

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630196

研究課題名(和文) 超離散反応拡散モデルを用いた自己駆動個体群の集団現象の解析と設計

研究課題名(英文) Analysis and Design of Multi-Agent Systems Based on Ultra-Discretized Reaction-Diffusion Models

研究代表者

山本 茂 (Yamamoto, Shigeru)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：70220465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：個体間相互作用や個体の移動が調整可能な個体群に見られる反応拡散現象として、渋滞現象、生物の被捕食、伝染病伝播を対象として、これらをモデル化する手法と制御する手法を開拓した。特にセルオートマトンの同定法、渋滞現象のセルオートマトンモデルの逆超離散化、交通流の制御法と新しい交通流モデル、被捕食モデルと伝染病伝播モデルの逆超離散化に関し新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：We have investigated a method of deriving and controlling reaction-diffusion phenomena such as traffic jam, predator-prey interactions, and disease propagation. In particular, we have developed an identification method for a cellular automaton, back-ultra-discretization of a cellular automaton showing traffic jam phenomena, a new control method based on a cellular automaton model, a new traffic flow cellular automaton model, and back-ultra-discretization of a Lotka-Volterra model and a Kendall model known as a disease propagation model.

研究分野：制御工学

キーワード：モデル同定 セルオートマトン 超離散化 交通流 捕食・被食モデル

1. 研究開始当初の背景

セルオートマトンは、格子状のセルと単純な規則による離散的計算モデルで、各セルの離散値状態の遷移則は、**max-plus** 代数型方程式で記述できる。この遷移則を適切に選ぶことによって、連続な微分・偏微分方程式を解いた場合と定性的には同様な振る舞いを表現できることが知られている。これまでに複雑な自然現象を模擬するための様々なセルオートマトンモデルが提案されている。しかし、社会システムの渋滞現象や生物の被食・捕食などを観測されたとおりの特徴を表現できるセルオートマトンを自動的に求める手法はこれまでに十分考察されていなかった。連続状態観測データから直接セルオートマトンモデルを同定し、その離散モデルを使って大規模複雑システムの解析設計を行う方法の探求も十分ではなく、多くの課題が残されている。

また、研究代表者は、高速道路で生ずる自然渋滞現象の特徴を説明できるセルオートマトンモデルに基づいて、渋滞を抑制するセルの遷移則を求めた。これを現実の交通流に応用するためには、セルの遷移則を連続状態制御則へ変換する方法が必要である。連続から離散への変換は超離散化として知られる確立した方法があるが、その逆変換である離散を連続に変換する逆超離散化が解決の鍵となると考えられた。ただし、当然のことながら、離散値から連続値への変換は一意ではなく自由度がある。この自由度は、離散値ダイナミクスと連続値ダイナミクスの定性的な性質を保存するために用いられるべきで、現象をうまく説明するようにモデルを導くモデリング手法が必要である。

超離散化は、従属変数の和と積の演算で構成される差分方程式を、変数変換と極限操作によって、**max** と和で構成される方程式へと変換する手法である。差分方程式の独立変数である時間と空間が離散であるのに加え、従属変数も離散化される全変数離散化を意味することから超離散化と呼ばれている。超離散化は、拡散方程式である **Burgers** 方程式や、生物の被食捕食を表すロトカボルテラ方程式などの研究があり、超離散化で得られたセルオートマトンが変換前の方程式の定性的な性質を受け継ぐことが知られている。一方で、その逆の変換である逆超離散化は、離散で失われた情報を適切に補って連続化する必要がある、容易なことではない。

2. 研究の目的

道路交通網で見られる渋滞や伝染病の伝搬などの現象は反応拡散モデルを用いて記述することができる。この研究課題では、個体間の相互作用や個体の移動が調整可能な個体群に見られる反応拡散現象を集団現象と呼び、時間と空間と状態量が離散化されたセルオートマトンで記述される超離散反応拡散モデルに基づいて、集団現象の生成と消

滅を制御するための解析手法と設計手法を開発する。具体的には、集団現象として社会システムの渋滞や生物の捕食・被食、伝染病伝搬などを対象として、セルオートマトンの同定法と制御法および超離散化と逆超離散化の方法を開拓することが本研究の主たる目的である。

3. 研究の方法

研究代表者と研究代表者の研究室に所属する大学院生がこれまでの研究成果を発展させるように理論的考察と数値シミュレーションおよび検証実験を進め、課題の解決に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) セルオートマトンモデルの同定法

状態が二値で状態遷移関数が **min** 関数で表現できるセルオートマトンモデルに問題を限定し、観測された状態の変化が真理値表として与えられた時、二分決定グラフ (**Binary Decision Diagram**) とシャノン展開を利用して真理値表から状態遷移関数を自動的に求める手法を開発した [学会発表 10]。なお、この方法は二分決定グラフにもとづいているためセルの離散状態が三値以上の多値の場合へ拡張することは困難であった。そこで、多値状態遷移関数を **min** 関数と **max** 関数とを用いて表現する方法を採用した。これにより、同定問題を、**max** 関数と **min** 関数の入力である **affine** 関数の個数を最小化する最適化問題に帰着させた。状態遷移関数を簡素な形で求めるため、スパース (疎) な解を得やすいという特徴をもつ **L1 ノルム最適化** を適用し、状態遷移関数を自動的に求める手法を導いた [雑誌論文 1] [学会発表 9]。

(2) 渋滞現象のセルオートマトンモデルと逆超離散化

実世界の高速道路での渋滞現象を生ずる交通流は、同一の密度であっても異なる複数の定常流量を示すメタ安定状態と呼ばれる特徴的な性質を持つことが知られている。メタ安定状態を持つセルオートマトンモデルとしてスロースタートセルオートマトン (**SISCA**) モデルや拡張バーガーズセルオートマトン **ver. 1 (EBCA1: Extended Burgers CA ver. 1)** モデルなどが提案されている。これらとは異なるセルオートマトンモデルを新たに導出した [学会発表 1]。

