

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11482

研究課題名(和文)非同期離散状態システムの理論体系の整備と小型・低消費電力神経補綴装置設計への応用

研究課題名(英文)Development of theories on asynchronous discrete-state system and their applications to designs of small and low-power neural prosthesis devices

研究代表者

鳥飼 弘幸(Torikai, Hiroyuki)

法政大学・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)：本研究では、非同期離散状態システムを用いた生物模倣ハードウェアの設計とその神経補綴装置への応用のための基礎固めに取り組んだ。具体的には、以下の2つのテーマに取り組んだ。(1)非同期離散状態神経細胞モデルを題材にして、非同期離散状態システムの新しい理論解析手法を整備した。(2)非同期離散状態神経振動子ネットワークを題材にして、非同期離散状態システムを用いた生物システムモデルの系統的な設計手法を整備した。(3)非同期離散状態神経細胞モデルを題材にして、小型で低消費電力な非同期離散状態生物模倣ハードウェアの系統的な設計手法を整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、小型で低消費電力な神経補綴装置を開発するための基本技術となる。神経補綴装置の具体例としては、人工内耳や人工海馬などが挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a design method of biomimetic hardware whose dynamics is described by an asynchronous discrete state map. For example, we obtained the following results, (1) We developed an asynchronous discrete state neuron model and related theoretical analysis method. (2) We developed an asynchronous discrete state central pattern generator model and related systematic design method. (3) We developed an asynchronous discrete state neuron model and related efficient implementation method.

研究分野：電気電子回路工学

キーワード：神経補綴

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 本研究では、非同期離散状態システムを用いた生物模倣ハードウェアの設計とその神経補綴装置への応用に取り組む。生物の感覚器や脳は、高度に洗練された非線形力学システムである。これまでに、様々な生物システムの数理モデル化手法が研究されてきたが、それらの代表例として以下が挙げられる。
  - 微分方程式による生物システムのモデル化。そのようなモデルは「連続時間」と「連続状態」を持つ。
  - 差分方程式による生物システムのモデル化。そのようなモデルは「離散時間」と「連続状態」を持つ。
  - デジタル計算機上の数値積分による生物システムのモデル化。そのようなモデルは「離散時間」と「離散状態」を持つ。それらに加えて、偏微分方程式による生物システムのモデル化手法も存在するが、解析の際には空間が離散化されて微分方程式の結合系としてモデル化されることも多いために（神経細胞のマルチコンパートメントモデルなど）、ここでは言及を省略する。
- (2) 疾患などによって機能を失った生物システムを集積回路などの電子デバイスで補完する装置（神経補綴装置）が近年盛んに研究・開発されている。具体例として、内耳の蝸牛の補綴装置である「人工内耳」や、脳を対象とした補綴装置である「人工海馬」などが挙げられる。そのような神経補綴装置の開発のためには、以下などが重要となる。
  - 補綴対象となる生物システムが持つ複雑な動作や機能を再現するための数理モデルの系統的な設計手法が求められる。
  - それに加えて、生物システムの再現度合いのみを追求したモデルではなく、小型で低消費電力な実装が可能なモデルであることが補綴装置への応用の観点から求められる。
- (3) そこで本研究では、「小型で低消費電力な電子デバイス実装に適した生物システムの数理モデル化手法の提案」に取り組む。また、「具体例として人工内耳や人工海馬などの神経補綴ハードウェアを設計し、実機実験によって同提案手法の有効性を示すこと」や、「超低消費電力なポスト CMOS デバイスでの実装のための同提案手法の改良」を目指す。

## 2. 研究の目的

- (1) 非同期離散状態システムの解析手法の整備：  
これまでに我々（応募者とその指導学生）は、非同期離散状態システムの理論的な解析手法や数値解析手法を提案してきたが、それらは場当たりので散発的なものであった。これに対して本研究では、非同期離散状態システムの理論体系や系統的な解析手法の整備に取り組む。
- (2) 非同期離散状態システムを用いた生物システムモデルの系統的な設計手法の整備：  
これまでに我々は、非同期離散状態システムを用いた生物システムの様々な構成要素のモデル（例えば、神経細胞の構成要素である樹状突起のモデルや、蝸牛の構成要素である基底膜のモデルなど）を提案してきた。これに対して本研究では、非同期離散状態システムを用いた統合的な生物システムモデル（例えば、神経細胞の結合系からなる脳コラムのモデルや、基底膜やリンパ液や有毛細胞や螺旋神経節が統合された蝸牛モデルなど）の系統的な設計手法を整備する。また、そのような非同期離散状態生物システムモデルの、生体計測データ（例えば脳や蝸牛の計測データ）へのフィッティング手法の整備にも取り組む。
- (3) 小型で低消費電力な非同期離散状態生物模倣ハードウェアの系統的な設計手法の整備：  
これまでに我々の研究グループでは、非同期離散状態システムを用いた生物システムモデルが数値積分を用いた生物システムモデルに比べて少数のトランジスタで実装できることを示してきたが、それらは場当たりのなものであり、消費電力の解析も不十分であった。これに対して本研究では、小型で低消費電力な非同期離散状態生物模倣ハードウェアの系統的な設計手法の整備に取り組む。また、そのような設計手法の有効性を、Field Programmable Gate Array (FPGA) などの大規模集積回路を用いた実機実装実験を通して検証する。

