

令和 3 年 6 月 25 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00015

研究課題名(和文)保存的セルオートマトンの構造とその計算能力

研究課題名(英文)Structure and computing efficiency of number-conserving cellular automata

研究代表者

今井 勝喜 (Imai, Katsunobu)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教

研究者番号：20253106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、物理的な質量保存に対応する性質をモデル化した数-保存的セルオートマトン(NCCA)の粒子移動モデルとしての性質を、その計算能力や計算量的側面から明らかにすることが目的である。新たにNCCAの性質をより大局的な粒子移動とより詳細な粒子移動とを階層的に分離して表現することができる階層的モーション表現を定義した。さらに階層的モーション表現を求めるアルゴリズムを構成し、近傍サイズが5以下のNCCAの階層的モーション表現列挙した。さらにモーションと遷移規則の関係を示すため、“pair”と“quad”というパターンの組合せでNCCAの規則を表現する方法を提案し、いくつかの基本的な性質を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数-保存的セルオートマトン(NCCA)は、その質量保存に対応した性質から、交通流や流体などのシミュレーションに広く用いられているが、複雑になると規則設計が難しくなるため、ごく基本的な遷移規則しか利用されないという問題点があった。この研究は階層的モーション表現により粒子移動の観点と規則の観点のギャップを埋めることで、NCCAをより扱いやすくすることが目的である。また、ARデバイスによるNCCAのシミュレータにより実世界のモデル化にNCCAによるシミュレーションが有益であることを併せて示すことができると考えている。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the properties of number-conserving cellular automaton (NCCA), which models the properties of physical conservation of mass, as a particle movement model from the viewpoint of its computational power and computational complexity. We defined a new model called the hierarchical motion representation (HMR), which can represent the properties of NCCA in a hierarchical manner. We also constructed an algorithm to obtain the HMR of any NCCA rule, and obtained all the HMRs of NCCAs with neighborhood size less than five. Moreover, we proposed a method of representing NCCA rules by a combination of "pair" and "quad" patterns to clarify the relationship between motions and transition rules and showed some basic properties about it.

研究分野：情報学基礎理論

キーワード：セルオートマトン 保存性 モーション表現

1. 研究開始当初の背景

セルオートマトン(CA)とは、格子状に並べられたセルによる離散的な計算モデルであり、各セルは(有限の)状態と呼ばれる数値を保持していて、次の状態はその近傍のセルの状態の組合せによって決定される。単純な遷移規則で(離散的)相互作用を記述できることから物理、生命、社会現象などの複雑な現象のモデル化にも広く用いられている。その中でも、遷移前と遷移後で各セルの状態の総和が不変な制約をみたく CA を(数-)保存的セルオートマトン(NCCA)という。この制約は、質量保存的な性質を反映した現象のモデル化に適しており、流体のシミュレーションに用いられている格子ガスも NCCA の一種である。それ以外にも 1 次元 2 状態 NCCA で、セルの状態 1,0 を車の有無と見立てて交通流のシミュレーションに利用されるなど種々の分野で用いられている。

CA は状態遷移に基づく並列計算モデルであるが、NCCA は実体のある粒子の移動モデルと見なせるので、各々の粒子(上の例ではそれぞれの車)が周囲の配置状況によって、次の移動先を決めることができるはずである。1 次元の場合には Boccara ら(1998, 2002)によってモーション表現と呼ばれる粒子の移動に基づくモデルで表現できることが示されている。一般に一つの NCCA に対し、無数の異なるモーション表現を与えることができるが、Moreira ら(2004)は粒子に番号付けし、その順序が入れ替わらない(上の例では車が追い越さない)制約のもとで彼らが正規と呼ぶモーション表現と NCCA とを一意に対応させられることを示している。すなわち、NCCA とモーション表現が同等のものとして扱えることが示されており、NCCA で何らかの粒子移動モデルを構築するときには、そのモーション表現を与えればよいことになる。しかし、モーション表現は近傍サイズと状態数を限定して設計するのが難しい。

NCCA は離散力学系の領域でも重要な研究テーマの一つであり、上述の交通流に関連するものに限っても多数の結果が知られている。ところが、例えば配置の密度の差による挙動の変化など、力学系としての漸近的な性質の解析が主であり、計算モデルとしての研究は限られている。

2. 研究の目的

以上の観点から、われわれは組合せ論的な立場から計算モデルとしての NCCA の性質の解明を目的としている。

(1) NCCA のモーション表現と遷移規則の関係

ある NCCA のモーション表現は無数に考えられる。また、1 対 1 に対応する正規モーション表現も提案されているが、そもそも CA とモーション表現は別の計算モデルであり、直感的な対応関係で表現できるわけではない。そこでまず NCCA の近傍サイズとモーション表現の関係を明らかにする。

