解 説

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

鳥 飼 弘 幸

京都産業大学*

Asynchronous Bifurcation Processor and its Applications to Neuro-hardwares

Hiroyuki Torikai

Kyoto Sangyo University*

概要

本稿では様々なニューロハードウェアの幾つかの側面からの比較を概観します。そして我々のグループで近年開発を進めている非同期分岐プロセッサとその位置付け、そしてそのニューロハードウェアへの応用例について解説します。

1. は じ め に

非線形性を積極的に利用している数あるダイナミカルシステムの中でも、生物の神経系は最も洗練されたシステムといっても過言ではないでしょう。これまでに神経系の非線形ダイナミクスを模擬するハードウェアが数多くの開発されてきましたが（文献¹⁾とその参考文献などを参照）、本稿ではそれらのハードウェアの幾つかの側面・文脈からの比較を概観した後、我々のグループで近年開発を進めている非同期分岐プロセッサとその位置付け、そしてそのニューロハードウェアへの応用例について解説します。

ニューロハードウェアを実装するための主なアプローチとして以下などが挙げられます（表 1 も参照）。

- 非線形微分方程式による膜電位のダイナミクスの表現と、そのアナログ電子回路による実装。膜電位のダイナミクスは連続時間と連続状態を有します。
- 非線形差分方程式による膜電位のダイナミクスの表現と、そのスイッチトキャパシタ回路やボアンカレ写像による実装。膜電位のダイナミクスは離散時間と連続状態を有します。
- 数値積分による膜電位のダイナミクスの表現と、その数値演算回路による実装。膜電位のダイナミクスは離散時間と離散状態を有します。
- セルオートマトンによる膜電位のダイナミクスの表現と、その順序回路による実装。膜電位のダイナミクスは離散時間と離散状態を有します。
- 非同期セルオートマトンによる膜電位のダイナミク

スの表現と、その非同期順序回路による実装。膜電位のダイナミクスは連続時間（状態の遷移時刻が実数時間軸上）と離散状態を有します。

これまでに我々のグループでは、非同期分岐プロセッサを用いたニューロハードウェアの利点として以下の点などを事例に基づいて示して来ましたが、本稿ではそれらの要点を 2 章と 3 章で解説します。

- 2 章で解説されるように、離散状態の状態遷移時刻の非同期性によってベクトル場に滑らかさが齎され、ベクトル場の滑らかさによって分岐図と分岐構造に滑らかさが齎されます。その結果、比較的低精度の離散状態空間（すなわち比較的低ハードウェアコストの VLSI）を用いてニューロハードウェアの設計が可能になります。例えば、3 章で例示されるように、通常の数値演算回路を用いたニューロハードウェアに比べて、非同期分岐プロセッサを用いたニューロハードウェアのハードウェアコストは $1/7$ や $1/10$ になる場合もあります。
- 表 1 に記されているように、非同期分岐プロセッサのパラメータはレジスタと論理ゲート間の配線パターンです。近年実用化がなされつつある動的再構成可能 Field Programmable Gate Array 技術を応用することにより、デジタルハードウェアの配線パターンはハードウェアの動作中に動的に変更可能になりつつあります。3 章で事例が解説されるように、非同期分岐プロセッサの配線パターンの動的更新機能を利用して、オンチップでパラメータの動的更新が可能なニューロハードウェアの開発が可能になります。また 4 章では、非同期分岐プロセッサの今後の展開に

* 〒 603-8555 京都市北区上賀茂本山

表 1 ニューロハードウェアを実装するための主なアプローチ

実装法	時間状態	非線形ダイナミクス	非線形ダイナミクスを特徴付けるパラメータ
アナログ電子回路	連続時間 連続状態	微分方程式	MOSFET などの回路素子の非線形性 (チップ内での動的更新には難が多い)
スイッチトキャパシタ・ポアンカレ写像	離散時間 連続状態	差分方程式	
数値演算回路	離散時間 離散状態	数値積分	非線形関数の係数
同期順序回路		セルオートマトン	配線パターン (動的再構成可能 FPGA 技術を用いてチップ内での動的更新が可能)
非同期順序回路 (本稿)	連続時間 離散状態	非同期セルオートマトン	

表 2 文脈に応じた非同期分岐プロセッサの呼称

呼称	文脈
非同期順序回路	レジスタ転送レベルでの実装手法としての文脈
非同期セルオートマトン	非線形ダイナミカルシステムの種類としての文脈
非同期数値積分	計算手法の種類としての文脈
非同期分岐プロセッサ	プロセッサの種類としての文脈

