

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540127

研究課題名(和文)自律性を有するニューラルネットワークの設計とその回路実装に関する研究

研究課題名(英文) Design of Neural Network with Autonomy and its Circuit Implementation

研究代表者

上手 洋子 (Yoko, Uwate)

徳島大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：80582642

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ニューロサイエンスで解明された新しい脳情報処理機能を人工ニューラルネットワークに応用したときの自律性について調査を行う。近年、認知過程において、ニューロン群の発火パターンが多角形構造を示すことが明らかにされてきている。そこで、我々は、進振動子ニューロンモデルを多角形状に結合した場合の調査を行う。

次に、ニューラルネットワークの回路化にむけた取り組みとして、ニューロンモデルを1次元写像に置き換えたシステムを考える。さらに、提案するニューラルネットワークの回路実装を行う。回路に実現することで、より高速に膨大なデータを処理することが可能となり、さまざまな応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigate autonomy when applying new brain information processing function clarified by neuroscience to artificial neural network. Recently, it has been clarified that firing pattern of neuron group shows polygonal structure in cognitive process. Therefore, we investigate the case where the advanced oscillator neuron model is combined with a polygonal shape.

Next, as an approach toward circuit implementation of a neural network, consider a system in which a neuron model is replaced with a one-dimensional map. Furthermore, we implement the circuit of the proposed neural network. By realizing it in a circuit, enormous data can be processed faster and various applications are expected.

研究分野：非線形回路工学

キーワード：ニューラルネットワーク 脳情報処理 複雑系ネットワーク 自律性 同期現象

1. 研究開始当初の背景

近年、ニューロサイエンスの目覚ましい発展に伴いこれまで未解明であった脳の高次機能が明らかにされている。こういった脳情報処理機能をモデリングした人工ニューラルネットワークのさまざまな数理モデルが提案されている。しかしながら、生物学情報処理システムと人工ニューラルネットワークの性能や機能には大きなギャップが存在する。このギャップを埋め、さらなる高次機能を持つ人工ニューラルネットワークの開発が必要である。申請者は、これまでセルアセンブリという脳の情報処理機能の数理モデルを階層型ニューラルネットワークの中間層に応用したネットワークを考案し、その有効性を確認している。

本研究課題の斬新なアイディアは、人工ニューラルネットワークの非効率な学習を自律性に应用することである。ニューラルネットワークの研究では、いかに効率良く学習するネットワークを開発するかが花形のテーマであった。しかし、我々は、一見非効率に見える学習プロセスが、ネットワークの柔軟性や耐久性といったこれからのニューラルネットワークに必要とされる機能に重要な役割をしているのではないかと考える。実際に申請者らは、セルアセンブリ機能を応用したニューラルネットワークに対して、学習後にある中間層ニューロンがダメージを受けて動作しなくなった場合についても調査を行った。コンピュータシミュレーションによって、提案ニューラルネットワークはダメージの影響が少ないことを確認している。この研究の成果は、脳の情報処理機能をニューラルネットワークに反映しており、ネットワークが柔軟性や耐久性を持つことでより複雑な情報処理に適応できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、ニューロサイエンスで解明された新しい脳情報処理機能を人工ニューラルネットワークに応用したときの自律性について調査を行う。ここでの自律性とは、ニューラルネットワークがあたかも独自の意図を持っているかのごとく振る舞う現象のことを意味する。人工ニューラルネットワークに自律性を持たせることができれば、工学アプリケーションだけでなく社会全体に役立つシステムの開発につながる。また、生物学ニューラルネットワークとのギャップを埋めることができ、より物理現象に近いニューラルネットワークを構築することが可能となる。近年明らかになったニューロサイエンスの成果として、認知過程において、ニューロン群の発火パターンが多角形構造を示すことが明らかにされてきている。これまでのニューラルネットワークの研究では多角形トポロジーに注目したものは多くされていない。そこで、我々は、進

