

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500289

研究課題名(和文) グラフオートマトン上の自己組織的な振動生成と構造遷移

研究課題名(英文) Self-organizing oscillation and structure transition in graph-rewriting automata

研究代表者

富田 康治 (Tomita, Kohji)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：80357574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：グラフオートマトンは、構造を変化させるルールと、ルールの適用を制約する構造との間の相互作用を記述する数理モデルである。この枠組み上の構造の生成とその解析に関する研究を進展させ、局所的に周期的動作する構造がグラフ上に分散し相互作用する系の自己組織過程の研究を行った。特に、各ノードに位相を導入して振動子として取扱い、各々が臆本モデルに基づく相互作用を行う場合を扱った。各ノードの振動数がノードのグラフオートマトンの状態によって決定される場合に、状態とグラフ構造の間の自己組織化に加えて、位相と状態の間にも自己組織的關係が導入されることを、シミュレーションを行い確認した。

研究成果の概要(英文)：Graph-rewriting automata define symbol dynamics on graphs where application of rewriting rules modifies the graph structure and the structure restricts rule applications. On this framework, we studied self-organizing oscillation and structure transition. We focused on its extension by introducing phases and synchronization scheme. In addition to the emergent behavior between states and the global structure, another emergent behavior between phases and states is in concern. Such behavior would be important for analyzing and designing self-organizing systems.

研究分野：総合領域

キーワード：グラフ セルオートマトン 自己組織化 複雑系 動的ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

相互作用する多数の振動子で作られるシステム(結合振動子系)は、要素の振動の同期と伝播などに見られる自己組織や、同期した振動パターンを使った運動の生成などに関して広く研究されている。それらの多くの研究では、振動子間の結合は局所的あるいは空間的に近距離の結合で対称性を仮定したり、全結合において結合の重みを調整可能としているが、振動子の数や空間的配置などは固定とされているものがほとんどである。

一方、これまで提案者は構造可変なシステムを扱うのに適したグラフオートマトンという枠組みを提案し研究を行ってきた。グラフオートマトンは、各ノードが3つの隣接するノードと結合したグラフ構造で、各ノードは状態を持ち、ノード状態と結合したノードの状態に応じてルールに従って状態遷移するセルオートマトンであるが、状態遷移に加えて図1に示すような構造変化も行う。これまでの研究により、グラフオートマトンの豊かな表現力、なかでも自己複製や階層構造の自然な表現などが明らかになっている。結合振動子や連続体上の振動・波動は、グラフ構造上やセルオートマトン上に構築できるが、一般には構造変化を伴わない。一方、グラフオートマトンでも周期的な動作を持つ系を構成でき、さらにグラフオートマトンやグラフ文法などの類似する系では、周期的に構造変化する系を構成することができるが、これまで重点的に研究された例はなかった。

2. 研究の目的

これまでのグラフオートマトンの研究は、主としてグラフ構造の自己組織的生成や解析を中心に行ってきた。その研究の過程では、生成される構造の静的な側面を重視していたので、振動的な状態変化や、周期的に変化する構造のような動的な挙動は解析の対象とはしてこなかった。

本研究課題では、ノード単体で振動子となりうるものや、複数のノードの結合によって振動子が構成されるものなどが、多数組み合わせさせて構造を作るときに、局所的振動子が形成され、振動数や位相差に空間的な分布・パターンに応じてグラフ構造が変化する仕組

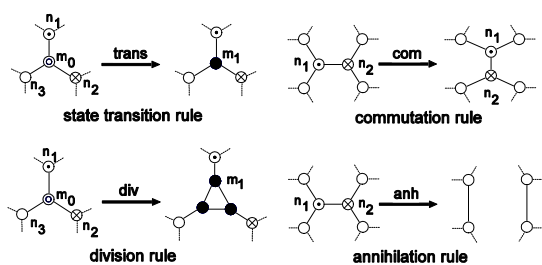


図1 グラフオートマトンの書換え規則

みを例示ことによって、基本原理を探る。

3. 研究の方法

これまでの研究では、主として閉じた系を想定し、その上での一般的な性質や、目的とするグラフ発展のためのルール設計を中心に研究を進めて来た。本研究では、これに応じたグラフ構造の自己組織化を扱う。これに関して、適当なルールを想定し、シミュレーションでグラフの性質などを評価する。また、関連する数理的解析を行う。

