

複数種の外乱を利用して大域的状态間を遷移する セルオートマトンの進化的探索

岩瀬 雄祐^{†1} 鈴木 麗璽^{†1} 有田 隆也^{†1}

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理解と応用に向けて、複数種の外乱の発生をきっかけにして大域的状态を任意の順序で出現させる系を遺伝的アルゴリズムを用いて探索した。その結果、外乱によって生じた状態が系全体へ広がることで、外乱の種類に応じて大域的状态の遷移を分岐させる系が得られた。特に、本稿では外乱の種類数を増やして必要なセルの状態数の増加を抑えた系について解析した。この機能的な振舞いは自律分散系の柔軟な制御に役立つと期待される。

Evolutionary Search for Cellular Automata in Which the Arbitrary Switch between Global States is Triggered by Different External Perturbations

YUSUKE IWASE,^{†1} REIJI SUZUKI^{†1} and TAKAYA ARITA^{†1}

This paper aims at understanding the self-organizing properties of cellular automata (CAs) interacting with the external world, and their applications. We conducted evolutionary searches for rules of CAs in which their global state can transit among different stable states in arbitrary orders after occurrence of appropriate external perturbations. In the result, the global states in the evolved CAs transited their global states among different stable states depending on the kinds of external perturbations occurred. In particular, we analyzed the CAs in which the kinds of external perturbations were increased for reducing the number of the distinct states. We expect that the functional behaviors would be useful for flexible control of autonomous decentralized systems.

^{†1} 名古屋大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

1. はじめに

セルオートマトン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系である¹⁾。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²⁾、生態系モデリング³⁾などに加え、近年、特に分散パーベイシブ系の制御モデル等⁴⁾⁵⁾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セルオートマトンを用い、火事や侵入者を検知する省電力型センサネットワークの制御を提案している⁴⁾。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している。

従来、このような制御システムを設計する上では、先に挙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、セルオートマトンの自己組織的な振舞いは、非同期なセルの更新⁶⁾、境界条件⁷⁾、ノイズ等⁸⁾、外界からの影響によって変化し得ることが知られており、近年、こうしたセルオートマトンと外界との相互作用を積極的に利用した自律分散系の制御の可能性についての議論がある⁵⁾⁹⁾¹⁰⁾。Mameiらは、分散パーベイシブ系の制御に向けて、外乱によって大域的なパターンを生じるセルオートマトンについて論じている⁵⁾。彼らは、非同期セルオートマトン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、外界からの影響として、遷移規則とは異なる状態遷移を生じる外乱を各セルへ確率的に加えている。彼らが設計した系では、定常的な外乱が存在する場合にのみ大域的な安定状態(ストライプパターン等)が出現させており、外界からの確率的な影響によって系全体の挙動を操作可能であることを指摘している。

我々は、上記の観点のもと、外乱によって自己組織的な挙動を示すセルオートマトン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きた⁹⁾¹⁰⁾。具体的には、外乱の発生をきっかけに、セルの状態種の分布で表される大域的な状態を切り替える問題を設定した。探索の結果、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して、外乱の影響の蓄積が一定量を超えるとその影響が系全体に広まる自己組織的な性質によって、セルの状態数をこえる大域的な安定状態を周期的に遷移する系が得られた。これは、外乱を制御信号として用いることで、系全体の状態を任意のタイミングで切り替えられることを示しているが、この問題に特化した一意の遷移パターンを探索したものであり、任意の状態への遷移を動的に制御するものではなかった。

そこで、本研究は、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、自律分散系の制御等への応用の可能性を示すことを目的とし、複数種の外乱を用いて、外乱の発生をきっかけにして大域的な状態を任意の順序で出現させるセルオートマトンを遺伝的アルゴリズムによって探索する。本稿では、特に、外乱の種類数を多く設定した場合に注目し、セルの状態数を少なく抑えつつも、多くの大域的な状態間を遷移可能なセルオートマトンの探索過程とその振舞いについて詳細に解析する。

