

生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics



鳥飼 弘幸 (Hiroyuki TORIKAI, Ph. D.)

京都産業大学 教授

(Professor, Kyoto Sangyo University)

IEEE 電子情報通信学会 日本神経回路学会

研究専門分野：非線形回路理論

あらまし 本稿では、SCAT 研究助成によって実施された研究成果に加えて、その周辺の研究成果も概観することによって、「生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信方式」の開発の試みについて紹介したい。まず、生物の柔軟な情報通信の仕組みを模倣するニューロハードウェアに関する代表的な研究手法について概観する。

次に、筆者らのグループで独自に開発を進めている非同期分岐プロセッサを用いたニューロハードウェアを紹介する。例えば、脳などの中枢系の動作原理を模倣するニューロハードウェアの開発事例や、内耳などの感覚系の動作原理を模倣するニューロハードウェアの開発事例を紹介する。そして、それらの開発事例で得られた知見を活用した「生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信方式」の開発の試みについて紹介する。最後に、今後の展開の例として、中枢系ニューロハードウェアと聴覚系ニューロハードウェアの医療工学への応用の可能性を議論し、生物の低消費カロリーな通信方式に学んだ低消費電力なインパルス通信方式についても議論する。

1. 研究の目的

実在のシステムのほとんどは非線形性を有している。そのようなシステムを設計・解析するためのアプローチとして、線形近似を用いて非線形性を近似的に回避するアプローチと、逆に非線形性を積極的に利用するアプローチとがある。非線形性を積極的に利用しているシステムは多数存在するが、それらのシステムの中でも、生物の神経系は最も洗練された非線形システムといっても過言ではないだろう[1]。これまでに神経系の非線形ダイナミクスを模倣するハードウェア（本稿ではニューロハードウェアと呼ぶ）が数多く開発されてきたが、本稿では、ニューロハードウェアを幾つかの側面・文脈から比較・概観した後、筆者ら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、同プロセッサのニューロハードウェアへの応用例、そして、そのようなニューロハードウェアを用いた「生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信方式」の開発の試みを紹介する。

2. 研究の背景

これまでに開発されてきた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る（参考文献[2]と、その引用文献なども参照。表1も参照）。

- (A) 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する。
- (B) 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ポ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する。
- (C) 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する。
- (D) 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する。

生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics

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	時間と状態	動作方程式	制御パラメータ
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	離散時間	差分方程式	
ポアンカレ写像	連続状態		
数値演算回路	離散時間	数値積分	非線形関数の係数
同期順序回路	離散状態	セルオートマトン	配線パターン(動的再構成可能技術を用いて動的に更新可能)
非同期順序回路	連続時間 離散状態	非同期セルオートマトン	

(E) 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)と離散状態を有する。このような手法を用いた情報処理・信号処理装置を「非同期分岐プロセッサ」と呼ぶことにする。

従来のニューロハードウェアは、主に(A)~(D)のアプローチで設計されている。一方、筆者らのグループでは、(E)の「非同期分岐プロセッサ」のアプローチを用いた新しいニューロハードウェアの設計手法を構築しつつある。本稿では、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実例や利点を紹介し、また、そのようなニューロハードウェアを用いた「生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信方式」の開発の試みについても紹介する。

3. 研究の方法と結果

3.1 研究の方法

図1に非同期分岐プロセッサ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2変数の神経細胞モデル[3][4]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。
- 非線形関数を実装する論理ゲート。例えば図1の例では、関数 F_v, F_u, B_v, B_u が実装されている。
- 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。非同期分岐プロセッサにおいては、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 $C_v(t, V, U)$ 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する。すると、図1の神経細胞モデルの動作は、以下の式で記述される。

(しきい値下でのダイナミクス)

$$V := V + F_v(V, U) \text{ if } C_v(t, V, U) = \uparrow$$

$$U := U + F_u(V, U) \text{ if } C_u(t, V, U) = \uparrow$$

(外部からの刺激に起因するダイナミクス)

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

ここで W は離散シナプス荷重を表わす。

(スパイクカットオフ)

$$(V, U) := (B_v(U), B_u(U)) \text{ if } (V, U) \in L \text{ and } C_v(t, V, U) = \uparrow$$

