

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25730175

研究課題名(和文) 動的シナプスを含む神経回路網のダイナミクスとその工学的応用の研究

研究課題名(英文) Dynamics of neural network with dynamic synapses and its application

研究代表者

香取 勇一 (Katori, Yuichi)

東京大学・生産技術研究所・研究員

研究者番号：20557607

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：皮質局所神経ネットワークの数理モデルを構築した。提案モデルは実験的に観測されている前頭前野ニューロンの活動の時系列を定性的に再現する。一時的に結合強度が変化するシナプス群(シナプス・アセンブリ)の概念を数理モデルとして明確にし、それが脳内での情報表現に大きく関わることを提案した。また動的シナプスを含む連想記憶ネットワークなど様々な条件でのシステムの解析に取り組み、その動力学特性を明らかにした。さらに神経ネットワークの数理モデル研究の知見を基に、プログラム可能な集積回路に連想記憶ネットワークを実装することで、神経ネットワークダイナミクスを工学的に応用するための基盤を確立した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a mathematical model of local cortical neural network. The proposed model reproduces the experimentally observed neural activities on prefrontal cortex. We mathematically clarify the concept of synaptic assemblies which characterize a temporally strengthened group of synapses and contribute information representation in the brain. We elucidate dynamical properties on several neural network with dynamic synapses, i.e. the associative memory network. We established the basis of engineering application of neural dynamics by implementing the associative memory network on a programmable device.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：神経ネットワーク 動的シナプス 短期的シナプス可塑性 連想記憶ネットワーク 数理モデル 計算論的神経科学

1. 研究開始当初の背景

ニューロンは、スパイク（活動電位）と呼ばれるパルス状の電気信号を発生し、化学シナプスを介して結合した別のニューロンに信号を伝える。活動電位は軸索上を伝搬し、シナプス前ニューロンの神経膜内へのカルシウムイオンの流入および神経伝達物質の放出を経て、シナプス後ニューロンの神経膜にシナプス電流を生じる。活動電位が連続して発生したときには、カルシウムイオン濃度の変化や、放出可能な神経伝達物質の枯渇が起き、信号伝達効率が一過性に变化する。このような短期的シナプス可塑性の性質は、電気生理実験により詳細に調べられており、伝達効率が一時的に減少する減衰型シナプスと、増強される促進型シナプスの存在が知られている。この性質はシナプス長期増強/抑圧（LTP/LTD）とは区別される。単一の動的シナプスの特性はよく研究されている一方で、動的シナプスによる多数の結合を含む神経回路網の動力学特性、脳内の情報処理における役割に関しては未解明の部分が多い。申請者らは、これまでに動的シナプスを含む神経回路網の数値モデルを研究してきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、動的シナプスを含む神経回路網の動力学特性および脳内の情報処理における役割を解明し、その工学的な応用のための基盤を確立することである。計画の具体的な研究項目は、1) 大規模神経回路網モデルの構築・解析、生理実験データを踏まえた検証、2) 統計力学の手法を用いた神経回路網ダイナミクスの詳細な解析、3) 電子回路による動的シナプスを含む神経回路網の工学的実装である。

3. 研究の方法

(1) 大規模神経回路網のモデルの構築と解析に関しては、生理学の知見を基にしたパラメータ値を用いて、数千個の神経細胞ネットワークを構築し、その数値シミュレーションを行い解析した。また平均場モデルと分岐解析により、その動力学特性の詳細を研究した。また生理学データを用いて数値モデル検証した。

(2) より抽象化された神経ネットワークモデルの研究として、確率的2状態ニューロンモデルを基にネットワークモデルを構築した。数値シミュレーションに加え、平均場理論や分岐解析の手法を用いて、その特性を詳しく解析した。

(3) 神経細胞やシナプスの数値モデルの解析の結果に基づき、デジタル電子回路に神経ネットワークモデルを実装し、その性能評価を行った。特に神経ネットワークの本質的な特性を保存したまま、回路規模を少なく抑える設計手法を用いた。

