

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：20103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23611027

研究課題名(和文) 自己言及型セルオートマトンによる多段階創発システムのデザインと実装

研究課題名(英文) Design and implementation of multi-level emergence system using self-mentioning cell automaton

研究代表者

中島 秀之 (Hideyuki, Nakashima)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・学長

研究者番号：80344224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：多段階の創発システムの実装を目指し、創発したシステムを要素とする2段階以上の創発を研究した。そのため、フラクタルネットワークの観点からシステムを考察してきた。実数体上から有限体上へ方程式を変換するシステムティックな方法を提案し、その解が非自明なフラクタル構造を生じることを見出した。初期目標の自己言及型セルオートマトン上での進化計算による実現には至らなかったが、完全フラクタルネットワーク(complete fractal network, CFN)という概念を考案し、この性質を調べた。また、CFNをセルオートマトン上に実装することに成功し、2層のネットワークの構築に成功した。

研究成果の概要(英文)：To reach intelligence through emergence, we need to implement multi-level emergence. Here, we do not mean emergence of property, but emergence of some physical entity that can be used as building blocks for the next-level emergence. For a system to be multi-level emergence, the first-level emerged entity must be auto-identified and fixed by the system. We first tried to mimic emergence of cell-like structure in our cellular automaton that become elements of the next-level emergence. Once a second order emergence is achieved, it can be repeated to multi-level emergence in principle.

研究分野：人工知能

キーワード：創発 セルオートマトン フラクタル

1. 研究開始当初の背景

以前より(特に人工生命やセルオートマトン分野で)単純な規則から面白い現象が創発する事例が研究されている。創発とは設計・実装した層の上に想定しなかった現象が新たに発生することである。しかしながら従来成果は全て一段階の創発を人間(研究者)が観察によって拾い上げているものである。我々の目標は、生命が分子構造から細胞を、さらに多細胞生物を創発させたように、これを多段階にすることにある。このためには人間の観察者の介在を無くす必要がある。一層目に創発した現象が自ら固定化し(自己組織化)、次にはその層が基本となり、更に上の創発を起こすというシステムを構築したい。つまり、単なる現象の創発ではなく、実体を伴ったシステムの創発が必須である。生物は我々が知る限り最も複雑な多層システムである。少なくとも分子層、細胞層、体組織層、個体層が各々独自の機構を持っており、各層は下位の層に還元して理解することはできない。

これまでも人工生命の研究で創発が実現されてきたが、従来の研究は一層の創発に限定されており、多層の創発をデザインするための手法は今のところ存在しない。また、この一層の創発を選別しているのは人間である。例えば単純な2状態セルオートマトンであるライフゲームにおいて、グライダーや、グライダーを打ち出し続けるグライダーガンという興味深いパターンは共に人間が発見したものである。

2. 研究の目的

知能は多層であるし、生物も多層システムである。人間の例でいうと、以下のような様々な層から構成されており、各々が異なる法則を持って動作している。これらの全てを理解しないことには人間を理解したこ

とにはならない。

- ・ 分子構造
- ・ 細胞
- ・ 内臓器官
- ・ 個体
- ・ 社会

これらの理解の一助とするため、多階層システムの構築を考えたい。しかしながら、これらの層の上下の関係はよく理解されていない。

上記にアプローチする手掛かりとして多段階創発システムの実装を考えた。人間並みの複雑なシステムの創発は、現状では夢物語である。研究としてはできる限り単純な系を考え、その上で二段階の創発を目指す。

3. 研究の方法

創発をデザインする基本手法としては進化的方法論しかないと考えている。これは単純化して言えば突然変異と選択の繰り返しである。ただし、従来の研究は一層の創発に限定されており、この方式で多層の創発をデザインするための手法は今のところ存在しない。また、この一層の創発を選別しているのは人間である。このままでは、以下に述べる多層システムの創発には使うことができない。多層創発はグライダーやグライダーガンが創発したら、それを要素として計算回路が創発するようなもので、実現はほぼ不可能に見える。しかしながら、生物進化はそれを成し遂げ、人間を創り上げた。我々はそのような大それた計画は持っていないが、非常に単純なシステムで良いから多層の創発を見たい。本研究ではその目的となる単純な、しかし多層のシステムを想定し、そこへの道を探った。

生物のような複雑さをもった多層システムの創発は当面手に負えないので、実験ドメインとしては従来の研究と同じセルオートマトンを使う。ただし、セルの変換規

則自体をセルに持たせ、これが突然変異により規則が変わりつつパターン変化を起こす自己言及型セルオートマトンを使う。自己言及型セルオートマトンの上で、新しい構造の創発を待ち、それを人間の観察を経ず自動的に固定できる仕組みを開発する。これが開発できれば、後は同じことを各階層に適用して行けば、原理的にはいくらでも複雑なものが構築できることになる（計算資源は有限であるため、実際に行うことは無理と考えているが）。

