

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05221

研究課題名(和文) 自律機能するネットワーク力学系の設計アルゴリズム開発と自己組織機構の解明

研究課題名(英文) Understanding self-organized mechanism through construction of oscillator network with the given complex time evolution

研究代表者

柳田 達雄 (Tatsuo, Yanagita)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：80242262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)： 所与された信号列を生成する力学モデルを設計することは理学的にも工学的応用の観点からも重要な課題である。多様な信号を生成させるため、オン・オフ型の結合網を連続変数に拡張したモデルを設計するため、スタガート・ステップ法を適用した効率的なモンテカルロ法を開発した。この手法を用いてネットワーク型力学系の結合網および結合位相差を設計し、所与された多様な振動成分をもつ信号生成器を構成した。この生成器は、小規模なネットワーク振動子であり、周期的、準周期的、非周期的と様々な信号が生成できる。このような簡便な振動子で多様な信号列を模倣(生成)することが可能であることを示し、国際研究会や学術雑誌等で成果発表した。

研究成果の概要(英文)： The purposes of this research are the following: 1) developing the algorithm to design a functional dynamical system 2) through the designing process by the developed method, extracting the self-organized rule which emerges the given function.

We have developed the Markov chain Monte Carlo method to design the oscillator network which generates the given complex time signals. We considered the real-valued connection network, and adapted the staggered-step method for the Monte Carlo method. Through the method, we have design oscillator network which generates periodic, quasi-periodic and chaotic signals. We have shown that, by designing the real-valued connection network, even the network of 10 oscillators produces fruitful time evolutions including chaos. In fact, such network oscillator can produce time signal with white colored power spectrum. In technological point of view, such tunable network oscillator is useful as signal generator with given characteristics.

研究分野：非線形力学系

キーワード：ネットワーク型力学系 マルコフ連鎖モンテカルロ法 カオス 力学系の設計 振動子集団 蔵本モデル 分岐 パワースペクトラム

1. 研究開始当初の背景

自然界には動的素子が非一様に相互作用して外乱や環境変化に抗して安定に機能するシステムが多く存在する。例えば、細胞内における生化学反応や遺伝子発現では多数の機能分子が関与しているながら安定なダイナミクスが創出されている。また、神経網では結合構造を自己組織的に形成して安定な情報処理を行っている。

本研究は、

1) 機能実現するネットワーク力学系の設計(振動子網など)を通して得られる結合構造の変化から自己組織化ルールを抽出するアルゴリズムの開発。2) 神経網、遺伝子発現網、代謝反応網などの機能性ダイナミクス創生の自己組織機構の解明である。さらに、これらの数理的知見を活かし、交通網・流通網などの社会システムの機能効率向上へ発展させる。

2. 研究の目的

近年、数理・生物・経済・社会科学など多分野においてネットワーク構造と機能の関係が着目されている。経験的に観測されるネットワークはスモールワールド性やスケールフリー性を持つことが明らかされ、クラスター係数・次数分布などに代表される特徴付けが欧米を中心として盛んに行われている。また、次数相関/同類度/階層性などネットワークを特徴付ける新しい概念や計算アルゴリズムの開発が進行している。

最近の研究動向は、このような静的ネットワークの解析から、ネットワークの生成プロセスや力学素子が不均一に相互作用した、いわゆるネットワーク型力学系研究に変化しつつある。そこでは、機能発現するためのネットワークの自己組織化ダイナミクスが中心的話題である。

しかしながら、細胞内の生化学反応網のように、外部刺激に対して多様な応答特性を持ち、かつ環境変化やノイズに対して安定に機能するダイナミクスを創生するネットワークの自己組織化のメカニズムは解明されていない。本研究は、ノイズや環境変動に抗して頑健に機能するモデル力学系の具体的な設計を通して、結合網構造の自己組織化ルールを抽出するアルゴリズムを開発し、機能性ネットワーク力学系の自己組織化機構の解明を目指す。

3. 研究の方法

メトロポリス法を代表とする統計力学などで広く用いられている動的モンテカルロ法が (1) 力学系の不変多様体などの相空間構造の解析【T. Yanagita and Y. Iba, J. of Stat. Mech. (2009)】。 (2) 優れた同期特性をもつ振動子網の設計【T. Yanagita and A. Mikhailov, Phys. Rev. E, 81(2010)】 (3) ノイズに抗して頑健な力学系の設計【T. Yanagita and A. Mikhailov, Phys. Rev.

