

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500015

研究課題名（和文） 保存的なセル・オートマトンのプログラミングに関する研究

研究課題名（英文） A study on the programming of number-conserving cellular automata rules

研究代表者

今井 勝喜（KATSUNOBU IMAI）

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：20253106

研究成果の概要（和文）：数保存的な性質を持つセル・オートマトンは物理シミュレーションなどに広く使われているにも関わらず、その性質を計算能力と規則のプログラミングの見地から研究する試みはあまり多くなかった。本研究では、1次元2近傍の保存的なセル・オートマトンの万能性を示し、1次元3近傍の場合に可逆性と保存性の両方を持つセル・オートマトンの規則の設計手法を提案した。さらに、不均一な近傍における保存的なセル・オートマトンの実装を可能にするため、ある種の保存的なセル・オートマトンを容易に設計することができる分割セル・オートマトンを準周期タイル上のセル・オートマトンに実装する方法を示した。

研究成果の概要（英文）：Although number-conservation is a physics-like constraint for cellular automata and widely studied, there are not so many researches in the view point of their rule programming. In this study, we show that the computational universality of one-dimensional two-neighborhood number-conserving cellular automata. Next we propose a method of designing rules of non-trivial one-dimensional three-neighborhood reversible and number-conserving cellular automata. We also shows that an implementation of partitioned cellular automata on quasi-periodic tilings, because a kind of number-conserving cellular automata can be easily designed employing the framework of partitioned cellular automata.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：オートマトン理論・形式言語理論・セルオートマトン

1. 研究開始当初の背景

セル・オートマトンは並列計算システムのモ

デルとして研究されてきたが、近年、可逆性、保存性といった物理的な制約に対応する制約を持つものが広く研究、利用されるように

なった。特に各状態が整数値で表され、その総和が変化しないで遷移する、数保存的セル・オートマトンは交通流の研究など種々の応用があるが、計算システムとしての見地からの研究、特に遷移規則の設計手法の研究などは少ない。

2. 研究の目的

本研究は保存的セル・オートマトンの計算能力を種々の場合に調べ、その規則をプログラムする組織的な手法を開発し、保存的な規則を容易に設計できるようにする事を目的とする。特にフロー関数と呼ぶ、数の移動を表現した形式で特徴付けを行い、フロー関数を適切に設計する事で大規模な保存的セル・オートマトンの設計を可能にする枠組みを構築することを目指す。さらに、従来困難であった可逆セル・オートマトンの規則のプログラミングに関し、保存的かつ可逆的な場合にその設計を容易にするプログラミング手法を開発する。また、フロー関数は均一な近傍形状の場合に機能するが不均一な近傍形の場合の保存的セル・オートマトンの実現についても研究する。

3. 研究の方法

本研究ではまず、もっとも単純な場合、すなわち1次元2近傍の場合の計算能力を調べる。次に、同じく物理的な性質を反映した可逆性を持つセル・オートマトンは設計が非常に困難であるが、保存性を併せ持つ場合には、その規則を設計する組織的な手法が存在する可能性があり、小さな状態数の場合に、全探索を行うことでその性質を明らかにする。さらに、実際の応用の見地から、ナノスケールな系における粒子の相互作用による計算モデルのひとつであるブラウニアンセル・オートマトンと保存的セル・オートマトンの関係について規則設計の見地から研究する。また、近傍が不規則な形状のセル・オートマトン場合における保存的規則の設計に関して調べる。

4. 研究成果

(1) 1次元かつ3近傍以下の保存的セル・オートマトンについて、数の移動を特徴づけるフロー関数の性質を調べ、2近傍の保存的セル・オートマトンで、非保存な場合も含めた任意のセル・オートマトンの効率的なシミュレーションが実行できることを示し、結果として、本質的な万能性を有することを示した。今まで、1次元で4近傍以上の場合には計算万能性を有することが示されていたが、3近傍以下の近傍サイズの保存的セル・オートマトンが万能性を持つかどうかは知られてい

なかった(学会発表11)。

(2) 保存性に加えて可逆的な性質を持つ1次元セル・オートマトンについて、次の結果を得た。1次元3近傍で4状態以上の保存的セル・オートマトンが可逆性も有する場合、今までの予想に反して、新たな性質を持つ規則群が存在することが計算機シミュレーションによる4,5状態の場合の全探索によりわかった。その探索結果をもとに、新たに見つかった規則を、既知の自明な規則と組み合わせることにより、1次元3近傍の場合に6状態より大きな状態数の場合の自明でない可逆かつ保存的なセル・オートマトン規則を組織的に設計する新たな手法を構成した。2近傍の場合には自明なセル・オートマトンしか存在せず、4近傍の場合には万能セル・オートマトンが存在することがわかっているが、本研究で扱っている3近傍の場合の計算能力は未だ明らかになっていない。しかし本研究から、3近傍の場合でも、かなり複雑な信号の衝突が記述できる可能性があることがわかってきた。一般に、4状態より大きな可逆セル・オートマトン上に何らかの計算手法を埋め込んだ規則を組織的に構成する方法は分割セル・オートマトンとよばれる自明な手法以外にはないが、この手法は可逆かつ保存的セル・オートマトンの場合に限られるものの、新しい手法として有望である(学会発表4,9,10)。