生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics

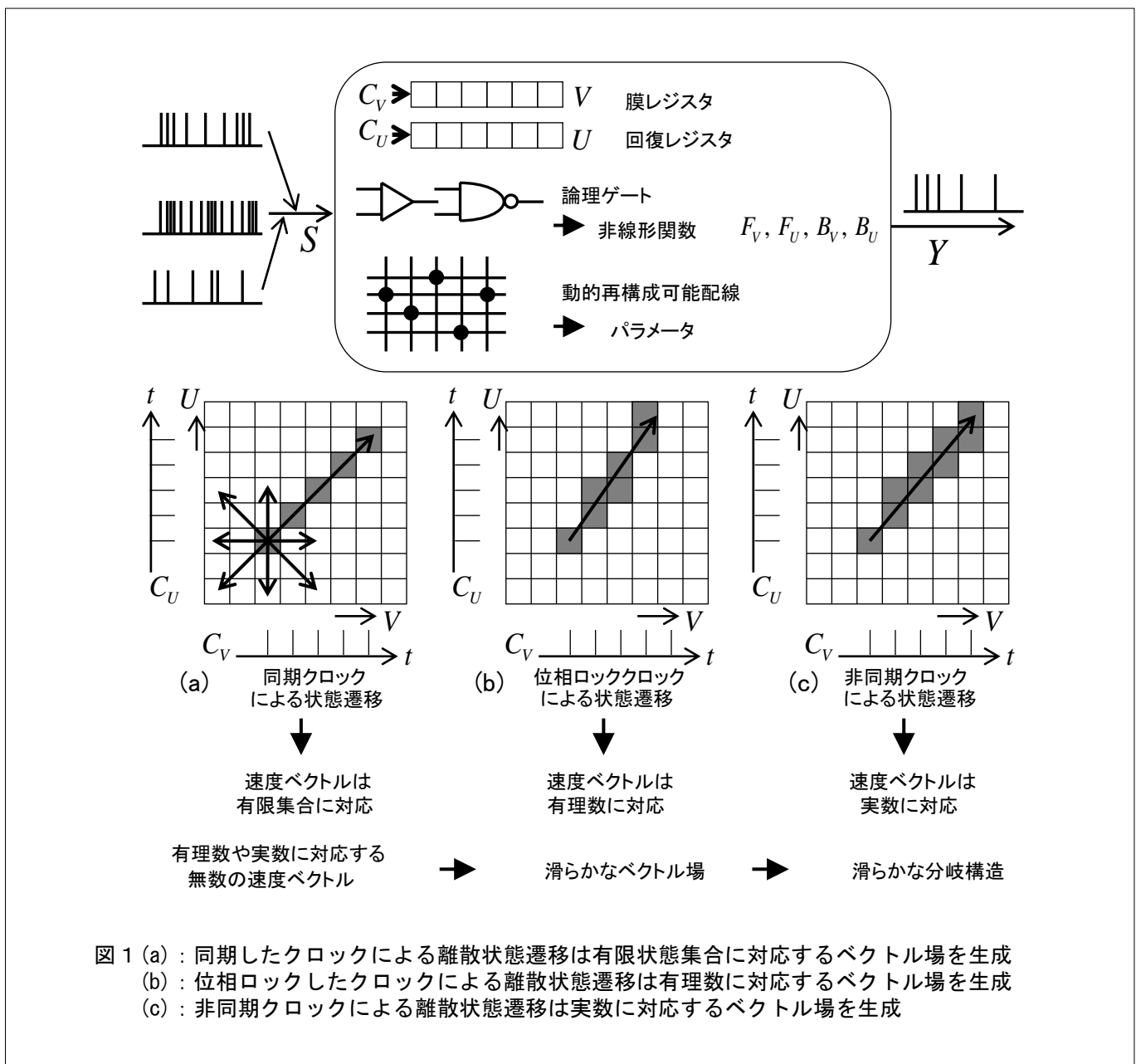
ここでLはしきい値集合であり、膜電位の急激な脱分極を停止させるしきい値として働く。若しくはLを発火しきい値として捉える場合もある。

(出力スパイク列)