(2) 粒子数と近傍サイズの計算量的なトレードオフ

われわれは本課題の申請を出すに先立ち、有限個の粒子数のみに依存する近傍半径 1 の万能 NCCA を構成した。さらに有限の大きな近傍サイズを許せば、たった 5 つの粒子のみで万能 NCCA を構成できることを示した。この結果をさらに拡張し、粒子数と近傍サイズの計算量的なトレードオフを明らかにする。

(3) NCCA を可視化、設計するためのシミュレータの作成

上記(1)、(2)と並行して、NCCA を可視化、設計するためのシミュレータを作成し援用する。NCCA の粒子移動を可視化するために、AR デバイスを用いる。真に 3 次元を表示を可能にすることができるため、粒子移動を表現するのに適し、有用であると思われる。

3. 研究の方法

保存的セルオートマトン(NCCA)の計算能力に関して、1: NCCA のモーション表現と遷移規則の関係、2: 粒子数と近傍サイズの計算量的なトレードオフ、3: 実際の物質依存な計算システムへの NCCA の応用、の三つの観点について研究する。

最も重要な着眼点は階層的モーション表現(HMR)と呼ぶ新しいモーション表現を導入し、それを用いて遷移規則と粒子移動が直接対応づけて NCCA が設計できる枠組みを作る。さらにモーション表現をうまくパッキングする適切な符号化手法を考案することで粒子数と近傍サイズのトレードオフを明らかにし、セルオートマトンのような実際の保存的な性質を持つ計算システ

ムへの応用を目指す。

研究目的 1 の「NCCA のモーション表現と遷移規則の関係」に関して以下の方針で研究を行う。

われわれは 2 次元 $m \times n$ の長方形近傍の NCCA の場合に、モーション表現が可能な NCCA に関してそれを列挙する手法を提案するにあたり、階層的なモーション表現という概念を導入した。これは、扱う近傍サイズと関係なく、より単純なパターンに依存する粒子の移動をまず抽出し、それらの組み合わせとしてより複雑なパターンに依存する粒子移動が階層的に重畳することによってモーション表現が構成されているという仮定に基づくモーション表現である。しかし 2 次元では自由度が大きすぎ、モーションの階層と遷移規則の関係を明らかにすることはできなかった。そこで本課題では 1 次元 2 状態の場合に限定し、階層的モーション表現によって任意の近傍サイズの NCCA が表現可能であることを示し、さらに小さな近傍サイズのモーション表現から帰納的に大きな近傍サイズのモーション表現を構成する方法を探究する。

研究目的 2 の「粒子数と近傍サイズの計算量的なトレードオフ」に関して以下の方針で研究を行う。

われわれは、2 本のレジスタメモリを持つレジスタ機械という計算モデルをシミュレートすることによって有限個の粒子数のみに依存する近傍半径 1 の万能 NCCA を構成した。さらに有限の大きな近傍サイズを許せば、たった 5 つの粒子のみで万能 NCCA を構成できることを示した。

しかし、近傍半径 1 の万能 NCCA は、粒子数 3901 という非常に大きなものであった。そこで、必要な粒子数を削減する手法を考案する。粒子数を削減するためには、例えばシミュレートされるべきレジスタ機械のメモリの状態の情報を複数のセルで共有することが重要になる。最も困難な点は、それらのセル間の粒子のモーション表現によるやりとりが、NCCA の規則において、不可能な数のやりとりを生成してしまう可能性があることである。すなわち負の数の状態を必要としてしまう。そのため適切な符号化手法を考案することが目標になるが、これも研究目的 1 と密接に関連する。

次に、有限の大きな近傍サイズを許す場合には、5 つの粒子のみで万能 NCCA を構成したが、類似の問題にペブルオートマトンと呼ばれる有限個数の「石」を配置するだけの機能を持つオートマトンの計算能力に関しての古典的な研究がある。有限粒子数の NCCA はオートマトンの内部状態も粒子の配置に埋め込まねばならないため、より強い制約の計算モデルになる。ペブルオートマトンはペブル 3 個で万能になりうるが、NCCA は現状では 5 粒子必要である。さらに 4 つ以下の粒子数のときの計算量的な複雑さを明らかにする。

