

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700225

研究課題名(和文)自己再構成非同期順序回路に基づく脳現象再現用VLSIとその神経補綴への応用の基礎

研究課題名(英文)A novel VLSI for reproduction of brain activity based on self-reconfigurable asynchronous sequential logic circuit towards applications to neural prosthesis

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、低ハードウェアコストで実装が可能な人工神経系の合成方法の構築を目指している。非同期の状態遷移を有するデジタル回路(非同期状態遷移を有する順序回路)を用いた人工神経細胞モデルを提案し、同モデルが様々な神経細胞の非線形応答特性を再現できることを示した。また、従来の神経細胞モデルに比べて、提案モデルは低コスト(少トランジスタ数)でVLSI実装できることを示した。さらに、同モデルの結合系を提案し、従来の神経細胞結合系モデルに比べて、脳活動の再現能力が高いことを示した。

研究成果の概要(英文)：This study is aiming at establishment of a systematic design procedure of neuro-hardware that can be implemented with low hardware cost. In this study, novel artificial neuron models the dynamics of which have asynchronous state transitions (i.e., the models are asynchronous sequential logic circuits) are presented. It is shown that the presented models can be implemented by less number of transistors compared to conventional artificial neuron models. Moreover, a network of one of the presented neuron models is presented and it is shown that the presented network has higher reproducibility of brain activities compared to conventional artificial neuron network models.

研究分野：非線形回路理論

キーワード：非同期順序回路 神経補綴

1. 研究開始当初の背景

神経補綴とは、機能が失われた神経系を VLSI などの人工機器によって補完する技術であり、代表例として感覚神経系の補綴である人工内耳が挙げられる。一方、近年、中枢神経系の補綴に関する研究も精力的に行われており、例えば Berger 等はマウスの海馬 CA3 スライス の VLSI による補綴に関する生物実験結果を報告している。しかしこれまでの中枢神経系に対する補綴技術には補綴機器としては好ましくない下記などの問題点が挙げられる。

- (1) 補綴対象の非線形応答特性やその背後にある非線形ダイナミクスを再現するためのアルゴリズムには非線形フィルタや数値積分などが用いられるが、そのために補綴用 VLSI 内で浮動小数点演算器などの演算器が多用される事になり、それに伴って実装回路面積と消費電力が大きくなる。
- (2) 補綴対象の学習機能を実現するためのアルゴリズムは「CPU+メモリ」上へソフトウェアとして実装されるか、もしくは DSP などへハードウェアとして実装されるが、OS やメモリコントローラなどの補綴機能とは直接関係のない多くの構成要素が必要であり、それに伴って実装回路面積と消費電力が大きくなる。

2. 研究の目的

本研究では VLSI による神経補綴の実用化のための基礎固めとして主に以下のテーマに取り組む。

- (1) 非同期順序回路を用いた小面積・低消費電力な神経細胞モデルの提案。
- (2) 動的再構成可能 FPGA 技術を用いた提案神経細胞モデルのオンチップ学習法(=自己再構成法)の提案。
- (3) 提案神経細胞モデルのネットワークを用いた神経補綴専用 VLSI の設計手法の構築と、従来の神経補綴手法との比較による提案手法の優位性の検証。

3. 研究の方法

- (1) 神経細胞体の様々な非線形応答を数理モデルで再現するための問題点として、以下などが挙げられる。

- 様々な刺激入力に対する膜電位の動作の再現。
- 刺激強度に対する平均発火頻度やスパイク間隔の変動係数などの神経スパイク列の特徴量の変化(非線形応答特性)の再現。
- 様々な非線形応答特性の背後にある分岐現象の再現。

研究代表者等はこれまでに、比較的均一なベクトル場を持つ非同期順序回路神経細胞モデルを提案し、それらのモデルが標準的な神経細胞モデルの動作をある程度再現できることを示してきたが、

ベクトル場の均一性ゆえに応答特性や分岐現象の再現性には限界があった。そこで本研究では、非線形力学系理論を基にして従来モデルのベクトル場を一般化することにより、実際の神経細胞体の様々な非線形応答特性やその背後にある分岐現象をより詳細に再現できる非同期順序回路神経細胞モデルを、実装面積や消費電力などの側面も考慮して構築する。

- (2) 研究代表者等はこれまでに、実際の神経細胞体や標準的な神経細胞モデルの膜電位の動作を自動的に再現するための非同期順序回路神経細胞モデルに対する単純なパラメータ更新法(学習法)を提案してきた。しかし神経細胞モデルと学習法の単純性ゆえに、実際の神経細胞体や標準的な神経細胞モデルが呈する複雑な非線形応答特性とその背後にある分岐現象の自動的な獲得には至っていない。そこで本研究では、上記の神経細胞モデルのベクトル場の一般化に加えて、学習法の一般化にも取り組む。また、実験を通して提案学習法の特徴(実装面積・消費電力と学習速度のトレードオフなど)を解析し、他の直接的な手法(例えば CPU とメモリにソフトウェアとして実装された神経細胞の数値積分モデルとその再急降下法によるパラメータ最適化)に対するハードウェアとしての優位性を示す。