4. 研究成果

(1) 大規模神経回路網モデルの研究に関しては、スパイクング・ニューロンを基に皮質局所神経ネットワークのモデルを構築した。特に前頭前野の行動計画に関わる局所ネットワークを対象とした。ゴール指向型行動計画課題中のサルの前頭前野からの神経活動の記録実験の結果から、複数のステップから構成される行動の計画に前頭前野が重要であることが明らかになっていた。また前頭前野には動的シナプスのなかでも促進型のシナプスが分布するという知見をもとに数値モデルの構築を行った。

実験的には各動作ステップに対応する神経細胞の存在が明らかになっており、動作の直前に特定の神経細胞が活動することが知られている。さらにその中の一部の神経細胞は動作の直前のよりも以前、行動を計画する段階でも一過性に活動が高まることが明らかになっていたが、そのメカニズム、役割は不明であった。提案モデルは実験的に観測されている前頭前野ニューロンの活動の時系列を定性的に再現するとともに、その情報処理メカニズムに関して、示唆を与える。行動計画課題で観測された実際の行動に先行する計画期における神経活動は、複数ステップの動作をスムーズに行うための準備と解釈することができる。促進型シナプスでは、前シナプスへカルシウムイオンが流入し、この影響が数秒間のこるため、これが短期記憶の役割を果たすと解釈することが出来る。提案モデルの力学的特性を詳しく解析するため、平均場モデルと分岐解析の手法を用いた。多くの変数から構成され、確率的に状態が変動するスパイクング・ニューロンモデルを、少数の自由度で構成される平均場モデルを導出した。平均場モデルを変数の時間スケールの違いに着目して解析することで、動的シナプスの短期的可塑性の影響により、力学系の構造が動的に変化（分岐）することを示した。これらの一連の解析により、一時的に結合強度が変化するシナプス群（シナプス・アセンブリ）の概念を数値モデルとして明確にし、それが情報表現に大きく関わることを提案することが出来た。

(2) 確率的2状態ニューロンモデルを基にした動的シナプスを含む神経ネットワークモデルの研究では、様々な条件でのシステムの解析に取り組み、その動力学特性を明らかにした。

まず動的シナプスを含む連想記憶ネットワークの解析では、動的シナプスにより多様なダイナミクスが生じることを明らかにした。また平均場モデルを導出したうえで、解析することで、その分岐構造を明らかにした。

さらに連想記憶ネットワークをスパースな記憶パターンに拡張し、より多様な動力学特性を持つこと、記憶容量が大きくなることを示した。

また興奮性・抑制性の不均一なネットワークの解析では、異なる振動数の2つの振動現象の結合(クロス・フリークエンシー・カップリング)を研究し、その現象が生じるメカニズムを解析した。結果として、位相関係が固定された振動と、固定されていない振動が、力学系の状態として定性的に区別できることを示し、その分岐構造を明らかにした。

短期的シナプス可塑性の短期記憶に関連する数理モデルの研究では、時系列データを基にネットワーク構造を学習させたネットワークにおいて、短期的シナプス可塑性が、短期記憶課題の性能を著しく向上させることを示した。

(3) 神経ネットワークを電子回路に実装する研究では、ニューロンの数理モデル研究の知見を基に、神経やシナプスの本質的な特性を保存したまま、回路実装コストを小さくする設計方法論を用いて、プログラム可能な集積回路(FPGA)に、スパイクング・ニューロンを基にした連想記憶ネットワークを実装した。さらにシナプス可塑性を導入し、ネットワークに外部入力として入力した時系列パターンを学習し、それを想起できることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara

"Enhanced Perceptual Function with Transitive Dynamics Induced by Dynamic Synapses" *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Vol.5, Springer, (査読あり、採録決定済み・印刷中)