動的システム理論などを元に、基本的な振動子とその結合の様式を調べ、多様な結合振動子系を表現できる基本モデルを決める。つまり、ノードの動特性として最初から振動特性を持たせる方法と、できるだけ単純な要素の特性を決めるとともに、発生させたい振動パターンを列挙し、構造遷移のためのルールを作る。このためには、従来のグラフオートマトンの枠組みを拡張することも考える。また、構造の上に局所的な振動子が複数形成され、それらの位相差のパターンが自己組織されるような単純な例だけでなく、振動数の異なる局所振動子の共存する構造も扱えるようにする。また、構造を変えない状態遷移だけの振動と、構造の遷移を伴った振動も考え、状態と構造がさらに有機的に作用し合う系を探索する。

4. 研究成果

主な研究成果は次の3点である。

(1) まず、グラフオートマトンの定式化を変えない枠組みにおける振動パターンを検討した。この場合には、初期構造およびルールセットの記述により様々な振動的現象が現れることを確認した。これには、固定した構造における状態の振動や、構造を含めた振動があり、後者の場合にも、ノード数の変更の有無や振動の周期に関して多数のバリエーションが含まれる。特にノード数の少ないグラフ構造における典型的な例に着目し、初期構造やルールセットを記述し、構造変化や状態数などの性質をシミュレータを用いて検討した。

(2) 次に、より直接的に位相を導入して各ノードを振動子として取扱い、各々が相互に結合された場合の振る舞いを検討した。周囲のノードが局所的に同期した時に限りグラフオートマトンのルールを実行するというモデルを想定した。具体的には、各ノードの振動子の位相を、初期値はランダムとし、基本的には蔵本モデルを基にした相互作用を行うものとする。ただし、グラフオートマトンのルールの適用は、ルールの適用に関係するすべてのノードの位相が予め与えた初期値の幅に収まる場合に適用されるものとし、同

じ領域での適用の集中を防ぐために、適用後は位相がランダムな値をとる。

これにより、グラフオートマトンの枠組みは結合振動子系として拡張され、振動子のネットワークに位相関係を形成するという自己組織化と、グラフ構造によって振動子を形成する自己組織化とが同時に起こる。すなわち、構造の変更を規定するルール適用によって、ノードの隣接関係・位相関係が変化し、一方、変化したノード間の位相相互作用によって、グラフオートマトンのルールの適用が拘束される。この時、ノードの状態が自然振動数を決定することで階層的な自己組織化が期待できる。

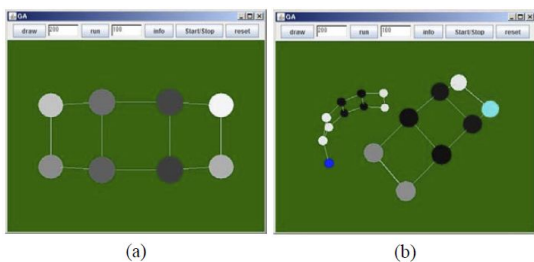
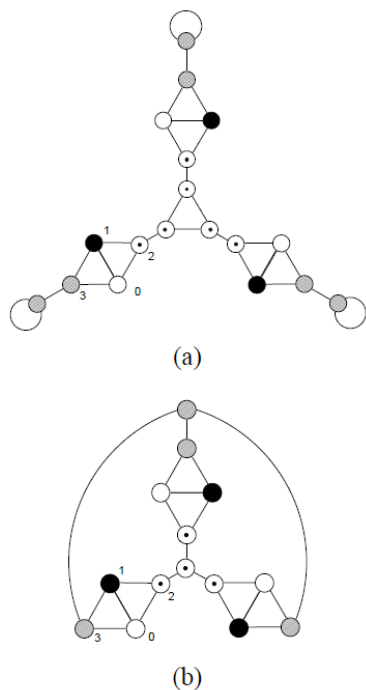


図2 自己複製の例



div 3 (1,0,3) → 5
 trans 5 (5,5,3) → 3
 trans 5 (0,3,5) → 0
 trans 5 (0,3,1) → 1
 trans 0 (0,1,2) → 4
 trans 1 (1,2,4) → 4
 anh (4,4)

