

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00332

研究課題名(和文) 樹状突起におけるシナプス間の相互作用を考慮したニューロンモデルの提案と検証

研究課題名(英文) Neuron Model based on Interaction among Synapses on Dendrites

研究代表者

唐堂 由其 (TODO, YUKI)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：70636927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非線形な特性をもつシナプスと樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮した樹状突起ニューロンモデル(DNM)を提案した。従来のMcCulloch & Pittsモデルに比べ、提案した樹状突起ニューロンモデル(DNM)では、単一ニューロンだけでも線形分離不可能な問題を解くことができることを理論的かつ計算機シミュレーションにより証明した。更に、シナプスの多様性を非線形シグモイド関数で近似し、より複雑な非線形連続関数に限りなく近似できることを数学的に証明し、計算機シミュレーションにより検証した。提案した樹状突起ニューロンモデル(DNM)は、神経細胞樹状突起の構造まで予測できた。

研究成果の概要(英文)：In this studies, a dendritic neuron model (DNM) based on the nonlinear synapses and their nonlinear interaction among them on dendrites was proposed. Compared with the traditional McCulloch & Pitts model, the proposed dendritic neuron model (DNM) was proved theoretically and by computer simulations to be capable of solving the linear un-seperatable problems with only one DNM neuron. The proposed dendritic neuron model (DNM) was also be proved mathematically and confirmed by computer simulations to be capable of approximating any complex nonlinear continuous functions. Finally, the proposed dendritic neuron model (DNM) also predicted dendritic structures of several actual neurons successfully.

研究分野：ニューロンコンピューティング

キーワード：ニューロン 樹状突起 シナプス 相互作用 ニューロンコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

(1) 脳の優れた情報処理能力は、脳における神経細胞（ニューロン）の樹状突起（シナプス結合）を介した様々な相互作用により実現されているので、脳の計算能力を向上するためにも、脳の動作原理を知るためにも、より忠実かつ高度なモデルを構築することが重要である。今世紀初頭、Golgi, Cajal らによって、脳の神経回路網が多く神経細胞（ニューロン）の結合したものであることが明らかにされた①。神経細胞の最も代表的なモデルは、1943年にMcCullochとPittsによって提唱されたものであり、現在でも広く用いられている②。しかし、このモデルは神経細胞の特性の空間的線形荷重と閾値作用しか考慮していないので、すべての神経細胞が同じ形態となり、樹状突起における相互作用が一切含まれていない。

(2) 近年、哺乳類小脳のプルキンエ細胞や海馬の錐体細胞での研究から、樹状突起は単にシナプス入力を荷重する役割だけではなく、その枝上のチャンネルなどの機能によって神経細胞の演算過程に積極的に関与していることがわかってきた③。しかし、有力なモデルはないのが現状である④。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮した新しいモデルを提案すること、新しいモデルが任意の非線形関数を実現できる「万能性」を証明すること、シナプスの可塑性によって樹状突起を形成するモデルの「学習性」を実証すること、を目的とする。このような新しいモデルが構築されれば、沈滞したニューロンコンピューティング並びに人工知能分野の新たな突破口になる。またこのモデルを用いて多くの神経細胞が予測されれば、未知の神経細胞の発見・特定、そして人工再生、更には脳の動作原理の理解・解明につながる事が大いに期待できる。

3. 研究の方法

McCulloch & Pitts ニューロンモデルにおける空間的加算としきい値作用等のみのモデルに樹状突起のメカニズムに基づく新しいニューロンモデルを取り入れたシミュレーション用ソフトウェアを再開発する。更に、数学的手法を使い、提案モデルの「万能性」を証明するとともに、計算機シミュレーションを用いて検証する。最後に提案した学習アルゴリズムを上記のシミュレーション用ソフトウェアに実装し、運動方向検出細胞、水平・垂直運動検出細胞、拡大・縮小運動検出細胞および時計回り検出細胞に対し、該当教師信号を与え学習によって、不要なものを淘汰し、有用なものを強化固定することで、成熟した機能の樹状突起を形成する。

