

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：37112

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24650120

研究課題名(和文)スパイク結合型神経回路網のカオス同期を用いた動的情報コーディングの研究

研究課題名(英文)Study on a dynamic information coding using chaotic synchronization in the spike coupled neural network

研究代表者

山口 明宏 (Yamaguchi, Akihiro)

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号：60281789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、神経回路網におけるカオス同期を用いた動的な情報コーディングの構築を目的として、カオス的スパイク応答を示す神経細胞モデルの二次元結合系の解析を行った。具体的には、スパイクレスポンスモデルで記述される神経細胞モデルに背景振動を付加してカオス的スパイク応答を示す神経細胞モデルを構築し、その二体結合モデルにおいて、同期率、自己相関、相互相関の解析を通してカオス的同期応答領域があることを数値的に示した。更に二次元結合系を構成し、画像入力に対する応答を解析した結果、スパイク応答のカオス的同期による入力パターンの特徴の結び付けの可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：A synchronized response of two-dimensional coupled system of chaotic spike response neurons (CSRNs) is investigated in the view point of the neural coding. The spike response model is employed as a neuron model and extended to exhibit chaotic spike responses by adding a background sinusoidal oscillation. For the coupled system of two CSRNs, the parameter region where chaotic synchronization occurs, is obtained by the numerical analysis of synchronization ratio, auto-correlation and cross-correlation. For the two dimensional coupled system of CSRNs, synchronized responses to visual stimuli are analyzed as an index of segmentation and feature linking. Consequently, resulting chaotic neural assemblies have high correlation among neurons with similar input. These results indicate the possibility of feature linking using the chaotic synchronization of spike responses.

研究分野：非線形力学系の情報学

キーワード：ニューラルコーディング カオス同期 スパイクレスポンスモデル セグメンテーション バインディング問題 GPGPU

1. 研究開始当初の背景

カオスを用いた情報コーディングの概念は、カオス通信の分野ではスペクトル拡散通信やカオス変調など盛んに研究されている。カオスの時系列は、a)信号系列の多様性、b)他の信号系列との非干渉性、c)信号の多重化を行った場合の再分離性など、情報コーディングに適した性質を持っており、神経回路網における情報コーディングとして、カオスの系列を用いることができれば、より多様な情報を表現できる可能性がある。

著者等は、時間方向の情報コーディングとして、スパイク系列発火タイミングの時間間隔にカオスダイナミクスを導入し、カオスダイナミクスの違いで情報を表現し、識別するシステムの研究を行っており、複数の情報源からのスパイク系列を重畳した重畳スパイク系列からスパイク系列に内在するダイナミクスを再構成することで、個々の情報源からのスパイク系列を分離でき、複数情報の同時多重表現が可能であることを示している。本研究では、これらの結果をさらに発展させて、脳における高次機能の一つである複数情報の関連性や結び付け問題を解決する新たな情報コーディングの構築を試みる。

2. 研究の目的

本研究では、複数情報の関連性や結び付け等の高次機能に適用可能な動的な情報コーディング原理の構築を大目標として、スパイク系列にカオス的ダイナミクスを導入したカオス的スパイク系列の同期によって複数の情報の関係性を表現する情報コーディングの構築を行う。具体的には次のステップで研究を進める。

- 1) カオス的スパイク応答ダイナミクスを有する神経細胞モデルの構築。
- 2) カオス的スパイク系列間の相互相関を用いた複数情報間の関連性の表現。
- 3) スパイク結合型神経回路網における複数情報の結び付け問題への適用。

更に応用として、視覚情報における物体のセグメント化および関連する物体間の関係性のカオス的スパイク同期によるコーディングを試みる。

3. 研究の方法

本研究では、基礎研究としてカオス的スパイク応答ダイナミクスを有する神経細胞モデルの構築と一次元結合系および二次元結合系におけるカオス同期の解析を行い、応用研究として視覚情報処理系での入力画像のセグメント化や特徴情報の結び付けに対してカオス的スパイク系列を用いた情報コーディングの概念の適用を行う。具体的には以下の3つの課題に取り組む。