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

非同期分岐プロセッサ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 ($C_V(t, V, U) = C_U(t, V, U) = C(t)$ の場合)、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る (表1も参照)。



生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics

- 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」であると言える。

3.2 研究の結果

3.2.1 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する。

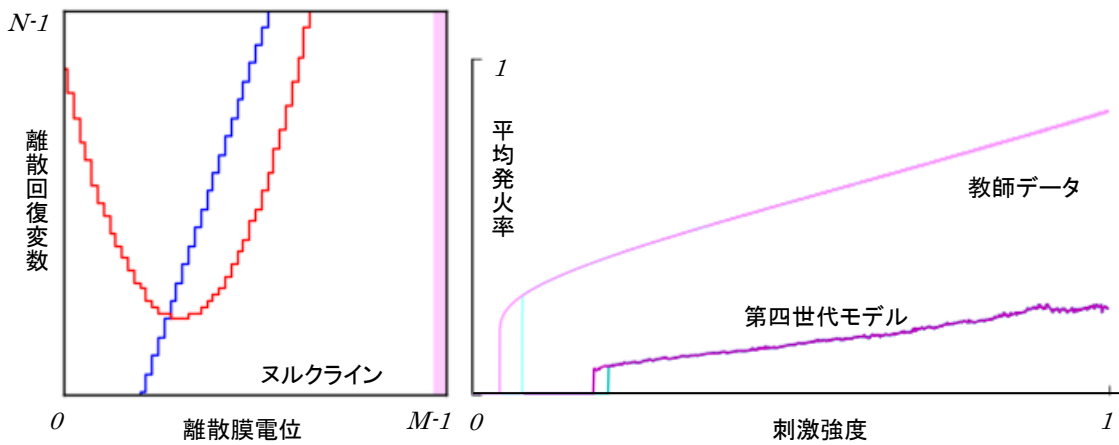
- 第一世代：積分発火型膜電位モデル[5][6]
最も基本的な膜電位モデルとして、完全積分発火型膜電位モデルが提案され、ポアンカレ写像が呈する周期倍分岐やサドルノード分岐の理論解析が行われた。また、同モデルの化学シナプスによる結合系が提案され、その同期現象（主にサドルノード分岐に起因する $m:n$ ロッキング）の理論解析が行われた。このように、完全積分発火型膜電位モデルは、主に現象の理論解析のための Toy Model として用いられた。
- 第二世代：非線形積分発火型膜電位モデル[7]
微分方程式膜電位モデルの一つである Quadratic 積分発火型膜電位モデルに対応する非線形積分発火型膜電位モデルが第二世代モデルとして提案された。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。
- 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離散回復変数 U を持たない。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。

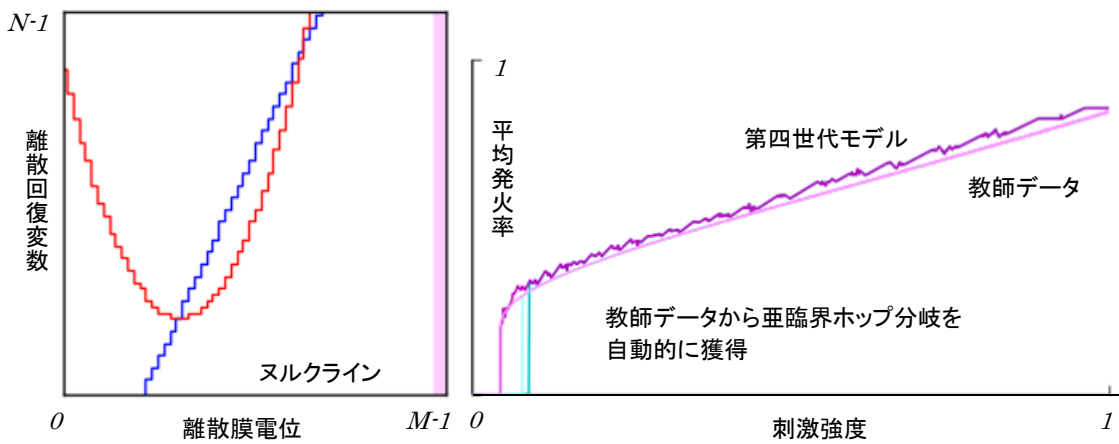
- 第四世代：一般化回転発火型膜電位モデル[8][9]
第四世代モデルは、第三世代回転発火型膜電位モデルの離散平面ベクトル場を一般化して改良したモデルであり、非同期分岐プロセッサを用いた膜電位モデルの中で（本稿発行時点で）最も作り込まれたモデルである。その結果、一般化回転発火型膜電位モデルは、様々な神経細胞モデルが呈する典型的な分岐現象（例えば、超臨界 Andronov-Hopf 分岐、亜臨界 Andronov-Hopf 分岐、リミットサイクルのフォールド分岐、サドルノード分岐、サドルノードホモクリニック分岐など）と、それに伴う非線形入力特性（例えば、class 1 と 2 の excitability 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している。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てきた。
- 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ある。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てきた。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る。
- 第六世代：Toy 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 Toy ネットワークモデルが提案されてきた。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リ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[Berger]）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てきた。