振動子ニューロンモデルを多角形状に結合した場合の調査を行う。

次に、ニューラルネットワークの回路化にむけた取り組みとして、ニューロンモデルを1次元写像に置き換えたシステムを考える。

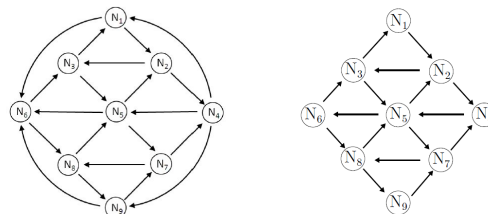
さらに、提案するニューラルネットワークの回路実装を行う。回路に実現することで、より高速に膨大なデータを処理することが可能となり、さまざまな応用が期待される。

3. 研究の方法

(1) 多角形構造による環状抑制形ニューラルネットワークの振動現象

近年、ニューラル振動子や環状制御形ネットワークなどのニューラルネットワークによる発振モデルが提案されている。特に、環状制御形ネットワークは単純な構造で振動現象が観測可能である。発振ニューラルネットワークは結合方法によって発振が変化する。ここでは、近年、脳科学で明らかになった多角形発火パターンを応用する。そして、環状抑制形ネットワークを構成するニューロンの入出力に着目し、多角形構造を用いた環状抑制形ネットワークについて調査を行う。

図1にシミュレーションで用いたネットワークモデルの一例を示す。ニューロン数が  $m=9$  個のときの、対称および非対称ネットワークについての振動現象を観察する。



(a)  $m=9$  (対称). (b)  $m=9$  (非対称).

図1. ネットワークモデル ( $m=9$ ).

(2) 時間遅れ結合による2つの一次元写像の振舞い

ニューラルネットワークの回路実装への取り組みの予備調査として、1次元写像を時間遅れ結合した場合の現象について調査を行う。1次元写像としては、キュービック写像を用い、遅れ時間をパラメータとしたときの、結合マップの振舞いについてシミュレーションを行う。

2つのロジスティック写像の時間遅れ結合システムは以下の式で記述される。

$$f(x) = ax^3 + x(1+a),$$

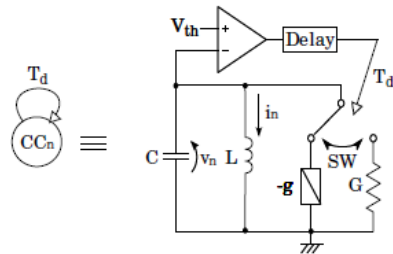
$$\begin{cases} x_{(1,i+1)} = (1-g)f(x_{(1,i)}) + gf(x_{(2,i-\tau_1)}) \\ x_{(2,i+1)} = (1-g)f(x_{(2,i)}) + gf(x_{(1,i-\tau_2)}) \end{cases}$$

ここで、キュービックマップのパラメータは6周期窓付近のインタミテンシーを生成する値に設定する。

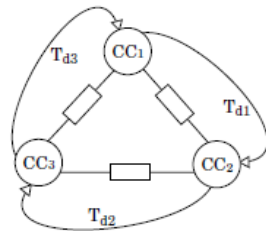
### (3) 時間遅れ結合によるカオス回路の同期現象

本研究課題の最終ステージとして、ニューラル振動子ネットワークの回路実装を行う。ニューラル振動子を、カオス回路としてみたて、先行調査の1次元写像の時間遅れ結合システムで得られた知見を活かし、回路にした場合の振舞いを調査する。

用いたカオス回路およびシステムモデルを図2に示す。



(a) 時間遅れを含むカオス回路.



(b) システムモデル.

図2. リング型結合カオス回路モデル.

## 4. 研究成果

### (1) 多角形構造による環状抑制形ニューラルネットワークの振動現象

本テーマでは、ニューロン数を  $m=9$  として、多角形構造の構築を行った。このモデルは結合荷重  $W=-25.0$  にてニューロン同士を結合してシミュレーションを行った。

シミュレーションの結果を図3に示す。対称なシステムでは、9相同期を観測できた。それに対して、非対称なシステムでは発振が確認できなかった。

これらの結果から、発振ニューラルネットワークでは、ニューロン間の結合方法により特徴ある発振を得ることが可能であることがわかった。

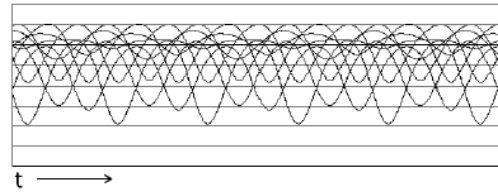
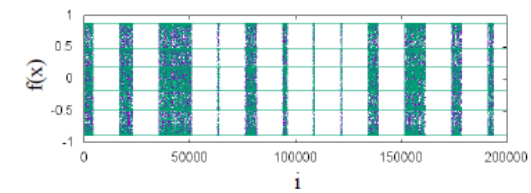