図 1 非同期分岐プロセッサのコンセプト。(a 左) 同期したクロックによる離散状態遷移は有限状態集合に対応するベクトル場を生成する。(a 中) 位相ロックしたクロックによる離散状態遷移は有理数に対応するベクトル場を生成する。(a 右) 非同期クロックによる離散状態遷移は実数に対応するベクトル場を生成する。(b) 非同期性によって滑らかな分岐図と分岐構造が齎される。

ついて議論します。

2. 非同期分岐プロセッサのコンセプト

図 1 に非同期分岐プロセッサのコンセプトを示します。同図においては、分かり易さのために Izhikevich の simple neuron モデル²⁾にインスパイアされた 2 変数の神経細胞モデル^{3, 4)}の概念図が示されていますが、その一般化は容易に可能であることに注意します。同モデルは以下の構成要素を有します。

- 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 $V \in \{0, 1, \dots, N-1\} = \mathbf{Z}_N$ を有し、回復レジスタは離散回復変数 $U \in \{0, 1, \dots, M-1\} = \mathbf{Z}_M$ を有します。
- 非線形関数を実現する論理ゲート。例えば図 1 の例^{3, 4)}では、関数 $F_V: \mathbf{Z}_N \times \mathbf{Z}_M \rightarrow \{-1, 0, 1\}$, $F_U: \mathbf{Z}_N \times \mathbf{Z}_M \rightarrow \{-1, 0, 1\}$, $B_V: \mathbf{Z}_M \rightarrow \mathbf{Z}_N$, $B_U: \mathbf{Z}_M \rightarrow \mathbf{Z}_M$ が実現されます。
- 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します。
- 離散状態の遷移をトリガする状態依存クロック $C_V(t, V, U)$ と $C_U(t, V, U)$ 。
- 外部からの刺激に対応する刺激入力 $S(t)$ 。

非同期分岐プロセッサ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「↑」を用いて表すことにします。すると図 1 の神経細胞モデル^{3, 4)}の動作は以下の式 (1)~(4) で記述されます。

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 $W \in \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$ は離散シナプス荷重を表します。

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 $\mathbf{L} \subset \mathbf{Z}_N \times \mathbf{Z}_M$ 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きます。(若しくは発火しきい値として捉える場合もあります。)

出力スパイク列：

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

非同期分岐プロセッサについてのリマークを以下に記します。

- 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ます。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 ($C_V(t, V, U) = C_U(t, V, U) = C(t)$)、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します。よって、非同期分岐プロセッサは、「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ます (表 2 も参照)。
- 数値演算回路を用いた数値積分に比べて、非同期分岐プロセッサの状態空間は非常に粗く設計されます。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分岐プロセッサ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ます。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、「非同期分岐プロセッサ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」であると言えます。

3. ニューロハードウェアへの応用例

3.1 中枢系ニューロハードウェア

非同期分岐プロセッサを用いた中枢神経系ニューロハードウェアの例を世代別に紹介します。

- 第一世代：積分発火型膜電位モデル^{5, 6)}

最も基本的な膜電位モデルとして、完全積分発火型膜電位モデルが提案され、ポアンカレ写像が呈する周期倍分岐やサドルノード分岐の理論解析が行われました。また同モデルの化学シナプスによる結合系が提案され、その同期現象 (主にサドルノード分岐に起因する $m:n$ ロッキング) の理論解析が行われました。このように、完全積分発火型膜電位モデルは、主に現象の理論解析のためのトイモデルとして用いられてきました。

- 第二世代：非線形積分発火型膜電位モデル⁷⁾

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

図2 非同期分岐プロセッサ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¹⁾。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。

電位モデルが第二世代モデルとして提案されました。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します。

●第三世代：回転発火型膜電位モデル^{3,4)}

第一世代と第二世代モデルは式 (1) 中の離散回復変数 U を持ちません。これに対して第三世代である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します。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ます。

●第四世代：一般化回転発火型膜電位モデル^{1,8,9)}

第四世代モデルは，第三世代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，非同期分岐プロセッサを用いた膜電位モデルの中で（本稿発行時点で）最も作り込まれたモデルです。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，亜臨界 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）を再現できます。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しています。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ました（未発表の実験においては約 1/10 となる場合も確認されています）。

