

外界と相互作用するセルオートマトンと人間との インタラクションの創発

岩瀬雄祐 (正会員) 鈴木麗璽 有田隆也

名古屋大学大学院情報科学研究科

Emergence of Interaction between Cellular Automata Interacting with the External Environment and Humans

Yusuke Iwase Reiji Suzuki Takaya Arita

Graduate School of Information Science, Nagoya University
iwase@alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp, {reiji, arita}@nagoya-u.jp

概要

生物や社会等の複雑なシステムは、構成要素間のミクロな相互作用によって自己組織化し、マクロレベルの振舞いを生じる。しかしながら、マクロレベルの振舞いは、他の自己組織系を含む、外界との相互作用によって変化し得ると考えられる。本研究では、マクロレベルで外界と相互作用する自己組織系の理解と応用を目的として、タッチパネルを介してセルオートマトンと人間がインタラクションでき、さらに、対話型進化計算によってセルオートマトンの遷移規則をカスタマイズできるシステムを提案する。本システムで、遊びの要素を含む、多様なマクロレベルのインタラクションが出現した。こうしたインタラクションは自己組織系のさらなる理解や、アートや教育への応用につながると考えられる。

Abstract

Complex systems such as organisms and social systems exhibit macro-level behavior that is self-organized by micro interactions between their components. However, the macro-level behavior could be also changed by interactions with the external environment including other self-organizing systems. This study aims at understanding and applications of self-organizing systems that interact with external environments at the macro level. We propose a system that allows interaction between cellular automata (CAs) and humans through a touch panel, in which users can customize the rules of CAs by using interactive evolutionary computation. The system allows users for macro-level interactions with play features. These macro-level interactions would be useful for understanding self-organizing behaviors and applications in art, education.

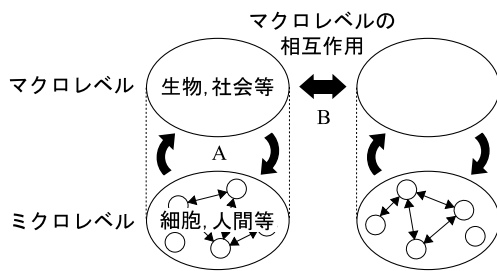


図 1: マクロレベルの相互作用

1 はじめに

生物や社会等のシステムは、細胞や人といった構成要素のミクロな相互作用を経て自己組織化し、マクロレベルの振舞いを生じる複雑なシステム [1] と考えられる (図 1A). こうしたシステムの振舞いは、要素同士の相互作用とともに、外界からの影響によっても変化し得る。また、ある自己組織系が他の自己組織系の外界の一部になっている場合があり得る。例えば、生物同士や異なる社会組織は、マクロな振舞いを介して相互作用している (図 1B). そのため、外的な作用に基づく自己組織化を考えることが重要といえる。また、群ロボット等に代表される自律分散型の工学システムにおいても、その外界にはユーザをはじめとする自己組織的な主体が複数存在し、システムの挙動に影響を及ぼす場合が考えられる。しかし、従来の自己組織系に関する議論では、ミクロレベルから創発するマクロレベルの振舞いの理解に主眼が置かれており、ある自己組織系から創発するマクロな振舞いと、他の自己組織系のマクロな振舞いを含む、外界との相互作用の影響については十分に議論されていなかった。

そこで、本研究では、マクロレベルで外界と相互作用する自己組織系の理解と応用を目的とする。複雑なシステムを理解するための抽象モデルの 1 つとしてセルオートマトン [2] が挙げられる。セルオートマトンは空間を格子点で分割し、各点にセルと呼ばれる有限オートマトンを置くことで構成される。各セルは内部状態を持ち、遷移規則にしたがって近傍の状態から次状態を決めることで更新される (図 2)。1 次元 2 状態 3 近傍の単純セルオートマトンにおいて計算万能性をもつ遷移規則の存在が示される等、単純な要素間の相互作用から生じるシステム全体の複雑な振舞いを理解するための抽象モデルとして幅広く活用されている。同時に、セル状態の更新における同期・非同期性 [3][4]、セル空間の境界条件 [5]、セルの状態遷移への外乱 [6] 等のシステムの外からの影響によってもマクロレベルの振舞いが大きく変わり得ることが知られており、近年では、こうした特性を積極的に利用した自律分散システムの制御の可能性が考えられている [7][8][9]。

一方、セルオートマトンと人間とのインタラクションに基づいた、アートやエンタテインメントへ向けた試みがいくなされてきた。Satomi らは生物の疎密から生態システムを表現するライフゲームを用いて仮想的な都市空間 *game_of_life* を構築している [10]。

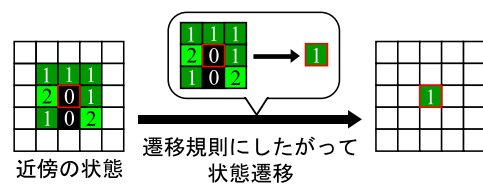


図 2: セルの状態遷移

セル空間上で、ユーザのいるセルはライフゲームにおける生状態になり、他の生状態のセルはアバターとして可視化される。ユーザは、セル空間を歩き回ることによって他のセルにおける生状態の発生・消滅に影響を与え、アバターとインタラクションできる。また、Stauffer らは、生物に着想を得たインタラクティブな電子ディスプレイである *BioWall* [11] 上に自己複製ループを実装している [12]。このシステムでは、ユーザのタッチによって任意のサイズのループを発生・消滅させることができるようになっている。一方、児玉らの“生きている表面”では、多様な自己複製ループを生成できる *Evoloop* を用いて、ユーザがインタラクティブに 3D 物体のテクスチャを生成できる手法が提案されている [13]。さらに、Fencott は、セルオートマトンとマルチタッチスクリーンを用いて、インタラクティブに音声と画像を生成するツールを示している [14]。これらの研究では、マクロレベルでの相互作用という視点は明示的に論じられてはいないが、セルオートマトンが自己組織系と外界との相互作用を考えるのに適したモデルであることを示しているといえる。さらに、人間がマクロレベルでセルオートマトンの振舞いに介入することで、アートやエンタテインメントとしての応用の可能性を検討することができると考えられる。しかしながら、従来の研究では、外的な作用の発生形態が比較的単純であり、また、インタラクションに特化した遷移規則を考える余地がある。