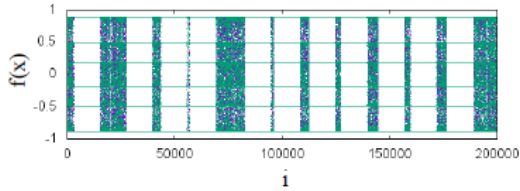
図3.  $m=9$ の対称多角形構造モデルの発振.

### (2) 時間遅れ結合による一次元写像の振舞い

2つの結合1次元写像の遅れ時間  $\tau_1$  と  $\tau_2$  の値を変えたときの、同期率の調査を行った。図4にシミュレーション結果を示す。図からわかるように、結合に遅れがない場合よりも遅れをいれたときのほうがラミナー部の同期範囲が広いことが確認された。



(a)  $\tau_1=0, \tau_2=0$  (遅れなし).



(b)  $\tau_1=1, \tau_2=5$  (遅れあり).

図4. 2つの結合キュービック写像の時系列.

次に遅れ時間  $\tau_1$  および  $\tau_2$  の値を変化させたときの平均ラミナー長のシミュレーション結果を図5に示す。この結果より、 $\tau_1 + \tau_2$  が6の倍数になるときに、平均ラミナー長の長さが長くなることがわかった。つまり同期率の向上が観測された。6の倍数でラミナー長が長くなる理由として、設定したキュービック写像が6周期窓付近のインタミテンシーカオスであることが考えられる。

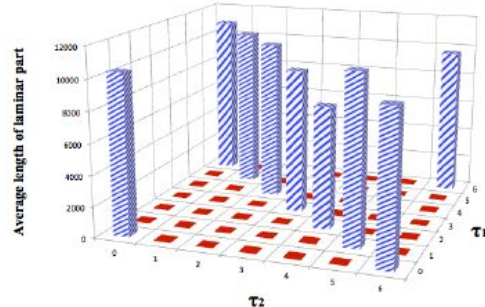


図5. 平均ラミナー長の分布.

(3) 時間遅れ結合によるカオス回路の同期現象

3a) 3つの時間遅れが同じ場合(対称)

まず、時間遅れパラメータの  $T_{d1}$ 、 $T_{d2}$  および  $T_{d3}$  が同じ場合のシミュレーション結果を図6に示す。

図6(a)はそれぞれ3つのカオス回路のアトラクタ、図6(b)はカオス回路間の位相差、図6(c)はカオス回路の電圧波形、そして図6(d)はポアンカレ断面を示している。

この結果から、3つのカオス回路の同期状態がスイッチングしていることがわかる。また、振幅の増減する周期が3つのカオス回路で異なることが観測できた。

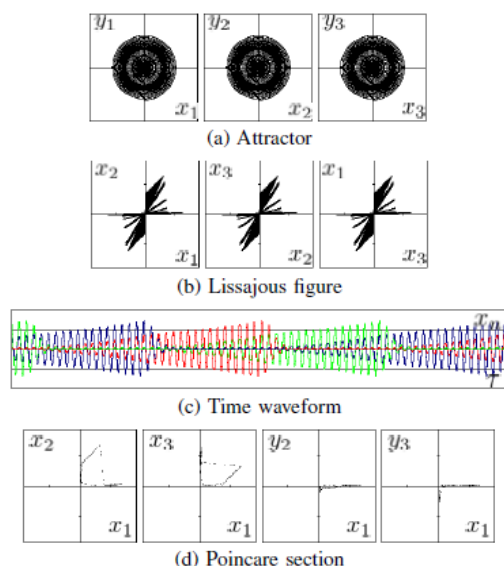


図6. 3つの時間遅れが同じ場合のシミュレーション結果 ( $T_{d1}=T_{d2}=T_{d3}=$  ) .