4. 研究成果

(1) 本研究では、樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮した新しいモデルを提案した。まず、シナプスの多様性とその非線形特性を二つのシナプスパラメータをもつシグモイド関数で近似し、そのシナプスパラメータの変化より複雑な非線形シナプス特性：興奮性シナプス；抑制性シナプス；常に1接触及び常に0接触の4つのシナプス状態を作り出すができた(図1)；更に、樹状突起における非線形作用を掛け算とした。そのため、同じ樹状突起の枝にある興奮性シナプスと抑制性シナプスの相互作用(掛け算)により、伝統的なMcCulloch & Pittsモデルで実現できないシナプス間の相互作用やシナプス前抑制などを実現できた。

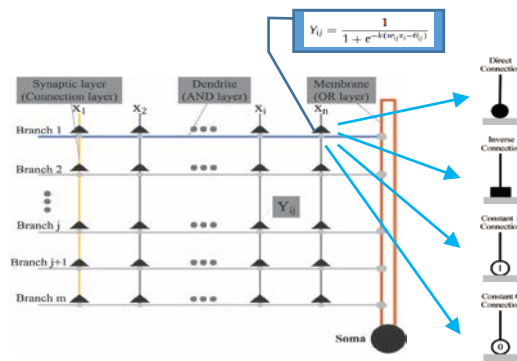


図1. 樹状突起におけるシナプス間の非線形相互作用を考慮したニューロンモデル

(2) 更に、本研究では、提案のモデルに対し、理論的な解析や計算機シミュレーションなどを行い、既存の実験データなどと照らし合わせ、提案のモデルの有効性及び忠実性を確認した。まず、本提案のニューロン一つだけでも線形分離不可能なExOR問題(図2)、更に任意の複雑な論理関数を解くことができることを理論的に証明した。次に、本提案のモデルで任意の複雑な連続関数に限りなく近似できることを数学的に証明し、計算機シミュレーションにより検証した。

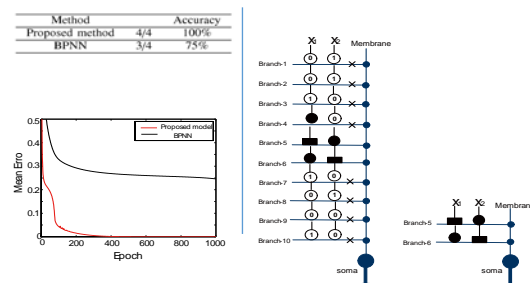


図2. 提案のニューロン一つだけで線形分離不可能なExOR問題の解答例

(3) 最後に、本研究では、バックプロパゲーション学習則を本提案のモデルに適用し、提案モデルの学習アルゴリズムを確立した。まず、本研究では、樹状突起の数と形態が任

意で、全てのシナプス間に相互作用があると仮定し、入力パターンと教師信号を与えた学習により、不要なものを淘汰し、必要なものを強化固定することで、成熟した機能の樹状突起を形成することができることを確認した。次に、運動方向検出ニューロンの樹状突起の構造、それらの樹状突起の詳しい構造や、結合状態までを同定することができた。更に、本研究では、本提案のモデルを用い、乳癌診断（図3）や経済動向予測（図4）などに応用し、その有効性を実証した。

The average sensitivity and specificity of DNM and BPNNs

Branch/ HL node	The average sensitivity(%)		The average specificity(%)	
	NMDN	BPNNs	NMDN	BPNNs
45	80	95.0139±1.5804	86.4167±14.0792	99.9545±0.1795
81	81	86.8333±12.1506	99.9545±0.1795	97.4060±14.0075
				97.4812±14.0128

