

「脳を創る」

平成9年度採択研究代表者

合原 一幸

(東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授)

「脳の動的時空間計算モデルの構築とその実装」

1. 研究実施の概要

本研究では、脳神経系のカオス性と非同期性に着目して、脳型時空間カオスダイナミクスおよび脳型時空間パルスダイナミクスに関する数理モデルを構築してその非線形ダイナミクスを理論的に解析し、脳神経系における動的時空間情報処理機構のモデル化およびその工学的応用可能性に関する様々な研究を行なった。また、これらの数理モデルに基づいて、カオスニューラルネットワークシステムや非同期パルスニューラルネットワークの集積回路化とその応用などの実装研究を行なった。さらに、数理モデルと関連して海馬神経回路の時空間応答特性の生理実験解析を行なった。

2. 研究実施内容

本研究は、(a)理論研究、(b)実装研究、(c)実験研究の 3 つのグループから成り、特に(a)および(b)を中心に研究を行なってきている。その研究実施内容は以下の通りである。(なお、5 にリストアップしたメンバー以外にも、多くの大学院生が積極的に研究に参加している)

(a) 理論研究

理論研究に関しては、5-1)のメンバーを中心にして、同期型および非同期型カオスニューラルネットワーク等の数理モデルを用いて、脳型時空間計算ダイナミクスに関する以下の理論解析を行なった。

(1) 脳型時空間カオスダイナミクスの数理解析

本研究では、ヤリイカ巨大軸索のカオス応答特性をヒントにしてモデル化したカオスニューロンモデルから構成された「同期型カオスニューラルネットワーク」モデルを用いて、脳型時空間カオスダイナミクスに立脚した情報処理機能とその力学構造に関して以下のような研究を行なった。

- (1-1) 動的連想記憶ネットワークにおける動的連想とその力学構造に関して、以下の結果が得られた:記憶パターンの部分入力によるカオスダイナミクスの瞬時引き込み特性、記憶想起特性のネットワーク規模依存性、不変部分空間の束構造と各不変部分空間上でのアトラクタの分岐、複数次カテゴリーのパターンのカオスダイナミクスによる動的バインディングと重複パターンの分離、
- (1-2) 組合せ最適化ネットワークにおける動的探索とその力学構造に関して、以下の結果が得られた:カオスニューロダイナミクスの大規模巡回セールスマン問題(TSP)、2次割り当て問題(QAP)や照明設計問題への応用、カオスニューロダイナミクスとタブーサーチ法などのヒューリ

スティック解法との融合モデルの改良、

(1-3) カオスニューロンモデルさらには Amari-Hopfield ニューロンモデル、FitzHugh-Nagumo ニューロンモデルから成るニューラルネットワークの局所的小および大域的な分岐構造を、結合係数、 α 関数の遅れ時間などの諸パラメータに着目して解析した。

(2) 脳型時空間パルスダイナミクスの数理解析

本研究では、「非同期カオスニューラルネットワーク」、「パルスプロパゲーションネットワーク」等の非同期パルス結合ニューラルネットワークモデルと「ダイナミカルセルアセンブリー仮説」をベースとして、時空間パルスコーディングとそれに基づく情報処理機構に関して以下のような研究を行なった。

(2-1) 時空間スパイクコーディングを実現するニューロン特性に関して、以下の結果が得られた: STDP (Spike Timing Dependent synaptic Plasticity) の数理解析とそのネットワークへの応用、クラス I, II ニューロンモデルの差異およびギャップ・ジャンクションの時空間情報処理特性への影響、

(2-2) コインシデンスディテクタ・ニューロンや他のダイナミカルニューロンモデルから成るニューラルネットワークにおける、ニューラルコーディングや情報処理機能とその力学構造に関して、以下の結果が得られた: 双方向機能的結合によるバインディング機能の実現、発火率コーディングと時空間パルスコーディングのデュアルコーディングの可能性、特に同一のニューラルネットワークにおいてノイズ等のパラメータの変化に伴ってデュアルコーディングが実現される機構の解明、

(2-3) ダイナミカルニューラルネットワークモデルにおける、同期発火の時間間隔時系列に基づいた外界の動的情報構造の時空間コーディングやコヒーレンス共振現象の発生機構を明らかにした。

(3) 順伝播型強化学習法則の数理解析

サルを用いた選択的注意課題において得られた前頭前野ニューロン活動データの解析結果を踏まえて、前頭前野の神経回路網モデルに関して“順伝播型強化学習法則”を提案しその有効性を検証した。