以上をふまえ、本研究では、我々の先行研究 [8] において得られた、遷移規則に基づく外乱によって自己組織化するセルオートマトンと、その外界に存在して相互作用する人間とのインタラクションシステムを設計・実装し、マクロレベルの相互作用過程の基礎的解析を行う [15]。これまでに、我々は外乱をきっかけにマクロレベルの状態遷移を生じ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設計した [8]。このセルオートマトンは、外乱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システム全体に広まる自己組織的な性質によって、セルの状態数を超えるマクロな安定状態を周期的に出現させるものであった。しかし、この外乱は、各セルにおいて一様な確率でセルの状態変化を生じるもので、機械的で比較的単純なものであった。本研究では、タッチパネルを介して人間がタッチすることで、セルオートマトンへインタラクティブに複雑なパターンとして外乱を加える。人間の自己組織的な認知過程に基づく時空間的に複雑なダイナミクスによって、セルオートマトンと人間との間に多様なマクロレベルの相互作用が発生することが期待される。さらに、マクロレベルの相互作用を促進するべく、対話型進化計算

によって、ユーザがその場で遷移規則をカスタマイズできるシステムを提案する。そして、マクロレベルの相互作用という新たな視点から、自己組織系のさらなる理解とアート・教育等への応用の可能性を検討する。

2 外乱によって自己組織化するセルオートマトン

セルオートマトンと人間とのインタラクションを可能にするため、先行研究 [8] で得られた外乱によって自己組織化するセルオートマトンを用いる。先行研究 [8] では、セルのとり得る各状態の発生頻度の分布 (密度分布)¹ をセルオートマトンのマクロ状態とみなし、この分布に微細な変化を加えることをマクロレベルの外乱と考えた。そして、マクロな状態遷移において時間間隔をあけて小さな確率で一様外乱を複数回加え、外乱をきっかけにマクロ状態が大きく変化するセルオートマトンの遷移規則を進化的に探索した。これは、システムの外からの作用に基づくマクロレベルの振舞いを設計しているといえる。

2.1 セルオートマトンと外乱

2 次元 M 状態 9 近傍の非同期セルオートマトンを考える。周期境界条件を適用した $N_h \times N_w$ のトーラス状のセル空間を用い、セル (i, j) を中心とした 3×3 の正方形の範囲を近傍とする。各セル (i, j) は内部状態 $q_{i,j}$ をもち、確率 P_a によって、 $q_{i,j}$ と周囲のセルの状態の発生頻度 $n_{i,j}(s)$ ($0 \leq s < M$) からなる近傍の状態 $S_{i,j}$ を参照し、遷移規則 δ に基づいて状態遷移する²。

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

全セルの状態がセルオートマトンのマクロ状態になる。

外乱として、遷移規則とは別に状態遷移 $\epsilon(s)$ を導入する。外乱 $\epsilon(s)$ は発生対象のセルの状態を確率 P_e で正順 (値を 1 増やす) 方向へ遷移させるものとして以下のように定義する。

$$\epsilon(s) : q_{i,j} := (q_{i,j} + 1) \bmod M \quad (2)$$

以上のような、遷移規則による状態遷移と外乱の発生を 1 ステップとする。

2.2 外乱による自己組織化

進化的探索によって得られた 2 次元 3 状態 9 近傍の非同期セルオートマトンのサイクリックな振舞いを図 3 に示す。ランダムに定めた初期状態から、状態 1 と状態 2 が混在するマクロ状態になる (1)。まず、1

¹ 微細な量的変化を評価するため、密度分布の各値にシグモイド関数を加えた強調密度分布を用いた。

² 探索空間の圧縮等のため、セルの状態に関する対称性を導入している。

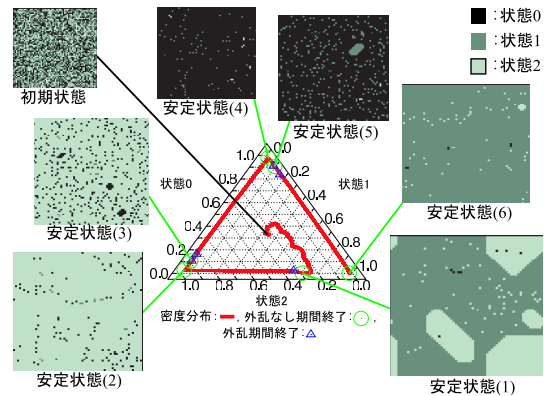


図 3: 外乱によって自己組織化するセルオートマトン。中央のグラフは各ステップにおけるセルのとり得る各状態の発生頻度の分布 (密度分布) の遷移を示し、周囲の図は具体的なマクロ状態を示す。初期状態は状態 0, 1, 2 がランダムに分布している。遷移規則に基づく状態遷移によって、状態 1 を背景にして状態 2 のクラスタが存在する安定状態 (1) へ至る。ここで短い時間外乱が発生すると状態 2 のクラスタが拡大を始め、状態 2 が大部分を占める安定状態 (2) へ大きく変化する。これ以降は、1 回の外乱ではマクロ状態は大きく変化せず (安定状態 (3, 5)), 2 回の外乱において、外乱で発生した状態が大部分を占める安定状態 (4, 6) へ遷移する。