2. 問題設定

$D(\geq 2)$ 種類の外乱を用いて $n(\geq 2)$ 種類の大域的な状態を任意の順序で出現させるセルオートマトンを次のように設計する。2次元 M 状態近傍 (μ -ア近傍) の非同期セルオートマトンを用いる。このセルオートマトンは周期境界条件を適用した $N \times N$ 正方形格子状のセル空間で構成される。各セルは、時刻 t において内部状態 $q_{i,j}^t$ を持ち、以下のように、確率 P_a で近傍の状態 $S_{i,j}^t$ を参照し、遷移規則 δ に基づいて状態遷移する。

$$q_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \delta(S_{i,j}^t) & (P_a) \\ q_{i,j}^t & (1 - P_a) \end{cases} \quad (1)$$

図1に、 $D=2$ と $D=3$ の場合の例を示す。図中、各ノード $\{s\}$ は1種類のセルの状態 s ($\forall i, j, q_{i,j} = s$) によって占められる大域的な状態分布 (以下様相と呼ぶ) を意味しており、セルのとり得る状態数 M と等しい数の様相が表現可能である。任意に出現させたい n 個の状態 (m_0, m_1, \dots, m_{n-1}) を環状に並べ、 $D-1$ 個おきに1つずつ、 $\lceil n/(D-1) \rceil$ 個^{*1} の中立状態 (*) を加える。次に、図1中の矢印で示されるように、 D 種の外乱を用いて、各状態から右回りに D 個の状態へ遷移できるものとする。具体的には、外乱 $+d$ ($1 \leq d \leq D$) は遷移規則によらないセルの状態遷移として、以下のように定義され、確率 P_e で各セルへ加えられる。

$$q' := (q + d) \bmod M. \quad (2)$$

総状態数 ($n + \lceil n/(D-1) \rceil$) が $2D$ 以下の場合、状態間に双方向の遷移が発生するため (図2)、さらに、任意の場所へ中立状態を加えて総状態数を $2D+1$ に増加させ、双方向の遷移をなくす。このようにして、 n 個の状態に対し、総状態数 $M = \max(n + \lceil n/(D-1) \rceil, 2D+1)$ の系において、中立状態を介して、 n 種類の状態を任意の順序で出現させることができるよ

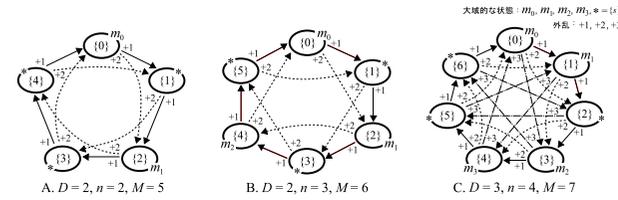


図1 外乱の種類に応じた大域的な状態の切り替え

Fig.1 Switching behaviors between global states based on different external perturbations.

大域的な状態: m_0, m_1, m_2, m_3, m_4
外乱: $+1, +2, +3$

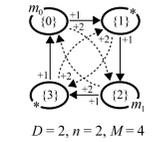


図2 双方向の遷移を含む例

Fig.2 Example of including bi-directional transitions.

うになる。

例えば、図1Aのように、最小の条件である $D=2, n=2$ の場合は、先の条件によって中立状態が1つ追加されて $M=5$ になり、状態列 “ $m_1 m_1 m_0$ ” は “ $m_1^{+2,+2,+1} m_1^{+2,+1} m_0$ ” の遷移等で出現する。さらに、図1Bのように、 $D=2, n=3$ の場合は $M=6$ になり、状態列 “ $m_0 m_2 m_1 m_0$ ” は “ $m_0^{+1,+2,+1} m_2^{+1,+2,+1} m_1^{+1,+2,+1} m_0$ ” 等で出現するように、 n 種類の状態を任意の順序で出現させられる。また、 $D=2, n=4$ の場合は $M=8$ になるが、 $D=3$ にすることで、同機能の系を $M=7$ でも実現できる (図1C)。このように、外乱の種類数を増やすことで、大域的な状態数を抑えられる。

3. 遺伝的アルゴリズムによる探索

3.1 遷移規則

本研究では、セルの状態によらない安定した切り替えと探索空間の圧縮を狙い、我々の先行研究⁹⁾¹⁰⁾と同様に、先の問題を解くセルオートマトンの遷移規則を次のように記述し、遺伝的アルゴリズムで探索する。