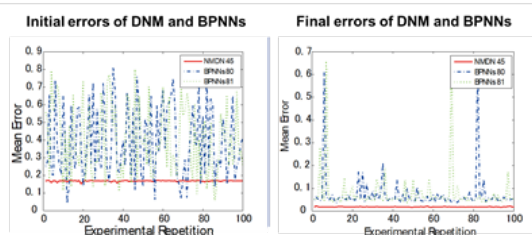


図3. 提案モデルの乳癌診断への応用

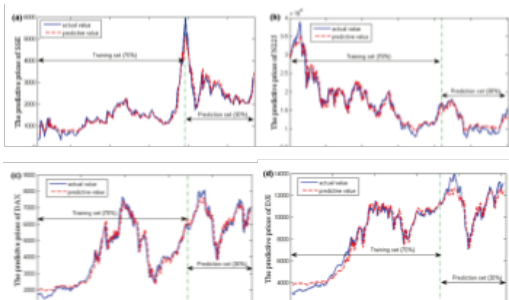


図4. 提案モデルの経済動向予測への応用

#### <引用文献>

- ① Histologie du Systeme Nerveux de l'Homme et des Vertebres, Paris: Maloin, 1911
- ② Warren S. McCulloch, Walter Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bull. Math. Biophysics*, vol. 5, no. 4, pp. 115-133 Dec. 1943
- ③ Hagai Agmon-Snir, Catherine E. Carr & John Rinzel, "The role of dendrites in auditory coincidence detection," *Nature*, vol. 393, pp.268-272, May 1998
- ④ London M1, Häusser M., "Dendritic computation," *Annu. Rev. Neurosci.*, 2005

#### 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 13 件)

- ① Aorigele, Zheng Tang, Yuki Todo, and Shangce Gao, "A hybrid discrete imperialist competition algorithm for gene selection for microarray data," *Current Proteomics*, vol. 15, no.2, pp.99-110, 2018, 査読有  
DOI:10.2174/157016461466617112815232  
7
- ② Shuangbao Song, Shangce Gao, Xingqian Cheng, Dongbao Jia, Xiaoxiao Qian, and Yuki Todo, "AIMOES: Archive Information Assisted Multi-objective Evolutionary Strategy for Ab Initio Protein Structure Prediction," *Knowledge-Based Systems*, vol. 146, pp.58-72, April 2018, 査読有  
SCI:, EI: 20180604760212
- ③ Yajiao Tang, Junkai Ji, Shangce Gao, Hongwei Dai, Yang Yu, and Yuki Todo, "A pruning neural network model for credit classification analysis," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol.2018, Article ID 9390410, 22 pages, Feb. 2018, 査読有  
SCI: 000426177200001, FX6EY
- ④ Junkai Ji, Shangce Gao, Shuaiqun Wang, Yajiao Tang, Hang Yu, and Yuki Todo, "Self-adaptive Gravitational Search Algorithm with A Modified Chaotic Local Search," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 17881-17895, September 2017, 査読有  
SCI:000411791700002, FI2RX, EI: 20173704161497
- ⑤ Zhenyu Song, Shangce Gao, Yang Yu, Jian Sun, and Yuki Todo, "Multiple Chaos