3b) 3つの時間遅れが異なる場合(非対称)

続いて、時間遅れをひとつだけ他と違う値に設定した場合の同期現象について調査を行う。

時間遅れパラメータの  $T_{d1}=1.2$ 、 $T_{d2}=T_{d3}=$  と設定した場合のシミュレーション結果を図7に示す。対称の場合と異なる点として、カオス回路1とカオス回路2の位相差がより多くの値を取っている。また、同期状態のスイッチング周期は、対称な時間遅れの時より長くなっていることがわかる。

この現象は、先ほど1次元写像の時間遅れ結合と同じ現象であることがわかった。よって、ネットワークポロジの非対称性がその振る舞いに大きな影響を与えると考えられる。

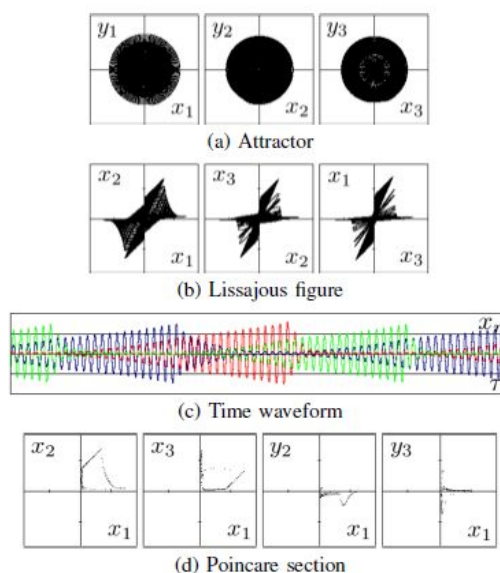


図7. 3つの時間遅れが異なる場合のシミュレーション結果 ( $T_{d1}=1.2$ 、 $T_{d2}=T_{d3}=$  ) .

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 20 件)すべて査読有り

1. Masaki TAKEUCHI, Thomas OTT, Haruna MATSUSHITA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "K-Means Algorithm Using Improved Firefly Algorithm," Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp. 225-228, Feb. 2017.
2. Masaki MORIYAMA, Masaki TAKEUCHI, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Analysis of Firefly Algorithm Combined with Chaotic Map," Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp. 229-232, Feb. 2017.
3. Daiki NARIAI, Minh Hai TRAN, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization in Two Rings of Coupled Three van der Pol Oscillators," Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp. 289-292, Feb. 2017.
4. Katsuki NAKASHIMA, Kazuki UETA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization of Coupled Two Rings of Chaotic Circuits," Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp. 325-328, Feb. 2017.