回目の外乱によって状態 2 のクラスタが拡大して、状態 2 が占めるマクロ状態となる (2)。2 回目の外乱では、状態 0 の小さなクラスタが出現するが、密度分布を大きく変化させるようなクラスタの拡大は起こらない (3)。しかし、3 回目の外乱では、状態 0 のクラスタが拡大して状態 0 が占めるマクロ状態へ遷移する (4)。以降、外乱によってクラスタ構造の出現と拡大を繰り返す。

このセルオートマトンは、小さなクラスタがあるサイズを超えると拡大するミクロな仕組みがあり、マクロレベルにおいて、外乱によってある状態の密度が一定以上になると大きく増加する非線形的な振舞いを示す。そのため、機械的で比較的単純であった外乱の発生を人間によってより柔軟に定めることができれば、セルオートマトンのより高度な振舞いが引き出され、セルオートマトンと人間とのマクロレベルの相互作用が出現する可能性があると考えられる。

3 タッチパネルによるセルオートマトンと人間とのインタラクションシステム

近年、マルチタッチが可能なタッチパネルの普及が進んでいる [16]。例えば、Apple 社の iPhone [17] はマルチタッチ方式のタッチパネルによってジェスチャ入力を可能とし、直感的で使いやすいインタフェース

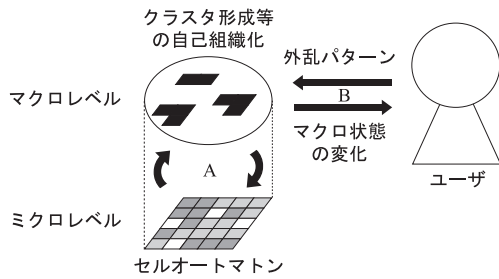


図 4: セルオートマトンと人間とのマクロレベルでのインタラクション

を実現している。また、こうしたインターフェースは人間とコンピュータとの対話性に優れており、アートや教育への利用が考えられている [14][18]。そこで、外乱によって自己組織化するセルオートマトンを用いて、マクロレベルの相互作用という視点から、タッチパネルを介してセルオートマトンと人間がインタラクションできるシステムを提案する。

3.1 提案システム

セルオートマトンと人間とのインタラクションを図 4 のように考える。セルオートマトンはセル同士のミクロな相互作用を経て、マクロレベルにおいてクラスタ形成等の自己組織化を生じる (A)。セルオートマトンはユーザへマクロ状態の変化を提示し、ユーザは外乱パターンをタッチによって指定する (B)。セルオートマトンと人間とのマクロレベルでの相互作用の発生をこのように設計する。

提案システム (図 5) では、タッチパネルにセルオートマトンのマクロ状態が表示される。タッチパネルがタッチされると、タッチされた位置 (i, j) を中心として半径 r_d の円形内のセルにおいて外乱 (式 (2)) が発生する。すなわち、ユーザのタッチによってセルオートマトン上にスポット外乱が生じる。

3.2 プロトタイプ

試作したシステムを図 6 に示す。タッチパネルの左上にはシステムを制御する 4 つのボタンが配置されている。Start, Stop ボタンはセルオートマトンの状態遷移を制御するもので、Start ボタンを押すことでセルオートマトンの状態遷移を開始し、Stop ボタンで状態遷移を止める。また、Random, Zero ボタンはセルオートマトンのマクロ状態を初期化するもので、Random ボタンを押すことで各セルをランダムな状態で初期化し、Zero ボタンで全セルを状態 0 にする。

