

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03515

研究課題名(和文) 神経補綴のための機能創発するFPGA万能神経細胞ネットワーク

研究課題名(英文) Artificial FPGA EM Cell Network with Emergence Capability for Neural Prosthesis

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、脳の一部を置き換え可能なレベルの高度な性能を持つ神経補綴装置を実現するための基礎技術を確立することを目的としている。それに対して以下などの研究成果を得た。(1) ヒトの脳の神経細胞が持つ非線形力学の模倣に特化した、小型で低消費電力な電子万能神経細胞モジュール及びその自動分化法を開発した。(2) 電子万能神経細胞ネットワークを構成し、同ネットワークに補綴対象部位と同様の機能を発現させて神経補綴装置として機能させるための設計論を構築した。(3) 生体内のノイズなどの悪条件の下でも安定して神経補綴装置として機能する完全無線化電子万能神経細胞ネットワークを実装する方法論を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の身体は自己回復機能を有しているとはいえ脆弱であり、例えば、乳幼児期にインフルエンザに罹患して高熱を発すると内耳内の蝸牛の機能が失われてしまい、その結果、聴覚障害になる場合がある。また、アルツハイマー型認知症などにより脳機能の一部が失われるリスクもある。このように、感覚器や神経系の機能が失われる可能性は誰もが持っており、それら一部失われた機能を人工的に生成した電気信号で補完する技術が神経補綴である。本研究では、特に脳を対象にした高性能な神経補綴装置の開発に取り組むが、これが未来の医療にとって意義深いことは明らかである。

研究成果の概要(英文)：The objective of this project is to establish the fundamental technology to realize a neural prosthesis device that can be replaced with a part of the brain. The following results were obtained. (1) Development of a compact and low-power VLSI EM cell module specialized for mimicking the nonlinear dynamics of neurons in the human brain and an automatic differentiation method for the module. (2) Development of a design methodology to construct a VLSI EM cell network that can work as a neural prosthetic device. (3) Development of a methodology to implement a fully wireless VLSI EM cell network that can function as a neural prosthetic device under noisy conditions.

研究分野：非線形回路工学、医療工学

キーワード：神経補綴

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々の身体は自己回復機能を有しているとはいえ脆弱であり、例えば、乳幼児期にインフルエンザに罹患して高熱を発すると内耳内の蝸牛の機能が失われてしまい、その結果、聴覚障害になる場合がある。また、アルツハイマー型認知症などにより脳機能の一部が失われるリスクもある。このように、感覚器や神経系の機能が失われる可能性は誰しもが持っており、それら一部失われた機能を人工的に生成した電気信号で補完する技術が神経補綴である。神経補綴装置の代表例として、聴覚障害者の聞こえを回復するための装置である「人工内耳」が挙げられる。さらに、疾患などにより損なわれた脳機能を回復するための脳補綴装置の研究開発が急速に進められており、ヒトの脳を対象にした実証実験も開始されている。しかし、従来の脳補綴装置は実用に耐えうる性能を獲得するに至っていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、脳の一部を置き換え可能なレベルの高度な性能を持つ脳補綴装置を実現するための基礎技術を確立することを目的とする。具体的には、あたかも iPS 細胞のように初期万能状態から補綴対象部位の細胞へと機能分化を果たす電子万能神経細胞モジュールを開発することを目的とする。

(2) そして、同細胞モジュールを用いた電子万能神経細胞ネットワークを構成し、補綴対象部位に応じた適切な創発性を発現させるための設計論を構築することを目的とする。

(3) さらに、非侵襲性を高めるために通信と給電が完全無線化された同ネットワークの実装法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、申請者のグループが独自に開発してきた「確率的な状態遷移を有する離散状態系の非線形理論」を用いて電子神経細胞モジュールを設計する。確率的遷移によってモジュールの状態に多様性がもたらされることにより、従来モデルに比べて格段に小型で低消費電力な電子回路として神経細胞モジュールを実装できる。また、モジュールのパラメータを電子回路の配線パターンに対応させることにより、動的再構成が可能なデバイスである Field Programmable Gate Array (FPGA) を用いて万能性を持った神経細胞モジュールを実装する。

(2) また、本研究では、電子万能神経細胞モジュールを用いて、補綴対象部位の解剖学的な構造を反映したネットワーク(電子万能神経細胞ネットワーク)を設計する。これは、ボトムアップ的モデル化手法である。これに、補綴対象部位の外形的な測定データを模倣させるためのトップダウン的なパラメータ最適化手法を協調させることにより、補綴対象を置き換え可能なレベルの高度な補綴性能を実現する。

(3) 生体内には、ゆらぎ、ノイズ、インピーダンスの動的変化などの補綴装置の動作を不安定化させる要因が数多く存在するが、単純な大電力化は生体へのダメージの観点から望ましくない。そこで、脳補綴装置としての実用上の制約条件の下で、通信品質や給電品質なども総合的に最適化する手法を構築し、生体内でも安定して動作する完全無線化神経補綴装置を実装する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、ヒトの脳の神経細胞が持つ非線形力学の模倣に特化した確率的離散状態モデルの設計方法を構築し、同モデルをハードウェアとして効率よく実装する方法論を構築した。具体的には、まず以下のように、離散状態を定義する。