E, 85 (2012)】。 (4) 高次機能を持つ力学モデルの設計【T. Yanagita, Advances in Cognitive Neurodynamics (III), (2013)】にたいして非常に有効な手法であることが申請者らの一連の研究により示されている。

これらの背景から、これらの手法を発展させて結合ネットワークの自己組織化ルールを抽出するアルゴリズムを開発し、自律機能するネットワーク力学系の設計による自己組織的に機能創生するメカニズムの解明を目的とする。さらに、申請者によって行ってきた興奮素子結合系の一連の研究【T. Yanagita, H. Suetani and K. Aihara, Phys. Rev. E, 78(2008)】、【T. Yanagita, et.al, Int. J. of Bif. and Chaos, 18(2008)】、【T. Yanagita, Phys. Rev. E, 76(2007)】や共同研究者である青柳ら神経系の研究【M. Saito, T. Tanaka, H. Sato, H. Toyoda, T. Aoyagi, and Y. Kang, Euro. J. of Neuroscience, 38 (2013)】によって得られた知見も神経網、遺伝子発現網など複雑で機能的なネットワーク力学系への応用と自己組織機構の解明に有効であると考えられる。

4. 研究成果

ネットワーク型力学系を所与された多様な振動を生成するように設計した。そのため、従来のオン・オフ型の結合網を拡張して連続変数の結合網を持つ振動子ネットワークを用いた。しかしながら、設計の観点からは、連続値は無限自由度であるため、従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法による設計には困難が伴う。そこで、マルコフ連鎖モンテカルロ法にスタガード・ステップ法を適用させた設計するネットワーク型力学系として、振動子ネットワークを用いた。振動子は、電気回路により容易に実現できるため工学的な応用の観点からも有用である。振動子ネットワークの設計目標として、所与されたパワースペクトラムとなる信号の生成とした。目標となるパワースペクトラムと振動子ネットワークが生成した信号のパワースペクトラムとの類似度として、従来は二乗などのノルムが用いられてきたが、ここでは以下のカルバック・ライブラー情報量を用いた。

$$D_{KL}(\tilde{S}|S) = \sum_{k=0}^{K-1} \tilde{S}(\omega_k) \log \frac{\tilde{S}(\omega_k)}{S(\omega_k)}.$$

この情報量をもとにして、所与されたパワースペクトラムと振動子ネットワークが生成したパワースペクトラムの間の距離(エネルギー)を以下で定義して、マルコフ連鎖モンテカルロ法により、カノニカル分布 $q(s)$ より結合ネットワークをサンプルする。

$$E(s) = \log \frac{D_{KL}(\tilde{S}|S)}{|S|},$$

$$q(s) = \frac{\exp[-\beta E(s)]}{\sum_s \exp[-\beta E(s)]}$$

結合網の設計は、複雑なエネルギー地形（適応度地形）における最適化となり緩和時間（設計時間）が長くなることが予想される。そのため、本研究では、拡張アンサンブル・モンテカルロ法であるレプリカ・エクステンジ法を用いた。

エネルギーレベル（適応度）に応じて、様々な信号を生成するが、最適なモデルでは目標パワースペクトラムをよく再現するネットワーク力学系が得られる。また、結合網を変更することにより基礎となる振動子を帰ることなく様々な目標パワースペクトラムを再現する信号を生成することがきできる（図1-3）。

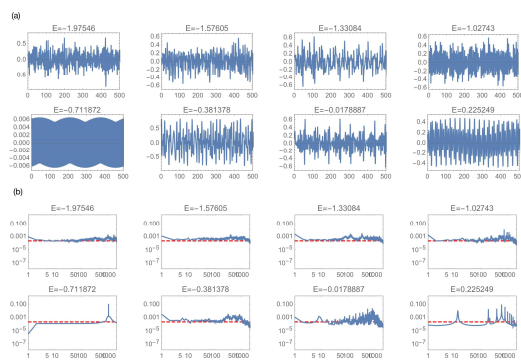


図1：所与された周期をもつ信号を生成する設計したネットワーク振動子によって生成された時系列 (a) およびパワースペクトラム (b)。(b)の破線はターゲットスペクトラムを表す。