4. 研究成果

(1) 完全フラクタルネットワーク(CFN)の定式化

多段階創発システムのターゲットの一つとしてすべての層が同じ構造をもった多層システム（フラクタルな構造）を考えるのが楽である。一つの層が創発すれば、それと類似の手法で次の層を創発させることができる。従って我々の当面の関心は様々な異なる層を創発させることではなく、複数の層で同じ構造を自動的に創発させることにある。

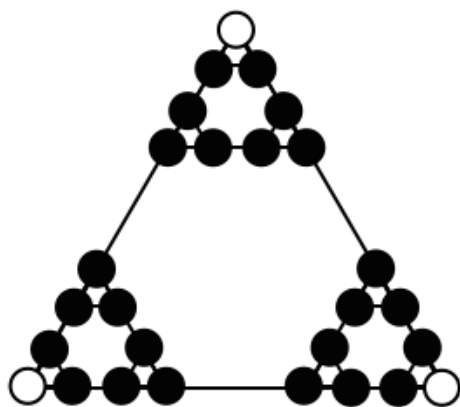


図1 3-CFN₃

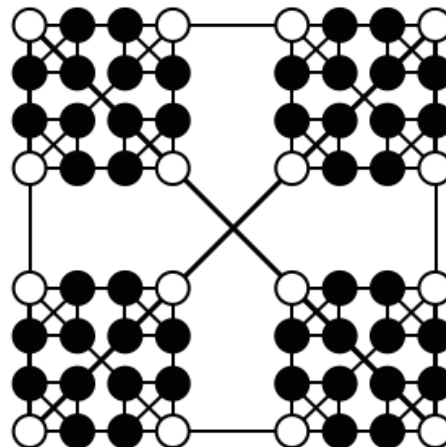


図2 4-CFN₃

K-完全フラクタルネットワーク(K-CFN)とはK個のクラスター（固まり）が相互に完全結合したネットワークであると定義する。ただし各クラスターは同様にK-CFNである。

図1は3-CFN、図2は4-CFNの例である。それぞれの図では3層だけ展開してあるが、このネットワークはフラクタル構造を持つため上下に無制限に展開可能である。この展開した層の数を明示したい場合はサブスクリプト n を付けて $K\text{-CFN}_n$ のように表すことにする。いくら展開しても各ノードからのリンクが K を超えないのがK-CFNの特徴である。K-CFNにおいてKリンクを持つノードを飽和ノード（図では黒丸で示す）、K未満のリンクしか持たないノードを非飽和ノード（白丸で示す）と呼ぶ。

$K\text{-CFN}_{n+1}$ は K 個の $K\text{-CFN}_n$ から以下の方法で構成される：

元の $K\text{-CFN}_n$ は K 個のクラスターの完全結合になっているから、各々のクラスターから $K-1$ 本のリンクが内部の完全結合用に出ている。つまり各クラスターは非飽和の状態で1本のリンクの余裕がある。つまり $K\text{-CFN}_n$ 全体で K 本のリンクの余裕がある。 K 個の $K\text{-CFN}_n$ を完全結合して $K\text{-CFN}_{n+1}$ を作るにはこの K 本のうち

K-1本ずつ使えば良い。従ってK-CFN_{n+1}は同様にK個の非飽和ノードを持つことになる。

nがいくら大きくなっても常にK個の非飽和ノードが存在するという性質は変化しない。

K-CFNがフラクタルとなる。ちなみに3-CFNはシェルピンスキーのガスケット(図3)と呼ばれているものに酷似しているが、少し違う。シェルピンスキーのガスケットでは内側の3つの三角形が角をシェアしている。そしてこの違いはK>3のK-CFN以上に相当するシェルピンスキー構造が作れない理由となっている。

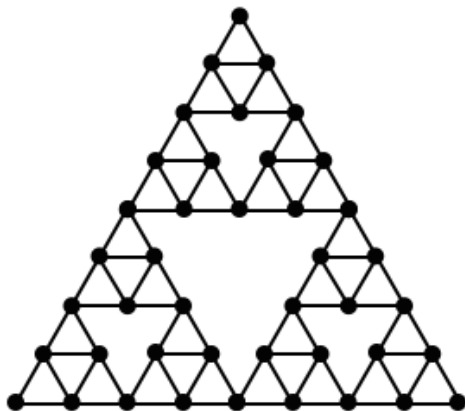


図3 シェルピンスキーのガスケット (あるいは Sierpiński triangle)