●第五世代：マルチコンパートメントモデル¹⁰⁾

第一世代から第四世代モデルは，主に細胞体の膜電

位のダイナミクスの再現を念頭に置いて設計されたモデルです。これに対して第五世代モデルとして，神経細胞全体（細胞体＋樹状突起＋軸索）のモデルとなるマルチコンパートメントモデルが提案されました。同モデルは樹状突起上の膜電位の様々な伝播特性を再現することが出来ます。

●第六世代：トイネットワークモデル⁷⁾

第六世代モデルとして前世代膜電位モデルを用いたトイネットワークモデルが提案されました。例えば，第二世代非線形積分発火型膜電位モデルを用いたりザーバネットワークが提案され，従来の神経補綴チップ（VLSI 人工海馬 CA3 スライス¹¹⁾）との比較を通して，非同期分岐プロセッサを用いた中枢神経系ニューロハードウェアの優位性が示されました。

3.2 聴覚系ニューロハードウェア

哺乳類の内耳に存在する蝸牛は，リンパ液（粘性流体），基底膜（非線形振動膜），内有毛細胞（機械力・電気ポテンシャル変換器），外有毛細胞（アクティブダンパ），螺旋神経節細胞（並列スパイク変調器）といった要素で構成される非線形性が非常に強い興味深いシステムです。その強非線形性により，蝸牛を中心とする聴覚系は，非線形フィルタ特性，多重トーン抑制特性，適応特性，整流特性，第一ピッチシフト，第二ピッチシフト，並列スパイク密度変調などをはじめとする様々な非線形音声処理を行っています。非同期分岐プロセッサを用いた聴覚系ハードウェアの例を以下に紹介します。

●蝸牛基底膜・内有毛細胞モデル^{12,13)}

第三世代の回転発火型膜電位モデルが持つフィルタ特性を応用して，基底膜が有する非線形フィルタ特性と内有毛細胞が有する整流特性を再現する蝸牛パーティションモデルが提案されました。

図3 非同期分岐プロセッサの今後の展開の例. 現象解析のための概念と解析ツール群. ※印はその基本的なアイデアが文献^{1, 6, 15)}などで用いられた.

●螺旋神経節細胞モデル¹⁴⁾

第一世代の積分発火型膜電位モデルを用いて、哺乳類の蝸牛・螺旋神経節細胞が示す並列スパイク密度変調や適応特性を再現する螺旋神経節細胞モデルが提案されました.

●ピッチシフトモデル¹⁵⁾

第一世代の積分発火型膜電位モデルを改良して、膜電位のダイナミクスにおけるリーク電流の影響を再現できる Leaky 積分発火型膜電位モデルが提案されました. 同モデルが呈する偽確立共鳴現象を利用して、人間の第一ピッチシフト特性を再現できる蝸牛モデルが提案されました.

4. 非同期分岐プロセッサの今後の展開

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に関する今後の展開の可能性を以下に記します.

●中枢系ニューロハードウェア

第一世代～第六世代の中枢系ニューロハードウェアは、Hodgkin-Huxley 型のコンダクタンススペースモデルではなく低次元化された簡略化モデルですが、より Anatomically に Plausible な非同期分岐プロセッサを構築べく、第七世代以降のニューロハードウェアとして、例えば「コンダクタンススペース膜電位モデル」や「カルシウム濃度のダイナミクスに基づいたスパインモデル」や「脳の多層構造¹⁶⁾を忠実に再現する積層 FPGA ニューロハードウェア」などの構築に取り組みつつあります. そのような Anatomically に Plausible な非同期分岐プロセッサの応用例として、VLSI 人工海馬スライス¹¹⁾などの「神経補綴チップ」や、計算論的神経科学のための「脳現

象解析専用ハードウェアプラットフォーム」や、IP 越しの脳型分散ハードウェアである「Brain over IP (BoIP)」などが挙げられます.

●聴覚系ニューロハードウェア

これまでの非同期分岐プロセッサを用いた聴覚系ニューロハードウェアでは、哺乳類の聴覚系が呈する様々な非線形応答特性のほんの一部の再現に止まっています. 多重トーン抑制特性や第二ピッチシフトなどのハードウェアによる再現が難しい応答特性を含めて、聴覚系の様々な非線形応答特性を矛盾無く再現できる統合内耳ハードウェアの構築に取り組んでいます. そのような統合内耳ハードウェアの応用例として、「聴覚系の非線形現象を忠実に再現できる人工内耳」などが挙げられます.

