

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006 ～ 2009
 課題番号：18360159
 研究課題名（和文） 大規模結合高次アクティブシリコンニューロンの試作による人工ブレインの構成的研究
 研究課題名（英文） Artificial Brain Construction based on a Massive Connection of Higher-order and Active Silicon Neurons
 研究代表者
 中島 康治（NAKAJIMA KOJI）
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：60125622

研究成果の概要（和文）：ポテンシャルとアクティブ領域の新概念によるニューロダイナミクスの研究を進め、発振系の結合によりバースト発振が生起すること、またその制御性が明らかとなった。36ニューロンユニットを用いたLSIチップの測定から得られた知見を基に、大規模なシステムへと拡張するための検討を行い、相互結合系の解析のために、LSIチップを利用して測定を行った。高次ダイナミクスを導入したニューロンモデルに関して、高次化をシナプス結合へ導入しTSP・QAP共に静的解表現の適用が可能となり100%の正解率が得られた。

研究成果の概要（英文）：We have analyzed bursting characteristics of neuron models based on a concept of potential with active areas. The parameter dependence of coupling oscillators with burst has been clarified. An LSI microchip with 36 neuron units have been measured to analyze coupling systems, and discussed to increase system size. We obtained 100% success rate for TSP and QAP problems solving on neural networks with higher order dynamics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2007年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：(1)ニューラルネットワーク(2)バースト発火現象(3)高次ダイナミクス
 (4) ID モデル (5)集積回路(6)ニューロチップ(7)能動素子(8)シリコンブレイン

1. 研究開始当初の背景

人工神経回路網は連想処理など現在のコンピュータが不得意とする処理を効率的に行える知的システムを構成できる候補として期待されている。しかし、これまでの人工神経回路網による情報処理に関する解析は

あくまでも受動的動作のみが考慮された確率的動作に重点があり、そのアクティブな特性に関しての積極的配慮はなされていなかった。

我々はアクティブな特性を積極的に考慮するために逆関数遅延モデルを提案し、最適

化問題などに対する性能が向上することを示したが、さらにそのユニットの動作を高次特性まで高めてネットワークの特性を解析し、合わせて集積回路による測定によって検証することを提案した。

2. 研究の目的

自励発振能力を含むアクティブな性質を持つシリコンニューロンの次元を上げ、その大規模結合系のマクロな回路網であるシリコンブレインにおける情報処理を前提とした高次特性への関与を解明する。

1つの具体例は、これまでのレベルでは困難であったが生理学的には広く興味を持たれ際立った特性であるバースト発火現象をシリコンニューロンに発現させ、これによりシリコンブレインの全く新しい高次の機能を引き出し、脳の情報処理機構の新たな獲得ならびに知的な処理に結びつく新機能の創製と開発に繋げる。

このため我々が提案した逆関数遅延 ID モデルをベースにしたさらに高次な一般性の高いモデルを構築し、応用をも視野に入れてこのモデルをベースとした集積回路による高次アクティブシリコンブレインを製作して、その測定と評価を通して超並列情報処理機構を明らかにする。

今後必要となる知的処理の IT への取り込みへの応用にもこのシステムをマイクロチップ化して自律分散的な処理を可能とすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、自励発振能力を含むアクティブな性質を持つシリコンニューロンの次元を上げ、その大規模結合系のマクロな回路網であるシリコンブレインにおける情報処理を前提とした高次特性への関与を解明することであるため、これまで明らかにされた動作とパラメータの関係をさらに詳細に検討した。

また、ネットワークとしての自由度をも高次シナプス結合の導入により高次化することで、情報処理能力を向上させる試みを行った。

さらに、36ニューロンユニットを用いた LSI チップの測定から得られた知見を基に、大規模なシステムへと拡張するための検討を行った。

また、信頼性の高い大規模システムを目指す方向性で、デジタル処理に立脚したシステムの研究を FPGA を用いて検討した。さらにハードウェア面でもシナプス結合における高次化を視野に入れた検討を行った。

4. 研究成果

高次モデルの特性解析に関して、種々のパ

ラメータ条件に対する単一ニューロンの動作をポテンシャルとアクティブ領域の概念を使って議論できることを明らかにした。

この方法は一般性が高く広い適用範囲と多くのモデルへの適用を可能としている。特にバースト状態などの高次の状態に関係するダイナミクスと安定性、自励発振状態、その境界状態などがアクティブ領域の重なり具合により決定されることを明らかにした。

これらの結果を基にバースト状態などと外部入力との関係について、パラメータ空間にマッピングを行い、動作の解明を進めるとともに、より一般性の高い新たなモデルについても議論して動作を解明した。

さらにニューロンモデルの相互結合系へと拡張する試みを行い、バースト ID モデルの複数ニューロンの結合状態を数値解析と前記の解析法に基づいて検討し、その結果を参照しながら大規模系の数値解析を進めて、回路網としての動作を評価した。