課題 1: カオス的スパイク応答を示す神経細胞モデルの設計と一次元結合系におけるカオス同期および情報伝達構造の解析。

課題 2: 二次元結合系のモデル構築と二次

元結合系における局所的カオス同期および複数の局所的カオス同期の共存状態の解析。

課題 3: 局所的カオス同期集団の相互相関を用いた情報コーディングの動画像入力への適用と情報の結び付け能力の解析。

これらの課題を通してカオス的スパイク系列の同期を用いた情報コーディングの構築を行う。

4. 研究成果

(1) カオス的スパイク応答ダイナミクスを有する神経細胞モデルの構築として、本研究では、Gerstner と Kistler によって提案されたスパイクレスポンスモデル(SRM)(引用文献)を拡張してカオス応答を示す神経細胞モデルを構築した。SRM では、入力に対する神経細胞の応答がカーネル関数を用いて直接記述される。本研究では、引用文献と同様に神経細胞に正弦波の背景振動が加えられていると仮定し、スパイク発火後の活動電位を表すカーネル関数の初期値が背景振動の値で決定されるように SRM を拡張した。この拡張された SRM は、背景振動の振幅や周期、外部入力の強度に応じて多様なスパイク系列を発生させることが可能である。図 1 (上段)に外部入力強度に対する拡張された SRM のカオス応答の分岐図を示す。本研究では、スパイク発火時刻の背景振動における位相を解析することでスパイク系列がカオス性を有することを示した。具体的には、スパイク発火時刻の位相が一次元のカオス写像で決定されることを示した。更に図 1 (下段)に示すようにリアプノフ指数を計算し分岐図のカオス応答領域でリアプノフ指数が正になることを示した(〔雑誌論文〕)。本報告書では、拡張された SRM をカオス的 SRM(CSRM)と呼ぶ。

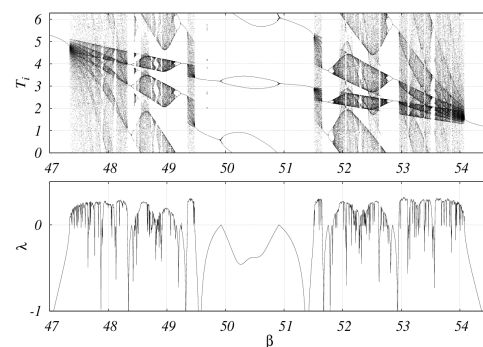


図 1 分岐図(上段)とリアプノフ指数(下段)

(2) CSRМ の結合系の基礎的な解析として、一方向二体結合系および双方向二体結合系におけるカオス同期の解析を行った。

まず、一方向二体結合系の解析においては、二つの CSRМ を 1 方向に結合し、それぞれの外部入力を変化させた場合の同期発火の比率を解析した。結果として、スパイク応答のカオス性を保持したまま同期が可能であることを数値実験で示した。更に、情報コーデ

イングの観点から、神経細胞の入力ダイナミクスに対する選択応答性に着目し、カオス応答を示す場合と周期応答を示す場合の選択応答特性を比較した。結果としてカオス性を示す場合のほうが入力ダイナミクスの違いに敏感に反応する傾向が見られた(〔雑誌論文〕)。

次に双方向二体結合系の解析においては、二つの CSRM を双方向に結合し、単一ニューロンの場合にカオス応答を示す同一の外部入力値を二つの CSRM に入力するモデルについて生成されるスパイク系列の相関構造を解析した。ここでシナプス結合に対応するカーネル関数を用いてスパイク結合をモデル化した。スパイク結合系では、リアプノフ指数の定義自体が困難なため、ここではスパイク系列の自己相関の指数的な減衰、および、相互相関が一定の位相差のもとで1となることをカオス同期の指標とした。結果として、図2(上段)に示すように結合強度を増していくとスパイク応答に分岐構造が生じており、図2(下段)に示すように自己相関値の第二ピーク値(AC^*)が1より小さく相互相関の最大値(CC^*)が1となる、カオス同期を保持しつつ二体の CSRM が同期する領域が存在することを発見した(〔雑誌論文〕)。