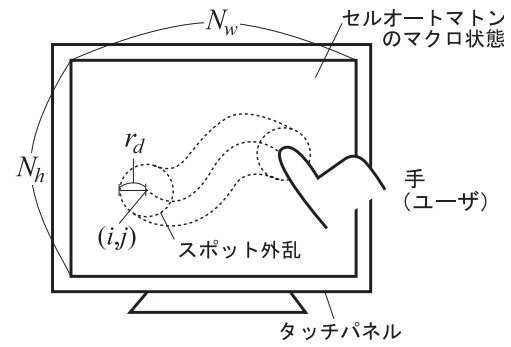


図 5: タッチパネルによる外乱生成システム



図 6: プロトタイプシステムの実装。タッチの後、状態 0 を背景にして、状態 1 のクラスタは残り、状態 2 のクラスタは状態 0 へ遷移して消えている。

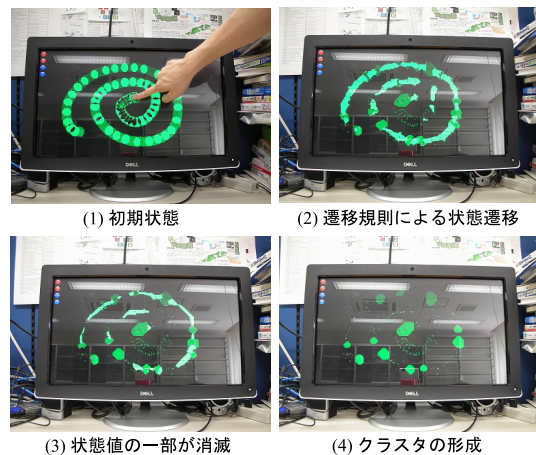


図 7: 渦巻きを描く

4 ユーザとの相互作用過程の基礎的分析

提案システムにおけるセルオートマトンとユーザのマクロレベルのインタラクションは、セルのミクロな相互作用から生じるセルオートマトンの自己組織的な

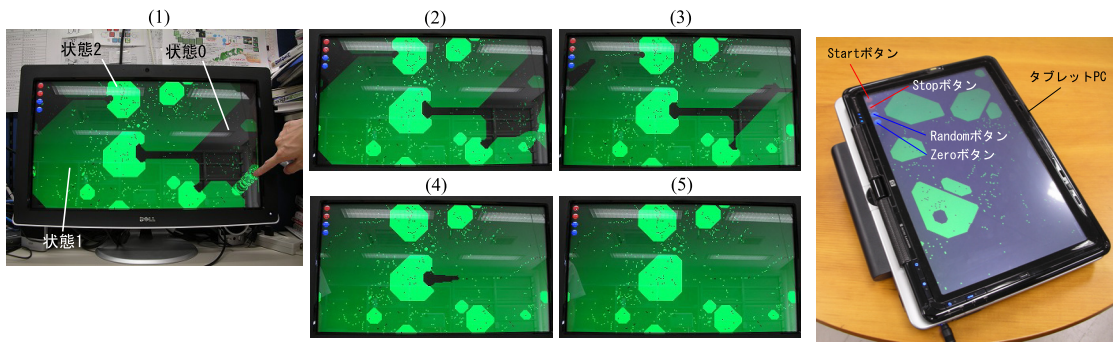


図 8: ユーザのタッチをきっかけにしたマクロな状態遷移. 右下の領域をタッチして外乱を加えると (1), 状態 0 の大きなクラスタが消える (2-5).

図 9: タブレット PC への実装

(マクロレベルの) 振舞いの創発 (図 4A) と, セルオートマトンのマクロレベルの振舞いとユーザとの創発的なインタラクション (図 4B) によって構成される. そこで, 提案したプロトタイプシステムにおいて, ユーザによる外乱入力をきっかけに自己組織的な振舞いが生じ得るか, また, 生じるとすればそれがユーザとの間にどのようなインタラクションをもたらし得るのかについて基礎的な知見を得るため, 名古屋大学第 51 回名大祭でのオープンラボ³の展示においてデモを実施した. デモには, 先にプロトタイプとして示したデスクトップ PC のシステム (図 6) と, 可搬なシステムのプロトタイプであるタブレット PC のシステム (図 9)⁴を用いた.

4.1 ユーザ入力に基づく自己組織的な振舞い

本研究で採用したセルオートマトンの遷移規則は, 確率的に一樣に与えた外乱をきっかけにして自己組織的なパターン変化が生じることは既知であった. しかし, ユーザが提案インターフェイスを用いて外乱を入力した場合, セルオートマトンに自己組織的な振舞いが生じ得るか, またどのようなパターンが生じ得るかは必ずしも自明ではない. そこで, 単純なパターンを入力したときにセルオートマトンが示す振舞いについて事前に調査した.

具体的には, 外乱によって自己組織化する 2 次元 ($M=3$ 状態 9 近傍の非同期セルオートマトン (2 章)) を用いた. セル空間のサイズを $N_h \times N_w = 150 \times 266$ と調整し, $P_a = 0.2$, $r_d = 7$, $P_e = 1.0$ と設定した. 図 6 は全セルを状態 0 とし, セルオートマトンの状態遷移において, タッチパネルを左下から右上へタッチした状況を示している. 初期状態として渦巻きを描くと図 7 のような振舞いが現れる. 外乱によって状態 0 のセルが状態 1 へ遷移し, 2 重に外乱が加わった領域では状態 2 が出現する (1). セルオートマトンを状態遷移させると, 状態 1 の領域は広がって状態 2 の

領域は縮小し (2, 3), 状態 1 のクラスタが残り (4), タッチによる状態遷移は収束する.

図 7 では, タッチによる状態遷移はマクロ状態の一部にとどまった. その一方で, 図 8 のように, タッチパネルの一部をタッチすることで, 広範囲に渡る状態遷移も発生し得る. ランダムな状態で初期化して遷移規則による状態遷移の後, 状態 1 が大部分を占め, 状態 2 の小さなクラスタが複数個, また, 状態 0 の大きなクラスタが 1 つ存在するマクロ状態となる. タッチパネルの右下の領域をタッチして外乱を加えると (1), 外乱によってクラスタ構造が不安定になり (2), 遷移規則によって状態 0 が状態 1 へ遷移して (3, 4), 状態 0 の大きなクラスタが消える (5).

デモ展示では, カメラを用いた従来のシステム [19] と比較して, ユーザはより柔軟に複雑なパターンとして外乱を加えることで, クラスタ構造にさまざまな影響を与えることができるようになり, 外乱に応じてさまざまな複雑な振舞いが出現し得ることが判明した. これは, タッチパネルを採用することで, より直感的で繊細な入力が可能になったことが大きく貢献していると考えられ, パターンに基づくマクロレベルの相互作用に注目する上で大きな改良であるといえる.

4.2 セルオートマトンとユーザのインタラクション

次に, 前節で生じたセルオートマトンの自己組織的な振舞いが, ユーザとの間にどのような相互作用をもたらすかについて知見を得るため, デモ展示への参加者によるインタラクションの過程を観察した. 具体的には, デスクトップ PC のシステムを会場となった研究室にあるデスクの上に設置し, タブレット PC のシステムを同室にあるソファの前に置かれたテーブルの上に設置した. 参加者に対して事前に研究の趣旨を説明した上で, システムを自由に触れられる状態にし, 参加者が利用しやすいよう配慮した.

デモ展示への参加者は, 5 グループ (男性 1 名, 女性 2 名, 男性 4 名, 男性 2 名, 男性 2 名) からなる計 11 名であった. 全体の様子として, どの参加者も外乱をパターンとして入力し, それをきっかけに生じるパターンとしてのセルオートマトンの振舞いの変化に

³ 「小さな」人工世界が創る「大きな」びっくり 11, 名古屋大学大学院情報科学研究科棟, 2010 年 6 月 5 日開催.

⁴ HP 製 Pavilion tx2000.