### 3. 研究の方法

- (1) 非同期離散状態システムの解析手法の整備：  
本研究では、非線形力学システム理論で用いられている様々な解析手法を参考にして、非同期離散状態システムの系統的な解析手法や理論体系を整備する。それらの解析手法を整備することによって、平衡状態・振動・分岐現象・確率的現象・時空間現象と、段階的・系統的に非同期離散状態システムの現象を解析することができる。
- (2) 非同期離散状態システムを用いた生物システムモデルの系統的な設計手法の整備：  
上記の解析手法と最新の離散最適化手法を駆使して、非同期離散状態生物システムモデルの生体計測データへのフィッティング手法の整備に取り組む。具体的には下記などが挙げられる。  
これまでに我々が開発してきた非同期離散状態システムを用いた神経細胞の細胞体モデルや樹状突起モデルなどの構成要素を統合して、神経細胞集団モデルを設計する。  
これまでに我々が開発してきた非同期離散状態システムを用いた蝸牛の基底膜モデルや有毛細胞モデルや螺旋神経節モデルなどの要素を統合して、蝸牛モデルを設計する。  
そのような統合生物システムモデルの生体計測データへの系統的なフィッティング手法を、離散最適化手法を参考にして整備する。
- (3) 小型で低消費電力な非同期離散状態生物模倣ハードウェアの系統的な設計手法の整備：  
神経補綴装置への応用を目指して、下記などに取り組む。  
生体計測データの再現度合いに加えて、実装に必要なトランジスタ数と消費電力も目的関数に取り入れた多目的最適化問題として非同期離散状態生物模倣ハードウェアの設計問題を再定式化し、その解法を、最新の離散多目的最適化手法を参考にして整備する。  
非同期離散状態生物模倣ハードウェアと既存の神経補綴ハードウェアをFPGAを用いて実装し、実機実験を通して、トランジスタ数や消費電力などに関する提案手法の有効性を示す。

### 4. 研究成果

- (1) 非同期離散状態システムの解析手法の整備：  
非同期離散状態神経細胞モデルを題材にして、非同期離散状態システムの新しい理論解析手法を整備した。具体的には、非同期性を生み出すクロック発生源の連続状態ダイナミクスと離散状態のダイナミクスの連成で構成される連続・離散ハイブリッド写像の傾倒的な導出法を提案し、同写像の適切な射影を考えることによって、非同期離散状態神経細胞モデルの非線形応答を理論解析できることを示した。それらの成果を引用文献[1]などで公表した。
- (2) 非同期離散状態システムを用いた生物システムモデルの系統的な設計手法の整備：  
非同期離散状態神経振動子ネットワークを題材にして、非同期離散状態システムを用いた生物システムモデルの系統的な設計手法を整備した。具体的には、生物を対象とした測定データを再現するための、非同期離散状態神経振動子ネットワークのパラメータの自動探索法を提案し、実機実験によって非同期離散状態神経振動子ネットワークが生物の歩容を再現できることを示した。それらの成果を引用文献[2]などで公表した。
- (3) 小型で低消費電力な非同期離散状態生物模倣ハードウェアの系統的な設計手法の整備：  
非同期離散状態神経細胞モデルを題材にして、小型で低消費電力な非同期離散状態生物模倣ハードウェアの系統的な設計手法を整備した。具体的には、非同期離散状態神経細胞モデルの非線形ベクトル場を表現する離散関数のハードウェア実装に適した系統的な設計手法を提案し、同手法で実装された非同期離散状態神経細胞モデルが小型・低消費電力で実装可能なことを実機実験によって示した。それらの成果を引用文献[3]などで公表した。

#### < 引用文献 >

- [1] Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai, A Novel Asynchronous CA Neuron Model: Design of Neuron-like Nonlinear Responses based on Novel Bifurcation Theory of Asynchronous Sequential Logic Circuit, IEEE Trans. CAS-I, Vol. 67, No. 6, pp. 1989 - 2001 (2020)

- [2] Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai, A Novel Hardware-Efficient Central Pattern Generator Model Based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics for Controlling Hexapod Robot, IEEE Access, vol. 8, pp. 139609-139624 (2020)
- [3] Taiki Naka and Hiroyuki Torikai, A Novel Generalized Hardware-Efficient Neuron Model based on Asynchronous CA Dynamics and its Biologically Plausible On-FPGA Learnings, IEEE Trans. CAS-II Vol. 66, No. 7, pp. 1247-1251 (2019)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Naka Taiki, Torikai Hiroyuki	4. 巻 66
2. 論文標題 A Novel Generalized Hardware-Efficient Neuron Model Based on Asynchronous CA Dynamics and Its Biologically Plausible On-FPGA Learnings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs	6. 最初と最後の頁 1247 ~ 1251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSII.2018.2876974	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 A novel spike-train generator suitable for QCA implementation towards UWB-IR applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 436 ~ 452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.9.436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 15
2. 論文標題 A novel hardware-efficient CPG model based on asynchronous cellular automaton	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20180387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.15.20180387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Matsuda Chiaki, Torikai Hiroyuki	4. 巻 65
2. 論文標題 A Novel Generalized PWC Neuron Model: Theoretical Analyses and Efficient Design of Bifurcation Mechanisms of Bursting	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs	6. 最初と最後の頁 1738 ~ 1742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSII.2017.2760509	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 67
2. 論文標題 A Novel Asynchronous CA Neuron Model: Design of Neuron-Like Nonlinear Responses Based on Novel Bifurcation Theory of Asynchronous Sequential Logic Circuit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers	6. 最初と最後の頁 1989 ~ 2001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSI.2020.2971786	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 A Novel Hardware-Efficient Central Pattern Generator Model Based on Asynchronous Cellular Automaton Dynamics for Controlling Hexapod Robot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 139609 ~ 139624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3012706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Kentaro Takeda and Hiroyuki Torikai
2. 発表標題 A novel hardware-efficient CPG model for a hexapod robot based on nonlinear dynamics of coupled asynchronous cellular automaton oscillators
3. 学会等名 IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------