離散膜電位変数 $V \in \{0, 1, 2, \dots, M - 1\}$

離散回復変数 $U \in \{0, 1, 2, \dots, M - 1\}$

実装においては、それらの離散変数はレジスタに符号なし2進数として格納される。次に、以下のように離散関数を定義する。

離散ベクトル場関数 $F_V, F_U : \{0, 1, 2, \dots, M - 1\} \times \{0, 1, 2, \dots, M - 1\} \rightarrow \{-1, 0, 1\}$

実装においては、それらのベクトル場関数はルックアップテーブルとして実装される。また、モデルは以下の入力を受け付ける。

周期クロック $C \in \{0, 1\}$

周期スイッチ信号 $S_V, S_U \in \{0, 1\}$

それらを用いて、以下のように神経細胞モジュールの動作を記述する。

C が立ち上がりエッジのとき

$$V := V + S_V F_V(V, U) + I$$

$$U := U + S_U F_U(V, U)$$

ここで、 I は入力である。また、簡単化のために離散状態変数を2つの場合について記述したが、実際の提案モデルは性能を向上させるために追加の離散状態を有している。以上のようにして実装される小型かつ低消費電力な電子回路が、万能状態の細胞に対応する電子万能神経細胞モジュールである。それらに加えて、同モジュールを様々な神経細胞へと分化させるためのパラメータ最適化手法を開発した。また、電子万能神経細胞モジュールとそのパラメータ最適化手法をField Programmable Gate Array (FPGA)に実装し、実機実験にてそれらの動作を確認した。

(2) 電子万能神経細胞ネットワークを構成し、同ネットワークに補綴対象部位と同様の機能を発現させて高性能な神経補綴装置として機能させるための設計論を構築した。具体的には、補綴装置としての創発性に関連する時空間現象を定量的に特徴づけるための特徴量を導出し、同特徴量を最大化させるためのネットワーク構造の最適化手法を開発した。

(3) 生体内のゆらぎやノイズ、インピーダンスの動的変化などの悪条件の下でも安定して神経補綴装置として機能する完全無線化電子万能神経細胞ネットワークを実装する方法論を構築した。具体的には、インパルス無線系列を用いた生体近接型の無線ニューラルネットワークを設計し、実機実験によってその動作を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kubota Itsuki, Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 71
2. 論文標題 A Novel Ergodic Discrete Difference Equation Cochlear Model: Theoretical Analyses, Reproduction of Mammalian Nonlinear Sound Processing, and Comparison of Implementation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs	6. 最初と最後の頁 877 ~ 881
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSII.2023.3313491	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, Ishikawa Masato, Torikai Hiroyuki	4. 巻 15
2. 論文標題 A novel ergodic discrete difference equation multi-compartment neuron model: various dendritic phenomena and on-chip differential conditioning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 132 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.15.132	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 Onodera Kazuhito, Torikai Hiroyuki	4. 巻 20
2. 論文標題 A novel design method of simplified central nervous system model of C. elegans based on hybrid dynamics of sequential logic and numerical integration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 20230110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/elex.20.20230110	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 Shirafuji Shogo, Torikai Hiroyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 A Novel Ergodic Cellular Automaton Model of Gene-Protein Network: Theoretical Nonlinear Analyses and Efficient FPGA Implementation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 300 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3231895	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 Kishimoto Yui, Kubota Itsuki, Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 A novel hardware-efficient auditory neuron model based on ergodic cellular automaton and its first pitch-shift effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 391 ~ 396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.391	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 13
2. 論文標題 Phase-locking phenomena in ergodically coupled CA phase oscillators and its theoretical analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 434 ~ 439
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.434	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 Komaki Sho, Takeda Kentaro, Torikai Hiroyuki	4. 巻 69
2. 論文標題 A Novel Ergodic Discrete Difference Equation Model of Central Pattern Generator: Theoretical Analysis and Efficient Implementation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs	6. 最初と最後の頁 1767 ~ 1771
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSII.2021.3108846	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 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Sho Komaki, Kentaro Takeda, and Hiroyuki Torikai
2. 発表標題 A novel asynchronous sequential logic model of central pattern generator for quadruped robot: systematic design and efficient implementation
3. 学会等名 IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Suzuki and H. Torikai
2. 発表標題 A Novel Hardware-Efficient Network of Ergodic Cellular Automaton Neuron Models and its On-FPGA Learning
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 I. Kubota, K. Takeda and H. Torikai
2. 発表標題 A novel ergodic cellular automaton cochlear model: reproduction of nonlinear sound processing functions of mammalian cochlea and efficient hardware implementation
3. 学会等名 IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Nakamura and H. Torikai
2. 発表標題 A Novel Ergodic Sequential Logic CPG: Efficient FPGA Implementation and Realizations of Various Gaits and their Safe Transitions
3. 学会等名 IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Shiomi and H. Torikai
2. 発表標題 A novel hardware-efficient ergodic sequential logic spiking neural network and reproductions of biologically plausible spatio-temporal phenomena towards development of neural prosthetic device
3. 学会等名 IEEE-INNS International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究分担者	松原 崇 (Matsubara Takashi) (70756197)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	若宮 直紀 (Wakamiya Naoki) (50283742)	大阪大学・大学院情報科学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	関屋 大雄 (Sekiya Hiroo) (20334203)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	

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
---------	---------