- Embedded Gravitational Search Algorithm,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol.E100-D, No.4, pp.888-900, Apr. 2017, 查 読 有 SCI: 000399371100033, ES2PT, EI: 20171703593869
- ⑥ Aorigele, Zheng Tang, Yuki Todo, Shangce Gao, “A Hybrid Imperialist Competition Algorithm for Feature Selection for Gene Expression Data,” *Current Proteomics* Vol. 15, No. 2, pp. 99-110, Apr. 2017, 查 読 有
- ⑦ Wei Chen, Jian Sun, Shangce Gao, Jiu-jun Cheng, Jiahai Wang, and Yuki Todo, “Using A Single Dendritic Neuron to Forecast Tourist Arrivals to Japan,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol.E100-D, No.1, pp.190-202, Jan. 2017, 查 読 有  
SCI: 000393063800022, EJ2TJ, EI: 20170203234467
- ⑧ Zhe Xu, Yirui Wang, Sheng Li, Yanting Liu, Yuki Todo, and Shangce Gao, “Immune Algorithm Combined with Estimation of Distribution for Traveling Salesman Problem,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 11, no. S1, pp.S142-S154, June 17, 2016, 查 読 有  
SCI: 000384886700019, DY1XC, EI: 20162602534388
- ⑨ Tianle Zhou, Shangce Gao, Jiahai Wang, Chaoyi Chu, Yuki Todo and Zheng Tang, “Financial time series prediction using a dendritic neuron model,” *Knowledge-Based Systems*, vol.105, pp.214-224, August 1, 2016, 查 読 有  
SCI: 000378961200018, DQ1KZ, EI: 20162402481594
- ⑩ Tao Jiang, Shangce Gao, Dizhou Wang, Junkai Ji, Yuki Todo, and Zheng Tang, “A Neuron Model with Synaptic Nonlinearities in a Dendritic Tree for Liver Disorders,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol.12, no.1, pp.105-115, Jan. 2016, 查 読 有  
SCI:000390352100014, EF5DY, EI: 20165003131131
- ⑪ Junkai Ji, Shangce Gao, Jiu-jun Cheng, Yuki Todo, and Zheng Tang, “An approximate logic neuron model with a dendritic structure,” *Neurocomputing*, vol.173, no.3, pp.1775-1783, 15 January, 2016, 查 読 有  
SCI:000366879800130, CZ1QG, EI: 20160401850168
- ⑫ Zijun Sha, Lin Hu, Yuki Todo, Junkai Ji, Shangce Gao, and Zheng Tang, “The Breast Cancer Classifier using Neuron Model with Dendritic Nonlinearity,” *IEICE Transaction on Information and Systems*, Vol.E98-D, No.7, pp.1365-1376, Jul. 2015, 查 読 有  
SCI:000359474300011, CO9DZ, EI: 20153001049206
- ⑬ Shuaiqun Wang, Shangce Gao, Aorigele, Yuki Todo, Zheng Tang, “A Multi-learning Immune Algorithm for Numerical Optimization,” *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, Vol.E98-A,No.1,pp.362-377, January 2015, 查 読 有  
SCI:000359464100038, CO9AL, EI: 20151100639385

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yirui Wang, Zhe Xu, Jian Sun, Fang Han, Yuki Todo, and Shangce Gao, “Ant Colony Optimization with Neighborhood Search for Dynamic TSP,” *7<sup>th</sup> International Conference on Swarm Intelligence*, LNCS 9712, pp. 434-442, Padma Resort at Legian, Bali, Indonesia, June 25-30, 2016, 査読有 EI: 20170103215651
- ② Aorigele, Shuaiqun Wang, Zheng Tang, Shangce Gao, Yuki Todo, “Improved Binary Imperialist Competition Algorithm for Feature Selection from Gene Expression Data,” *2016 International Conference on Intelligent Computation*, August 2-5, Lanzhou, China, LNAI 9773, pp. 67-78, 2016, 査読有 EI: 20163002641774
- ③ Sheng Li, Tao Jiang, Huiqin Chen, Dongmei Shen, Yuki Todo, and Shangce Gao, “Discrete chaotic gravitational search algorithm for the unit commitment problem,” *2016 International Conference on Intelligent Computation*, August 2-5, Lanzhou, China, LNAI 9772, pp. 757-769, 2016, 査読有 EI: 20163002641295
- ④ Hang Yu, Zhe Xu, Shangce Gao, Yirui Wang, and Yuki Todo, “PMPSO: A Near-Optimal Graph Planarization Algorithm using Probability Model based Particle Swarm Optimization,” *IEEE 2015 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC-2015)*, Nangjing, China, pp.15-19, Dec.2015, 査読有, EI: (Best Post Paper Award)

- ⑤ Tao Jiang, Dizhou Wang, Junkai Ji, Yuki Todo, and Shangce Gao, “Single Dendritic Neuron with Nonlinear Computation Capacity: A Case Study on XOR Problem,” *IEEE 2015 International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC-2015)*, Dec. 18-20, Nangjing, China, pp.20-24, 2015, 査読有 (EI:)

[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  
唐堂 由其 (TODO Yuki)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号：70633927
  - (2) 研究分担者  
唐 政 (TANG Zheng)  
富山大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：90227299
  - (3) 連携研究者  
( )  
研究者番号：
  - (4) 研究協力者  
( )