

同期現象の可視化・可聴化ツールの提案 — 結合振動子の位相モデルを用いて —

廣瀬 隼也[†] 井庭 崇^{††}

本論文では、結合振動子の位相モデルを用いた同期現象の可視化および可聴化を行うツールを提案する。このツールは、従来の同期現象の可視化に加えて可聴化も行うことで、集団での同期現象に関する新しい体験を提供することを目的としている。このツールでは、完全グラフ、レギュラーグラフ、ランダムグラフ、スモールワールドネットワーク、スケールフリーネットワークを扱うことができ、結合方式は拡散結合を扱うことができる。

A Tool for Visualizing and Sonificating Synchronous Phenomenon Using Coupled Oscillators with Topological Model

JUNYA HIROSE[†] and TAKASHI IBA^{††}

We propose a tool for visualizing and sonificating synchronous phenomenon using coupled oscillators with topological model. The aim of this tool is to offer new insight into synchronous phenomenon in population by sonificating in addition to conventional visualization. Oscillators interaction type we took is diffusion bond and complete graph, regular graph, random graph, small-world network and scale-free network can be selected.

1. はじめに

近年、物理学や生物学、社会科学などの幅広い分野において発見された「同期現象」(synchronous phenomenon)を数理的に理解するために、様々な数学モデルが提唱され、シミュレーションによる分析が行われてきた¹⁾²⁾。「同期」とは、複数の周期的な現象がネットワークを形成し、互いに影響を及ぼしあうことによって、全体である規則的な振る舞いをする現象を指す。本論文で提案する「Synchronous Simulator」は、結合振動子の位相モデルをベースに同期現象の可視化と可聴化を行うツールである。

2. 同期現象とリズム

同期現象を研究する際のアプローチの一つとして、ネットワークの要素を振動子でモデル化する方法がある。例えばパプアニューギニアに生息するホタルの集団発光などは、個々のホタル自体が内部ダイナミクス

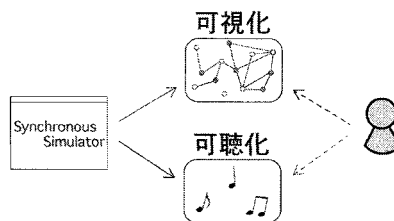


図1 可視化・可聴化で同期を感じ取る

を持つので、振動子を用いたモデル化が適している。現在では、これらの要素を結合し相互作用させることによって、ネットワーク全体がどのような振る舞いになるのかを理解する研究が行われている。

同期とは、総じてある法則性を持ったリズムの形成であると考えることができる。同期の種類としては、全ての要素が同期する「完全同期」や、部分的に同期する「部分同期」、動作が徐々に伝わっていく「進行波」などがあるが、振動子においてある決まった状態が起きた瞬間を観察すると、完全同期の場合はすべてが同時に一定の間隔でその状態を示すので、メトロノームのような一定のリズムを形成していると言える。部分同期や進行波の場合は、同期する箇所が複数表れ、1

[†] 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University
^{††} 慶應義塾大学 総合政策学部
Faculty of Policy Management, Keio University

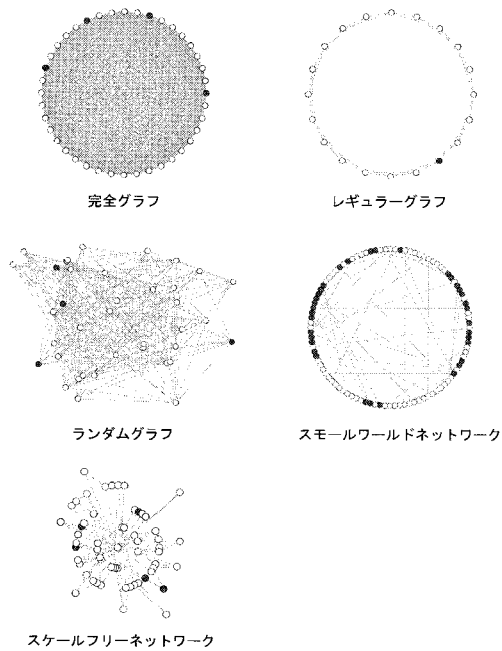


図2 ネットワークモデル

周期分の変化で生じるテンポから複雑なリズムを形成する。このように、同期はリズムという観点から捉えることができるので、聴覚によって現象を捉えることが可能であると考えられる。

そこで、本論文では、従来の可視化に加え「可聴化」というアプローチを追加することによって、同期現象の新しい体験を提供することを目指したい。

3. 同期現象の可視化・可聴化ツールの提案

3.1 Synchronous Simulator の主な特徴

本論文で提案するツール「Synchronous Simulator」は、拡散結合を用いた結合振動子の位相モデルを、可視化及び可聴化によって表現するシミュレーションツールである(図1)。

Synchronous Simulator では位相モデルを採用しており、各ノードは決められた値に到達すると色を変えて発光したことを示し、そのノードに対応した音を出す。Synchronous Simulator は、単体でも動的な振る舞いをする振動子が、ある決まった状態に到達した時に振動子の色が変わり、状況に応じた音を出す。これにより、同期が起きたときに大量の音が混ざり合い、どのあたりの振動子が同期しているのかを聴覚によって理解することができる。