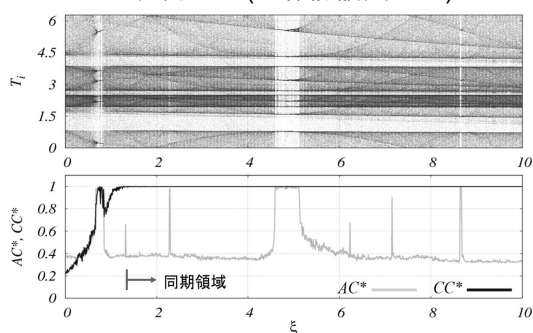


図2 二体結合系における分岐図と相関値

(3) 入力画像のセグメンテーションや特徴の結び付けを意図して、CSRM の二次元結合系であるセルラーニューラルネットワークのモデルを構築し、局所入力に対するスパイク同期応答を示す同期集団の形成を検証した。ここで、図3(左上)に示すように 20×20 セルのセルラーニューラルネットワークを構成し $G1$ から $G4$ の4つのニューロン集団に単一ニューロンの場合にカオス応答を示す同一の外部入力値を与え、その他のニューロン $G0$ については背景入力として別のカオス応答を示す同一の外部入力値を与えた。結合は近傍のニューロンとの興奮性結合とした。図3(右上)は、代表的なニューロンの応答のラスタプロットであり、4つの局所集団 $G1 \sim G4$ 、および背景 $G0$ でそれぞれ、スパイク応答が同期している。更に $G1 \sim G0$ については外部入力値が同一であるにもかかわらず異なる発火タイミングで同期している。図3(左下)は、各ニューロンの平均発火率であり、平均発火率では $G1 \sim G4$ の局所同期集団は区別できないことがわかる。これに対して、図

3(右下)は、局所同期集団 $G1$ の中心位置にあるニューロンと他のニューロンとの相互相関を計算したものであり、同一の局所同期集団内では相関が高く、他の局所同期集団とは相関が低くなっており、相互相関の意味で局所同期集団を区別できており、カオス同期集団の相互相関を用いた情報コーディングが実現できていると考えられる(〔雑誌論文〕)。

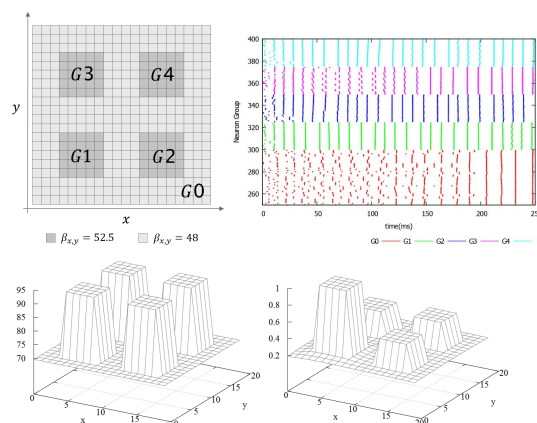


図3 二次元結合系における局所入力に対するカオス同期集団の形成

更に実画像のセグメンテーションに向けて、グレースケールのグラデーションパターンやモザイクパターンの入力に対するスパイク応答を解析した結果、入力値に近い連結領域にあるニューロンがカオス同期集団を形成し、入力値が近くても空間的に離れた集団とは相互相関が低くなる傾向がみられ、グレースケール入力パターンの場合でも相互相関の意味でカオス同期集団を区別できる可能性を示した(〔雑誌論文〕)。