(4) カオス的ダイナミクスの複雑さの数理解析

本研究では、アナログ計算の基礎としてカオス的ダイナミクスの複雑さと可能な機能を広い視野に立って特徴づけるため、Kolmogorov Complexityを用いたSturmian系列を生成する力学系の複雑さ解析、音声カオス、カオス暗号などのカオス工学に関する広範な数理解析を行なった。

(b) 実装研究

実装研究に関しては、5-(2)のメンバーを中心にして、同期型カオスニューラルネットワークや非同期パルスニューラルネットワークなどの数理解析に関して、以下のハードウェア化研究を行なった。

(1) 大規模カオスニューラルネットワークシステム

大規模カオスコンピュータの構成要素となるカオスニューロチップを完成させた。3 内部状態を持つカオスニューロンを $0.5 \mu\text{m}$ CMOS 半導体技術で集積回路化した。さらにチップを用

いたシステム全体の設計を行なった。また、回路動作を詳細に記述したエミュレータにより、システムの詳細な動作を検証した。

(2) 高速に最適化問題を解くスイッチトカレント(SI)カオスニューロンシステム

並列分散処理が可能な多数のアナログカオスニューロン回路で二次割当て問題を解くためのニューロン集積回路とシステムの構成法を提案し、その性能を調べた。

(3) フラクタルコーディング・カオスニューラルネットワーク

カオスニューラルネットワークを用いて、カオス時系列入力 of 記号力学的情報を、状態空間でのフラクタル性にコードするアナログ電子回路を個別電子部品を用いて試作してそのデータを解析するとともに、その集積回路実装を行なった。

(4) 非同期パルスニューラルネットワーク

活動電位の詳細なタイミングにより処理を行なう非同期パルスニューロンを、連続時間と連続値が扱えるアナログ回路技術で集積回路化した。また、パルスの時間情報を保存できるパルスバス伝送方式を提案した。

(5) 非線形抵抗回路

容量結合 MOSFET を用いた非線形抵抗素子を応用した多様な N 字型非線形特性を実現するとともに、その応用回路を提案した。

(6) パルス形ハードウェアニューロンモデルの実装と汎用化

IC 化可能な極めて単純なパルス形ハードウェアニューロンモデルの開発、カオスニューロンモデルを基にしたハードウェアカオスニューロンモデルの開発、拡張 BVP モデルと対応するバーストニューロンモデルを基にした IC 化可能なバーストニューロンモデルの開発等を行った。

(c) 実験研究

実験研究に関しては、5-(3)のメンバーを中心にして、脳型時空間計算モデルの実験的検証およびその結果の数理モデル化へのフィードバックを目的とした、生理実験およびデータ解析手法の構築を行なった。まず、短期記憶の学習則に関連して、海馬神経回路の入力-入力および入力-出力タイミング依存性長期増強と長期抑圧の時間窓の存在を明らかにした。また、実験的に観測された神経スパイク列時空間データからニューロン間の動的因果性を検出するデータ解析手法を提案した。

3. 研究実施体制

(1) 理論研究グループ

① 合原一幸(東京大学、教授)

② 研究項目

- ・ 脳型動的時空間計算の基本数理モデルの構築とその応用
- ・ 順伝播型強化学習法則の数理モデリング
- ・ ギャップ・ジャンクションによって結合された抑制性介在細胞系の動力学
- ・ カオスニューラルネットワーク力学構造

- ・ 多数個ニューロンの結合系の分岐解析

(2) 実装研究グループ

① 堀尾喜彦(東京電機大学、教授)

② 研究項目

- ・ 大規模カオスニューラルネットワークシステムの構築および非同期パルスニューラルネットワークのVLSI化
- ・ 汎用化したパルス形ハードウェアカオスニューロンモデルの実装とニューラルコーディングの解明
- ・ フラクタルコーディング・カオスニューラルネットワークの実装研究

(3) 実験研究グループ

① 塚田 稔(玉川大学、教授)

