法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-12

DESIGN OF NEUROMORPHIC HARDWARE BASED ON ASYNCHRONOUS CELLULAR AUTOMATON

TAKEDA, Kentaro / 武田, 健太郎

(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
177
(発行年 / Year)
2022-03-24
(学位授与番号 / Degree Number)
32675甲第540号
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2022-03-24
(学位名 / Degree Name)
博士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)
(URL)
https://doi.org/10.15002/00025233

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

論文題目	Design of Neuromorphic Hardware based on Asynchronous Cellular Automaton
氏名	武田　健太郎
学位の種類	博士（工学）
学位番号	第 540 号
学位授与年月日	2022 年 3 月 24 日
学位授与の要件	法政大学学位規則第 5 条第 1 項第 1 号該当者（甲）
論文審査委員	主　査　鳥飼　弘幸　　教授
	副　査　斉藤　利通　　教授
	副　査　安田　彰　　教授
	副　査　川村　新　　教授（京都産業大学）

１．論文内容の要旨

近年，生物の感覚系や中枢神経系の動作を模倣する集積回路（神経模倣回路）と，それらの神経補綴（しんけいほてつ）への応用が盛んに研究されている．感覚系の神経補綴装置の代表例として人工内耳が挙げられる．人工内耳は，蝸牛の動作を模倣する装置であり，先天的及び後天的な理由によって機能が失われた蝸牛の動作を補完することによって聞こえを回復する装置である．また，近年，中枢神経系を対象にした補綴装置の開発も始まっている．例えば，脳の一部の部位の機能が失われた場合に，その部位の動作を模倣する集積回路を用いて脳機能の回復を目指す神経補綴装置が開発されており，2018 年からはヒトの脳を対象にした神経補綴装置の機能検証も始められている．しかしながら，現行の人工内耳や脳の補綴装置は，十分な機能を有しているとは言い難い．これは，蝸牛や脳などの生物の神経系が持つ非線形動力学を集積回路で効率的に模倣するための設計手法が現状では不十分であることが主な原因である．そこで本論文では，生物の神経系が持つ非線形動力学を効率的に集積回路で模倣するための設計手法を提案すること，及び，具体例を用いた同手法の有用性の実証が目的として掲げられている．本論文の構成は以下の通りである．

１章では，神経模倣回路についての背景が述べられ，効率的な神経模倣回路の設計指針が提示されている．具体的には，まず，神経模倣回路の設計手法が四種類に分類されている．一種類目は，常微分方程式を用いて神経模倣回路を設計し，アナログ回路で実装する手法である．二種類目は，差分方程式を用いて神経模倣回路を設計し，スイッチトキャパシタ回路で実装する手法である．三種類目は，離散状態差分方程式を用いて神経模倣回路を設計し，デジタルプロセッサで実装する手法である．四種類目は，非同期散状態差分方程式を用いて神経模倣回路を設計し，非同期順序回路で実装する手法である．従来の神経模倣回路に関する研究のほとんどにおいては，一，二，三種類目の設計手法が用いられてきた．それに対して本章では，神経模倣回路の四種類の設計手法の相互関係が明らかにされ，非同期順序回路を用いた神経模倣回路の設計手法の整備の重要性が指摘されている．

その上で，非同期順序回路を用いた効率的な神経模倣回路の設計指針が提示されている．以下の章では，同設計指針に基づいて様々な神経模倣回路が提案されている．

２章では，非同期順序回路を用いた蝸牛モデルが提案されている．聴覚系の主要な構成要素である蝸牛は複雑な非線形動力学を有し，様々な非線形音声信号処理を実行していることが知られている．しかし，現行の人工内耳は主に線形システム理論を用いていて設計されており，それ故，蝸牛の非線形音声信号処理を十分模倣することができない．そこで本章では，蝸牛の非線形動力学を非同期順序回路として効率的に実装する手法が提案されている．理論解析と数値解析の両面から，提案蝸牛モデルが哺乳類の蝸牛が示す典型的な非線形音声信号処理の特性を模倣できることが示されている．また，Field Programmable Gate Array を用いて提案蝸牛モデルを実装し，その動作が実機実験で確認されている．さらに，従来の蝸牛モデルと比較して，提案モデルが少数の回路素子で実装可能であり，低消費電力で動作可能であることが示されている．