(4) CSRM の結合系のシミュレーションにおいては、スパイク発火タイミングのニューロン間の相互依存性がボトルネックとなり、発火時刻の計算に多くの時間を要し、大規模なシミュレーションが難しいという課題があった。特に GPGPU を用いた並列化ではこの影響が大きく、並列化の効果を得ることが難しかった。これを解決するために、神経細胞間のシナプス結合に時間遅れを導入した結合モデルを構築した。時間遅れを導入することでシミュレーションの単一計算ステップ内では相互依存を考慮する必要がなくなり、GPGPU を用いた高速化が可能となった。これまでのモデルとの比較のため時間遅れに依存した応答のダイナミクスの変化を解析した結果、時間遅れの導入によって系のダイナミクスは変化するが、時間遅れが短い場合、時間遅れが無い場合とほぼ同等の応答を示すことを数値実験で確認した。

更にカオス同期を用いた情報の結び付けにむけて、モデルの拡張として各神経細胞に与える背景振動に位相差を導入した。背景振動の位相が異なる場合には、ニューロンの発

火ダイナミクスも異なるものとなるため同期しにくくなり、背景振動の位相が同じ場合には、外部入力と同じであれば、発火ダイナミクスが同一となるため同期しやすくなると考えられる。これを検証するために、同一の外部入力値を持つ CSRМ の二体結合系について、背景振動の位相差を変化させた場合の生成スパイク系列の相互相関を解析した。背景振動の位相差に対する相互相関の変化を図4に示す。ここで、マーカーは結合強度を表す。図4より、背景振動の位相差が0の場合に、相互相関値にピークがあり、結合強度の増加にともなって相互相関が1の同期が達成されることを検証した〔雑誌論文〕。この位相差に対する選択的応答性は、方位選択性などの同一の特徴の結び付けに適用することができると考えられる。

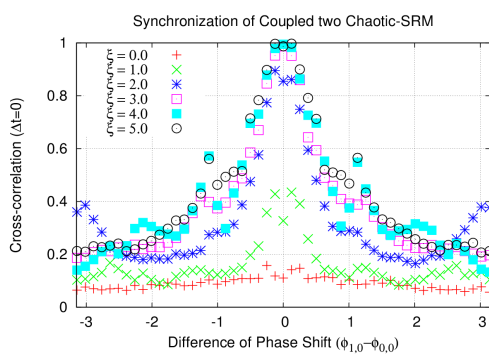


図4 背景振動に位相差に対する相互相関

(5) 画像の特徴情報の結び付けの検証実験として、Gray と Singer のネコ視覚野での実験(引用文献)を参考に、図5に示した2つの動く bar の動画像を二次元結合系に入力しスパイク応答の相関解析を行った。ここで、bar の画像が入力される領域では、単一細胞の場合にカオス応答を示す外部入力値を入力しそれ以外の場合の入力は0とした。ここで 40×40 セルのセルラーニューラルネットワークを用い、背景振動の位相に bar の進行方向に勾配を持たせることで bar の横方向の同期応答に選択性を持たせた。更に背景振動があるカオス応答の場合と背景振動がない周期的スパイク応答の場合とで結果を比較した。

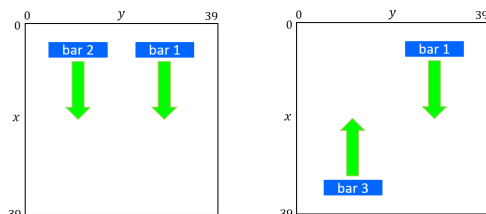


図5 入力動画像パターン

背景振動が有る場合の相互相関解析の結果を図6に示す。ここで、矢印で示した神経細胞のスパイク応答と他の神経細胞のスパイク応答の相互相関を計算している。図6の上段は時間差0での相互相関であり、下段は

最大相互相関である。また左側は、2つの bar が並んで同一方向に移動する場合であり、右側は2つの bar が反対方向に移動する場合である。図6より二つの bar が同一方向に移動する場合には、二つの bar に対応するスパイク応答に高い相関がみられる。また反対方向に移動する場合は、二つの bar が横方向に並んでいる場合でも二つの bar に対応するスパイク応答に相関はみられなかった。