② 研究項目

- ・ 海馬神経回路のダイナミクスと記憶情報処理
- ・ 神経スパイクデータの時空間解析手法の構築

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

A. 学術論文

- M. Watanabe, K. Nakanishi and K. Aihara: "Solving the Binding Problem of the Brain with Bi-directional Functional Connectivity", *Neural Networks*, Vol.14, pp.395-406 (2001).
- M. Komuro and K. Aihara: "Hierarchical Structure among Invariant Subspaces of Chaotic Neural Networks", *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol.18, No.2, pp.335-357 (2001).
- J. Kuroiwa, S. Nara and K. Aihara: "Response Properties of a Single Chaotic Neuron to Stochastic Inputs", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.11, No.5 (2001), pp.1447-1460 (2001).
- N. Ichinose and K. Aihara: "Detection of Mutual Determinism between a Pair of Spike Trains", *Biological Cybernetics*, Vol.85, pp.327-333 (2001).
- O. Araki and K. Aihara: "Dual Information Representation with Stable Firing Rates and Chaotic Spatiotemporal Spike Patterns in a Neural Network Model", *Neural Computation*, Vol.13, No.12, pp.2799-2822 (2001).
- N. Masuda and K. Aihara: "Synchronization of Pulse-coupled Excitable Neurons", *Physical Review E*, Vol.64, 051906, pp.1-13 (2001).
- J.K. Ryeu, K. Aihara and I. Tsuda: "Fractal Encoding in a Chaotic Neural Network", *Physical Review E*, Vol.64, 046202, pp.1-6 (2001).
- H. Kitajima, T. Yoshinaga, K. Aihara and H. Kawakami: "Burst Firing and Bifurcation in

Chaotic Neural Networks with Ring Structure”, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol.11, No.6, pp.1631-1643 (2001).

- 関根好文, 隅山正巳, 佐伯勝敏, 合原一幸:「エンハンスメント型 MOSFET による λ 型ニューロンモデル」, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J84-C, No.10, pp.988-994 (2001).
- I. Tokuda, T. Miyano and K. Aihara:“Surrogate Analysis for Detecting Nonlinear Dynamics in Normal Vowels ”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.110, No.6, pp.3207-3217 (2001).
- K. Tsumoto, T. Yoshinaga and H. Kawakami:“Bifurcations in Synaptically Coupled BVP Neurons”, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol.11, No.4, pp.1053-1064 (2001).
- T. Yoshinaga and H. Kawakami:“Chaotic Wandering and Bifurcations in Coupled Chaotic Neurons”, Journal of Nonlinear Analysis — Theory, Methods and Applications, Vol.47, No.8, pp.5357-5365 (2001).
- N. Masuda and K. Aihara:“Cryptosystems with Discretized Chaotic Maps”, IEEE Trans. CAS 1, Vol.49, No.1, pp.28-40 (2002).
- J. Matsuoka, Y. Sekine, K. Saeki, and K. Aihara:“Analog Hardware Implementation of a Mathematical Model of an Asynchronous Chaotic Neuron”, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E85-A, No.2, pp.389-394 (2002).
- 佐伯勝敏, 関根好文, 合原一幸:「エンハンスメント型 MOSFET を用いたパルス形バーストニューロンモデル」電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J85-C, No.3, pp.174-180 (2002).
- K. Tsumoto, T. Yoshinaga and H. Kawakami:“Bifurcations of Synchronized Responses in Synaptically Coupled Bonhoffer-van der Pol neurons”, Physical Review E, Vol.65, No.3, 036230, pp.1-9, (2002).

B. 国際会議

- G. Tanaka, S. Murashige and K. Aihara:“Bifurcation Analysis of an Ocean Internal Wave Model”, Proc. of 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.1, pp.7-10 (2001).
- T. Sekine, M. Sakagami, M. Watanabe and K. Aihara:“Comparison between PSTH and Mutual Information on Neuronal Data”, Proc. of 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.1, pp.39-42 (2001).
- T. Ohnishi and K. Aihara:“Neural Response and Spatio-temporal Learning”, Proc. of 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.1, pp.47-50 (2001).
- M. Adachi, M. Kanakubo and K. Aihara:“An Analyses of Response of Associative Chaotic Neural Networks to Partial Pattern Inputs”, Proc. of 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.1, pp.147-149 (2001).
- Y. Osana and K. Aihara:“A Solution of the Binding Problem with Chaotic Neurodynamics”,

Proc. of 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.1, pp.155–158 (2001).