(c)

図3 初期構造とルールセット

このような系の例として、単純な系に対し、シミュレーションを実行した。まず、グラフオートマトンで得られていた自己複製のパターンを、この枠組み上でも動作することを確認した(図1)。さらに、梯子構造を結合した種々のグラフを初期構造とし、これを変形するルール設計を行い、種々の位相パラメータに対してシミュレーションを行い、上記のような自己組織的振る舞いが現れることを確認した。初期構造とルールセットを図2に、シミュレーション例を図3に示す。

(3) これらの応用への検討の一部として、均質な機械的構成要素に対する自己組み立て、自己複製のための様々な手法を提案し、比較検討した。具体的にはランダムな摂動による方法(図4)や、構成要素を集めて結合することによる万能組み立て器に基づく方法(図5)などを検討し、統一的な取扱いが可能であることを示した。

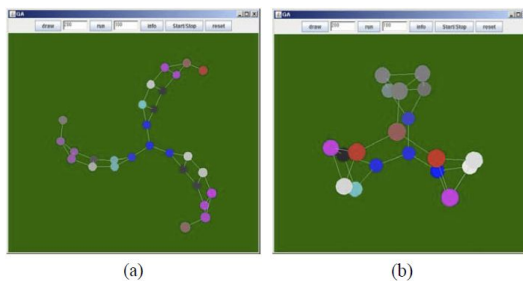


図4 シミュレーション例

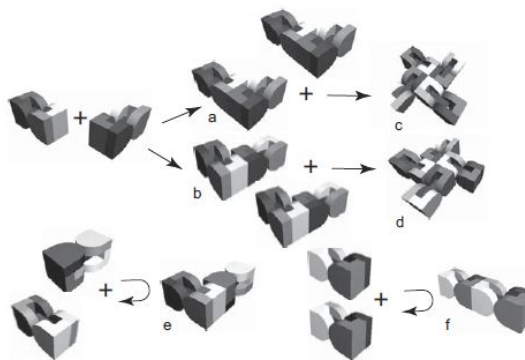


図5 ランダムな摂動による自己複製

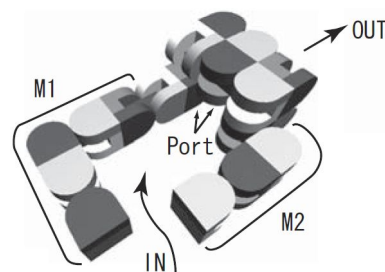


図6 万能組立て器による自己複製

以上の研究を発展させることにより、運動制御のみならず生物システムや社会ネットワーク等の一般的な動的システムの解析や設計の基礎を与えるものと期待できる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

Kohji Tomita, Akiya Kamimura, and Haruhisa Kurokawa: Toward multi-Level self-organization in graph-rewriting automata, Proceedings of the International Conference on Computer Science, Computer Engineering, and Social Media (CSCESM2014), 2014年12月13日, テッサロニキ(ギリシア)
<http://sdiwc.net/digital-library/toward-multilevel-selforganization-in-graphrewriting-automata.html>

Kohji Tomita, Akiya Kamimura, and Haruhisa Kurokawa: Oscillating Behaviors on Graph-rewriting Automata, Proceedings of the Second International Conference on Informatics Engineering & Information Science (ICIEIS2013), pp. 329-333, 2013年11月13日, クアラルンプール(マレーシア)
<http://sdiwc.net/digital-library/oscillating-behaviors-on-graphrewriting-automata.html>

Haruhisa Kurokawa, Akiya Kamimura, and Kohji Tomita: Self-Assembly and Self-Reproduction by an M-TRAN Modular Robotic System, International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS 2012), Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol. 104, pp. 205-218, Springer, 2012年11月9日, ボルチモア(アメリカ)
DOI: 10.1007/978-3-642-55146-8_15

〔その他〕

ホームページ等

<http://staff.aist.go.jp/k.tomita/ga>

6. 研究組織

(1)研究代表者

富田 康治 (TOMITA KOHJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：80357574

(2)研究分担者

黒河 治久 (KUROKAWA HARUHISA)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能シ

ステム研究部門・主任研究員
研究者番号：70356947

神村 明哉 (KAMIMURA AKIYA)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員
研究者番号：70356822