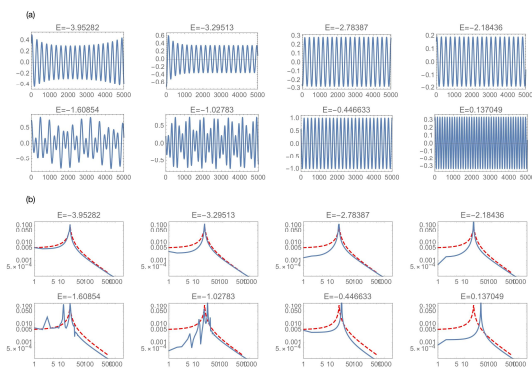


図2：所与された周期2の信号を生成するマルコフ連鎖モンテカルロ法により設計したネットワーク振動子によって生成された時系列 (a) およびパワースペクトラム (b)。(b)の破線はターゲットスペクトラムを表す。

特に、目標パワースペクトラムとして白色雑音とすると、少数の振動子ネットワークにおいても結合網を設計することにより強いカオス振る舞いを生成することができる。マルコフ連鎖モンテカルロ法の改良とモデル拡張によって、従来よりも幅広い特性をもつネ

ットワーク力学系の設計が可能になった。このような人工的な目標パワースペクトラムを生成するネットワーク振動子のみならず、カオス力学系（非周期的時系列）の典型例であるローレンツモデルのパワースペクトル

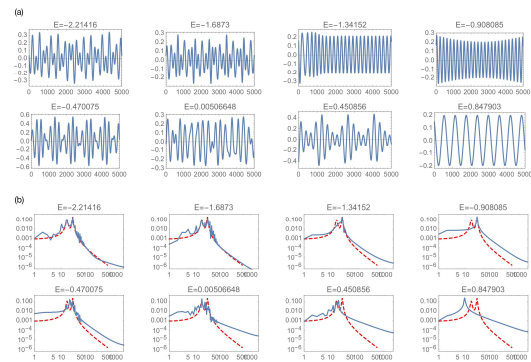


図3：ホワイトノイズ（フラットなパワースペクトラム）生成する設計したネットワーク振動子によって生成された時系列 (a) およびパワースペクトラム (b)。(b)の破線はターゲットスペクトラムを表す。

を生成するネットワーク型力学系を設計にも成功した。このような時系列の模倣は極めて強いカオス系を含めても10程度の振動子という比較的少数のネットワーク力学系で生成できる（図3）。振動子は簡便な電気回路においても実現できるので、所与されたパワースペクトラムを持つ人工信号の生成器として工学的な応用も期待できる。

さらに、これらの知見、とくにマルコフ連鎖モンテカルロ法のネットワーク力学系のデザインで得られたアルゴリズムをハミルトン力学系にも適用させ、所与された運動エネルギー分布をもつモデル設計にも応用することができ、より広範囲な力学系モデル設計への応用が期待されており、これらに関する成果を国内、国際学会などにおいて発表した。

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 9件)

1. Bayesian estimation of phase dynamics based on partially sampled spikes generated by realistic model neurons, Kento Suzuki, Toshio Aoyagi and Katsunori Kitano, *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol.11, 116(2018).DOI:10.3389/fncom.2017.00116 (査読あり)
2. A dynamical systems approach for estimating phase interactions between rhythms of different frequencies from experimental data, Takayuki Onojima, Takahiro Goto, Hiroaki Mizuhara and Toshio Aoyagi, *PLOS Computational Biology*, 14(1),