３章では，非同期順序回路を用いた中枢パターン生成器モデルが提案されている．様々な生物において，歩行運動を実現するための制御信号を生成する神経回路が下位中枢に局在していることが知られており，そのような制御信号の生成は中枢パターン生成器によって自動化されていると考えられている．本章では，中枢パターン生成器の非線形動力学を非同期順序回路で効率的に実装する手法が提案されている．中枢パターン生成器の解析においては，同期引き込み現象の解析が重要であるが，本章では，非同期順序回路の同期引き込み現象の効率的な解析手法が提案されている．そして，同解析手法を用いて，提案中枢パターン生成器が多足ロボットの様々な歩行運動を実現するための制御信号を生成できることが示されている．さらに，提案モデルが従来の中枢パターン生成器モデルに比べて少数の回路素子で実装可能であり低消費電力で動作可能であることが示されている．

４章では，非同期順序回路を用いた神経細胞ネットワークモデルが提案されている．まず，非同期順序回路を用いた神経細胞モデルが提案されており，同モデルの非線形動力学の解析手法が提案されている．そして，同解析手法を用いて，提案モデルが典型的な神経細胞が示す非線形応答特性を模倣できることが理論と数値実験の両面から示されている．次に，同神経細胞モデルを用いて，生物の短期記憶や眼球運動の制御において重要な役割を果たしている神経細胞ネットワークである神経積分器の集積回路モデルが提案されている．緻密な数値解析の結果，提案モデルが生物の神経積分器の非線形応答特性を模倣できることが示されている．さらに，本章においても，提案モデルが従来モデルに比べて少数の回路素子で実装可能であり低消費電力で動作可能であることが示されている．

５章では，順序回路を用いた神経細胞モデルの量子ドットセルオートマトンによる実装が検討されている．まず，１～４章で提案された神経模倣回路の設計手法を基にして，量子ドットセルオートマトンによる実装に適した神経模倣回路の設計手法が提案されている．そして，同設計手法を用いて，神経細胞同士のスパイク通信に適した神経細胞モデルが提案されている．さらに，量子ドットシミュレータを用いて提案モデルの動作が緻密に解析

されている．その結果，提案神経細胞モデルが，細胞同士の通信に適した神経スパイク列をロバストに発生できることが示されている．

６章では，本研究で得られた結果がまとめられ，今後の研究の方向性が示されている．

２．審査結果の要旨

本論文では，非同期順序回路を用いた効率的な神経模倣回路の設計指針が示されており，同指針に基づいて様々な神経模倣回路が提案されている．口頭試問を含む審査の結果，下記の点において新規性と工学的有効性を確認した．

1. 蝸牛モデル

   本論文では，哺乳類の蝸牛の典型的な非線形音声信号処理である「非線形帯域通過フィルタ特性」や「結合音抑制」を模倣できる非同期順序回路が提案されている．非同期順序回路を用いて蝸牛の非線形音声信号処理を模倣する試み自体に新規性を見出せる．また，提案モデルが従来の蝸牛モデルに比べて約３割の回路素子数で実装可能であることが示されているが，これには，人工内耳への応用などの観点から工学的な有効性が確認できる．

2. 中枢パターン生成器

   本論文では，非同期順序回路を用いた中枢パターン生成器が提案されているが，この試み自体に新規性を見出せる．また，順序回路に非同期性を導入することによって多足ロボットの歩行に適した制御信号をロバストに生成可能であることが緻密な解析によって示されているが，これには工学的な有効性を確認できる．

3. 神経積分器

   本論文では，非同期順序回路を用いた新しい神経細胞モデルとそのネットワークが提案されており，新規性を見出すことができる．また，提案ネットワークが，生物の神経積分器の非線形動力学を模倣できることが示されている．さらに，提案モデルが従来モデルに比べて約３割の回路素子で実装可能であり約３割の消費電力で動作可能であることが示されているが，これには，神経補綴装置への応用などの観点から工学的な有効性が認められる．

以上，本論文では，様々な神経系の非線形動力学を模倣できる新しい神経模倣回路が提案されている．さらに，それらの回路が従来モデルに比べて効率的に実装可能であることも示されており，神経補綴装置への応用などの観点からも工学に資するところが大きい．よって，本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した．

（報告様式Ⅲ）