注目しており、この意味でマクロレベルのパターンとしての相互作用が生じていることが確認できた。より具体的には、セルオートマトンからユーザへの影響については、マクロレベルの振舞いに注目したという明確な回答が一部の参加者から得られ。例えば、ライフゲームなどからでは得られないようなマクロレベルのドラスティックな振舞いの変化全体を楽しんでいる様子が観察された。また、ユーザからセルオートマトンへの影響については、一点一点入力するのではなく、指で大きめに入力することでパターンを描く、マクロレベルの影響を意図した入力がされていることが確認された。

特に、5 グループ中 4 グループでは、相互作用の過程が比較的長く続いたことが特徴的であった。各グループでの相互作用の様子をまとめると次の通りであった。

1. ぱっと見て面白いものに興味があり、パターンによる外乱を入力した後のセルオートマトンの振舞いを「ずっとみてしまう」と注目していた (女性 2 人組)。
2. パターン入力によるセルオートマトンの反応に興味を持ち、システムの応用について話し合っていた (男性 4 人組)。
3. セルオートマトンに出現したクラスタを領地や戦艦の様に見立て、パターン入力をきっかけにしたセルオートマトンの変化にストーリーを付けて楽しんでいた (男性 2 人組、研究室メンバ)。
4. 交互にセルオートマトンにパターンを入力し、セルオートマトンに大きな変化を起こした方が負けというゲームに見立てて楽しんでいた (男性 2 人組、研究室メンバ)。

どのグループにおいても、セルオートマトンの自己組織的な振舞いがユーザの興味を惹いているのが特徴であるといえる。特に、3 のようにセルオートマトンの振舞いにユーザが独自のストーリーを付与する様子や、4 のセルオートマトンの振舞いにゲーム的な側面を見出す様子は、システムの構築において意図しなかった相互作用の形態として興味深いといえる。

以上から、提案システムを用いたユーザ入力をきっかけにしてセルオートマトンが自己組織的な振舞いを示し (図 4A)、それによって生じたマクロレベルのパターンを認識してユーザがさらにパターンで入力する過程が繰り返される (図 4B)、マクロレベルのインタラクションの創発が確認できたといえる。

その一方で、セルオートマトンの振舞いにあまり興味を惹かず、早く飽きてしまう参加者 (男性 1 名) も存在した。各ユーザにとって興味を惹くかどうかは、採用した遷移規則に基づく自己組織的な振舞いをどのように受け止めるかに依存する。そのため、システムの応用を考える上では、ユーザの興味や意図に応じた自己組織的な振舞いが提示可能なシステムへの発展が、応用に向けて重要であるといえる。

5 対話型進化計算による 遷移規則のカスタマイズ

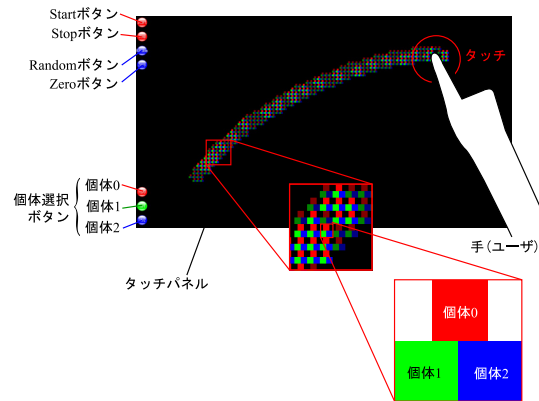


図 10: 対話型進化計算を用いた遷移規則のカスタマイズシステム (3 個体)

前節では、提案システムにおいてセルオートマトンと人間との間にマクロレベルの相互作用が創発することを確認したが、ユーザの興味や意図に応じた自己組織的な振舞いを示すことの必要性も示唆された。一般に、セルオートマトンなど、局所的な規則から創発するマクロレベルの振舞いを、規則のレベルで直接設計することは容易でなく、また、どのような振舞いが必要とされるかもユーザによって異なる。

人間の主観的な評価に基づく進化的な最適化手法として対話型進化計算がある [20]。先駆的な研究としては、生命的な CG を生成するドーキンス (Dawkins) のバイオモルフ [21] が挙げられる。Unemi は、人間が主観に基づいて次世代に向けた解候補を直接選択する模擬育種法 (Simulated Breeding) によって、画像、動画、コラージュ、また、音楽フレーズを生成できるシステムを提案している [22][23]。近年では、Hastings らが、CG やゲーム等に向けて、粒子系を制御するニューラルネットワークの設計に対話型進化計算を用いている [24]。対話型進化計算は人間の主観的な評価が必要な問題に有効な手法であり、複雑なシステムの最適化にも用いることができる。そこで、3 章で提案したシステムを元にして、ユーザが望むマクロレベルの相互作用を発生可能なセルオートマトンを、対話型進化計算を用いて探索する。

5.1 ユーザによる外乱発生に向けた 遷移規則のカスタマイズシステム

セルオートマトンの遷移規則を遺伝子列として個体を表現する。ユーザによる外乱発生、ならびに、ユーザの主観的な評価による個体選択を繰り返すことによって個体集団を進化させ、ユーザの目標とする遷移規則を得る。

プロトタイプを図 10 に示す。複数の遷移規則 (個体) によるセル状態が同時に画面へ表示され、個体数分の個体選択ボタンが追加されている。個体間で区別がつくように各個体が色で区別されており、セルの状態を状態 0 から状態 $M - 1$ へ明度が上がることで表