- M. Watanabe and K. Aihara: “Forward Propagating Reinforcement Learning Inspired by Neuronal Activity in Monkey Prefrontal Cortex”, Proc. of 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.2, pp.581–583 (2001).
- M. Watanabe: “Contextual Modulation with Functional Connectivity in a Spiking Neural Network”, Proc. of 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, pp.581–583 (2001).
- K. Tsumoto, T. Yoshinaga, K. Aihara and H. Kawakami: “Bifurcations in a Synaptically Coupled System of Hodgkin–Huxley Neurons with a Periodic Alpha–function Train”, Proc. of Int. Tech. Conf. on Circuit/Systems, Computers and Communications, Vol. II, pp.1030–1033 (2001).
- K. Tsumoto, T. Yoshinaga, K. Aihara and H. Kawakami: “Bifurcations in a Synaptically Coupled System of Hodgkin–Huxley Neurons with a Periodic Alpha–function Train”, Abstract Book of 4th Int. Workshop on Neuronal Coding 2001, pp.105–108 (2001).
- Y. Sekine, J. Matsuoka, K. Saeki and K. Aihara: “Analog Circuits of Chaotic Neuron Model based on Mathematical Equations”, Proc. 2001 IEEJ International Analog VLSI Workshop, pp.25–30, Bangkok, Thailand (2001).
- K. Saeki, N. Kashiwagi, Y. Sekine and K. Aihara: “Pulse–Type Hardware Bursting Neuron Model for IC”, Proc. 2001 IEEJ International Analog VLSI Workshop, pp.7–12, Bangkok, Thailand (2001).
- J. Matsuoka, H. Nakashima, K. Saeki, Y. Sekine and K. Aihara: “The Response Characteristics of a Pulse–type Hardware Chaotic Neuron Model using CMOS”, Proc. The 2001 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC–CSCC01), E4–5, pp.612–615, Tokushima, Japan (2001).
- K. Matsuda, Y. Horio and K. Aihara: “A Simulated LC Oscillator using Multi–input Floating–gate MOSFETs”, Int. Symp. on Circuits and Syst., Vol.3, pp.763–766, Sydney, Australia (2001).
- K. Tanaka, Y. Horio and K. Aihara: “A Modified Algorithm for the Quadratic Assignment Problem using Chaotic–neuro–dynamics for VLSI Implementation”, Int. Joint Conf. on Neural Networks, pp.240–245, Washington DC, U.S.A. (2001).
- Y. Horio and K. Aihara: “A Large–scale Chaotic Neuro–computer”, Proc. Joint Symp. for Advanced Science and Technology, pp.15–20, Hatoyama, Japan (2001).
- T. Kobayashi, L. Chen and K. Aihara: “Stability and Bifurcation Analysis of Robust Circadian Oscillators”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th ’02), Vol.1, pp.58–61 (2002).

- J. Matsuoka, Y. Sekine, K. Saeki and K. Aihara:“Pulse-type Hardware Chaotic Neuron Model Constituting from CMOS Processing”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.62-65 (2002).
 - N. Ichinose and K. Aihara:“A Design Method of Model Gene Networks”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.66-69 (2002).
 - Y. Morishita and K. Aihara:“A Genetic Network Model on Selective Expressions”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.70-73 (2002).
 - Y. Ono, H. Suzuki, J. Murakami, T. Shimosawa and K. Aihara:“Grazing Bifurcation and Mode-Locking in Reconstructiong Chaotic Dynamics”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.102-107 (2002).
 - H. Tanaka and K. Aihara:“Dimension Analysis of the Hodgkin-Huxley Equations with Noise: Effect of Random Noise on Chaos”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.108-111 (2002).
 - K. Fukuda and K. Aihara:“Symbolic Dynamics of Bimodal Maps and Homomorphism”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.116-119 (2002).
 - M. Hasegawa, T. Ikeguchi and K. Aihara:“Tabu Search for Traveling Salesman Problems”, Proc. of the Seventh Int. Symp. on Artificial Life and Robotics (AROB 7th '02), Vol.1, pp.120-123 (2002).
 - 合原一幸:「デジタルかアナログかー遊びの空間」in『20 世紀の定義 [6] ゲームの世界』(編集委員 樺山紘一・坂部 恵・古井由吉・山田慶兒・養老孟司・米沢富美子), pp.177-191, 岩波書店 (2002).
 - 合原一幸:「神経系のカオスー複雑性に秘められた機能」in『第三世代の大学 -東京大学新領域創成の挑戦』(似田貝香門 編), pp.60-61, 東京大学出版会 (2002).
 - 堀尾喜彦:「カオスニューロコンピュータの実装」, Computer Today, Vol.18, No.6, pp.24-31, サイエンス社 (2001).
- (2) 特許出願
国内3件、外国なし