図3は $M=5$ の例を用いて遷移規則の概念を示したものである。遷移規則 (δ) は近傍における各状態の頻度に基づき、かつ、セルの状態に関する対称性を加えたもので、各近傍の状態について、遷移後のセルの状態を δ で一意に定める。更新するセルの状態 ($q_{i,j}$)、及び、セル (i, j) を除く近傍のセルにおける各状態にあるセル数 (各状態 s について $n_{i,j}(s)$) を組み合わせて、以下のように近傍の状態 ($S_{i,j}$) を表す (図3A)。

*1 $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数を意味する。

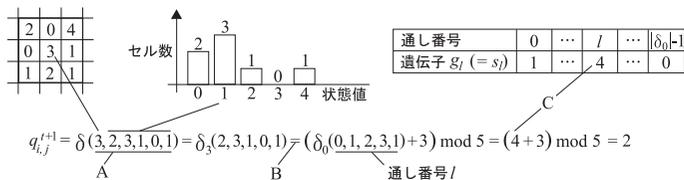


図3 遷移規則の概念 ($M = 5$)
Fig. 3 The concept of transition rule ($M = 5$).

$$n_{i,j}(s) = \sum_{|k| \leq 1, |l| \leq 1, |k|+|l| \neq 0} \begin{cases} 1 & \text{if } q_{i+k, j+l} = s \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{i,j} = \{q_{i,j}, n_{i,j}(0), n_{i,j}(1), \dots, n_{i,j}(M-1)\}.$$

さらに、セルの状態構成へ推移則 (状態 $0 \rightarrow$ 状態 $1 \rightarrow \dots \rightarrow$ 状態 $M-1 \rightarrow$ 状態 0) を導入することで、以下のように、セルの状態に関する対称性を遷移規則へ加える (図 3B)。

$$\delta_q(n(0), n(1), \dots, n(M-1)) = \delta(q, n(0), n(1), \dots, n(M-1)),$$

$$\delta_q(n(0), n(1), \dots, n(M-1)) = (\delta_0(n(cs(q, 0)), n(cs(q, 1)), \dots, n(cs(q, M-1))) + q) \bmod M \quad (cs(q, x) = (q+x) \bmod M). \quad (4)$$

この対称性があるために、状態 s のセルの遷移を定める各規則 δ_s ($1 \leq s < M$) は δ_0 を構成するすべての状態値を推移則の通りに巡回シフトすることによって得られ、 δ_0 から δ が定まる。

3.2 評価

問題設定において定めたタスクを可能にする遷移規則を次のように評価する。まず、図 1 における矢印の 1 つに相当する、各外乱発生前後の遷移過程を図 4 のとおりに評価する。各セルを状態 s として初期様相とする (図 4A)。初期様相 $\{s\}$ の安定性を評価するために、セルオートマトンを L_{st} ステップ状態遷移させる (図 4B)。この安定性の評価期間に続く L_{dis} ステップを外乱期間とし、遷移規則による更新とともに、外乱 $+d$ が発生する (図 4C)。その後、様相 $\{(s+d) \bmod M\}$ への遷移を評価するために、外乱による遷移の評価期間として、 L_{tr} ステップ状態遷移させる (図 4D)。また、外乱によらない周期的な振舞いを抑えるために、外乱期間の開始ステップは特定の範囲 ($\pm L_f$ ステップ) でランダムに変化し、それに対応して前後の評価ステップが増減する。

状態 s が占める様相 $\{s\}$ に外乱 $+d$ が加わった場合の遷移を初期様相の安定性の評価値 $e_{st}(s)$ と外乱によって生じる遷移の評価値 $e_{tr}(s, d)$ の積で評価し、初期様相と外乱の全組

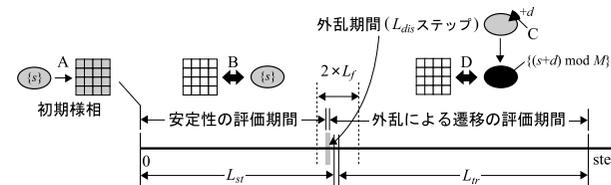


図4 外乱 $+d$ によって生じる様相 $\{s\}$ から $\{(s+d) \bmod M\}$ への遷移の評価
Fig. 4 Evaluation of transition from the global state $\{s\}$ to $\{(s+d) \bmod M\}$ induced by the external perturbation $+d$.

