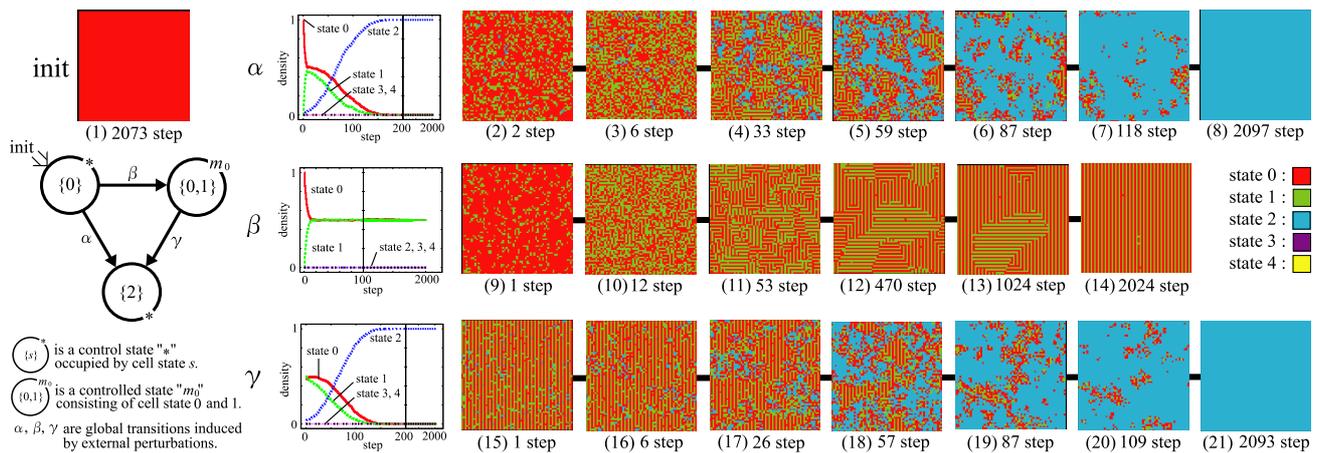


図 2 普遍部品の振舞い. α , β , γ 遷移について, 密度分布の推移とともに, 外乱発生後の遷移と最終ステップの大域状態を示す. 図中左上は初期状態の安定性の評価期間における最終状態 S_{init} である

Fig. 2 The behavior of UC. This figure shows the α , β and γ transitions induced by external perturbations, the global state transitions after external perturbations and their last states. In this figure, the upper left is the last state S_{init} in the stability evaluation of the initial state.

なセル状態 2 が発生した (2). β 遷移と同様にしてセル状態 1 の領域が広がり (3), その一部はセル状態 0 とともにストライプ構造を生じた (4). しかしながら, 外乱によって発生したセル状態 2 の領域が広がることによってストライプ構造が消え, γ 遷移と同様の過程を経て均一状態 {2} へ遷移した (5)–(8).

遷移規則の探索によって得られた CA の遷移特性をまとめると次のようになる. CA の大域状態において, 1 種類のセルの状態が占める均一状態は安定する. また, 連続した 2 種類のセルの状態は安定化してストライプ構造を持つ混合状態を生じる. しかしながら, これが 3 種類になると, 1 種類のセルの状態が減少し, 安定性が抑えられて均一状態へ復帰する. 以上から, こうした自己組織的な振舞いを進化の過程で獲得することによって, 図 1A において定義した普遍部品が得られたといえる.

なお, 得られた普遍部品を用い, 図 1B の構成回路上でランダムに定めた長さ 5 の混合状態列を発生させた場合, 7 割程度の成功率であった. また, 遷移規則変換によって 7 状態の CA にも適用可能なことを確かめた (紙面の都合で省略).

5. おわりに

本研究では, 外界との相互作用によって自己組織化するセルオートマトンの特性の理解と応用を目的とする研究の一環として, 外乱を加えることにより大域的な混合状態を任意の順序で出現させることのできる CA を提示した. この CA は, 実現したい大域的な混合状態の数の「普遍部品」を機械的に組み合わせることで構成できる. 遺伝的アルゴリズムを用いた遷移規則の探索を通じて, 大域状態に

含まれるセルの状態種に応じた自己組織的な特性を獲得することによって普遍部品が得られた. 先行研究 [4] における 1 種類のセルの状態が占める均一な大域状態の制御に対して, 本研究で得られた普遍部品は構成回路を構成することで大域的な混合状態を任意の順序で出現させることができ, また, より多状態の CA にも適用できると考えられる.

分散型パーベイシブシステムの制御に向けて, Mamei らは外的な影響によって CA 上にストライプパターン等の安定的な大域状態を出現させた [2]. 本研究では, このような大域状態自体をダイナミックに制御する手法を提案したといえる. こうした制御は自律分散システム一般の柔軟な制御法の開発に有用な知見をもたらすと期待できる.

今後, 探索した普遍部品の特性の詳細な分析や改良, あるいは応用のための具体的な検討を行っていく予定である.

参考文献

- [1] Kwak, K.J., Baryshnikov, Y.M. and Coffman, E.G.: Self-Organizing Sleep-Wake Sensor System, *Proc. 2nd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO2008)*, pp.393–402 (2008).
- [2] Mamei, M., Roli, A. and Zambonelli, F.: Emergence and Control of Macro-Spatial Structures in Perturbed Cellular Automata, and Implications for Pervasive Computing Systems, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol.35, No.3, pp.337–348 (2005).
- [3] 岩瀬雄祐, 鈴木麗瑩, 有田隆也: 外乱によって自己組織化するセルオートマトンの進化的探索, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.48, No.SIG 19 (TOM 19), pp.23–32 (2007).
- [4] 岩瀬雄祐, 鈴木麗瑩, 有田隆也: 複数種の外乱を利用して大域の状態間を遷移するセルオートマトンの進化的探索, 情報処理学会研究報告, Vol.2009-MPS-75, No.14 (2009).



岩瀬 雄祐 (正会員)

2005年富山大学工学部知能情報工学科卒業。2012年名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士(情報科学)。現在、株式会社インターネットイニシアティブに勤務。電子情報通信学会、芸術科学会各会員。



鈴木 麗壘 (正会員)

1998年名古屋大学情報文化学部退学(飛び級)。2003年同大学院人間情報学研究科博士後期課程修了。博士(学術)。カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て、現在、名古屋大学大学院情報科学研究科准教授。人工生命手法に基づく構成論的研究に従事。進化と学習の相互作用、協調行動の進化、進化とニッチ構築等に興味を持つ。International Society of Artificial Life, 人工知能学会, 計測自動制御学会, 日本進化学会, 日本数理生物学会各会員。



有田 隆也 (正会員)

1983年東京大学工学部計数工学科卒業。1988年同大学院工学系研究科修了。工学博士。名古屋工業大学講師、カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て、現在、名古屋大学大学院情報科学研究科教授。人工生命や複雑系科学の研究に従事。言語の進化、人間行動の進化、進化的計算論等に興味を持つ。著書に『人工生命』(医学出版, 2002年), 『心はプログラムできるか』(ソフトバンククリエイティブ, 2007年), 『生物から生命へ』(筑摩書房, 2012年)等。人工知能学会, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本数理生物学会各会員。