交通流を表現するバーガーズセルオートマトンが **Burgers** 方程式の超離散化により得られることは知られている。また、バーガーズセルオートマトンの逆超離散化により **Burgers** 方程式が導ける。そこで、交通流を表現する離散的な時系列データに、(1)のセルオートマトン同定法を適用し、得られたセルオートマトンモデルの逆超離散化によって **Burgers** 方程式を導出した。対象としたセルオートマトンはバーガーズセルオートマト

ンと同様の状態遷移を示すが異なる構造である。この結果は、同一の離散的な時系列データを表現する複数の異なるセルオートマトンモデルが、逆超離散化によって同一の構造を持つ連続的な微分方程式へ帰着する場合があることを示している〔学会発表 7〕。

(3) 交通流の制御

拡張バーガーズセルオートマトンモデルを用いて、渋滞を抑制する新たな制御手法を導出した。従来手法では渋滞解消までの時間が短い、流量の低下が見られていた。提案法では、先行車の行動を予測する制御法で、単位時間あたりに停止する車両数を減らすことにより、流量の低下を抑える方法となっている。〔学会発表 5〕。また、都市内交通流を対象として、車両の流入量と交差点近傍の車両台数による交差点モデルを作り、交差点モデルに基づく信号機の予測制御法を導出した。セルオートマトン 184 モデルを用いた数値シミュレーションで、モデル予測制御により信号機のスプリットとオフセットが変化し交通流を円滑できていることを確認した〔学会発表 2〕。

(4) 被食・捕食モデル

生物の捕食者・被食者のダイナミクスを表現する連続状態連続時間モデルとして知られるロトカボルテラ方程式の解が二値化されて与えられた時、(1)の成果を利用して、セルオートマトンモデルが同定できることを確認できた〔学会発表 8〕。また、セルオートマトンモデルと逆超離散化を経て、ロトカボルテラ方程式系の解と同質な解を有する微分方程式が得られることを確認した〔学会発表 4〕。超小型群ロボット Kilobot の動的モデルの同定手法を導出し、そのモデルに基づく制御入力の決定法にしたがって、被捕食の実験を行った〔学会発表 6〕。Kilobot は 3cm ほどの機体左右に搭載された振動モータを用いて二輪駆動ロボットと同様の移動ができる。赤外線 LED と受光素子により、近隣の機体との通信や赤外線の受光強度から相対距離を推定する。

(5) 伝染病伝播モデル

既存の伝染病伝播偏微分方程式モデル(空間 1 次元伝播モデルに拡張した Kendall によるモデル)を超離散化することで、セルオートマトンモデルを導出できることを確認した。また、得られたセルオートマトンモデルに回復と免疫を表す遷移ルールを加えた後に、逆超離散化で得られる偏微分方程式が回復と免疫を表現できていることを確認した〔学会発表 3〕。

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 1 件)

- 1) 山本倖大, 山本 茂, L1 ノルム最適化に基づくセルオートマトンモデルの同定法, 計測自動制御学会論文集, vol. 52, no. 9, pp. 459-466, 2016.
DOI: 10.9746/sicetr.52.459 (査読有)

〔学会発表〕(計 10 件)

- 1) 田中拓栄, 山本 茂, 交通流の基本図にメタ安定状態を持つ新しい 1 次元 3 状態 3 近傍セルオートマトンモデル, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月 7 日, 岡山大学(岡山県・岡山市).
- 2) 頼末祥秀, 山本 茂, 交差点近傍の車両台数と流入量に基づく交通信号の自律分散モデル予測制御, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月 7 日, 岡山大学(岡山県・岡山市).
- 3) 中西 慧, 山本 茂, 感染症伝播の反応拡散モデルとセルオートマトンモデルの超離散化による考察, 第 49 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2017 年 2 月 22 日, 北海道大学(北海道・札幌市).
- 4) 松井康知, 山本倖大, 山本 茂, ロトカボルテラ方程式系の逆超離散化を用いた同定法に関する考察, 2016 年 3 月 9 日, 南山大学(愛知県・名古屋市).
- 5) 田中拓栄, 山本倖大, 山本 茂, 拡張バーガーズセルオートマトンモデルに基づく高密度交通流の渋滞制御, 第 3 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2016 年 3 月 7 日, 南山大学(愛知県・名古屋市).
- 6) 中村泰紀, 山本 茂, 超小型群ロボットのモデリングと制御実験, 第 48 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2016 年 3 月 1 日, 北海道大学工学部(北海道・札幌市).
- 7) 山本倖大, 山本 茂, 等価なバーガーズセルオートマトンモデルの逆超離散化に関する考察, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2015, 2015 年 11 月 18 日, 函館アリーナ(北海道・函館市).
- 8) 松井康知, 山本倖大, 山本 茂, ロトカボルテラ方程式系の離散ダイナミクスを表現するオートマトンモデルの同定法, 第 2 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月 5 日, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区).
- 9) 山本倖大, 山本 茂, 11 ノルム最適化に基づくセルオートマトンモデル同定手法に関する考察, 第 27 回自律分散システム・シンポジウム, 2015 年 1 月 12 日, 東京理科大学森戸記念館(東京都・新宿区).

- 10) Kota Yamamoto and Shigeru Yamamoto,
Derivation of a Cellular Automaton
Model Based on a Binary Decision
Diagram and Shannon's Expansion, SICE
Annual Conference 2014, 2014年9月12
日, 北海道大学 (札幌市・北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 茂 (YAMAMOTO, Shigeru)

金沢大学・電子情報学系・教授

研究者番号：70220465