



Title	Computation-Universality, Synchronization and Self-Reproduction in Reversible and Conservative Cellular Automata
Author(s)	今井, 勝喜
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155648
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	今井 勝喜
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 14297 号
学位授与年月日	平成 11 年 2 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文名	Computation-Universality, Synchronization and Self-Reproduction in Reversible and Conservative Cellular Automata (可逆性と保存性を持つセル・オートマトンの計算万能性, 同期性および自己増殖性に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 佐藤 俊輔 (副査) 教授 福島 邦彦 教授 中野 馨

論文内容の要旨

単電子デバイス, 量子計算, DNA 計算などの次世代の計算機構と目されているものの多くは, 情報がキャリアとなる物質に直接結びついており, 物質の物理的性質を反映した計算モデルの研究が注目されるようになってきた, その中でも可逆論理に基づく可逆計算モデルが近年注目を集めようになってきている。たとえば量子計算においては計算過程が可逆であり, 観測時を除いてどの計算のステージも情報の欠損を伴わず, その計算過程は可逆的なものとして構成されなければならない。そのような可逆な計算モデルのひとつとして, 可逆セル・オートマトン(CA)がある。可逆CAとは, どの時点でも必ず 1 ステップ前の状態に一意に逆戻りできるような CA である。この性質のため, 可逆CA 上での信号やパターンの生成や消滅には制約が伴うことになるが, 一般の CA 同様, 計算万能性を有するものが知られている。しかし, 従来の CA に関しては多数の研究が行われている構成万能性や同期問題など, より高次の機能についてはほとんど調べられていなかった。そこで本論文では, 可逆 CA における計算能力の研究を, 計算万能性, 同期動作, パターン配置問題としての自己増殖能力の観点から行った。まず計算万能性について考察し, 従来から知られていたモデルよりも状態数の少ない 8 状態の 2 次元計算万能可逆 CA を示した。次に従来の非可逆な CA の同期問題として研究してきた一斉射撃問題を可逆 CA 上で実現するための条件を示し, 実際に可逆解を構成した。さらに質量保存的な性質を反映した CA によるモデルとしてビット保存的な CA を拡張した Number-Conserving CA を提案し, その上での一斉射撃解を構成した。また, 可逆システムにおけるパターン配置問題に対するアプローチとして, 2 次元と 3 次元可逆空間における自己参照メカニズムに基づく自己増殖セル・オートマトンが構成可能であることを示した。

論文審査の結果の要旨

本論文では, 可逆セル・オートマトン(以下 CA と略す)における計算能力を, 計算万能性, 同期動作, パターン配

置問題としての自己増殖能力の観点から研究したもので、5章から成る。

第1、2章では、研究背景ならびに、可逆CAについての諸定義や既知の主要な結果について述べた。

第3章では計算万能性をもつ8状態の可逆CAを構築した。まず可逆CAの計算万能性について、その定式化に用いられている保存論理とともに概観した。計算万能な可逆CAについては、種々のモデルが知られている。本章では三角形状の近傍を用いることにより8状態の計算万能なモデルを構成し、状態数が従来のモデルで示されたものよりもさらに削減可能であることを示した。これはPCAの枠組みを用いた等方的な規則を持つモデルの中では最小状態数のものである。構成したCAが計算万能であることは、万能な可逆論理素子であるFredkinゲートの入出力関係を模倣できることを示すことによった。

第4章では、CA上の同期問題の基本的なモデルとして用いられている一斉射撃問題をとりあげ、可逆CAやNumber-Conserving CAにおける実現可能性を議論した。まず従来の非保存的なCAの上の一斉射撃問題について概説し、一斉射撃問題を保存的なCAで実現するための条件を議論した。ここでは従来の単一の射撃状態からなる可逆解は構成できないことを示し、可逆CAにおける一斉射撃解条件を新たに定義した。この条件の下で、Minskyらの $3n$ 時間解に基づく99状態解を1次元可逆PCAによって構成した結果を示す。さらに2次元の場合の解や、より高速に同期する解などについての結果も示した。次にNumber-Conserving CA上における一斉射撃問題を考察した。まずNumber-Conserving CAの基本的な性質を考察し、その上での一斉射撃解の条件について述べた。そして、実際にNumber-Conserving CA上の解が構成可能であることを示した。

第5章では、2次元可逆空間で自己増殖する 8^5 状態のセル・オートマトンSR8を構成した。これはLangtonの8状態自己増殖CAに基づいているが、自分自身の形状を参照することにより、簡単な機構にもかかわらず自由度の高い増殖メカニズムを可逆空間上に実現している。また、SR8の自己参照メカニズムは増殖時に形状を子孫へ伝えるために用いられるが、さらにパターンの配置場所の制御にも応用できることを述べた。さらに、SR8を基本的な性質を保ったままで3次元へ拡張できることを示し、可逆空間におけるパターン配置のための枠組みとなりうることを示した。

これらの結果は次世代の計算機構として期待されている量子計算やDNA計算などにおけるプログラミング技術として応用できるものであり、CAの分野に一定の寄与をした。よって、博士(工学)の学位論文として価値があると認める。