Synchronous Simulator では、結合方式は常に振動

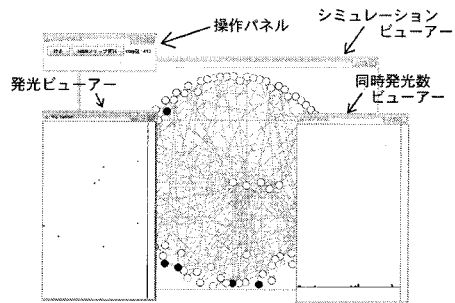


図3 Synchronous Simulator の画面

子と相互作用をする「拡散結合」を扱うことができ、以下に示す Kuramoto 位相モデルを用いている³⁾。

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i)$$

ここで、 ω_i は i 番目の振動子の固有振動数を、 K は結合強度を、 θ_i は i 番目の振動子の位相を表す。

Synchronous Simulator では、ネットワークモデルを以下の5種類から設定できる(図2)。

- 完全グラフ
- レギュラーグラフ
- ランダムグラフ
- スモールワールドネットワーク
- スケールフリーネットワーク

3.2 Synchronous Simulator の画面構成

Synchronous Simulator はシミュレーションビューアー、発光ビューアー、同時発光数ビューアー、操作パネルから構成されている(図3)。

シミュレーションビューアーではシミュレーションの経過を観察できる。シミュレーションビューアーで表示されるノードは振動子であり、各ノードは位相が決められた値に到達すると一時的に色を変える。これによって同期の度合いを色の変化で観察することができる(図4)。設定できるグラフの表現方法は、以下の5種類であり、各ネットワークモデルで作られたグラフを見やすくすることができる。なお、表示されたノードはマウスを用いて配置を変えることができる。

- ランダムに配置(図5)
- 円形に配置(図6)
- ハブであるほど中央に配置(図7)
- ハブであるほど右側に配置(図8)
- ハブであるほど上側に配置(図9)