ID モデルに比較して高次 ID モデルは情報処理能力が高いことを示唆する結果についてもその理由を検討し、さらに大規模結合回路の動作特性や情報処理能力を数値的に解析評価して新たな情報処理概念の獲得を行った。

これにより、ネットワークとして最適化問題の正解のみを与えるパラメータ設定方法を確立し、数値解析によりその結果を確認した。

特に高次化をシナプス結合へ導入した解析において、組み合わせ最適化問題を記述するエネルギー関数をより一般化することができ、TSP・QAP 共に最適解のみを静的状態としてとる解表現の適用ができる成果を得た。

さらにこれまで不可能であった時系列情報の連続時間モデルへの埋め込みに成功し、実例として一般の文章を我々のネットワークに記憶して想起させることを行った。これは今後のネットワークの実用化を強く示唆できる結果である。

集積回路については、36ニューロンユニットを用いた LSI チップの測定からその高次動作を確認し、この成果を基に更に大規模なシステムへと拡張するための検討を進めた。

また相互結合系の解析のために、ポテンシャルとアクティブ領域の新概念の視点から改めて LSI チップを利用した測定を進めた。これにより結合系でのバースト発振現象のパラメータ依存性などを解析した。

さらに複数ニューロンの結合系の設計を行い、大規模な階層構造を持つ高次シリコンブレインの設計への拡大を検討した。特にシナプス結合における高次化も視野に入れた検討も行いこの方向も進展させた。

また官能外観検査に用いる実用的なシス

テムを設計し、FPGAにより実現した。そのシステムを用いて企業から提供された検査用データについてその性能を確認した。

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 19 件)

1. Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Design of the Inverse Function Delayed Neural Network for Solving Combinatorial Optimization Problems," IEEE Trans. Neural Network, vol. 21, no. 2, Feb. 2010, pp. 224-237 査読有.
2. T. Onomi, T. Kondo, and K. Nakajima, "Implementation of High-Speed Single Flux-Quantum Up/Down Counter for the Neural Computation Using Stochastic Logic," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, June 2009, pp. 626-629 査読有.
3. Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Parameter Analysis for Removing the Local Minima of Combinatorial Optimization Problems by Using the Inverse Function Delayed Neural Network," Advances in Neuro-Information Processing, 15th Int. Conf., ICONIP 2008, Auckland, New Zealand, November 25-28, 2008, Revised Selected Papers, Part I, 2009, pp. 875-882 査読有.
4. 千承佑, 早川吉弘, 中島康治, "外観検査システムのための高速ハードウェアニューラルネットワークの設計", 電子情報通信学会論文誌A, vol. J92-A, no. 1, Jan. 2009, pp. 37-47 査読有.
5. Y. Yamada, K. Nakajima, and K. Nakajima, "RF impedance of intrinsic Josephson junction in flux-flow state with a periodic pinning potential," Physica C, vol. 468, Sep. 2008, pp. 1295-1297 査読有.
6. K. Nakajima and S. Suenaga, "Bursting characteristics of a neuron model based on a concept of potential with active areas," Chaos, American Institute of Physics, vol. 18, May 2008, p. 023120 査読有.
7. J. Sveholm, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Recalling Temporal Sequences of Patterns Using Neurons with Hysteretic Property," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, No. 4, April 2008, pp. 943-950 査読有.
8. S. Chun, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, "Hardware Neural Network for a Visual Inspection System," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, No. 4, April 2008, pp. 935-942 査読有.
9. T. Onomi, T. Kondo, and K. Nakajima, "High-speed single flux-quantum up/down counter for neural computation using stochastic logic," Journal of Physics: Conference Series, vol. 97, March 2008, p. 012187 査読有.
10. A. Sato, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Avoidance of the Permanent Oscillating State in the Inverse Function Delayed Neural Network," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, no. 10, Oct. 2007, pp. 2101-2107 査読有.
11. S. Suenaga, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Design of a Neural Network Chip for the Burst ID Model with Ability of Burst Firing," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, no. 4, April 2007, pp. 715-723 査読有.
12. S. Sato, K. Inomata, M. Kinjo, N. Kitabatake, K. Nakajima, H. B. Wang, and T. Hatano, "Macroscopic Quantum Tunneling and Resonant Activation of Current Biased Intrinsic Josephson Junctions in Bi-2212," IEICE Trans. Electronics, vol. E90-C, no. 3, March 2007, pp. 599-604 査読有.
13. K. Inomata, S. Sato, M. Kinjo, N. Kitabatake, H. B. Wang, T. Hatano and K. Nakajima, "Study of macroscopic quantum tunnelling in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions," Superconductor Science and Technology, vol. 20, no. 1, Jan. 2007, pp. S105-S109 査読有.
14. 佐藤朱里, 早川吉弘, 中島康治, "Inverse Function Delayed モデルによる組み合わせ最適化問題正解率のパラメータ依存性," 電子情報通信学会論文誌基礎・境界, vol. J89-A, no. 11, Nov. 2006, pp. 960-972 査読有.
15. Y. Nakamiya, M. Kinjo, O. Takahashi, S. Sato, K. Nakajima, "Quantum Neural Network Composed of Kane's Qubits," Jpn. Journal of Applied Physics, vol. 45, No. 10A, Oct. 2006, pp. 8030-8034 査読有.
16. S. Suenaga, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Dynamical Behavior of Neural Networks with Anti-Symmetrical Cyclic Connections," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E89-A, no. 10, Oct. 2006, pp. 2775-2786 査読有.
17. J. Sveholm, Y. Hayakawa and K. Nakajima, "Temporal Sequences of Patterns with an Inverse Function Delayed Neural Network," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E89-A, no. 10, Oct. 2006, pp. 2818-2824 査読有.
18. H. Li, Y. Hayakawa, S. Sato and K. Nakajima, "Hardware Implementation of an Inverse Function Delayed Neural Network Using Stochastic Logic," IEICE Trans. Information and Systems, vol. E89-D, no. 9, Sep. 2006, pp. 2572-2578 査読有.
19. Y. Yamada, K. Nakajima, and K. Nakajima, "RF Responses and In-Phase Josephson Vortex Motion in an Intrinsic Josephson Junction System with a Periodic Pinning Potential," Journal of the Korean Physical Society, vol. 48, no. 5, May 2006, pp. 1053-1056 査読有.

