

氏名	かみかわ なおき 上川 直紀
本籍	和歌山県
学位の種類	博士(工学)
学位の番号	乙第12号
学位授与年月日	平成29年12月16日
学位授与の要件	本学学位規則第23条
学位論文題目	内部状態の少ないセルオートマトンに関する研究
論文審査委員	主査教授 梅尾博司 副査教授 浅倉史興 副査教授 越後富夫 副査教授 来海 暁

論文内容の要旨

セルオートマトンは生物固有の能力である自己増殖, 自己複製機能を数学的に記述するモデルとして, J. von Neumann により考案された計算モデルで, 昨今では複雑系, マルチエージェント・システム, 人工生命, 生物学, 人工知能など数多くの分野で研究がなされている. 本論文は, 数列生成問題並びに一齐射撃問題 (FSSP) と呼ばれる同期プロトコルの設計問題に焦点を絞り, 内部状態数が極めて少ないセルオートマトンの計算能力について, 大規模計算機プログラムと数学的手法を併用して, その数理構造の一端を明らかにしたものである.

本論文の構成は以下のとおりである. 第1章では, 本研究の目的と背景について述べ, 第2章では, 複数のセルオートマトン・モデルを定義している. これらは標準セルオートマトン (CA), セル間通信量を 1-bit/1-step に制限した 1 ビット・セルオートマトン (CA_{1-bit}) 並びにマルチレイヤー・セルオートマトン (MLCA) である.

第3章では CA 並びに CA_{1-bit} 上の数列生成問題に関して得られた諸結果について述べている. Fibonacci 数列など多数の数列に対して, 最適時間生成アルゴリズムを提案するとともに, 最小状態数の有限オートマトン上に実現する. これらは先行研究で, 生成に 2~3 倍の時間を要し, 実装には多数の状態数を必要としていたもので, 申請者は過去の諸結果を改良し, 内部状態数並びに生成時間の最適性を同時に満足するアルゴリズムを示す. また内部状態数が比較的少ない CA に対し, 実時間生成可能な数列のクラスを明らかにし, 複数クラスの特徴づけに成功している. さらにそれらのクラス間に真の階層性が存在することを初めて明らかにする. CA_{1-bit} 上でも同様な数列生成問題を考察し, 様々な数列の実時間生成アルゴリズムを新たに提案している. CA_{1-bit} 上でも標準 CA と同様な生成能力の階層性を示すとともに, 1 状態標準 CA では実時間生成が不可能であるが, 1 状態の CA_{1-bit} 上で実時間生成可能な数列の存在を明らかにし, 両者の間にも真の能力的階層性が存在することを示す. また構成した数々の遷移関数の正当性を数学的に証明している. 証明を簡素化し, 証明プロセスの透明性を高めるため様々な独自の記法を導入し, 工夫を凝らしている.

第4章では、FSSPを考察し、得られた諸結果をまとめている。従来のFSSPでは、4状態ですべてのCAの同期を実現する解(完全解)は存在しないことが証明されていた。申請者は、部分解なる考え方を初めてFSSPに導入し、サイズ n が $n = 2^k, k \geq 1$ なるセル空間の同期が可能な対称型4状態部分解の存在を初めて明らかにする。その数は17個であることを突き止め、巨大な解空間の中から、目標のFSSP解にアプローチする手法を確立する。さらに、サイズが $n = 2^k - 1$ なるセル空間に対しても同様な部分解の存在を示し、対称解が39個、非対称解が132個存在することを示す。さらに申請者は、耐故障性を有する同期アルゴリズムの設計と有限オートマトン上での実装手法についても研究を進め、MLCAの遷移関数から標準CAのための遷移関数に機械的に変換する手法を開発し、複雑なCAアルゴリズムが有限オートマトン上に実現できることを明らかにする。本手法により大規模なセルオートマトン上への実装が容易になる。最後に、第5章では本研究で得られた成果を総括している。

論文審査結果の要旨

本論文は、内部状態数が極めて少ないセルオートマトン (Small-state Cellular Automata) の数列生成問題並びに一斉射撃同期問題における計算能力について、大規模計算機プログラムと数学的手法を併用して、その数理構造を明らかにするものである。セルオートマトンは高度な非線形性を有し、その挙動の予測は極めて困難であり、計算機実験は不可欠である。申請者は、そのための大規模プログラムを開発し、数列生成問題と一斉射撃同期問題におけるセルオートマトンの挙動を解明し、数多くの数列の最適時間生成アルゴリズムを設計し、それらを最小状態の有限オートマトン上に実装するとともに、実現したアルゴリズムの正当性を数学的に証明し、遷移関数の正当性を証明する手法を確立している。研究手法は大規模計算機プログラムを援用しながら、理論的且つ数学的に、数多くの研究成果を取りまとめている。数列生成問題は、Fischer [1965], 有沢 [1971], Korec [1990, 1997] らの研究に端を発するが、申請者は生成に要する時間を最適化し、生成に必要な内部状態数を極限まで削減し、より弱い計算モデル上で最適性を示すなど、先に示されていた諸結果を改良している。得られた成果は新規性が極めて高い。隣接するセル間の通信量を 1-bit に制限した $CA_{1\text{-bit}}$ に関する申請者の研究は、その後の M. Kutrib [2008](Giessen Univ., Germany) らの研究でしばしば引用され、少なからずこの分野の研究に影響を与えたものと思われる。申請者が明らかにした対称型 4 状態 2^k 同期プロトコルの研究 [2008-2009] は、3 年後の W. L. Ng [2011](Univ. of California, Irvine) の非対称型 4 状態 2^k 同期プロトコルの研究のベースとなり、 2^k プロトコルの解空間の完全解明に繋がった。さらにその後の申請者の研究により、新たな 4 状態 $2^k - 1$ プロトコルの存在が 2017 年に明らかになった。

計算能力が高くないと思われていた小さなセルオートマトンは、予想に反して、数々の数列を最適時間・最小状態で生成可能であり、また 4 状態同期プロトコルのクラスは、内部状態数は最小であり、且つ数多くの最適時間アルゴリズムを含んでいるなど、本論文により豊かな数理構造を有することが明らかになった。またこれらの諸結果を導出するために開発された手法、未知の解空間にアプローチする手法は独創的であり、他の計算モデルへの拡張可能性もある。これらの研究成果は、提出された学位論文、9 編の論文 (和文: 2 編, 英文: 7 編)、並びに 19 編の国際会議議事録としてまとめられた。

以上のように、本論文は内部状態数の少ないセルオートマトンの数列生成能力の階層性、最適性、大規模計算機プログラムを併用した独創的な研究手法、遷移関数の正当性証明手法、世界で最も小さい同期プロトコル・クラスの発見など、同オートマトンの数理構造の解明に大きく寄与した点で高く評価できる。以上により、本論文は博士学位論文として、その条件を十分に満足していると判断した。

論文審査委員 主査 教授 梅 尾 博 司
副査 教授 浅 倉 史 興
副査 教授 越 後 富 夫
副査 教授 来 海 暁

論文審査結果の要旨

最終試験の結果, 合格と認める.

論文審査委員 主査 教授 梅 尾 博 司

副査 教授 浅 倉 史 興

副査 教授 越 後 富 夫

副査 教授 来 海 暁