森竜太、香取勇一、合原一幸

「動的シナプスはリカレントニューラルネットワークの短期記憶性能を向上させる」
生産研究 67 巻 3 号, p.295,
<http://doi.org/10.11188/seisankenkyu.67.293> (2015 年) (査読なし)

徐牧原、香取勇一、合原一幸 (Muyuan XU, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara), 「スパース符号化に基づく動的シナプスを持った神経回路網のダイナミクス」(*Dynamics on Sparse Coding-Based Neural Network with Synaptic Depression*). 生産研究 66 巻 3 号 p.295, <http://doi.org/10.11188/seisankenkyu.66.295>, (2014 年) (査読なし)

Yuichi Katori, Yosuke Otsubo, Masato Okada, Kazuyuki Aihara, "Associative Memory Network with Dynamic Synapses", *Advances in Cognitive Neurodynamics* Vol.4, p.479-483,

DOI:10.1007/978-94-017-9548-7_68,
Springer, (2014 年), (査読あり).

Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Naohiro Saito, Shun Yoshida, Kazuyuki Aihara, Hajime Mushiake, "Increased firing irregularity as an emergent property of neural-state transition in monkey prefrontal cortex", *PLoS ONE*, Vol. 8, 12, e80906, (2013 年), doi: 10.1371/journal.pone.0080906, (査読あり)

〔学会発表〕(計 11 件)

Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara

"Enhanced Perceptual Function with Transitive Dynamics Induced by Dynamic Synapses", International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2015). Sanya, China, (2015 年 6 月 6 日)

Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara,

"Dynamical Theory of cell and synaptic assemblies", Winter Workshop on Mechanism of Brain and Mind, 27, Hokkaido, Japan, (2015 年 1 月 7 日)

Ryota Mori, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, "short-term memory ability on recurrent neural network with dynamic synapses", Winter Workshop on Mechanism of Brain and Mind, 27, Hokkaido, Japan, (2015 年 1 月 7 日)

Takumi Sase, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, "Diverse cross-frequency coupling on a neural network with dynamic synapses," Winter Workshop on Mechanism of Brain and Mind, 27, Hokkaido, Japan, (2015 年 1 月 7 日)

Yuichi Katori, "Memory association dynamics on neural network with dynamic synapses", The Twenty Third Annual Computational Neuroscience Meeting (CNS 2014), Quebec, Canada, (2014 年 7 月 28 日).

Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, "Transitive Dynamics among Attractors on Neural Network with Short-Term Plasticity", The 1st International

Symposium on Neuromorphic and Non-linear Engineering (ISNNE2014), Tokyo, Japan (2014年2月21日)

Li Jing, Yuichi Katori, Takashi Kohno, "Digital Silicon Neuronal Network and its Application to Associative memory", The 1st International Symposium on Neuromorphic and Non-linear Engineering (ISNNE2014), Tokyo, Japan, (2014年2月21日)

Takumi Sase, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, "Bifurcation Analysis of Stochastic Inhomogeneous Neural Network with Excitatory and Inhibitory Neurons", The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling, Tokyo, Japan, (2013年11月12日)

Yuichi Katori, "Mathematical Modeling of Neural Dynamics and Brain functions" The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modelling, Tokyo, Japan, (2013年10月12日)

Yuichi Katori, Kazuhiro Sakamoto, Hajime Mushiake, Kazuyuki Aihara, "Reorganization of effective network structure with dynamic synapses in cortical circuit and its possible functions", The Twenty Second Annual Computational Neuroscience Meeting (CNS2013), Paris, France, (2013年7月14日).

Yuichi Katori, Yosuke Otsubo, Masato Okada, Kazuyuki Aihara, "Associative Memory Network with Dynamic Synapses", The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013 (ICCN2013), Sigtuna, Sweden, (2013年6月24日).

〔その他〕

ホームページ等

<http://researchmap.jp/katori>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香取 勇一 (Yuichi Katori)

東京大学・生産技術研究所・研究員

研究者番号：20557607