[学会発表] (計 74 件)

1. 渡辺峰生、片山秀瑛、桜庭栄、猪股邦宏、小野美武、佐藤茂雄、中島康治、Low-Tc ジョセフソン接合列における集团的スイッチング特性、2010 年春季 第 57 回応用物理学関係連合講演会、18p-V-12、平塚、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 18 日)
2. 中本涼介、桜庭栄、小野美武、佐藤茂雄、中島康治、大規模集積回路のための SFQ Booth Encoder、電子情報通信学会 2010 年総合大会、C-8-18、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 16 日)
3. 桜庭栄、小野美武、中島康治、4 ビット並列高速フーリエ変換システム、電子情報通信学会 2010 年総合大会、C-8-17、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 16 日)
4. 黒瀬幸司、曾田尚宏、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、van der Pol 相互結合系のポテンシャルとアクティブエリアに基づく動解析、電子情報通信学会 2010 年総合大会、A-2-12、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 16 日)
5. 曾田尚宏、黒瀬幸司、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、高次結合ネットワークによる組み合わせ最適化問題解探索のパラメータ特性、電子情報通信学会 2010 年総合大会、A-2-1、仙台、2010 年 3 月、(2010 年 3 月 15 日)
6. 曾田尚宏、黒瀬幸司、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、離散時間高次結合逆関数遅延ネットワーク、信学技報、Vol.109, No.458, NLP2009-177, pp.131-136, Mar. 2010, 東京、(2010 年 3 月 10 日)
7. 黒瀬幸司、曾田尚宏、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、2 次ポテンシャル上にアクティブエリアを持つ振動子相互結合系の振る舞い、信学技報、Vol.109, No.458, NLP2009-181, pp.109-113, Mar. 2010, 東京、(2010 年 3 月 10 日)
8. 前波勇介、小野美武、早川吉弘、佐藤茂雄、中島康治、超伝導ニューラルネットワークとその 4-Queen 問題への応用、信学技報、Vol.109, No.458, NLP2009-172, pp.81-85, Mar. 2010, 東京、(2010 年 3 月 10 日)
9. R. Nakamoto, S. Sakuraba, T. Onomi, S. Sato, and K. Nakajima, "Booth encoder for large scale integration SFQ circuits," Proceedings of Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2010, pp.103-104, Yokohama Japan, Jan. 2010 (2010 年 1 月 13 日)
10. S. Sakuraba, A. Martins, T. Onomi, S. Sato, and K. Nakajima, "High Throughput Parallel Arithmetic Circuits for Fast Fourier Transform," Proceedings of Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2010, pp.10-15, Yokohama Japan, Jan. 2010 (2010 年 1 月 13 日)
11. 佐藤茂雄、金城光永、中島康治、ホップフィールドネットワークと断熱的量子計算、信学技報、Vol.109, No.269, NLP2009-91, pp.51-54, Nov. 2009, 屋久島、(2009 年 11 月 11 日)
12. K. Kurose, T. Sota, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Analyses of Two Dimensional Hindmarsh-Rose Type Model Based-on a Concept of Potential with Active Areas, Proceedings of the 2nd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems, p. 167, Sendai, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 27 日)
13. T. Sota, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Solving Combinatorial Optimization Problems with the Quartic Form Energy Function of the Neural Network, Proceedings of the 2nd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems, pp. 69-70, Sendai, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 27 日)
14. K. Kurose, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Analyses of the dynamics of interconnected van der pol models based-on a concept of potential with active areas, Proceedings of the 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 423-426, Sapporo, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 20 日)
15. T. Sota, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, The Quartic Form Energy Function for General Combinatorial Optimization Problems, Proceedings of the 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 527-530, Sapporo, Japan, Oct. 2009 (2009 年 10 月 20 日)
16. 黒瀬幸司、早川吉弘、中島康治、Two Dimensional Hindmarsh-Rose Type Model のポテンシャル上のアクティブ領域に基づく動特性解析、日本神経回路学会第 19 回全国大会、P2-20、仙台、2009 年 9 月、(2009 年 9 月 25 日)
17. 曾田尚宏、早川吉弘、中島康治、非線形自己結合を持つ逆関数遅延ニューラルネットワーク、日本神経回路学会第 19 回全国大会、P1-18、仙台、2009 年 9 月、(2009 年 9 月 24 日)
18. 早川吉弘、中島康治、逆関数遅延ニューラルネットワークを用いたナンバープレイスの解法、日本神経回路学会第 19 回全国大会、P1-17、仙台、2009 年 9 月、(2009 年 9 月 24 日)
19. S. Sakuraba, T. Onomi, and K. Nakajima, "4-bit Parallel Multiplier for a Fast Fourier Transform," Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference, SP-P40, Fukuoka, June 2009 (2009 年 6 月 19 日)
20. S. Sakuraba, T. Onomi, and K. Nakajima, "4-bit Parallel Adder for a Fast Fourier Transform System," Proceedings of Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV2009, P12, Fukuoka, June 2009 (2009 年 6 月 19 日)
21. S. Sato, K. Matsushita, K. Inomata, H. Wang, T. Hatano, M. Kinjo, and K. Nakajima, "Collective Dynamics of Intrinsic Josephson Junctions," Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference, TD-P35, Fukuoka, June 2009 (2009 年 6 月 18 日)
22. 中島康治、早川吉弘、黒瀬幸司、バーストニューロンモデルのポテンシャル上のアクティブ領域に基づく動特性解析、第

