

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700253

研究課題名（和文） デジタルスパイクニューロンのパルス結合系：
学習法の構築と応用の基礎固め研究課題名（英文） Pulse-coupled systems of digital spiking neurons:
Consolidations of learning methods and application basics

研究代表者

鳥飼 弘幸 (HIROYUKI TORIKAI)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：20318603

研究成果の概要（和文）：本研究では離散状態と連続遷移時刻を持つ非同期式セルオートマトンで動作が記述される神経細胞モデルを提案する。また、生物の神経細胞が持つ非線形ダイナミクスを自動的に FPGA 上に獲得するための同モデルの学習則を提案する。さらに、同モデルの結合系を提案し、様々な時空間現象を理論と数値実験の両面から解析する。そして、それらの結果のニューラル人工器官への応用の可能性を探る。

研究成果の概要（英文）：In this study, a neuron model that is described by an asynchronous cellular automaton having discrete state and continuous transient time is proposed. Also, a learning algorithm for the model to reproduce nonlinear dynamics of a biological neuron automatically in an FPGA is proposed. Furthermore, a network of the model is presented and its various spatio-temporal phenomena are analyzed both analytically and numerically. Then, possibilities of applications of these results to neural prosthesis are explored.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：ニューラルネットワーク、離散状態系、FPGA、動的再構成可能VLSI

1. 研究開始当初の背景

これまでに微分方程式や離散時間写像を用いたニューロンモデルとそれらの結合系が多数提案され、工学的応用の可能性も大いに検討されて来ました。一方申請者は、離散状態と離散時間を持つ超離散スパイクニューロンモデルを提案して来ました。本研究では同モデルを一般化して、離散状態と連続時間を持つハイブリッドスパイクニューロンモ

デルを提案します。本報告書では両モデルをまとめてデジタルスパイクニューロン(DSN)と呼びます。DSNとそのパルス結合系に関する研究には「スパイクニューロンとそのパルス結合系の離散状態力学系を用いた新しいモデル化への挑戦」という学術的な興味に加えて下記の意義があります。連続状態ニューロンモデルは、主に非線形回路やスイッチトキャパシタ回路によって実装されます。この

とき典型的な学習パラメータは回路素子の非線形特性になりますが、そのハードウェア上での動的更新には多くの場合困難を伴います。これに対して DSN のダイナミクスを決定するパラメータはレジスタ間の結線パターンであり、その動的更新は FPGA(Field Programmable Gate Array)に代表される再構成可能デジタル回路技術を利用する事により容易に実現出来ます。すなわち DSN はハードウェア上での学習に非常に適しています。また同様の事が DSN のパルス結合系についてもいえます。

2. 研究の目的

近年、脳一機械インターフェイスと並んで、ニューラル人工器官が注目を集めています。感覚器のニューラル人工器官の代表例として人工内耳が挙げられますが、現状の人工内耳はシグナルプロセッサを応用したものが主流であり、より高性能な人工内耳を開発する為にはハードウェア化に適した精緻な聴覚神経細胞モデルが必要になります。また脳のニューラル人工器官の例として、非線形フィルタを用いて脳神経細胞の結合系の応答特性を近似する人工海馬が提案されていますが、より高性能な人工海馬を開発する為にはやはりハードウェア化に適した精緻な中枢神経細胞モデルが必要になります。そこで本研究では、聴覚神経細胞や中枢神経細胞のダイナミクスを近似するための DSN とその学習則を構築を目指して下記のテーマに取り組みます。

(1) DSN とその学習則の提案と解析

様々な信号を入力できる DSN を提案し、「入力のパラメータ値の変化に対して DSN の現象がどの様に変化するか」という所謂分岐現象を解析します。例えば様々な分岐現象の発生メカニズムを系統的に分類し、各現象の発生条件を理論的に解明します。また分岐解析の結果に基づいて、様々な入力に対する DSN の応答特性を明らかにします。そして、未知ニューロンの応答特性を近似するための DSN の学習則を提案し、学習の特性を解析します。

(2) パルス結合系の提案と解析

DSN のパルス結合系を提案し、同結合系が呈する多彩な時空間現象や入力に対する多彩な応答現象を系統的に分類します。また、それらの現象の発生条件などを理論と数値実験の両面から解明します。そして、未知のパルス結合系の応答特性を近似するための DSN のパルス結合系とその学習則を提案し、学習

の特性を解析します。

(3) FPGA 上での学習

FPGA 実装に適した DSN の学習則を提案し、それらのハードウェア的な特性を解析します。例えば、DSN のサイズ、近似誤差、学習の収束時間、消費電力、回路面積等の関係を理論と数値実験の両面から解析し、それらの結果を回路実験によって確認します。

(4) 応用の基礎固め

ニューラル人工器官への応用に特化した DSN の学習則を構築します。例えば、特定の神経細胞の電気生理学実験データの近似に特化した DSN とその学習則を構築し、人工ニューラル器官への応用の基礎を固めます。

3. 研究の方法

以下のように研究を遂行します。

(1) 新しい DSN の合成と解析

申請者がこれまでに提案してきた超離散スパイクニューロンモデルを一般化し、本研究では様々な入力を受け付ける事が出来る新しい DSN を合成します。また DSN の応答特性を理論と数値実験の両面から解析します。DSN の応答特性の解析手法として、連続状態と離散状態を有するハイブリッド写像を導出します。同ハイブリッド写像を用いる事により、DSN が呈する典型的な分岐現象の発生メカニズムを解明出来ます。またハイブリッド写像の解析手法の確立のために、非線形力学系の分岐理論とハイブリッドダイナミカルシステム理論を参考にします

(2) DSN の学習則の提案と解析

未知ニューロンの応答特性を近似するための DSN の学習則を提案し、近似誤差と学習時間の関係等の特性を理論と数値実験の両面から解析します。申請者はこれまでに、所望のスパイク列を発生するための超離散スパイクニューロンモデルの基礎的な学習法を提案して来ました。本研究ではこのアイデアを発展させて、未知ニューロンの応答特性を近似するための DSN とその学習則を提案します。また DSN の合成の際には神経細胞の微分方程式モデルの非線形ダイナミクス等を参考にします。これにより DSN による未知ニューロンの近似の性能の向上を図ります。

(3) パルス結合系の合成と解析

DSN のパルス結合系を提案し、その自律的な

時空間現象(入力が無い場合の時空間現象)と様々な入力に対する応答現象を解析します。また所望の応答特性を実現するためのパルス結合系の学習則を提案し、その基本的な特性を解析します。DSN のパルス結合の解析ツールとしてハイブリッド写像の結合系を導出します。同結合写像を用いる事により、パルス結合系が呈する多彩な現象を効率的に解析出来ます。

(4) DSN の学習則と結合系の FPGA 実装

DSN とその学習則は FPGA 実装における小型化・低消費電力化も考慮に入れて提案します。DSN の学習に関するハードウェア的な特性(例えば近似性能と回路面積と消費電力の関係)を理論と数値実験の両面から解析し、それらの解析結果を FPGA を用いた実装回路実験によって確認します。また DSN 単体に関する実装回路実験の結果を基に、DSN のパルス結合系の FPGA 実装も取り組み、様々な時空間現象の発生を確認して理論解析結果を実機実験にて検証します。

(5) 応用の基礎固め

上記(1)～(4)で得られる結果を基に、DSN のニューラル人工器官への応用の基礎を固めます。例えば、NEURON Simulator において公開されている電気生理学実験結果の近似に特化した DSN の学習法を提案し、実機実験にてその有用性を検証します。

4. 研究成果

主な研究成果とその意義を以下に記します。

(1) 新しい DSN の合成と解析

DSN を合成するための基礎として、連続状態神経細胞モデルを提案し、その非線形ダイナミクスとその信号符号化機能を考察しました。その結果を基にして様々な信号を入力として受け付けることが出来る一般化された DSN を新たに提案しました。また、写像法を参考にして、同一般化 DSN の動作を記述するハイブリッド写像を導出しました。同写像を用いる事により、DSN が呈する典型的な分岐現象の発生の条件を求めました。以上の成果の意義を簡潔にまとめると「従来の DSN に比べて生物の神経細胞の非線形ダイナミクスをより精緻に再現できる DSN の合成法を構築できた」と言えます。

(2) DSN の学習則の提案と解析

2-OPT と呼ばれるヒューリスティックなパラメータ最適化手法を参考にして、未知

ニューロンの応答特性を近似するための DSN の学習則を提案しました。同学習則の特性と、遺伝的アルゴリズムやタブサーチなどのより大掛かりなパラメータ最適化手法の特性とを比較しました。その結果、提案学習則が、計算コストがはるかに軽いにも関わらず、比較対象の手法に比べて遜色の無い学習能力を有することを緻密な数値実験によって示しました。以上の成果の意義を簡潔にまとめると「神経細胞のダイナミクスを自動的に獲得するため"simple but powerful"な DSN の学習則を構築できた」と言えます。

(3) パルス結合系の合成と解析

化学シナプスによる結合を念頭に置いた DSN のパルス結合系を提案し、同結合系が呈する様々な同期現象の分類手法を提案しました。それらの同期現象を解析する為に、DSN 単体に対するハイブリッド写像を用いた結合写像系を導出しました。同結合写像系を用いて提案パルス結合系が呈する様々な同期現象の発生条件を理論的に解明しました。以上の成果の意義を簡潔にまとめると「所望の応答特性を実現するためのパルス結合系の合成手法の開発の基礎を固められた」と言えます。

(4) DSN の学習則と結合系の FPGA 実装

DSN とその学習則を商用の FPGA に実装し、DSN が呈する様々な非線形現象の発生とオンチップでの学習機能を実機実験にて検証しました。また DSN のパルス結合系も商用の FPGA に実装し、様々な同期現象の発生を実機実験にて検証しました。使用する回路面積(Configuration Logic Block の数)と動作速度のトレードオフについても実機実験にて解析しました。以上の成果の意義を簡潔にまとめると「商用 FPGA による実機実験を通して、DSN の結合系と学習則の実装用のための専用 FPGA を設計するための基礎を固められた」と言えます。

(5) 応用の基礎固め

NEURON Simulator において公開されている海馬 CA3 における神経細胞の電気生理学実験結果の近似に特化した DSN の学習法を提案し、商用 FPGA を用いた実機実験によって、DSN がオンチップ学習によって自動的に電気生理学実験結果を近似することが出来ることを示した。以上の成果の意義を簡潔にまとめると「神経細胞の結合系に関する電気生理学実験結果を自動的にオンチップで近似するための手法を構築するための基礎を固められた」と言えます。

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 8 件)

- [1] Takashi Matsubara, Hiroyuki Torikai and Tetsuya Hishiki, A Generalized Rotate-and-Fire Digital Spiking Neuron Model and its On-FPGA Learning, IEEE Trans. CAS-II, Vol. 58, No. 11, pp. 677-681 (2011)
- [2] Hirofumi Ijichi and Hiroyuki Torikai, Analysis of m:n lockings from pulse-coupled asynchronous sequential logic spiking neurons, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E94-A, No. 11, pp. 2384-2393 (2011)
- [3] Tetsuya Hishiki and Hiroyuki Torikai, A Novel Rotate-and-Fire Digital Spiking Neuron and its Neuron-like Bifurcations and Responses, IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 22, No. 5, pp. 752-767 (2011)
- [4] Kai Kinoshita and Hiroyuki Torikai, A self-organizing pulse-coupled network of sub-threshold oscillating spiking neurons, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E94-A, No.1, pp.300-314 (2011)
- [5] Sho Hashimoto and Hiroyuki Torikai, A novel hybrid spiking neuron: Bifurcations, Responses, and On-chip learning, IEEE Trans. CAS-I, Vol.57, No.8, pp.2168-2181 (2010)
- [6] Tetsuro Iguchi, Akira Hirata and Hiroyuki Torikai, Theoretical and heuristic synthesis of digital spiking neurons for spike-pattern-division multiplexing, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E93-A, No.8,

pp.1486-1496 (2010)

- [7] Hiroyuki Torikai and Toru Nishigami, An artificial chaotic spiking neuron inspired by spiral ganglion cell: Paralleled spike encoding, theoretical analysis, and electronic circuit implementation, Neural Networks Vol. 22, pp. 664-673, (2009)
- [8] Hiroyuki Torikai and Toru Nishigami, Response of a chaotic spiking neuron to various periodic inputs and its potential applications, IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E92-A, No.8, pp.2053-2060 (2009)

[学会発表] (計 20 件)

- [1] T. Matsubara and H. Torikai, Dynamic Response Behaviors of a Generalized Asynchronous Digital Spiking Neuron Model, Proc. ICONIP 2011, Part III, LNCS 7064, pp. 395-404 (2011)
- [2] Y. Yamashita and H. Torikai, Generalized PWC Analog Spiking Neuron Model and Reproduction of Fundamental Neurocomputational Properties, Proc. ICONIP 2011, Part III, LNCS 7064, pp. 405-415 (2011)
- [3] H. Ijichi and H. Torikai, Basic analysis of synchronous phenomena from coupled asynchronous sequential logic neurons, Proc. NOLTA pp. 627-630 (2011)
- [4] T. Matsubara and H. Torikai, Basic Analysis of Generalized Asynchronous Digital Spiking Neuron Model, Proc. NOLTA, pp. 670-673 (2011)
- [5] T. Noguchi and H. Torikai, Ghost

stochastic resonance in an asynchronous sequential logic neuron model, Proc. NOLTA, pp. 318-321 (2011)

[6] Y. Yamashita and H. Torikai, Bifurcation based synthesis of a PWC analog spiking neuron model, Proc. NOLTA, pp. 184-187 (2011) (Student Paper Award).

[7] T. Matsubara and H. Torikai, A Novel Asynchronous Digital Spiking Neuron Model and its Various Neuron-like Bifurcations and Responses, Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 741-748 (2011)

[8] Y. Yamashita and H. Torikai, A Novel Piece-Wise Constant Analog Spiking Neuron Model and its Neuron-like Excitabilities, Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 717-724 (2011)

[9] H. Ijichi and H. Torikai, Theoretical Analysis of Various Synchronizations in Pulse-Coupled Digital Spiking Neurons, Proc. International Conference on Neural Information Processing, pp. 107-115 (2010)

[10] Tetsuya Hishiki and Hiroyuki Torikai, Neural Behaviors and Nonlinear Dynamics of a Rotate-and-Fire Digital Spiking Neuron, Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 2921-2928 (2010)

[11] Tetsuro Iguchi, Akira Hirata, and Hiroyuki Torikai, Integrate-and-Fire Type Digital Spiking Neuron and its Learning for Spike-Pattern-Division Multiplex Communication, Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 2425-2432 (2010)

[12] Hiroyuki Torikai and Sho Hashimoto, Nonlinear dynamical system

approaches towards neural prosthesis, Proc. International Conference on Applications in Nonlinear Dynamics, pp. 78-87 (2010)

[13] Tetsuya Hishiki and Hiroyuki Torikai, Bifurcation analysis of a resonate-and-fire-type digital spiking neuron, Proc. ICONIP 2009, Part II, LNCS 5864, pp. 392-400 (2009)

[14] Kai Kinoshita and Hiroyuki Torikai, A pulse-coupled network of SOM, Proc. ICONIP 2009, Part II, LNCS 5864, pp. 367-375 (2009)

[15] H. Torikai and T. Nishigami, Basic Coding Functions of Paralleled Chaotic Spiking Neurons, Proc. NOLTA, pp.50-53 (2009)

[16] Kai Kinoshita and Hiroyuki Torikai, A spiking neuron model and its pulse-coupled network version of a self-organizing map, Proc. NOLTA, pp.30-33 (2009)

[17] Sho Hashimoto, Hishiki, Tetsuya Hishiki and Hiroyuki Torikai, Approximation of Neuron Dynamics by Discrete State Dynamics: An Approach Toward Reconfigurable Hardware Based Neural Prosthesis, Proc. NOLTA, pp.254-257 (2009).

[18] Tetsuya Hishiki and Hiroyuki Torikai, A Novel Resonate-and-Fire-Type Digital Spiking Neuron and its Bifurcation Analysis, Proc. NOLTA, pp. 531-534 (2009) (Student Paper Award).

[19] H. Torikai and T. Nishigami, A Novel Chaotic Spiking Neuron and its Paralleled Spike Encoding Function Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 3132-3139

(2009).

[20] Sho Hashimoto and Hiroyuki Torikai, Bifurcation Analysis of a Reconfigurable Hybrid Spiking Neuron and its Novel Online Learning Algorithm, Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 1134-1141

(2009).

[その他]

ホームページ等

<http://ushiolab.sys.es.osaka-u.ac.jp/research/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥飼 弘幸 (HIROYUKI TORIKAI)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号：20318603