合せにおいて得られる各評価の平均値を適応度 f として次のように定める。

$$f = \frac{1}{M \times D} \sum_{s=0}^{M-1} \sum_{d \in \{1,2,\dots,D\}} e_{st}(s) \times e_{tr}(s, d) \quad (5)$$

ここで、 $e_{st}(s)$ は安定性の評価期間における状態 s の割合の平均値、 $e_{tr}(s, d)$ は外乱による遷移の評価期間における状態 $(s+d) \bmod M$ の割合の平均値である。 e_{st} は外乱発生前において様相が変化しないこと、また、 e_{tr} は目標の様相へ早く遷移することを評価している。以上から、セルオートマトンは、複数の大域的な安定状態をもち、外乱をきっかけにしてその種類に応じた安定状態へダイナミックに切り替えることが求められる。

3.3 遺伝子の記述と進化操作

遺伝的アルゴリズムを用いてセルオートマトンの遷移規則 (δ_0) を探索する。近傍の状態に対する遷移後のセル状態を遺伝子として、各個体は規則 δ_0 を表現する (図 3C)。 I 個体で構成される集団を、以下の手続きによって G 世代まで進化させる。

- (1) 初期集団の設定
各個体のすべての遺伝子の値を 0 とする。このとき、各個体は状態が全く変化しない遷移規則となる。
- (2) 適応度の評価
各個体について、遺伝子列から遷移規則 (δ) を定め、セルオートマトンを遷移させ、式 (5) に従って各個体の適応度 (f) を得る。
- (3) 選択
集団から適応度の高い順番に、 E 個の個体をエリート個体として選択し、次世代に残す (エリート保存)。また、集団から適応度に比例した確率で、重複を許して、 $I - E$ 個の個体を非エリート個体として選択する。

- (4) 交叉
非エリート個体について、2個体を1組の親とし、交叉率 ($P_{crossover}$) に従い、2点交叉させ、それらの子個体とする。
- (5) 突然変異
さらに、子個体の全遺伝子を、突然変異率 ($P_{mutation}$) に従い、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。
- (6) 終端処理
エリート個体と、交叉、突然変異を終えた非エリート個体を、次世代の集団とする。最終世代に至るまで手順 (2) へ戻る。

4. 実験結果と解析

実験に用いるパラメタとして次の値を用いた： $\{D, n, M\} = \{2, 2, 4\}, \{2, 2, 5\}, \{2, 3, 6\}, \{3, 4, 7\}$, $N = 64$, $P_a = 0.2$, $L_{st} = 512$, $L_{dis} = 1$, $P_c = 0.04$, $L_{tr} = 2048$, $L_f = 64$, $I = 32$, $G = 512, 1600$ ($M=7$ の場合), $E = 8$, $P_{crossover} = 0.75$, $P_{mutation} = 0.05$. $M = 7$ について 23 試行, 他の M について 24 試行ずつ遺伝的アルゴリズムによる探索を実施した。

最小条件として、外乱の種類数 $D = 2$ についてセルの状態数 $M = 4, 5, 6$ の各設定で実験を行った。 $M = 5, 6$ の場合、それぞれ ($n =$) 2, 3 種類の大域的な状態間を任意の順序で遷移可能な遷移規則が得られた。その一方で、 $M = 4$ の場合、問題設定に挙げた条件を満たさないため、外乱の種類に応じて遷移を切り替える遷移規則は得られなかった。しかし、大域的な状態数を増やすために M をさらに増加させることは、探索空間の増大から、遷移規則の探索を困難なものになると予測される。そこで、本稿では、特に、より少ない M で多くの遷移可能な状態を表現できる設定として、外乱の種類が多い $D = 3$ の場合に注目し、探索過程と得られた遷移規則によるセルオートマトンの振舞いについて詳細に解析する。

4.1 進化の過程

$D = 3, n = 4, M = 7$ の場合について、各世代における集団中の最大適応度、平均適応度、最小適応度の推移を図 5 に示す。最大適応度は初期世代においてほぼ 0 であるが、約 100 世代までに急速に上昇して約 0.4 になり、400 世代前後の 2 回目の増加によって約 0.7 になり、さらに、約 700 世代から 1040 世代までの 3 度目の増加を経て、最終的に式 (5) の最大値 1 付近に至った。また、世代を通して、平均適応度は最大適応度の 2/3 程度を推移し、最小適応度は 0 から 0.15 付近を推移した。