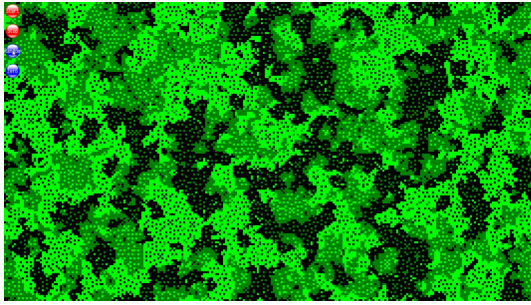


図 11: 反応拡散的な性質の増加

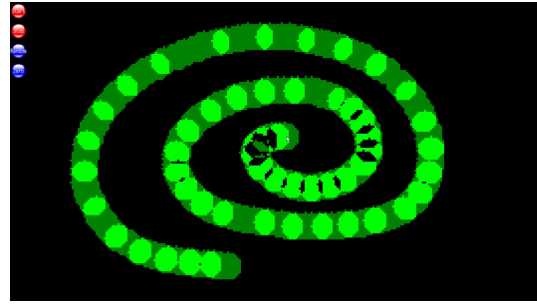
現し、各セルの領域を個体数で分割することによって複数のマクロ状態を画面へ多重表示している。各セルオートマトンは独立に動作するが、ユーザは1度のタッチで全てのセルオートマトンに同じパターンの外乱を加えられる。また、個体選択ボタンは各世代において個体選択に用いる。以下の手順でセルオートマトンの遷移規則をカスタマイズする。

1. 全 N_p 個体を外乱によって自己組織化するセルオートマトン (2 章) の遷移規則で初期化する。
2. 全セルを状態 0 で初期化する。
3. 遷移規則によるマクロな状態遷移を開始した上で、ユーザはセルオートマトンへ外乱を加え、各個体のマクロ状態の変化を評価する。
4. 次世代の親個体を個体選択ボタンを押して選択する。
5. 確認のため、選択した個体のみが画面に表示される。このとき、先とは異なる個体選択ボタンを押すと、4. へ戻って個体選択をやり直せる。
6. 再度、同じ個体選択ボタンを押して、親個体を確定する。
7. 親個体を構成する各遺伝子に確率 $P_{mutation}$ で突然変異を加え、新しく $N_p - 1$ 個の子個体を生成する。
8. 親個体と新しく生成した子個体を次世代の個体集団とする。
9. 目標とする遷移規則が得られるまで、2. へ戻る。

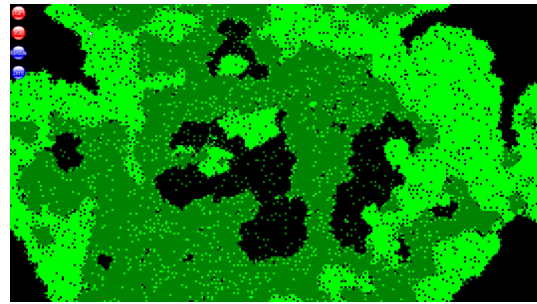
対話型進化計算の技術的な課題として、個体評価におけるユーザの疲労や、個体数と世代数の減少による進化の収束性の悪化等が挙げられる [20]。提案システムでは、複数のセルオートマトンを多重表示し、1度のタッチで同じ外乱パターンを加えて個体評価することで、タッチパネルの操作における疲労と、解候補の時間発展の比較における心理的負担の軽減を図っている。また、先に遺伝的アルゴリズムで探索した遷移規則を初期個体にすることで、探索に必要な個体数と世代数を削減を狙う。

5.2 提案システムの試行と基礎評価

3.2 節で採用した遷移規則を初期集団にして、1) ユーザが外乱を加えない状況でも変化を生じるよう



A. 初期状態 (渦巻き)



B. 遷移規則による状態遷移後

図 12: クラスターの拡大

に、2) 画像としての複雑さを増すように、という2つの異なる評価基準でそれぞれ探索を行った結果を示す。以下の実験では、 $N_p = 3$ 、 $P_{mutation} = 0.05$ とし、他のパラメータは3.2 節と同じものを定め、各試行50 世代程度の探索を行った。

図 11 は元の遷移規則がもつ反応拡散的な性質が増加した規則”000121122001022100221111210101000110000000001”である⁵。この遷移規則は状態 0 が占めるマクロ状態において状態 1 のセルを自発的に生じる規則が含まれ、ユーザによる外乱発生がない状況においても、マクロ状態の変化を示す。その結果、全体に3 種のセルが細かく混在している状況になった。一方、より大きなクラスターを生じさせるように探索して得られた遷移規則”00011122101102002222100202202200011000100000”によるセルオートマトンの振舞いを図 12 に示す。元の遷移規則による振舞い (図 7) と比較して、セルオートマトンの初期状態として渦巻きを描くと (図 12A)、遷移規則による状態遷移の後、外乱をきっかけに生じた状態が拡散して全域へ広がり、3 種の大きなクラスター領域が生じた (図 12B)。

以上から、比較的短い世代数において、ユーザの設計意図を反映した遷移規則のカスタマイズが提案手法によって可能なことが示されたといえる。ユーザの主

⁵ 遺伝子列の各値は、以下のように、状態 0 のセルの遷移を決める規則 δ_0 の各値に対応する。

$$\begin{aligned} & \delta_0(0, 0, 8) \quad \delta_0(0, 1, 7) \quad \dots \quad \delta_0(1, 0, 7) \quad \delta_0(1, 1, 6) \\ & \dots \quad \delta_0(7, 0, 1) \quad \delta_0(7, 1, 0) \quad \delta_0(8, 0, 0)'' \end{aligned}$$