(2) CFNのセルオートマトン実装

4-CFNをセルオートマトン上にマップする。この理由は(a)(自己言及型)状態遷移の概念が進化アルゴリズムに馴染むことと、(b)近傍という距離概念の導入による探索空間の縮小である。

さて、図2に示した4-CFNは図4のような2次元セルオートマトンにマップできる。これは4-CFNが長いリンクを持たず、2次元セルオートマトンの8近傍へのリンクのみにマップ可能であるという性質が大きい。近傍へのリンクは内部状態として表現する。8近傍へのリンクの有無を8ビット

の2進数で表すことが可能であるから、2⁸状態を考えれば良い。2⁸状態セルの遷移表は8近傍と中心セル自体を含め(2⁸)⁹状態から中心セルの新(2⁸)状態へのマップとなる。図4からもわかるように、最終的な形態では各セルからのリンクは8方向すべてにランダムに出るわけではなく、限定された4方向へのリンクしか存在しないから、うまいメカニズムを考えればリンクを表すセルの状態は2⁴=16まで落とし込むことが可能はずである。

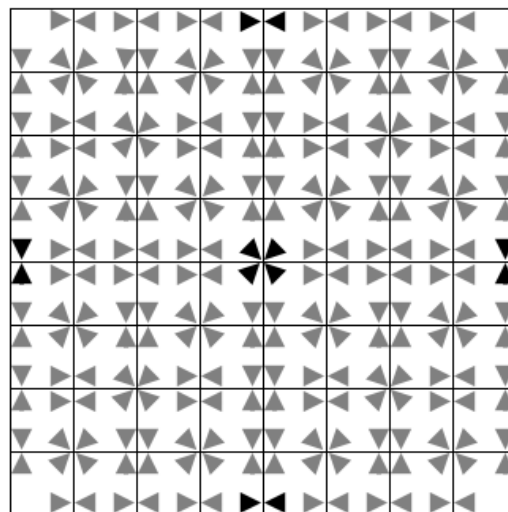


図4 4-CFN₃のセルオートマトン版 (4-CA₃)

(3) 進化型自己言及セルオートマトン

次のステップは前節で述べたようなCAを自動的に創発させることである。それには自己言及セルオートマトンを使う。これはセルの状態がセルの遷移規則を表すものである。通常セルオートマトンは大局的かつ固定の遷移規則を持っている。この遷移規則や初期配置を変えながら面白いパターンの創発を待つのが従来の研究手法であった。

基本的には市川らの進化型オートマトンの考え方を導入する。これはセルの状態が

整数値という無限状態を持つ（遺伝子情報をコードしたものと見なす）もので、周辺のセルとの相互作用により自己複製する。このようなセルオートマトンのランダムな進化の上で 4-CA_1 の発生を待つことになる。しかしながらこの手法ではパターンの発生を研究者が見守る必要がある。即ちシステムに内在したパターン判別とその固定の機構が存在しない。

そこで我々は自己言及型のセルオートマトンを使うことにした。これはセルの状態がセルの書換え規則をも含むものである。従って状態が変化すると書換え規則も変化するというメタな構造を持っている。この方式を用いて進化させれば、原理的にはすべての書換え規則を網羅することが可能である。

我々の基本的な戦略はセルの書き換え規則((24)⁹ 24)をゲーデルコーディングにより自然数に対応させ、セルの内部状態とする。これを進化的アルゴリズムで変化させ、安定した構造のできるのを待つことである（これでも探索範囲が広過ぎる。更なる工夫が必要である）。

次の問題は 4-CA_1 が一旦生成されたらこれを固定することである。安定した構造ができた（即ち、そのような構造を生成する遷移規則が固定できた）この規則を周辺に広げて行く必要がある。構造の自己複製ではなく、生成規則の自己複製を試みるわけである。その結果として 4-CA_1 が全体を覆い尽くすのが望ましい。

1 段目の創発に成功したら、2 段目の創発に入る。この部分は自動的かつ連続的に起こることが望ましい。また、1 段目と 2 段目の間に区切りがある必要はない。1 段目の創発が完成するのを待たず（待つという同期はそもそも取れない）に、部品が揃った時点で自動的に上位の創発が起こることが望まれる。