4. 研究成果

(1) の「粒子数と近傍サイズの計算量的なトレードオフ」に関して、以下の研究を行った。1 次元の場合にはモーション表現と呼ばれる粒子の移動を元にしたモデルと対応づけられることが知られているが、NCCA の近傍サイズとモーション表現の関係を明らかにするため、階層的モーション表現と呼ぶ新しいモーション表現を定義した。これは、それぞれの粒子の移動を決定するために参照する必要のあるセルの数に関して、適用順序を規定したモーションで表したもので、NCCA の性質をより大局的な粒子移動とより微細で複雑な粒子移動とを階層的に分離して表現することができる。例えば、単純な平行移動はたった一つのセルのみを参照するだけで可能であるが、複雑な粒子移動は多数のセルの粒子の配置に依存する。任意に与えられた NCCA の規則から、その階層的モーション表現を求めるアルゴリズムを構成した。このアルゴリズムを用いて、近傍サイズが 5 以下の NCCA の階層的モーション表現をすべて求めた。その結果、各近傍サイズの NCCA の階層的モーション表現を根が平行移動か恒等写像に対応するモーションで、順次複雑なモーションをノードに持ち、すべての階層的モーション表現を包含するような木構造で表現すると、NCCA の規則を適切に圧縮表現する方法として用いることができることがわかった。これにより NCCA の構造を簡潔に表現できるだけでなく、新たな列挙手法を構成することができると思われた。逆にその木を構成することで NCCA の規則を列挙することが可能ではないかと予想された。また、近傍サイズ n の階層的モーション表現は $n-1$ の場合を包含した再帰的な構造を持っており、その性質を利用することで、すべての $n-1$ までの NCCA の階層的モーション表現が分かっている場合に n の場合を効率的に求められる可能性があることが示唆された。

ここまでは NCCA の粒子移動のモデルであるモーション表現の近傍サイズについての階層性に着目してその性質を調べてきたが、モーション表現と遷移規則の対応関係をより詳細に調べるため、2 状態 NCCA で遷移規則が 1 を返す、すなわち 1 の移動に関与するパターンの特徴を表す pair と quad と呼ぶ構造に着目し、すべてが quad の NCCA 場合とすべてが pair の NCCA 場合についてその性質を調べた。得られた結果を投稿した。

2 状態 NCCA の数保存的である制約から、1 に遷移する局所関数(遷移規則)の引数パターンは、その左端または右端の 0,1 を反転し、それ以外は同じパターンとなるものが必ず含まれる。片方が 0,1 のもの “pair” と、両端が 0,1 の二重 pair となる “quad” の組合せで NCCA の規則を表現することができる。これは階層モーション表現による表現と関連しているが、より従来の遷移規則に近い表現である。まず、近傍サイズが 6 セルまでの NCCA について、quad と pair の組み合わせごとに何種類の NCCA が対応するかを計算機シミュレーションにより求め、それらの性質を明らかにしようと試みた。まず NCCA の遷移規則 がすべて quad になる場合を特徴づけ、さらにすべてが pair になる場合と、quad が一つ減って pair に置き換わっている場合についていくつかの基本的な性質を示した。

(2)の粒子数と近傍サイズの計算量的なトレードオフに関しては、モーション表現に基づいて、関与する粒子数が少ない場合の NCCA がどれだけ複雑な挙動を示しうるかを調べた。粒子数が 3 以下では決定可能であることをモーション表現を利用することで示した。

(3)に関してこのようなモーション表現による NCCA の規則設計を支援するために、AR 表示デバイスである HoloLens を用いてセルオートマトンの 3D 可視化システムを作成した。これは NCCA の状態の時間遷移を粒子の移動を追跡しやすく可視化する機能を有しており、NCCA を遷移をわかりやすく可視化できる。このシステムに関する論文を投稿準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 KONG Gil-Tak, IMAI Katsunobu, NAKANISHI Toru	4. 巻 E104.D
2. 論文標題 A New Structure of 2-State Number-Conserving Cellular Automata	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 673 ~ 678
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2020EDP7123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kong Gil-Tak, Katsunobu Imai, Toru Nakanishi	4. 巻 14
2. 論文標題 The Structure of Hierarchical Motion Representation of 2-state Number Conserving Cellular Automata	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cellular Automata	6. 最初と最後の頁 397-416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigeki Akiyama, Jonathan Caalim, Katsunobu Imai, Hajime Kaneko	4. 巻 61
2. 論文標題 Corona Limits of Tilings: Periodic Case	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Discrete & Computational Geometry	6. 最初と最後の頁 626-652
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00454-018-0033-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Katsunobu Imai
2. 発表標題 A representation of one-dimensional two-state number conserving cellular automata based on their value-1 rule patterns
3. 学会等名 人工知能学会 合同研究会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K Imai, K Oroji, T Kubota
2. 発表標題 A weakly universal three-dimensional Larger than Life cellular automaton
3. 学会等名 Proc. 6th International Workshop on Applications and Fundamentals of Cellular Automata (AFCA-CANDAR 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 GT. Kong, K Imai
2. 発表標題 On enumeration of number-conserving cellular automata by value-1 patterns
3. 学会等名 Proc. 12th Annual Meeting of the Asian Association for Algorithms and Computation (AAAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G.T. Kong, K. Imai, T. Nakanishi
2. 発表標題 Hierarchical Motion Representation of 2-State Number Conserving Cellular Automata
3. 学会等名 5th International Workshop on Applications and Fundamentals of Cellular Automata, (CANDAR-AFCA2017), (国際学会)
4. 発表年 2017年～2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 A. Adamatzky (Ed)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 484
3. 書名 Reversibility and Universality	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 5th International Workshop on Applications and Fundamentals of Cellular Automata, (CANDAR-AFCA2017),	開催年 2017年～2017年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------