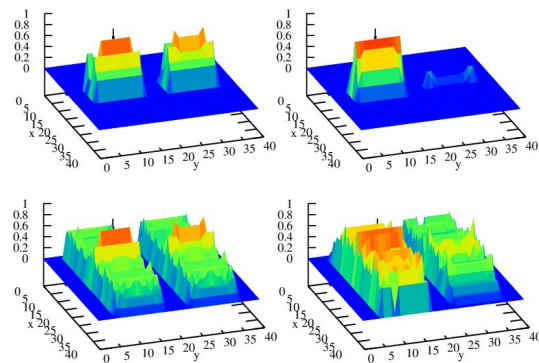


図6 カオス的スパイク応答の相関解析

次に背景振動が無い周期的なスパイク応答の相互相関を解析した結果を図7に示す。ここでは bar の進行方向に無関係に横方向に並んでいる場合は相関がみられる(上段)。更に最大相互相関は空間方向に周期構造をもっており、時間方向、空間方向ともに二つの bar の情報を結びつけることができないと考えられる。

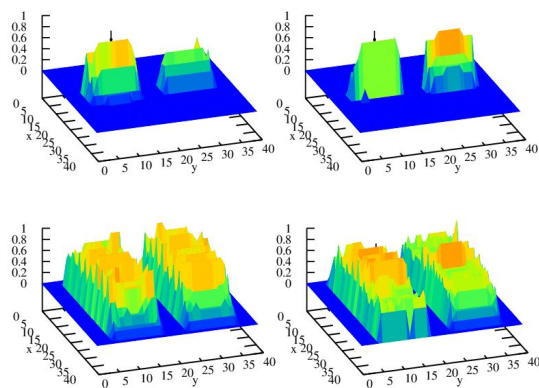


図7 周期的スパイク応答の相関解析

これらの結果は、神経細胞の応答がカオス性を有する場合には、同一方向に移動する二つの bar の情報を結びつけることができていると解釈でき、カオス的スパイク系列の同期を用いた情報コーディングの可能性を示していると考えられる〔雑誌論文〕。

(8) 最後に実画像の入力への応答の解析に向けて、カメラで撮影した動画像に対する応答のシミュレーションを行うシステムを構築した。ここで 160×120 セルの二次元セルラーニューラルネットワークを構成し、GPGPU を用いた並列化を行い2値化した動画像に対する応答を計算している。GPGPU には、

NVIDIA社 GTX680を使用し、CPUはIntel Core i5-4570を使用した。入力画像サイズが160×120の場合、構築したシステムではGPGPUを用いて、19200個のニューロンのシミュレーションと指定したニューロンと他のすべてのニューロンとの最大相互相関の解析を行い、結果を動画で表示することができる。システムの出力を図8に示す。左上がカメラからのグレースケール入力画像、右上が2値化し反転した入力画像、左下がニューロンの応答、右下が指定したニューロンと他のニューロンとの相互相関の解析結果である。カラーの図においては、赤が高い値、青が低い値を表す。図8右下の解析結果では、数字の「2」の部分のニューロンとの最大相互相関を計算しており、数字の「2」の部分全体で相関が高くなり同期集団を形成していることがわかる。