4. 研究成果

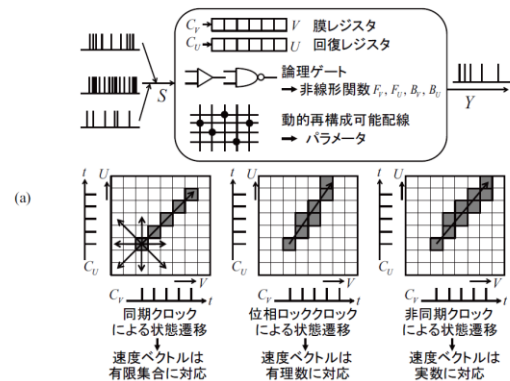


図 1. 非同期順序回路を用いた神経細胞のモデル化のコンセプト。

- (1) 図 1 に非同期順序回路を用いた神経細胞のモデル化のコンセプトを示す。同図においては、分かり易さのために Izhikevich の simple neuron モデルにインスパイアされた 2 変数の神経細胞モデルの概念図が示されているが、その一般化は容易に可能であることに注意する。同モデルは以下の構成要素を有する。

- 離散状態を有する 2 つのレジスタ。膜レジスタは離散膜電位 V を有し、回復レジスタは離散回復変数 U を有する。
- 非線形関数を実現する論理ゲート。

例えば図1の例では、関数 F_V, F_U, B_V, B_U が実現される。

- 上記非線形関数をパラメタライズする動的再構成可能配線。配線パターンがパラメータ値に対応する。
- 離散状態の遷移をトリガする状態依存クロック C_V, C_U 。
- 外部からの刺激に対応する刺激入力 $S(t)$ 。

非同期順序回路の動作の記述を簡潔にするために、「瞬間的な離散状態の代入」を記号「:=」を用いて表し、「クロックのポジティブエッジ」を「↑」を用いて表す。すると図1の神経細胞モデルの動作は以下の式(1)~(4)で記述される。

しきい値下でのダイナミクス:

$$\begin{aligned} V &:= V + F_V(V, U) & \text{if } C_V(t, V, U) = \uparrow \\ U &:= U + F_U(V, U) & \text{if } C_U(t, V, U) = \uparrow \end{aligned} \quad (1)$$

外部からの刺激に起因するダイナミクス:

$$V := V + W \quad \text{if } S(t) = \uparrow \quad (2)$$

ここで W は離散シナプス荷重を表す。

スパイクカットオフ:

$$\begin{aligned} (V, U) &:= (B_V(U), B_U(U)) \\ &\text{if } (V, U) \in \mathbf{L} \text{ and } C_V(t) = \uparrow \end{aligned} \quad (3)$$

ここで \mathbf{L} はしきい値集合であり、膜電位の急激な脱分極を停止させるしきい値として働く。(若しくは発火しきい値として捉える場合もある。)

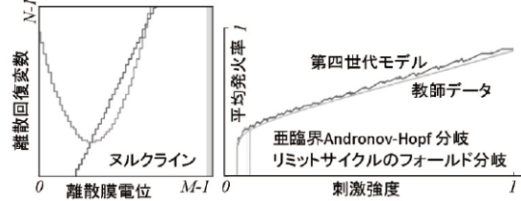
出力スパイク列:

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } (V, U) \in \mathbf{L} \text{ and } C_V(t) = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

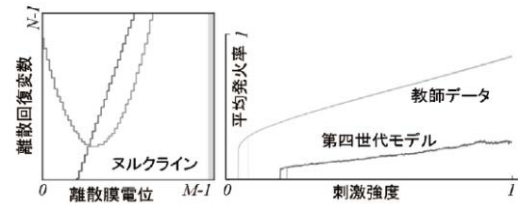
非同期順序回路を用いた神経細胞のモデル化についてのリマークを以下に記す。

- しきい値下でのダイナミクスを記述する式(1)は、前進オイラー法やルンゲ・クッタ法などの陽的1段数値積分公式との対応がみられる。すなわち、2つのクロックが共通でかつ状態に依存しない場合、関数 F_V と F_U は陽的1段数値積分公式における状態更新量に対応する。よって、非同期順序回路は、「非同期状態更新を有する陽的1段数値積分公式」であると捉えることも出来る。
- 数値演算回路を用いた数値積分に比べて、非同期順序回路の状態空間は非常に粗く設計される。しかし、図1で要約されているように、非同期性によって非同期順序回路の状態の速度ベクトルに滑らかさが齎され、その結果ベクトル場に滑らかさが齎され、そして分岐図と分岐構造に滑らかさが齎される。よって、厳密性を多少犠牲にして直感的に分かりやすい言葉でまとめると、「非同期順序回路は非同

期状態遷移に起因する連続時間軸を巧みに利用して滑らかな分岐構造を実現する系」であり、「数値演算回路を用いた数値積分は状態空間の精度を(なんら工夫無く)高めることにより滑らかな分岐構造を実現する系」であると言える。