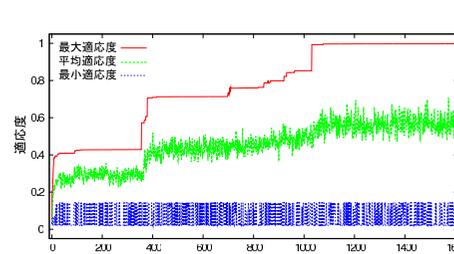


図 5 適応度の推移 ($D = 3, n = 4, M = 7$)

Fig. 5 Fitness of the population ($D = 3, n = 4, M = 7$).

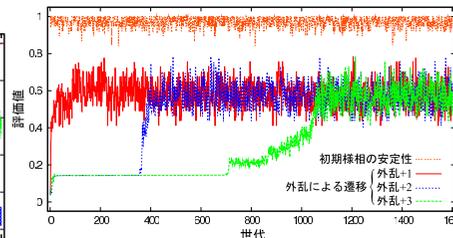


図 6 初期様相の安定性と外乱による推移の評価 ($D = 3, n = 4, M = 7$)

Fig. 6 Stability of initial configuration and transitions induced by external perturbations ($D = 3, n = 4, M = 7$).

適応度は式 (5) のように初期様相の安定性と外乱によって生じる遷移の評価値から定義される。そこで、適応度の上昇した理由を明らかにするため、適応度評価に用いられた各評価値について、各平均値の推移を図 6 に示した*1。初期様相の安定性の評価値は世代を通じて 0.9 から 1 程度の高い値を推移しており、外乱発生前における様相は変化が少なく安定していると考えられる。外乱 +1 によって生じる遷移の評価値は 100 世代頃までに 0.6 付近へ増加した。その一方で、外乱 +2 と外乱 +3 の評価値は、初期世代において 0.15 付近を推移し、外乱 +2 については 400 世代前後の増加、そして、外乱 +3 については約 700 世代からの緩やかな増加を経て、外乱 +1 と同程度の値を推移するようになった。従って、適応度の上昇は外乱によって生じる遷移の評価値の上昇によるもので、進化の過程で、個体集団は複数種の外乱に異なるタイミングで適応していったと考えられる。

$D = 3$ の場合と同様にして、 $D = 2$ の場合においても、2 種類の外乱への適応によって、適応度は 2 段階の上昇を示した。遺伝的アルゴリズムによる探索の結果、 $M = 5$ 以上の全試行において、最大適応度が式 (5) の最大値付近まで上昇し、タスクをほぼ完全にこなす遷移規則が得られた。ただし、 $D = 2, n = 2, M = 4$ の場合、外乱によって生じる遷移の評価値が上昇しない外乱があり、24 試行中 23 試行において、最大適応度は約 0.8 までしか上昇せず、タスクを完全にこなす遷移規則は得られなかった。