●非同期分岐プロセッサ

非同期分岐プロセッサ自体の作り込みや、解析手法の構築にも取り組んでいます. 例えば、図3に示されたように、微分方程式や差分方程式の分岐理論^{17, 18)}における解析ツールに対応する非同期分岐プロセッサ用の解析ツール群の構築に取り組んでいます.

5. ま と め

本稿では非同期分岐プロセッサと呼ばれる特殊なハードウェアと、その中枢系ニューロハードウェアや聴覚系ニューロハードウェアへの応用について解説させて頂きました. また、非同期分岐プロセッサとそれを用いたニューロハードウェアの今後の展開について、今後の研究の方向性についてご批判を頂くつもりで、敢えて妄想の類も含めて記させて頂きました. 最後に、非同期分岐プロセッサの開発に共に取り組んで頂いた

松原崇氏をはじめとする全ての共同研究者に心より感謝します。

参 考 文 献

- 1) T. Matsubara and H. Torikai, Asynchronous Cellular Automaton Based Neuron: Theoretical Analysis and On-FPGA Learning, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, Vol.24, No.5, pp.736–748, 2013.
- 2) E.M. Izhikevich, *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*, The MIT press, 2007.
- 3) T. Hishiki and H. Torikai, A Novel Rotate-and-Fire Digital Spiking Neuron and its Neuron-like Bifurcations and Responses, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.22, No.5, pp.752–767, 2011.
- 4) T. Matsubara, H. Torikai and T. Hishiki, A Generalized Rotate-and-Fire Digital Spiking Neuron Model and its On-FPGA Learning, *IEEE Transactions on Circuits and Systems Part II*, Vol.58, No.10, pp.677–681, 2011.
- 5) S. Hashimoto and H. Torikai, A Novel Hybrid Spiking Neuron: Bifurcations, Responses, and On-chip Learning, *IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I*, Vol.57, No.8, pp.2168–2181, 2010.
- 6) H. Ijichi and H. 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.
- 7) T. Matsubara and H. Torikai, A Novel Reservoir Network of Asynchronous Cellular Automaton based Neurons for MIMO Neural System Reproduction, *Proc. IEEE-INNS IJCNN*, pp.1563–1569, 2013.
- 8) T. Matsubara and H. Torikai, Neuron-like Responses and Bifurcations of a Generalized Asynchronous Sequential Logic Spiking Neuron Model, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E95-A, No.8, pp.1317–1328, 2012.
- 9) T. Matsubara and H. Torikai, Bifurcation-based Synthesis of Asynchronous Cellular Automaton Based Neuron, *IEICE NOLTA Journal*, Vol.4, No.1, pp.111–126, 2013.
- 10) N. Shimada and H. Torikai, Reproduction of Forward and Backward Propagations on Dendrites by Multi-compartment Asynchronous Cell Automaton Neuron, *Proc. IEEE-INNS IJCNN*, 2014 (accepted).
- 11) T. Berger and D. Glanzman, *Toward Replacement Parts for the Brain: Implantable Biomimetic Electronics as Neural Prostheses*, The MIT Press, 2005.
- 12) H. Ishimoto, M. Izawa and H. Torikai, Nonlinear filter characteristics from an asynchronous cellular automaton oscillator, *Proc. NOLTA*, 2014 (accepted).
- 13) 石本裕典, 鳥飼弘幸, 非同期セルオートマトンを用いた有毛細胞モデルの基本特性について, *電子情報通信学会技術研究報告 NLP2012-107* (2013-1).
- 14) M. Izawa and H. Torikai, Nonlinear responses of an asynchronous cellular automaton model of spiral ganglion cells, *Proc. IEEE-INNS IJCNN*, 2014 (accepted).
- 15) T. Noguchi and H. Torikai, Ghost Stochastic Resonance from Asynchronous Cellular Automaton Neuron Model, *IEEE Transactions on Circuits and Systems Part II*, Vol.60, No.2, pp.111–115, 2013.
- 16) A. M. Thomson and A. P. Bannister, Interlaminar Connections in the Neocortex, *Cerebral Cortex*, Vol.13, No.1, pp.1–14, 2003.
- 17) Y. Kuznetsov, *Elements of Applied Bifurcation Theory*, Springer, 3rd ed. 2004.
- 18) M. Bernardo, C. Budd, A.R. Champneys and P. Kowalczyk, *Piecewise-smooth Dynamical Systems*, Springer, 2008.