- e1005928(2018).DOI:10.1371/journal.pcbi.1005928 (査読あり)
3. Tatsuo Yanagita, Design of Oscillator Networks for Generating Signal with Prescribed Statistical Property, Journal of Physics: Conference Series, 936, pp. 012073--012081 (2017) doi:10.1088/1742-6596/936/1/012073 (査読あり)
 4. 小西哲郎, 柳田達雄, 鎖状系のエネルギー分配と遅い緩和: Boltzmann-Jeans 則, 日本物理学会誌, 72, pp.782-788 (2017) (査読あり)
 5. Yoji Kawamura, Sho Shirasaka, Tatsuo Yanagita and Hiroya Nakao, Optimizing mutual synchronization of rhythmic spatiotemporal patterns in reaction-diffusion systems, Physical Review E, 96, pp. 012224-012236 (2017)DOI:10.1103/PhysRevE.96.012224 (査読あり)
 6. Yu Terada, Keigo Ito, Toshio Aoyagi and Yoshiyuki Y. Yamaguchi, Nonstandard transitions in the Kuramoto model: a role of asymmetry in natural frequency distributions, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, (2017),13403,DOI:10.1088/1742-5468/aa53f6 (査読あり)
 7. Tetsuro Konishi and Tatsuo Yanagita, Slow relaxation of kinetic energy of a spring-chain model in solvent, Journal of Statistical Mechanics, 3, 033201-033223 (2016) (査読あり)
 8. Yu Terada and Toshio Aoyagi, Dynamics of two populations of phase oscillators with different frequency distributions, Physical Review E,94, (2016),012213-012221,DOI:10.1103/PhysRevE.94.012213 (査読あり)
 9. Takashi Hayakawa and Toshio Aoyagi, Learning in neural networks based on a generalized fluctuation theorem, Physical Review E,92 (2015) 052710-052721 (査読あり)
- [学会発表](計 13件)
1. カオス遍歴時系列データの主成分分析, 荒井貴光, 青柳富誌生, 日本物理学会第73回年次大会(2018/3/22-2018/3/25), 東京理科大学野田キャンパス, 2018/3/25, ポスター発表.
 2. 擬似的に束縛された鎖状系の緩和現象, 日本物理学会 第73回年次大会、東京理科大学 (2018/03/23), 柳田達雄, 小西哲郎
 3. 束縛系鎖モデルの局所運動のデザイン, 日本物理学会 2017年年秋季大会、岩手大学上田キャンパス(2017/09/23), 柳田達雄, 小西哲郎
 4. 振動子系における相互作用の有無が位相応答曲線の推定に与える影響について, 枘井啓貴, 青柳富誌生, 日本物理学会 2017年年秋季大会(2017/9/21-2017/9/24), 岩手大学(上田キャンパス), 2017/9/24, 口頭発表.
 5. Design of Oscillator Networks for Generating Signal with Prescribed Statistical Property, 6th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, Neapolis University of Pafos, Cyprus, Aug. 28-31, 2017, Tatsuo Yanagita
 6. 財の交換モデルにみられる富の分布について, マクロ経済動学の非線形数理, 京都大学数理解析研究所(2017/08/7-9), 柳田達雄
 7. Emergence of locally energetic motion in chain-type systems, Dynamics Days Asia Pacific 9, Hong Kong University of Science and Technology, Hong-Kong, Dec. 14-17, 2016, Tatsuo Yanagita and Teturo Konishi
 8. Energy concentration and its relaxation to equilibrium in chain-type Hamiltonian systems, Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science, Kagoshima University (2016/10/03-06), Tatsuo Yanagita and Tetsuro Konishi
 9. 荒井貴光, 青柳富誌生, 二部グラフ構造を持つ位相振動子型連想記憶モデル, 日本物理学会 2016年年秋季大会, 2016年09月13日~2016年09月16日, 金沢大学角間キャンパス
 10. 今井貴史, 青柳富誌生, 位相記述が破綻する摂動強度を予測するための基盤的方法, 第71回年次大会, 2016年03月19日~2016年03月22日, 東北学院大学(宮城県, 仙台市)
 11. 衝突に起因する鎖状分子の運動, 日本物理学会 第71回年次大会、東北学院大学 (2016/03/19), 柳田達雄, 小西哲郎
 12. Tatsuo Yanagita, Design of oscillator networks, synchronization and chaos, International Workshop New Frontiers in Nonlinear Sciences (国際学会), 2016年03月06日~2016年03月08日, Hotel KANRONOMORI, Niseko, JAPAN
 13. Applications of Extended Ensemble Monte Carlo for Dynamical Systems, Dynamics Days Europe 2015, Exeter, England Sep. 6-10, 2015, Tatsuo Yanagita

〔図書〕(計 1件)

1. 「地形現象のモデリング」遠藤徳孝・小西哲郎・西森 拓・水口 毅・柳田達雄 編, 名古屋大学出版会 (2017), 第 2 章 (pp.41-65)河川～流路形成の計算機実験

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

<http://www.phenomath.osakac.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柳田 達雄 (YANAGITA, Tatsuo)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：80242262

(2)研究分担者

青柳 富誌生 (AOYAGI, Toshio)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：90252486

(3)研究協力者

Alexander Mikhailov (アレキサンダー・ミハイロフ) Fritz-Haber 研究所