4.2 複数種の外乱によって生じる遷移の分岐

適応度と評価値の推移から、進化の過程を経て、複数種の外乱に適応した個体が得られた

*1 外乱によって生じる遷移の評価値は外乱の種類別に平均値を求めている。

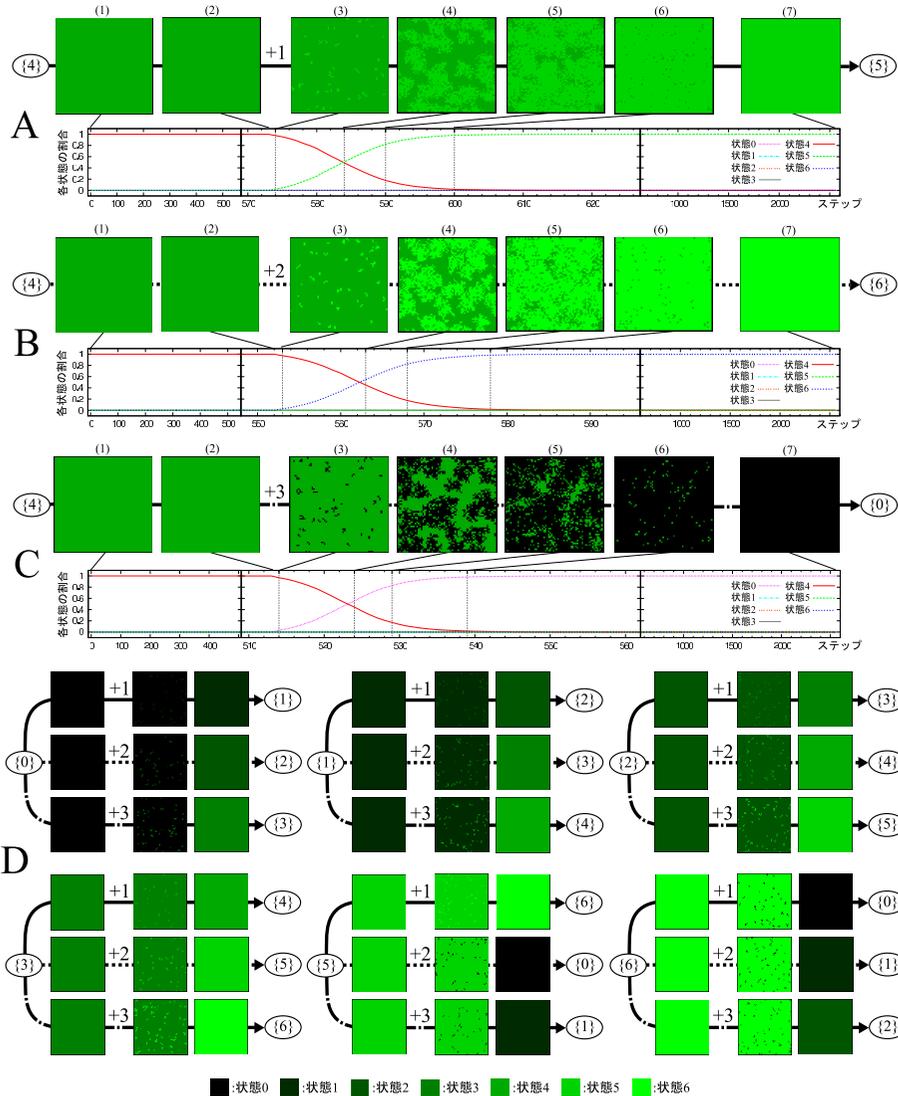


図 7 セルオートマトンの振舞い ($D = 3, n = 4, M = 7$)
 Fig. 7 Behavior of the evolved cellular automata ($D = 3, n = 4, M = 7$).

ことが分かった。そこで、最終世代の個体の振舞いを詳しく解析した。

図 5 の試行において最終世代で適応度が最大となった個体の振舞いを図 7 に示す。状態 4 が占める様相 {4} を初期様相とした場合、セルオートマトンは発生する外乱の種類に応じて図 7A, B, C ような振舞いを示した。各図において、下のグラフはセルのとり得る各状態の割合の推移を示し、上の各図はグラフの特定のステップの様相を表す。様相 {4} は、遷移規則による状態遷移においても変化せず、安定していた (A, B, C (1), (2))。外乱 +1 が発生した場合、外乱を受けたセルは状態 5 へ変化し、様相上に状態 5 のセルが微量に発生した (A (3))。外乱の発生後、遷移規則による状態遷移により、様相上における状態 5 の範囲が拡大して、状態 5 の割合は急激に増加し (A (4 - 6))、状態 5 が占める様相 {5} へ遷移した (A (7))。その一方で、外乱 +2 が発生した場合、外乱によって状態 6 のセルが出現し (B (3))、外乱 +1 の場合と同様にして、様相 {6} へ遷移した (B (4 - 7))。さらに、外乱 +3 が発生した場合には、外乱によって状態 0 のセルが出現し、様相 {4} は様相 {0} へ遷移した (C (1 - 7))。従って、セルオートマトンは 3 種類の外乱の発生をきっかけにして、様相 {4} を異なる 3 種類の様相へ切り替えた。他の様相 ({0}, ..., {3}, {5}, {6}) からの遷移においても、同様の切り替え動作が現れた (図 7D)。そのため、図 7 の各遷移をつなぎ合わせることで目標とした大域的な状態の遷移 (図 1C) が得られた。