(b) FPGA内での5000回の動的再配線によって教師データの背後に潜む分岐シナリオを自動的に獲得。



(a) FPGA実装された第四世代モデルの初期応答。

図2. 非同期順序回路を用いた中枢神経系ニューロハードウェアのチップ内動的再配線による膜電位ダイナミクスの自動的な獲得の例。教師データの再現(汎化性あり)のみならず、教師データの背後に潜む分岐のシナリオも自動的に獲得。

(2) 本研究の成果として得られた、非同期順序回路に基づいた神経細胞モデルの主要なものを以下に示す。

- 非線形積分発火型膜電位モデル: 微分方程式膜電位モデルの一つであるQuadratic積分発火型膜電位モデルに対応する非線形積分発火型膜電位モデルを提案した。同モデルは、サドルノードホモクリニック分岐とサドルノード分岐に起因するclass 1と2のexcitabilityやヒステリシス特性を呈する。
- 回転発火型膜電位モデル: 上記のモデルは式(1)中の離散回復変数 U を持たない。これに対して回転発火型膜電位モデルは離散回復変数 U と離散膜電位 V を持ち、2次元の離散平面ベクトル場を生成する。その結果、回転発火型膜電位モデルは神経細胞の膜電位の典型的な時間波形を再現できる。
- 一般化回転発火型膜電位モデル: このモデルは、回転発火型膜電位モデルの離散平面ベクトル場を一般化して改良したモデルであり、非同期順序回路を用いた膜電位モデルの中で最も作り込まれたモデルである。その結果、一般化回転発火型膜電位モデルは、様々な神経細胞

モデルが呈する典型的な分岐現象（例えば超臨界 Andronov-Hopf 分岐, 臨界 Andronov-Hopf 分岐, リミットサイクルのフォールド分岐, サドルノード分岐, サドルノードホモクリニック分岐など）とそれに伴う非線形入出力特性（例えば class 1 と 2 の excitability と spiking やヒステリシス特性）を再現できる. 図 2 は同モデルのチップ内動的再配線による膜電位ダイナミクスの自動的な獲得の例を示す. また, 一般化回転発火型膜電位モデルは, 典型的なパラメータ値において, 微分方程式神経細胞モデルに比べて約 1/7 のハードウェアコストで実装可能である場合があることが示された.

- ネットワークモデル:
非線形積分発火型膜電位モデルを用いたリザーバネットワークを提案し, 従来の神経補綴チップ (VLSI 人工海馬 CA3 スライス) との基本的な比較を行った.

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 6 件)

[1] Hironori Ishimoto, Masato Izawa and Hiroyuki Torikai, A Novel Cochlea Partition Model based on Asynchronous Bifurcation Processor, NOLTA, IEICE (NOLTA Journal), Vol. 6, No. 2, pp. 207-225 (2015) 査読あり

[2] Masato Izawa and Hiroyuki Torikai, Asynchronous Cellular Automaton Model of Spiral Ganglion Cell in the Mammalian Cochlea: Theoretical analyses and FPGA implementation, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E98-A, No. 2, pp. 684-699 (2015) 査読あり

[3] 鳥飼弘幸, 非同期分岐プロセッサとそのニューロハードウェアへの応用, 日本神経回路学会誌, Vol. 21, No. 2, pp. 64-69 (2014) 査読なし解説論文

[4] Takashi Matsubara and Hiroyuki Torikai, Asynchronous Cellular Automaton Based Neuron: Theoretical Analysis and On-FPGA Learning, IEEE Trans. NNLS, Vol. 24, No. 5, pp. 736-748 (2013) 査読あり

[5] Takuya Noguchi and Hiroyuki Torikai, Ghost Stochastic Resonance from Asynchronous Cellular Automaton Neuron Model, IEEE Trans. CAS-II, Vol. 60, No. 2, pp. 111 - 115 (2013) 査読あり

[6] Takashi Matsubara and Hiroyuki Torikai, Bifurcation-based Synthesis of Asynchronous Cellular Automaton Based Neuron, IEICE NOLTA Journal, Vol. 4, No. 1, pp. 111-126 (2013) 査読あり

[学会発表] (計 3 件)

[1] Naoki Shimada and Hiroyuki Torikai, Reproduction of Forward and Backward Propagations on Dendrites by Multi-compartment Asynchronous Cell Automaton Neuron, International Joint Conference on Neural Networks 2014 (Beijing, China) (2014.07)

[2] Takashi Matsubara and Hiroyuki Torikai, A Novel Reservoir Network of Asynchronous Cellular Automaton based Neurons for MIMO Neural System Reproduction, International Joint Conference on Neural Networks 2013 (Dallas, USA) (2013.08)

[3] Hiroyuki Torikai and Takashi Matsubara, Asynchronous cellular automaton based modeling of nonlinear dynamics of neuron, International Conference on Theory and Application in Nonlinear Dynamics 2012 (Seattle, USA) (2013.08)

[その他]

ホームページ

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

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