- 58 回理論応用力学講演会、2C08、東京、2009年6月、(2009年6月10日)
23. 松下耕司、佐藤茂雄、猪股邦宏、金城光永、王華兵、羽多野毅、中島康治 固有ジョセフソン接合列における集団力学について、2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会、2p-ZP-2、つくば、2009年4月、(2009年4月2日)
24. 桜庭栄、小野美武、中島康治、高速フーリエ変換システム用ハイスループット並列加算器、電子情報通信学会2009年総合大会、C-8-18、松山、2009年3月、(2009年3月20日)
25. 小野亜衣子、佐藤茂雄、金城光永、中島康治、ニューラルネットワークの手法を用いた断熱的量子計算における計算性能のハミルトニアン依存性について、電子情報通信学会2009年総合大会、A-2-35、松山、2009年3月、(2009年3月20日)
26. 黒瀬幸司、早川吉弘、中島康治、ニューロチップを用いたバーストIDモデル相互結合系の測定、電子情報通信学会2009年総合大会、A-2-22、松山、2009年3月、(2009年3月19日)
27. 曾田尚宏、早川吉弘、中島康治、高次シナプス結合ニューラルネットワークによる組み合わせ最適化問題解探索、電子情報通信学会2009年総合大会、A-2-28、松山、2009年3月、(2009年3月19日)
28. 押切智子、早川吉弘、中島康治、高次元ニューロンモデルの動的相互作用に関する研究、電子情報通信学会2009年総合大会、A-2-23、松山、2009年3月、(2009年3月19日)
29. Ali A. Lemus, Y. Hayakawa, and K. Nakajima, Neural Searching Algorithm for Combinatorial Optimization Problems, 電子情報通信学会2009年総合大会、情報システムソサイエティ総合大会特別号学生ポスターセッション、p. 86, March 2009, 松山、(2009年3月18日)
30. 佐藤茂雄、猪股邦宏、王華兵、羽多野毅、金城光永、中島康治、固有ジョセフソン接合の量子特性、電子情報通信学会2009年総合大会、CT-1-2、松山、2009年3月、(2009年3月17日)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島康治 (NAKAJIMA KOJI)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：60125622

(2) 研究分担者

佐藤茂雄 (SATO SHIGEO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号：10282013

(3) 研究分担者

早川吉弘 (HAYAKAWA YOSHIHIRO)
仙台高等専門学校・准教授
研究者番号：20250847

(4) 研究分担者

小野美武 (ONOMI TAKESHI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号：70312676