以上の振舞いは次のような遷移規則によって生じることが解析により示された。まず、初期様相の安定性は、近傍の状態が同一の場合にセルの状態を変化させない規則によるものであった。さらに、外乱の発生をきっかけに生じる大域的な状態の遷移は、外乱によって生じた状態を保持する規則と、その状態を伝搬させる規則によって生じていた。各種類の外乱について、外乱によって生じる状態を伝搬する 2 種類の規則が存在しており、それらによって外乱の種類に応じた遷移の切り替えが可能になったと考えられる。

$D = 2, n = 2, M = 5$ と $D = 2, n = 3, M = 6$ の場合においても、外乱によって発生したセルの状態が様相全体へ広がる振舞いによって、図 1A, B のような、外乱の種類に応じた分岐を示す個体が得られた。その一方で、 $D = 2, n = 2, M = 4$ の場合、適応度が上昇した 23 試行から得られた個体では、外乱 +2 の発生において、外乱によって生じた状態を保持する規則とその状態を伝搬させる規則が衝突して、2 種類の状態が混在する様相を生じ、図 2 のような遷移が得られなかった。このため、問題設定において考慮したように、 $D = 2, n = 2, M = 4$ の系は大域的な状態を任意の順序で出現させる系にならなかった。

5. おわりに

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理解と応用を目的として、複数種の外乱を用いて、外乱の発生をきっかけにして大域的な状態を任意の順序で出現させるセルオートマトンの遷移規則を遺伝的アルゴリズムを用いて探索した。その結果、セルのとり得る1状態が占める大域的な状態を安定状態とし、外乱で発生した状態を系全体への伝搬させることで、発生する外乱の種類に応じて安定状態間の遷移を分岐させる遷移規則が得られた。セルのとり得る状態の多いセルオートマトンでは、外乱の種類数を増加させることで中立状態を減らせる可能性があり、必要なセルの状態数の増加を抑え得ることが分かった。

先に述べたように、探索によって得られた系は、大域的な状態の一部を中立状態とすることで、外乱によって特定の状態を任意の順序で出現させることができる。従って、この結果は、外界との相互作用に基づく自律分散系の柔軟な制御につながる知見と言えよう。

今後の課題としては、局所的な構造を利用した複数のセルの状態を含む様相間の遷移の検討や、実用に向けたロバスト性の検討等が挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省21世紀COE「計算科学フロンティア」の援助による。

参 考 文 献

- 1) S. Wolfram: *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc. (2002).
- 2) S. Sakai, K. Nishinari and S. Iida: A New Stochastic Cellular Automaton Model on Traffic Flow and Its Jamming Phase Transition, *J. Phys. A: Math. Gen.*, Vol. 39, No. 50, pp. 15327–15339 (2006).
- 3) H. Nagata, S. Morita, J. Yoshimura, T. Nitta and K. Tainaka: Perturbation Experiments and Fluctuation Enhancement in Finite Size of Lattice Ecosystems: Uncertainty in Top-Predator Conservation, *Ecological Informatics*, Vol. 3, Iss. 2, pp. 191–201 (2008).
- 4) K. J. Kwak, Y. M. Baryshnikov and E. G. Coffman: Self-Organizing Sleep-Wake Sensor System, *Proc. the 2nd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO2008)*, pp. 393–402 (2008).
- 5) M. Mamei, A. Roli and F. Zambonelli: Emergence and Control of Macro-Spatial Structures in Perturbed Cellular Automata, and Implications for Pervasive Computing Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 35, No. 3, pp. 337–348 (2005).
- 6) T. E. Ingerson and R. L. Buvel: Structure in Asynchronous Cellular Automata,

Physica D, Vol. 10, pp. 59–68 (1984).

- 7) 蛭川 繁, 米田正明, 広瀬貞樹: 散逸境界条件下のセルオートマトンについて, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 4, pp. 927–930 (1997).
- 8) C. Marr and M. T. Hütt: Similar Impact of Topological and Dynamic Noise on Complex Patterns, *Physics Letters A*, Vol. 349, pp. 302–305 (2006).
- 9) 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).
- 10) Y. Iwase, R. Suzuki and T. Arita: Evolutionary Search for Cellular Automata that Exhibit Self-Organizing Properties Induced by External Perturbations, *Proc. of 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 759–765 (2007).