遷移規則のインデックスに関する詳細は文献 [8] を参照のこと。

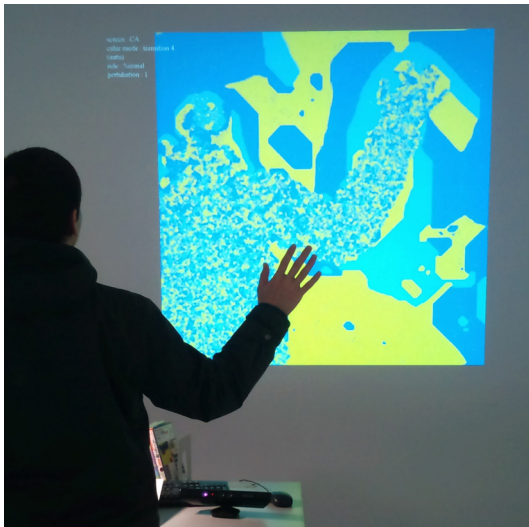


図 13: セルオートマトンと人間とのインタラクション。図中のスクリーンにセルオートマトンのマクロ状態が表示されている。また、スクリーンの直下に Kinect センサーを置き、鑑賞者等を含めた距離画像を取得し、その距離に応じてセルオートマトン上で外乱を発生させている。

観的な評価を複雑なシステムの選択へ直接生かすことは、これまでにない複雑なシステムと人間との相互作用を見つけられる可能性があるだろう。

6 応用に向けて

セルオートマトンを用いた既存研究に関しては、ライフゲーム等でユーザがインタラクティブにセルの状態を改変可能なアプリケーション(例えば iLifeGame)などが存在するが、多くの場合、インターフェイスは単に初期値の入力の一形態を担うものであり、外乱の影響が遷移規則の設計を含めて全体で考慮された遷移規則を用いたものはほとんどない。特に、ライフゲームではユーザによる状態改変が全体にどのような影響を及ぼすかを推測するのは難しい。一方、提案システムは、パターン入力に応じたセルオートマトンのパターンの変化が容易に理解が可能であるため、多様なインタラクションの過程が発生したと考えられる。このように自己組織的な振舞いの変化をインタラクションを通じて体感できることは、提案システムの教育利用への可能性を示唆すると考えられる。

例えば、幼児における芸術教育や情報教育には身体を基礎とした豊かな感覚の育成を視点にもつ新しい教育機器が必要とされ、幼児の全身が活用できる「センサ・テーブル」が提案されている [25]。また、子どもの健全な発達のためには「遊び」が重要といわれており、愛知県児童総合センター「汗かくメディア」[26]のようにメディアを介した新しい遊びの提案もみられる。本研究で提案したシステムは、セルオートマトンとのマクロレベルの相互作用によって、ユーザに多様

なインタラクションを出現させるものとなったことから、このような意味での教育に向けた応用も考え得る。

また、セルオートマトン自体やセルに明示的に意味づけを行わずにユーザに提示することで、ユーザ自身が自己組織的な振舞いに意味づけを行い楽しむ様子が観察されたことは、ユーザとのインタラクションの過程でその関係も創発し得るという観点からの自己組織的なシステムのアートへの応用に関して、一つの示唆を与えるものと考えられる。

我々は、最近、本研究に関するアートに向けた試みとして、マクロレベルの相互作用を体感できるシステム「セルオートマトンと人間とのインタラクション」(図 13) を制作・展示した⁶。この展示では、スクリーンにセルオートマトンのマクロ状態を表示し、Microsoft 社の Kinect センサーを用いてスクリーンに直面する鑑賞者等を含めた距離画像を取得し、その距離画像をセルオートマトンのマクロ状態に対応づけることによって、スクリーンの近くにある物程、対応するセルへ大きな確率で外乱が発生させるようになっている。また、GPGPU⁷ による並列演算により 600×600 の広大なセルオートマトンを用いたリアルタイム処理を実現することで、解像度の極めて高いきめ細かな外乱パターンを、身体動作によってダイナミックに入力することが可能になった。その結果、図 13 に示されるように、鑑賞者がスクリーンに近づくことでそのシルエットが外乱としてセルオートマトン上に発生し、セルオートマトンの複雑なパターンと鑑賞者の身体動作の間にさまざまなインタラクションが生じることが確認できた。例えば、鑑賞者からは「川辺で水に触れているような、何か自然のものに触れている不思議な感じがする」といった感想が得られた。提案システムのアートへ応用の可能性の一端が示されたといえる。

本論文では、特に興味深いインタラクションの事例について報告したのみであるが、ユーザーエクスペリエンスに関連する従来の理論を用いた検討が応用を考える際に重要になってくると思われる。例えば、セルオートマトンの振舞いにある種の意味づけがなされたグループで長時間の相互作用が観察されたのは、ユーザ自身が適切な意味づけを見いだすことで、フロー理論 [27] におけるチャレンジとスキルの一致によるインタラクションへの没入感をもたらした可能性がある。また、やや古典的ではあるが、カイヨワ (Caillois) は遊びを競争 (アゴーン、相手と能力を競う遊び)、偶然 (アレア、偶然性に基づく遊び)、模倣 (ミミクリー、自分とは異なる誰かを演じる遊び)、そして、目眩 (イリンクス、知覚の安定を崩して心地よいパニックを引き起こす遊び) の 4 つに分類している [28]。創発したインタラクションにおいて、タッチに反応するシステムのマクロな振舞いは「目眩」、ユーザが独自のストーリーを付与することは「模倣」、また、ゲーム的な側面を見出すことは「競争」や「偶然」にそれぞれ深く関連すると考えられる。詳細な検討は今後の課題である。

⁶ ALart 2012. 名古屋大学教養教育院プロジェクトギャラリー「clas」。2012 年 2 月 15 日から 22 日まで開催。

⁷ General-purpose computing on graphics processing units, GPU による汎目的計算。

7 おわりに

マクロレベルで外界と相互作用する自己組織系の理解と応用を目的として、外乱によって自己組織化するセルオートマトンと人間とのインタラクションシステムを提案した。タッチによる外乱生成によってセルオートマトンのマクロ状態におけるクラスタ構造にさまざまな影響を与えることができるようになり、外乱をきっかけにセルオートマトンと人間との間に多様なマクロレベルのインタラクションが出現した。