(4) フラクタルシステム理論

セルオートマトン上における創発システムの実現に向けて、フラクタルネットワークの観点からシステムを考察してきた。保存量を伴った力学系を実数体上から有限体上へ変換するシステムティックな方法を提案した。ここで有限体とは、有限個の元からなる四則演算の定義された体である。双線形形式を持つ力学系に上記の方法を適用した結果、解として非自明なフラクタル構造が生じる系を発見および解の一部について証明した。現在までに、素数 3 を標数とする場合に三分木(ternary tree)による入れ子構造(入れ子の深さは任意の自然数でよい)が存在すること、およびその厳密解について詳細に調べた。この系では解の衝突に際し、安定な構造を持つことも数値実験の結果わかっている。孤立波解それぞれが内部構造としてフラクタルを含有し、かつ、力学的な安定性を保有するこの系の、近可積分的な系への拡張はフラクタル間に相互作用を引き起こすと期待される。最終年度における研究からは楕円曲線と密接な関係をもつことがわかり、数理科学的にも暗号理論や計算数論への応用が期待され、当初予期しなかった萌芽的發展が得られている。当初の目的であった多段階創発については、系の高次元化（主に戸田方程式階層）や非自律化なども含めた上で今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔招待講演〕(計 1 件)

中島秀之：創発システムへの視点, 2011 京都大学国際フォーラム「新たな知の統合に向けて」, 2011 年 10 月 16 日, 京都大学（京都市）

〔**雑誌論文**〕(計 7 件)

Fumitaka Yura: Hankel Determinant Solution for Elliptic Sequence, arXiv:1411.6972v2, Linear Algebra and its Applications, Elsevier, 2015, 掲載確定, 査読有

由良文孝: 楕円曲線と Hankel 行列式, 九州大学応用力学研究所講究録 26AO-S2, 163-169, 2015. 査読有

由良文孝: 有限体上のソリトン方程式における入れ子構造を持つソリトン解について, 日本応用数理学会論文誌 24(4):317-336, 2014. 査読有

由良文孝, 「有限体上における箱玉系と類似したソリトン方程式について」, 九州大学応用力学研究所研究集会講究録 25AO-S2, 71-78, 2014. 査読有

Fumitaka YURA: Solitons with a nested structure over finite fields, J. Phys. A: Math. Theor. 47(32):325201-325223, 2014 DOI: 10.1088/1751-8113/47/32/325201, 査読有

由良文孝, 「箱とバスケットと玉の系におけるソリトン解」, 九州大学応用力学研究所研究集会講究録 24AO-S3, 156-161, 2013, 査読有

Hideyuki Nakashima: Evolution-Theoretic Approach to Synthetic Study of Intelligence, Viva Originio, 39(1):1-5, 2011. 査読有

〔**学会発表**〕(計 9 件)

由良文孝: 楕円数列の Hankel 行列式解について, 日本応用数理学会 研究部会 連合発表会, 2015 年 3 月, 東京都

由良文孝: 楕円曲線と Hankel 行列式, 九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会, 2014 年 10 月, 福岡県春日市

由良文孝, 「有限体上における箱玉系と類似したソリトン方程式について」, 九州大学応用力学研究所研究集会, 2013.11.01, 福岡市

中島秀之, 由良文孝, 篠田孝祐: 多段階創発システムの試み -フラクタルネットワークを例として, ネットワークが創発する知能研究会(JWEIN'13), 2013, 慶応義塾大学(横浜市)

Haruyuki Fujii, Hideyuki Nakashima, Masaki Suwa, Proposing Designology, Proc. 5th International Congress of International Association of Societies of Design Research, pp.2227-2238, 2013.8.26-30, Tokyo, 査読有

中島秀之, 由良文孝, 篠田孝祐, 多段階創発システムの試み, 人工知能学会全国大会, 2013,6/6, 富山市

Hideyuki Nakashima, Fumitaka Yura and Kosuke Shinoda, A Scenario for the Second Order Emergence, 5th International Conference on Emergent Intelligence of Networked Agents, 2013, May 7, AAMAS 2013, St. Paul, Minnesota, USA.

由良文孝, 「箱とバスケットと玉の系におけるソリトン解」, 九州大学応用力学研究所研究集会, 2012.11.02, 福岡市
由良文孝, 「箱とバスケットと玉の系におけるソリトン解について」, 日本応用数理学会 2012 年度年会, 2012.08.29, 北海道

〔**図書**〕(計 1 件)

中島秀之: 知能の謎, 近代科学社, 2015, 全 273 頁

〔**産業財産権**〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

研究組織

(1) 研究代表者

中島秀之(NAKASHIMA, Hideyuki)

公立はこだて未来大学, 学長

研究者番号: 80344224

(2) 研究分担者

由良文孝(YURA, Fumitaka)

公立はこだて未来大学, システム情報科学部, 准教授

研究者番号: 90404805