5. Shuhei HASHIMOTO, Takahiro CHIKAZAWA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization Phenomena in Complex Networks of Coupled Chaotic Circuits with Different Degree Distribution," Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), pp. 333-336, Feb. 2017.
6. Kazuki NAGAO, Shinsaburo KITAKA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Deep Learning Improving Learning Efficiency by Using Noise for Back Propagation," Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'16), pp. 1-4, Dec. 2016.
7. Masaki TAKEUCHI, Haruna MATSUSHITA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Improved Firefly Algorithms Including Slow Fireflies," Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'16), pp. 53-56, Dec. 2016.
8. Seiya KITA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Switching Synchronization States of Ring System of Chaotic Circuit Including Time Delay in One-Direction," Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'16), pp. 67-70, Dec. 2016.
9. Yoko UWATE, Yuichi TANJI and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization in Oscillators Coupled by Transmission Line Model with Different Length," Proceedings of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16), pp. 455-458, Mar. 2016.
10. Yoko UWATE, Yuichi TANJI and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization in Two van der Pol Oscillators Coupled by Transmission Line Model," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'15), pp. 109-112, Dec. 2015.
11. Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization in Bubble Structure Using Coupled Oscillators," Proceedings of International Workshop on Vision, Communications and Circuits (IWVCC'15), pp. 93-95, Oct. 2015.
12. Kosuke OI, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization Phenomena of Complex Networks by Using Parametrically Excited Oscillators," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Maps and their Applications (NOMA'15), pp. 22-25, Jun. 2015.
13. Yuki FUJISAWA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Delay-Induced Synchronization States in Two Coupled Cubic Maps," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Maps and their Applications (NOMA'15), pp. 30-33, Jun. 2015.
14. Kazushige NATSUNO, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Image Processing by Cellular Neural Networks with Reinforcement Learning," Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'14), pp. 46-48, Dec. 2014.
15. Jun SHIOMOTO, Yoko UWATE, Thomas OTT and Yoshifumi NISHIO, "Comparison of Synchronization Phenomena in Three Network Topologies," Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'14), pp. 36-38, Dec. 2014.
16. Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Oscillation Death and Amplitude Change in Coupled van der Pol Oscillators with Strong Frustrations," Proceedings of IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS'14), pp. 233-236, Nov. 2014.
17. Yuki SHOJI, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronizations and Oscillations of Negative Coupled Neural Oscillators," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'14), pp. 827-830, Sep. 2014.
18. Jun SHIOMOTO, Yoko UWATE, Thomas OTT and Yoshifumi NISHIO, "Breakdown of Inter-Cluster Synchronization of Coupled Chaotic Circuits Arranged in One-Dimensional Coordinate," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'14), pp. 640-643, Sep. 2014.
19. Yoko UWATE, Yoshifumi NISHIO and Ruedi STOOP, "Frustrations in Strongly Coupled Polygonal Oscillatory Networks," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'14), pp. 377-380, Sep. 2014.
20. Takuya INOUE, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Effectiveness of Combination of Artificial Immune System and Virus Theory of Evolution for QAPs," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA'14), pp.

160-163, Sep. 2014.

〔学会発表〕(計 8 件)

1. Seiya KITA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization State of a Ring of Coupled One-Direction Time-Delayed Chaotic Circuits," IEEE CASS Shanghai and Shikoku Chapters Joint Workshop on Circuits and Systems (SSJW'16), (no paper), 24<sup>th</sup> Nov. 2016, 上海 (中国) .
2. Kazuki NAGAO, Shinsaburo KITAKA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Deep Learning for Noisy Back Propagation," IEEE CASS Shanghai and Shikoku Chapters Joint Workshop on Circuits and Systems (SSJW'16), (no paper), 24<sup>th</sup> Nov. 2016, 上海 (中国) .
3. Masaki TAKEUCHI, Haruna MATSUSHITA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Features of Firefly Algorithm Increasing Females", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS'16), p. S1B.7, 1<sup>st</sup> Aug. 2016, 台南 (台湾) .
4. Daiki NARIAI, Minh Hai TRAN, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Synchronization Phenomena in a Ring of Coupled Three van der Pol Oscillators", Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS'16), p. S2B.7, 1<sup>st</sup> Aug. 2016, 台南 (台湾) .
5. Yoko UWATE, Yoshifumi NISHIO and Ruedi STOOP, "Synchronization in Frustrated Coupled Oscillatory Systems," IEEE CASS Guangzhou and Shikoku Chapters Joint Workshop on Circuits and Systems (GSCAS'16), 15<sup>th</sup> Jul. 2016, 広州 (中国) .
6. Masaki TAKEUCHI, Haruna MATSUSHITA, Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Firefly Algorithm Focused on Female Moving Distance," IEEE CASS Guangzhou and Shikoku Chapters Joint Workshop on Circuits and Systems (GSCAS'16), 15<sup>th</sup> Jul. 2016, 広州 (中国) .
7. Yoko UWATE and Yoshifumi NISHIO, "Social Network Modeling by using Coupled Oscillatory Systems", TMAC Spring Symposium 2016, 29<sup>th</sup> Feb. 2016, マラッカ (マレーシア) .

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6 . 研究組織

##### (1)研究代表者

上手 洋子 (UWATE YOKO)  
徳島大学・大学院理工学研究部・准教授  
研究者番号 : 80582642

##### (2)研究分担者

西尾 芳文 (NISHIO YOSHIFUMI)  
徳島大学・大学院理工学研究部・教授  
研究者番号 : 80253227

##### (3)連携研究者

( )

研究者番号 :

##### (4)研究協力者

( )