発光ビューアーおよび同時発光数ビューアーは、数10ステップ前までの各ノードの発光の履歴を表示す

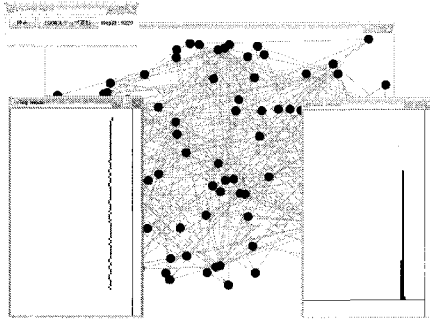


図 4 同期した時の画面

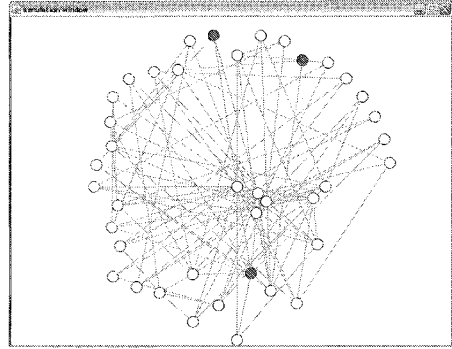


図 7 ハブであるほど中央に配置したグラフ

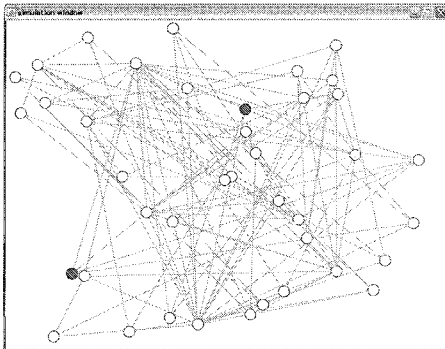


図 5 ランダムに配置したグラフ

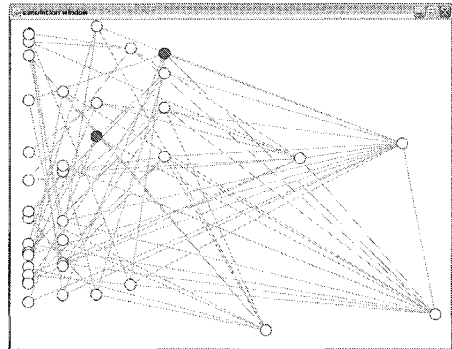


図 8 ハブであるほど右側に配置したグラフ

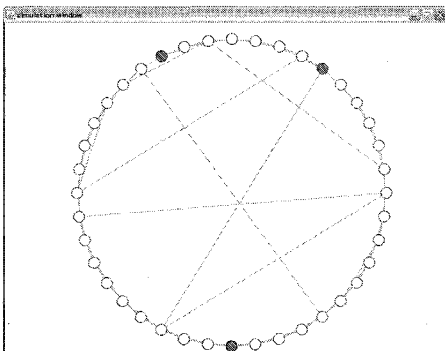


図 6 円形に配置したグラフ

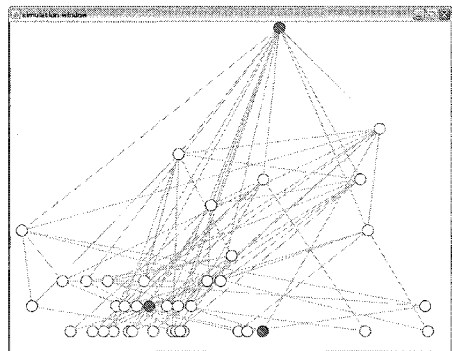


図 9 ハブであるほど上側に配置したグラフ

る。これらのビューアーでは現ステップでの各ノードの発光状態を右側に表示し、左に行くほど前のステップ時の発光状態を表示している。発光ビューアーは各ノードごとの発光状態の履歴を表示するものであり(図 10)、同時発光数ビューアーは各ステップで発光したノードの量を表示するものである(図 11)。

操作パネルではシミュレーションの「一時停止」と

「再開」、「描画の省略」を行うことができる。

4. 個別モデルへの適用例

ここでは具体例として、完全グラフで拡散結合された結合振動子の振る舞いのシミュレーションの結果を紹介することにした。完全グラフで拡散結合された結合振動子では、全ての固有振動数が等しい場合、結

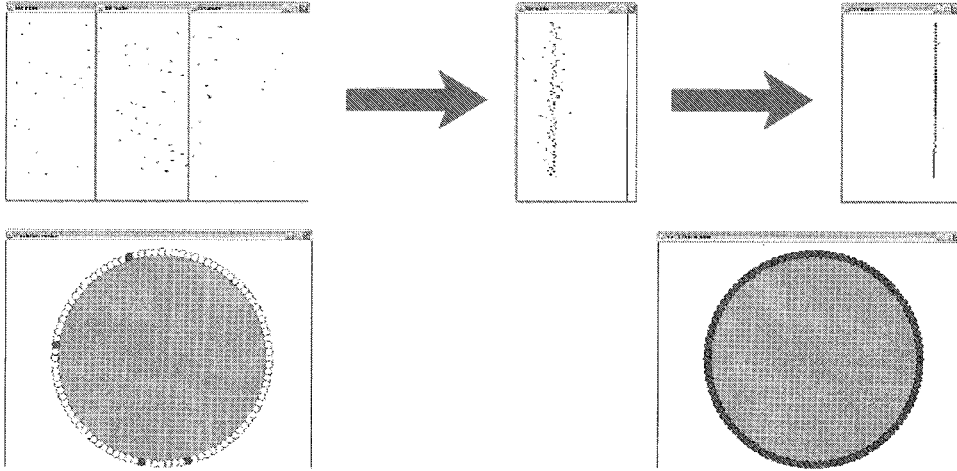


図 12 完全グラフで拡散結合された結合振動子の振る舞い (ノード数 = 100, 固有振動数は全て等しい)

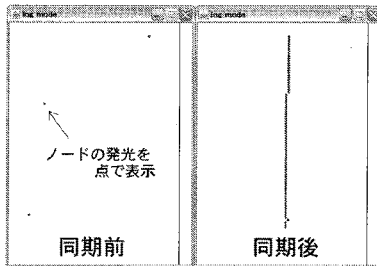


図 10 発光ビューアー

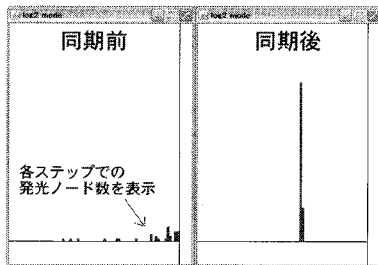


図 11 同時発光数ビューアー

合強度が少しあるだけで同期が始まることが知られている³⁾。

実際に Synchronous Simulator を用いて振る舞いを観察したところ, はじめは各ノードがランダムに音を出していたが, 時間が経つにつれてノードの発光するタイミングが合いはじめ, 最終的にノードの発光は

1ヶ所にまとまり, 音が一定の間隔で鳴るようになった。その時のシミュレーション開始図とシミュレーション結果が図 12 である。

5. おわりに

本論文では結合振動子の位相モデルを用いた同期現象に対し, 視覚でのアプローチを用いることで, 同期現象に対する新しい体験を可能にするツールを作成し, 実際にそのツールを用いて同期現象の振る舞いのシミュレーションを行った。

今後はこのツールを拡張し, カオス振動子などを追加しながら, 新たな表現のためのツールに改良したいと思う。本論文で提案するツールで複雑ネットワークを用いた新しい体験を与えることができれば幸いである。

謝 辞

この研究に対し, 多くのアドバイスをいただいた井庭研究会のメンバーに感謝したい。

参 考 文 献

- 1) Strogatz, S.H.: *Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order*, Hyperion (2003). SYNC: なぜ自然はシンクロしたがるのか, 早川書房, 2005.
- 2) 増田直紀, 今野紀雄: *複雑ネットワークの科学*, 産業図書 (2005).
- 3) 蔵本由紀, 三村昌泰: *リズム現象の世界 (非線形・非平衡現象の数理)*, 東京大学出版会 (2005).