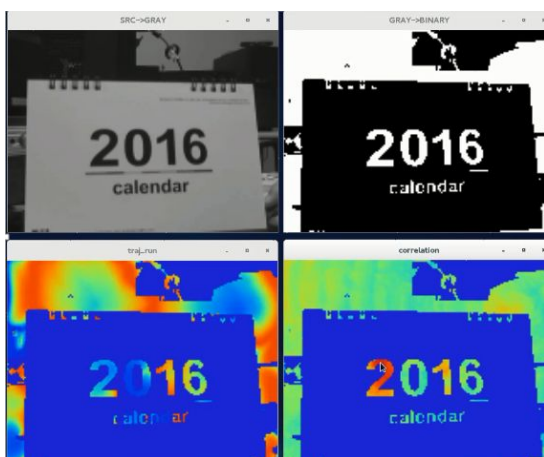


図8 実画像の入力に対するスパイク応答の相互相関解析

以上、本研究ではカオス的スパイク系列の同期を用いた新たな情報コーディングの構築に向けて、カオス的スパイク応答を示す、カオス的スパイクレスポンスモデルの構築、構築したモデルの二体結合系での同期応答、情報伝達構造の基礎的な解析、二次元結合系における画像パターン入力に対するカオス的スパイク系列の相互相関を用いた同期集団の識別、画像の特徴情報の結び付けに関して研究を行った。結果として、モデル上での数値計算によってカオス的スパイク系列の同期を用いた情報の結び付けが可能であることを示した。更に実画像に対する応答を解析するシステムを構築し、入力値の類似した領域でスパイク応答の相関が高くなることを示した。これらの結果より、本研究で目標としていたカオス的スパイク系列の同期を用いた情報コーディングの構築については、一定の成果が得られた。実際の神経系での実現可能性については、今後の継続した課題として取り組んでいきたい。

<引用文献>

Gerstner, W., & Kistler, W., "Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity," Cambridge University Press, 2002

Lee, G. & Farhat, N.H., "The Bifurcating Neuron Network 1," Neural Networks, Vol. 14, pp. 115-131, 2001

Gray, C.M., Koenig, P., Engel, A.K., & Singer, W., "Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties," Nature, 338, pp.334-337, 1989

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4件)

山口明宏, スパイクレスポンスモデルの一方二体結合系におけるカオス同期, 福岡工業大学情報科学研究所所報, 査読無, Vol. 24, 2013, pp. 1-6

山口明宏, カオス的スパイクレスポンスモデルの二次元結合系における局所同期を用いた情報コーディング, 福岡工業大学情報科学研究所所報, 査読無, Vol. 25, 2014, pp. 1-6

Masayuki Fujiwara, Akihiro Yamaguchi, Masao Kubo, "Synchronized Response to Grayscale Image Inputs in Chaotic Cellular Neural Network," Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 査読有, Vol.2, No.1, 2015, pp. 26-29, DOI: 10.2991/jrnal.2015.2.1.7

Akihiro Yamaguchi, Satoshi Arakane, Masao Kubo, "Feature Linking using Synchronized Responses in Chaotic Cellular Neural Networks for Visual Stimulus of Moving Objects," Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 査読有, Vol.2, No.4, 2016, pp. 230-233, DOI:10.2991/jrnal.2016.2.4.6

[学会発表](計5件)

山口明宏, 久保 正男, スパイク応答型神経細胞モデルの一次元結合系における局所的カオス同期について, 日本応用数理学会 2013年度年会, 2013年9月9-11日, アクロス福岡(福岡県・福岡市)

Masayuki Fujiwara, Akihiro Yamaguchi, Masao Kubo, " Synchronized Response to Grayscale Image Inputs in the Chaotic Cellular Neural Network," The 2015 International Conference on Artificial Life and Robotics, January 10-12, 2015, Horuto Hall, Oita, JAPAN

藤原 正幸, 山口 明宏, 久保 正男, カオスのセルラーニューラルネットワークにおける画像入力に対する同期応答の解析, 日本応用数理学会 2015 年 研究部会 連合発表会, 2015 年 3 月 6-7 日, 明治大学(東京都・中野区)

Akihiro Yamaguchi, Satoshi Arakane, Masao Kubo, " Feature Linking by Synchronized Response in Chaotic Cellular Neural Network for Visual Stimulus of Moving Objects," The 2016 International Conference on Artificial Life and Robotics, January 29-31, 2016, Okinawa Convention Center, Ginowan, JAPAN

山口 明宏, 荒金 聡, 久保 正男, カオスのセルラーニューラルネットワークにおける動的な視覚刺激に対する同期応答の解析, 日本応用数理学会 2016 年 研究部会連合発表会, 2016 年 3 月 4-5 日, 神戸学院大学(兵庫県・神戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 明宏 (Yamaguchi Akihiro)

福岡工業大学・情報工学部・准教授

研究者番号 : 60281789

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し