生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics



(a) FPGA 実装された第四世代モデルの初期応答



(b) FPGA 内での 5,000 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

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 [2]
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

3.2.2 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ある[11]。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る[11]。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する。

生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics

- 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てきた。
- 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てきた。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てきた。

3. 2. 3 生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信方式の模索

- 超広帯域インパルス無線通信 (UWB-IR) 向けの符号生成[16]
第一世代の積分発火型膜電位モデルを用いた UWB-IR に適したインパルス列の生成手法が提案され、従来方との比較を通して、ある条件下では提案手法が優れていることが示された。
- 送受信機の同期化手法[6]
インパルス無線通信を実現するための同期化手法の構築のための基礎研究を行い、同期が達成されるパラメータ領域の理論計算手法が示された。

4. 将来展望

本研究の将来展望を以下に記す。

- 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あるが、より Anatomically に Plausible な非同期分岐プロセッサを構築するべく、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」、あるいは「脳が多層構造[17]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る。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[18]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」、あるいは IP 越しの脳型分散ハードウェアである「Brain over IP (BoIP)」などが挙げられる。

- 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る。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る。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」などが挙げられる。
- 生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信方式
生物は長い進化の過程で、中枢系における複雑な通信を非常に低熱量（低カロリー消費量）で実現する術を獲得してきた。一方、前述したように、非同期分岐プロセッサと用いたニューロハードウェアは年々実際の神経系の模倣度が向上している。よって、生物の通信方式を模倣した新しい超低消費電力な通信方式を構築するためにも、本研究をさらに推進する。

参考文献

- [1] E. M. Izhikevich, Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting, The MIT press, 2007.
- [2] 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.

生物の非線形ダイナミクスに学んだインパルス通信

Impulse Communication Method inspired by Biological Nonlinear Dynamics

- [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 Tetsuya 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, An Asynchronous Recurrent Network of Cellular Automaton-based Neurons and its Reproduction of Spiking Neural Network Activities, *IEEE Trans. NNLS*, 2015 (accepted)
- [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, A Novel Asynchronous Cellular Automaton Multi-Compartment Neuron Model, *IEEE Trans. CAS-II*, 2015 (accepted)
- [11] J. O. Pickles, *An introduction to the physiology of hearing*, Emerald Group Publishing, 2012.
- [12] H. Ishimoto, M. Izawa and H. Torikai, Nonlinear filter characteristics from an asynchronous cellular automaton oscillator, *Proc. NOLTA*, 2014 (accepted).
- [13] M. Izawa and H. Torikai, A Novel Hardware-Efficient Cochlea Model based on Asynchronous Cellular Automaton, *Proc. IJCNN* (2015) (accepted).
- [14] M. Izawa and H. 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)
- [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] T. Iguchi, A. Hirata and H. 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)
- [17] A. M. Thomson and A. P. Bannister, Interlaminar Connections in the Neocortex, *Cerebral Cortex*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-14, 2003.
- [18] T. Berger and D. Glanzman, *Toward Replacement Parts for the Brain: Implantable Biomimetic Electronics as Neural Prostheses*, The MIT Press, 2005.

この研究は、平成23年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成24～25年度に実施されたものです。