OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Hardware-Efficient Modeling of Nonlinear Dynamics in Neural Systems
Author(s)	松原, 崇
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/52061
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　　名　（　松原　崇　）	
論文題名	HARDWARE-EFFICIENT MODELING OF NONLINEAR DYNAMICS IN NEURAL SYSTEMS （神経システムにおける非線形ダイナミクスのハードウェア実装に適したモデル化）

論文内容の要旨

本稿は非同期セルオートマトンによる神経細胞モデル(ACAN)とセルオートマトンによる神経細胞モデルの非同期ネットワーク(ANCAN)を提案する．これらはそのダイナミクスが非同期セルオートマトンで記述されている．ACANはモデルや生物の神経細胞に見られる様々な活動とその背後にあるメカニズム(分岐現象)を再現できる．また学習アルゴリズムによってそのダイナミクスを変更し，望ましい活動や分岐現象を再現可能である．さらにACANは小さな非同期順序回路に実装可能であり，既存の神経細胞モデルに比して少ない計算コストしか要求しない．学習アルゴリズムも非同期順序回路に実装可能であり，動的再構成可能デバイスに実装することで，ACANのダイナミクスを実装後に変更することが可能である．この特徴はACANの可塑性の実装に有用である．ANCANはモデルや生体の神経組織の刺激に対する応答である活動を再現可能である．既存の手法に比べ高い精度で再現可能であり，少ないハードウェアしか要求しない．神経システムは入力として外界の情報を感覚器から得，出力として運動器に信号を送り随意・不随意運動を引き起こす，一種のダイナミカルシステムである．また生物は神経システムを外界に合わせて調整することで，自転車に乗るといった新しい活動を学ぶことが出来る．このような神経システムの働きは様々な観点から研究されてきた．神経システムの活動を再現するという観点からは，多くの数理モデルが連続時間・連続状態を持つ非線形なダイナミカルシステムを用いて提案されてきた．しかしそういった数理モデルをデバイスに実装することが一般に困難であり，何らかの変換や誤差の発生がつきまとう．例えば汎用デジタルプロセッサで実装するには離散時間・離散状態で設計する必要があり，異なるクラスのダイナミカルシステムに変換する必要がある．一方ACAN及びANCANは連続時間・離散状態という異なるダイナミカルシステムに属している．また同じクラスに属する非同期順序回路に一切の変換を要さずに実装可能であり，容易性や効率性の点で優れている．またこのクラスの理論解析は類例が少なく，非線形力学の観点からも意義深い．

様式7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　松　原　　崇　）		
	（職）	氏　　名
論文審査担当者	主 査　教 授 副 査　教 授 副 査　教 授 副 査　教 授	潮　俊光 乾口　雅弘 野村　泰伸 鳥飼　弘幸（京都産業大学コンピュータ理工学部）

論文審査の結果の要旨

本論文は、集積回路実装に適した神経系のモデルを複数提案し、それらのモデルの理論解析及び数値解析、モデルの妥当性の検証、試作回路を用いた実機実験、並びに既存モデルに対する優位性の検証に関する研究成果をまとめたものである。第１章の序論と第４章の結論を含め、以下の各章から構成されている。

第２章では、離散状態を持つ非同期セルオートマトンで動作が記述される神経細胞モデル(ACAN)が提案されている。神経細胞は刺激に対して様々な非線形応答を示すが、それらの応答の分類方法として、膜電位の時間波形の特徴に基づいて２０種類に分類する手法が知られている。本章では、提案モデルがそれらの２０種類の膜電位の非線形応答を全て再現できることが示されている。また本章では、提案モデルの非線形現象を解析するための道具として、ポアンカレ写像の考え方を応用した解析手法が提案されている。同解析手法を用いて、提案モデルが呈する分岐現象が理論的及び数値的に解析されており、その結果、提案モデルが、既存の神経細胞の精緻な数理モデルが典型的に呈する局所分岐と大域分岐に類似した分岐現象を呈することが示されている。つまり、提案モデルは、神経細胞の膜電位の時間波形といった表層的な特徴のみならず、神経細胞が呈する分岐現象も再現できることが示されている。さらに本章では、提案モデルに対する学習アルゴリズムが提案されており、提案モデルと学習アルゴリズムの双方が集積回路として実装されている。そして、神経細胞モデルが発生する膜電位の発火パターンーを教師信号として実装回路に提示することによって、回路内部の配線が学習アルゴリズムによって動的に変更され、その結果、教師信号の発生の背後に潜む分岐現象が実装回路内部に自動的に獲得されることが、複数の例題を用いて示されている。

第３章では、前章で提案された神経細胞モデルの簡略化モデルを用いた非同期ネットワーク(ANCAN)が提案されている。そして、提案ネットワークの学習によって、未知の神経細胞集団が呈する多入力多出力の非線形応答を自動的に再現する手法が提案されている。学習対象の例として、電気生理学実験によって得られた神経細胞集団の多入力多出力の非線形応答や、神経細胞集団の精緻な数理モデルが呈する多入力多出力の非線形応答が用いられており、提案ネットワークがそれらの非線形応答をどの程度厳密に再現できるかが解析されている。また、比較対象として、既存のＶＬＳＩ神経補綴装置で用いられているモデルや、多入力多出力の時系列の学習における代表的なモデルや、ハードウェアコストを低く抑えた簡略化神経細胞モデルの結合系などが用いられており、数値実験と実機実験によって詳細に比較が行われている。その結果、電気生理学実験データの再現度、神経細胞集団の精緻な数理モデルの応答の再現度、ハードウェアコストなどの観点から、提案ネットワークと提案学習アルゴリズムが優れていることが示されている。

以上のように本論文は、集積回路実装に適した神経系のモデル化手法を提案し、その解析の枠組みを提案し、学習アルゴリズムを提案しているが、既存のＶＬＳＩ神経補綴装置などに対する優位性を示すことによって、離散状態を持つ非同期セルオートマトン神経系モデルの工学的有用性を示すことに貢献した。よって、博士（工学）の学位論文として価値があるものと認める。