(3) ナノスケールな系における粒子の相互作用による計算モデルのひとつであるブラウニアンセル・オートマトンと保存的セル・オートマトンの関係について規則設計の見地から研究した。保存的セル・オートマトンのフロー関数の形式で計算万能なブラウニアンセル・オートマトンを与え、フロー関数の形式を用いることがブラウニアンセル・オートマトンを扱う上でも有効であることを示した(論文3)。

(4) フロー関数の形式によるモデル化は、規則的な格子上では有効に働くが、ランダムな場合や準周期的な格子配置上では、組合せ対称と呼ぶ対称性を持つ場合以外にはフロー関数によるモデル化が難しい。そこでランダムなネットワークと準周期的なセル・オートマトンについての性質をその上の保存的なパターンの移動に着目して調べた。特に準周期的なセルの配置を持つセル・オートマトンの場合には局所的にはきわめて強いセル配置の規則性を持っているため、その上で保存的な規則を設計する新しい手法が構成できるのではないかと予想している。本研究では、まず、厳密な意味での保存的セル・オートマトンではないが、分割セル・オートマトンと

呼ばれる、可逆性やモーメント保存性などをモデル化するのに適した枠組みを、準周期的なセルの配置を持つセル・オートマトンの場合に適用することを試みた。分割セル・オートマトンはセルの局所的な相互的な接続関係を利用するが、準周期タイリングのひとつであるペンローズタイリングの場合にその接続関係を求める方法を調べ、ペンローズタイリング上で分割セル・オートマトンを実装する方法を示した。その手法を用いて、分割セル・オートマトンのシミュレータを作成し、可逆的、保存的規則を満たす、自己増殖セル・オートマトンなど、種々のセル・オートマトンが準周期タイリング上でも実現できることを示した(論文 1, 学会発表 1, 3, 5)。

(5) セル・オートマトンは汎用モデリングツールとして一般的に用いられているにもかかわらず、日本語で書かれた一般的な入門教科書がほとんどなかった。そこで、初等的なセル・オートマトンの教科書を共同で訳出した(図書 1)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

(1) Imai, K., Hatsuda, T., Poupet, V., Sato, K.: A 6-state universal semi-totalistic cellular automaton on kite and dart Penrose tilings, *Fundamenta Informatica*, 査読有, 2013, in press.

(2) Nakayama, D., Sakamoto, N., Imai, K.: A Transferring protocol using local information on ad hoc sensor network and its behaviors. *International Journal of Networking and Computing*, 査読有, 3(1), 2013, 170-180.

(3) Lee, J., Imai, K., Zhu, Q-S.: Fluctuation-driven computing on number-conserving cellular automata. *Information Science*, 査読有, 187, 2012, 266-276.

[学会発表] (計 11 件)

(1) Imai, K., Hatsuda T.: On the behaviors of signals in cellular automata on Penrose tilings, 7th International Workshop on Natural Computing, 2013年3月20日, Tokyo.

(2) Adachi, S., Lee, J., Peper, F., Isokawa, T., Imai, K.: Determining the Critical Temperature of the

Continuous-State Game of Life, Proc. 10th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2012年9月25日, 査読有, Greece, 83-90.

(3) Imai, K., Hatsuda, T., Poupet, V., Sato, K.: A Universal Semi-totalistic Cellular Automaton on Kite and Dart Penrose Tilings, Proc. 18th Int. Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, La Marana, Corsica, France, (EPTCS 90), 2012年9月20日, 査読有, 267-278.

(4) Imai, K., Martin, B., Saito, R.: On radius 1 nontrivial reversible and number-conserving cellular automata. Proc. 4th Workshop on Reversible Computation, Copenhagen, 2012年7月2日, 査読有, 54-60.

(5) Imai, K., Hatsuda, T.: Waves and signals on "Life-like" and "Generation" cellular automata on a Penrose tiling. 6th International Workshop on Natural Computing, 2012年3月28日, Tokyo.

(6) Nakayama, D., Sakamoto, N., Imai, K.: A Transferring Protocol with Local Information on an Ad-Hoc Sensor Network. Proc. 2nd International Conference on Networking and Computing, 2011年12月2日, 査読有, 291-293.

(7) 荒巻、今井、坂本: 非同期 Larger than Life セル・オートマトンのグライダーの安定性について, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 2010年11月25日(京都市).

(8) Formenti, E., Imai, K., Martin, B. and Yunès, J-B.: Cellular automata, Boolean functions, Pseudo-random generators, Symmetric cryptography, Proc. 17th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems (AUTOMATA 2011), 査読有, 2011年11月21日, Santiago, Chile.

(9) 齊藤、今井、森田、岩本: 可逆性と保存性を同時に満たすセルオートマトンの探索, 平成 22 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日, (岡山市).

(10) Imai, K., Martin, B., Saito, R.: On radius 1-dimensional reversible and number-conserving cellular automata. LA

シンポジウム, 2010年7月21日(浜松市).

(11) Imai, K., Alhazov, A. On universality of radius $1/2$ number-conserving cellular automata, Proc. 9th International Conference of Unconventional Computation UC2010, Lecture Notes of Computer Science (Springer), 査読有, 6079, 2010年6月21日, 45-55.

[図書] (計 1 件)

(1) Schiff, J. (Peper, 梅尾, 足立, 磯川, 今井, 小松崎, 李訳), セルオートマトン, 2011, 共立出版, 250 ページ.

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 勝喜 (KATSUNOBU IMAI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 20253106

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: