

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00352

研究課題名(和文)非同期分岐プロセッサ：人工神経系と人工感覚器の開発のための基盤技術

研究課題名(英文)Asynchronous Bifurcation Processor: Key Technology for Neural Prostheses

研究代表者

鳥飼 弘幸 (TORIKAI, Hiroyuki)

京都産業大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：20318603

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)：本研究では、神経細胞が呈する様々な非線形応答とその背後に潜む分岐現象を再現するための小面積な非同期分岐プロセッサを開発した。また、神経回路の学習機能において重要な役割を果たしているスパインの非線形応答特性を再現するための小面積な非同期分岐プロセッサを開発した。さらに、内耳の蝸牛にある基底膜が呈する様々な非線形応答とその背後に潜む分岐現象を再現するための小面積な非同期分岐プロセッサを開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a novel hardware-efficient asynchronous bifurcation processor, which can mimic nonlinear responses of neurons and their underlying occurrence mechanisms, was designed. Also, a novel hardware-efficient asynchronous bifurcation processor, which can mimic nonlinear responses of spines, was designed. Furthermore, a novel hardware-efficient asynchronous bifurcation processor, which can mimic nonlinear responses of cochlea's basilar membranes and their underlying occurrence mechanisms, was designed.

研究分野：非線形回路理論

キーワード：生物模倣ハードウェア セルオートマトン 非同期順序回路 神経補綴

1. 研究開始当初の背景

生物の神経系や感覚器が持つ高度な機能の仕組みを解明するために、様々な数理モデルが提案・解析されており、関連分野の大型国際プロジェクトなども組まれている。また、生物の神経系や感覚器が持つ高度な機能の仕組みに学んだ工学システムの開発も盛んに行われており、例えば聴覚系の仕組みに学んだ携帯端末用音声信号処理チップなどが開発されている。さらに、人工内耳や人工脳スライスなどの、機能を失った感覚器や神経系を補完するための神経補綴装置の開発も盛んに行われている。これに対して本研究では、生物の神経系や感覚器の様々な動作を再現できる小面積で低消費電力な VLSI (大規模集積回路) である「非同期分岐プロセッサ」の開発を目指し、また同プロセッサの神経補綴装置への応用の基礎固めも目指す。

2. 研究の目的

研究代表者のグループではこれまでに、神経系や感覚器の様々な構成要素の非線形現象を再現する VLSI を開発してきたが、開発手法が場当たりのであったために性能に限界があった。そこで本研究では、以下のように系統化されたテーマに取り組む(図 1 参照)。

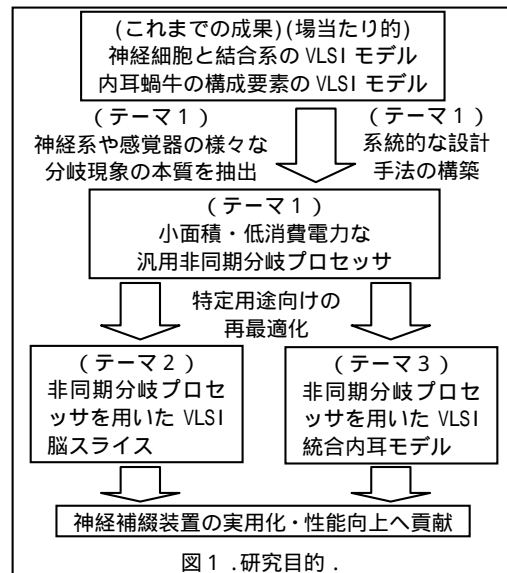
(テーマ 1) 神経系や感覚器が呈する様々な非線形応答の背後に潜む分岐現象の本質を再現できる小面積で低消費電力な汎用 VLSI である「非同期分岐プロセッサ」の系統的な設計手法を提案する。

(テーマ 2) テーマ 1 の汎用非同期分岐プロセッサを基にして、本テーマでは、神経系の非線形応答とその背後に潜む分岐現象の再現に特化した特定用途向け非同期分岐プロセッサの設計手法を提案する。また、同特定用途向けプロセッサを用いて VLSI 脳スライスを設計し、従来の神経補綴装置との性能の比較を通して、提案手法の神経補綴装置の観点からの優位性を示す。

(テーマ 3) 内耳の蝸牛は非線形性を有する多数の構成要素からなる複雑な非線形力学系である。本テーマでは、内耳の各構成要素の非線形応答とその背後に潜む分岐現象の再現に特化した特定用途向け非同期分岐プロセッサの設計手法を提案する。また、それらの構成要素を統合した VLSI 統合内耳モデルを設計し、従来の人工内耳との性能の比較を通して提案手法の優位性を示す。

3. 研究の方法

(テーマ 1) 神経系が典型的に呈する分岐の標準形の非同期分岐プロセッサによる実装。神経系や内耳の蝸牛は、入力の変化に伴って様々な分岐現象を呈することが知られている。それらの分岐現象には、標準形と呼ばれる、ある意味においてミニマムな微分・差分



方程式が存在する。すなわち、「神経系や内耳の非線形現象とそれらに由来する機能を VLSI 上に再現するためには、神経系や内耳が呈する様々な分岐現象の標準形を適切に電子回路として再現することが重要」である。ところが、分岐現象の標準形の非同期分岐プロセッサによる系統的な再現手法はこれまでに構築されていない。そこで本研究では、神経系や内耳が典型的に呈する様々な分岐現象の標準形を非同期分岐プロセッサ上に系統的に実装する手法を構築する。例えば、これまでに、神経細胞の膜電位の動作を精緻にモデル化した多くの高次元な数理モデル(所謂、Hodgkin-Huxley 型の Conductance-based モデル)が提案されてきたが、それらのモデルが定性的な現象の変化や、反応の変化、またそれらに伴う非線形応答を呈する場合、それらの変化や応答の背後で分岐現象が引き起こされている。ところが、神経細胞が呈する典型的な分岐現象は、中心多様体と呼ばれる低次元の部分空間上において起こる。また、内耳の高次元な数理モデルについても、同様な低次元の中心多様体が存在する。すなわち、神経細胞や内耳の精緻な数理モデルが高次元であっても、それらに非線形応答を齎す分岐現象の本質は、低次元(典型的には 1 ~ 3 次元)な部分空間上で引き起こされる。そこで本研究では、神経細胞や内耳が呈する様々な分岐現象の標準形を少数の状態変数で実装するために、中心多様体上の神経細胞の動作に着目して非同期分岐プロセッサの設計を行う。また、神経細胞の可塑性や内耳の動的適応能力を実装するために、実用化を迎えつつある動的再構成可能 VLSI 技術を応用する。

(テーマ 2) 神経系の非線形応答の再現に特化した非同期分岐プロセッサの開発。神経細胞の膜電位が呈する様々な非線形応答とその背後に潜む分岐現象の再現に特化

した小面積で低消費電力な非同期分岐プロセッサを開発する。例えば、神経細胞の測定データから得られるベクトル場と、非同期分岐プロセッサが構成するベクトル場の距離を、分岐現象の Genericity 理論を活かして適切に定義する(分岐現象の Genericity 理論とは、分岐現象の標準形と局所的に等価な方程式の集合を明らかにする理論である)。そして、同距離とハードウェアコストと消費電力を目的関数とした多目的最適化問題として、非同期分岐プロセッサの設計問題を定式化する。そして、現在知られている様々な最適化手法を適用して、高性能(=膜電位の分岐現象の再現度合いが高い)、小面積、低消費電力な非同期分岐プロセッサの設計手法を構築する。また、そのようにして設計された膜電位モデルを用いて、マルチコンパートメント神経細胞モデルを構築し、複雑な形状の樹状突起における活動電位の様々な伝播現象を再現できる非同期分岐プロセッサの設計手法を、膜電位モデルの場合と同様に様々な最適化手法を応用して構築する。

(テーマ3) 内耳の非線形応答の再現に特化した非同期分岐プロセッサの開発

内耳の蝸牛の各構成要素が呈する様々な非線形応答とその背後に潜む分岐現象の再現に特化した小面積で低消費電力な非同期分岐プロセッサの設計手法を構築する。例えば、テーマ2と同様に、内耳の各構成要素の測定データから得られるベクトル場と非同期分岐プロセッサが構成するベクトル場の距離を、分岐現象の Genericity 理論を活かして適切に定義する。そして、同距離とハードウェアコストと消費電力を目的関数とした多目的最適化問題としてプロセッサの設計問題を定式化し、内耳の構成要素の非線形応答の再現に特化した非同期分岐プロセッサを設計する。

4. 研究成果

テーマ1～3の各研究テーマについて、以下のような研究成果を得た。

(テーマ1) 神経系が典型的に呈する分岐の標準形の非同期分岐プロセッサによる実装
神経細胞や内耳が呈する様々な分岐現象の標準形を少数の状態変数で実装するために、中心多様体上の内耳の蝸牛内にある基底膜の動作に着目して非同期分岐プロセッサの設計を行った。また、再構成可能 VLSI 技術を用いて同非同期分岐プロセッサの実機実装を行った。代表的な成果を発表論文[3]で公表した。

(テーマ2) 神経系の非線形応答の再現に特化した非同期分岐プロセッサの開発
神経細胞の膜電位が呈する様々な非線形応答とその背後に潜む分岐現象の再現に特化した小面積な非同期分岐プロセッサを開発

した。また、神経回路の学習機能において重要な役割を果たしているスパインの非線形応答特性の再現に特化した小面積な非同期分岐プロセッサを開発した。さらに、再構成可能 VLSI 技術を用いて、それらの特化された非同期分岐プロセッサの実機実装を行った。代表的な成果を発表論文[4][5]で公表した。また、それに関連して、神経系の非線形応答の再現に特化した電子回路モデル(発表論文[1])や、遺伝子ネットワークの非線形応答の再現に特化した非同期分岐プロセッサ(発表論文[2])を開発した。

(テーマ3) 内耳の非線形応答の再現に特化した非同期分岐プロセッサの開発

内耳の蝸牛にある基底膜が呈する様々な非線形応答とその背後に潜む分岐現象の再現に特化した小面積な非同期分岐プロセッサの設計手法を構築した。また、再構成可能 VLSI 技術を用いて同非同期分岐プロセッサの実機実装を行った。代表的な成果を発表論文[3]で公表した。

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5件、全て査読あり)

[1] Chiaki Matsuda and Hiroyuki Torikai, A Novel Generalized PWC Neuron Model: Theoretical Analyses and Efficient Design of Bifurcation Mechanisms of Bursting, IEEE Trans. CAS-II (accepted)

[2] Takuya Yoshimoto and Hiroyuki Torikai, A Novel Hardware-Efficient Gene Network Model based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics, IEICE NOLTA Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 302-318, (2017)

[3] Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai, A Novel Hardware-Efficient Cochlea Model based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics: Theoretical Analysis and FPGA Implementation, IEEE Trans. CAS-II, Vol. 64, No. 9, pp. 1107 - 1111 (2017)

[4] Kanata Isobe and Hiroyuki Torikai, A novel hardware-efficient asynchronous cellular automaton model of spike-timing dependent synaptic plasticity, IEEE Trans. CAS-II, Vol. 63, No. 6, pp. 603-607 (2016)

[5] Takashi Matsubara and Hiroyuki Torikai, An Asynchronous Recurrent Network of Cellular Automaton-based Neurons and its Reproduction of Spiking Neural Network Activities, IEEE Trans. NNLS, Vol. 27, No. 4, pp. 836-852 (2016)

〔学会発表〕(計 18 件)

[1] Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai, A Novel Hardware-Efficient CPG Model based on Nonlinear Dynamics of Asynchronous Cellular Automaton, Proc. ICONIP (Springer LNCS), pp. 812-820, 2017.

[2] Chiaki Matsuda and Hiroyuki Torikai, A Novel Design Method of Burst Mechanisms of a Piece-Wise Constant Neuron Model based on Bifurcation Analysis, Proc. ICONIP (Springer LNCS), pp. 796-803, 2017.

[3] Taiki Naka and Hiroyuki Torikai, Polychronization in an Asynchronous Cellular Automaton Model of Spiking Neural Network, Proc. NOLTA, p. 99, 2017.

[4] Takuya Yoshimoto and Hiroyuki Torikai, Bifurcations in an Asynchronous Cellular Automaton Model of Gene Network, Proc. NOLTA, p. 485, 2017.

[5] Kentaro Takeda, Chiaki Matsuda, and Hiroyuki Torikai, Design of Electronic Circuit Model of Neural System based on Hybrid Dynamical System, Proc. NOLTA, p. 628, 2017.

[6] Ryota Araki, Hiroyuki Torikai, and Takuya Yoshimoto A novel gene network model based on nonlinear dynamics of asynchronous cellular automaton Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 4488-4495, 2017.

[7] Chiaki Matsuda and Hiroyuki Torikai, Homoclinic bifurcations in a piece-wise constant neuron model, Proc. NOLTA, pp. 156-159, 2016. (Student Paper Award)

[8] Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai, Reproduction of nonlinear cochlea response by asynchronous bifurcation processor, Proc. NOLTA, pp. 279-282, 2016.

[9] Taiki Naka and Hiroyuki Torikai, Multi-compartment Neuron Model based on Asynchronous Bifurcation Processor Proc. NOLTA, pp. 489-492, 2016.

[10] A Hardware-Efficient Gene Network Model based on Asynchronous Bifurcation Processor, Takuya Yoshimoto and Hiroyuki Torikai, Proc. NOLTA, pp. 642-645, 2016.

[11] Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai, Design of Biomimetic Digital Hardware based on Asynchronous Bifurcation Processor, Proc. 5th Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication

Sciences (JKCCS2016), p. 83, 2016. (Best Paper Award)

[12] Chiaki Matsuda and Hiroyuki Torikai, Design of Neuromorphic Analog Electronic Circuit based on Piece-wise Constant Nonlinear Vector Field, Proc. 5th Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences (JKCCS2016), p. 94, 2016.

[13] Hiroyuki Torikai, Kentaro Takeda, and Taiki Naka, Asynchronous Bifurcation Processor and its Applications to Neuromorphic Hardware Design, Proc. ICAND 2016 (Springer LNNS), pp.217-229.

[14] Narutoshi Jodai and Hiroyuki Torikai, A Hardware-Efficient Multi-Compartment Soma-Dendrite Model based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics Proc. IEEE-INNS IJCNN, pp. 219-226, 2016.

[15] Narutoshi Jodai and Hiroyuki Torikai, A Dendrite Model Based on Asynchronous Bifurcation Processor, Proc. NOLTA, 602-605, 2015.

[16] Kanata Isobe and Hiroyuki Torikai, A Hardware-Efficient Neural System Model Based on Asynchronous Bifurcation Processor, Proc. NOLTA, pp. 189-192, 2015.

[17] Souhei Takeda and Hiroyuki Torikai, Design of Homoclinic Bifurcation in PWC Neuron Model, Proc. NOLTA, 345-348, 2015.

[18] Masato Izawa and Hiroyuki Torikai, A Novel Hardware-Efficient Cochlea Model based on Asynchronous Cellular Automaton, Proc. IJCNN, paper ID 15745, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~torikai/>

<http://torikai-lab.ws.hosei.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥飼 弘幸 (TORIKAI, Hiroyuki)

京都産業大学・

コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：20318603