今後の発展として、マクロレベルの相互作用に基づいた自己組織系の議論を発展させるために、マクロレベルの相互作用を促進させるセルオートマトンの設計を進め、さらに多様なインタラクションを解析することが挙げられる。また、アートや教育等への応用に向けて、ユーザインタフェースを改善すること等も挙げられる。

参考文献

- [1] M. Mitchell Waldrop 著, 田中光彦, 遠山峻往 共訳, 複雑系, 新潮社 (1996).
- [2] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc. (2002).
- [3] T. E. Ingerson and R. L. Buvel, "Structure in Asynchronous Cellular Automata, " *Physica D*, Vol. 10, pp. 59–68 (1984).
- [4] 山下和也, 米田恭章, 酒井充, 丸山 博, 広瀬貞樹, "不完全な同期下のセルオートマトンの時空間パターン, " 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93-D, No. 7, pp. 1179–1188 (2010).
- [5] 蜷川 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 岩瀬雄祐, 鈴木麗璽, 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).
- [9] 岩瀬雄祐, 鈴木麗璽, 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).
- [10] M. Satomi and C. Sommerer, "“game_of_life”: interactive art installation using eye-tracking interface, " *Proc. the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 246–247 (2007).
- [11] G. Tempesti, D. Mange, A. Stauffer and C. Teuscher, "The BioWall: an Electronic Tissue for Prototyping Bio-Inspired Systems, " *Proc. of the 2002 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware (EH'2002)*, pp. 221–230 (2002).
- [12] A. Stauffer and M. Sipper, "An Interactive Self-Replicator Implemented in Hardware, " *Artificial Life*, Vol. 8, No. 2, pp. 175–183 (2002).
- [13] 児玉幸子, 福田陽子, 佐山弘樹, "生きている表面 “Evoloop” を用いた動的テクスチャのコンセプトとインタラクティブアートにおける実験, " 芸術科学論文誌, Vol. 3, No. 3, pp. 193–196 (2004).
- [14] R. Fencott, "Interactive Music using Multi-Touch Cellular Automata, " *Proc. of (re)Actor3: The 3rd International Conference on Digital Live Art*, pp. 17–18 (2008).
- [15] 岩瀬雄祐, 鈴木麗璽, 有田隆也, "自己組織系におけるマクロレベルの相互作用の理解に向けたセルオートマトンと人間とのインタラクションシステムの提案, " エンタテイメントコンピューティング2010 予稿集, No. B9 (2010).
- [16] 古市昌一, "タッチパネル方式によるヒューマンインタフェースの研究最前線, " 情報処理, Vol. 50, No. 4, pp. 327–333 (2009).
- [17] Apple iPhone, <http://www.apple.com/jp/iphone/index.html> (2010/8/9).
- [18] 永野 直, 林 秀彦, "マルチタッチインタフェースの認知モデルと教育利用, " 鳴門教育大学情報教育ジャーナル, No. 6, pp. 9–13 (2009).
- [19] 岩瀬雄祐, 鈴木麗璽, 有田隆也, "人間とのインタラクションによって自己組織化するセルオートマトン, " 第9回 AI 若手の集い CD-ROM 予稿集, pp. 29–32 (2008).
- [20] 高木英行, 畠見達夫, 寺野隆雄, "対話型進化計算法の研究動向, " 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 24–35 (1998).
- [21] R. ドーキンス著, 中嶋康裕他訳, ブラインド・ウォッチメイカー - 自然淘汰は偶然か?, 早川書房 (1993).
- [22] T. Unemi, "SBART 2.4: an IEC Tool for Creating 2D Images, Movies, and Collage, " *Leonardo*, Vol. 35, No. 2, pp. 171, 189–191 (2002).
- [23] T. Unemi, "SBEAT3: A Tool for Multi-part Music Composition by Simulated Breeding, " *Proc. of the eighth International Conference on Artificial Life (ALife VIII)*, 410–413 (2002).

- [24] E. J. Hastings, R. K. Guha and K. O. Stanley, "Interactive Evolution of Particle Systems for Computer Graphics and Animation," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 13, No. 2, pp. 418–432 (2009).
- [25] 塩見知利, "幼児のためのマルチメディア教材開発: 「総合的感覚教材」としてのセンサ・テーブル開発と実践分析," 日本教育情報学会学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 33–43 (2002).
- [26] 愛知県児童総合センター「汗かくメディア」, http://www.acc-aichi.org/asobi_program/asekaku/index.html (2012/2/20).
- [27] 今村浩明, 浅川希洋志 編, フロー理論の展開, 世界思想社 (2003).
- [28] R. カイヨワ著, 清水幾太郎, 霧生和夫共訳, 遊びと人間, 岩波書店 (1970).

有田 隆也



1983 年東京大学工学部計数工学科卒業。1988 年同大学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, 進化的計算論などに興味を持つ。著書に“人工生命”(医学出版, 2002), “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) など。人工知能学会, 情報処理学会, 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。

岩瀬 雄祐



1982 年生。2005 年富山大学工学部知能情報工学科卒業。2007 年名古屋大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。現在, 同大学院博士後期課程在学中(投稿時)。外的な作用に基づく自律分散系の制御と応用に関する研究を行う。電子情報通信学会, 情報処理学会, 芸術科学会各会員。

鈴木 麗壘



1998 年名古屋大学情報文化学部自然情報学科退学(飛び級)。2003 年同大学大学院人間情報学研究科博士後期課程修了。博士(学術)。名古屋大学助教, カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て, 2010 年名古屋大学大学院情報科学研究科准教授。現在に至る。人工生命手法に基づくエージェントベースモデリングに関する研究に従事。進化と学習の相互作用, 協調行動の進化, 進化計算のアートへの応用などに興味を持つ。International Society of Artificial Life, 人工知能学会, 日本進化学会, 日本数理生物学会各会員。