

平成23年 5月30日現在

機関番号： 82401
 研究種目： 研究活動スタート支援
 研究期間： 2009～2010
 課題番号： 21800089
 研究課題名（和文）
 非線形システムにおけるゆらぎ制御を利用した計算アーキテクチャに関する研究
 研究課題名（英文） A study of computational architecture using control by fluctuations
 in nonlinear systems
 研究代表者
 安東 弘泰（ANDO HIROYASU）
 独立行政法人理化学研究所・脳数理研究チーム・基礎科学特別研究員
 研究者番号： 20553770

研究成果の概要（和文）：

本研究では、実用面で不可避免的に存在する雑音を有効に利用するということを念頭に置き、非線形システムの雑音誘起現象を利用して、以下のような新しい計算アーキテクチャの理論を考案した。①計算万能なブラウン回路を、カオス系のノイズ同期現象と組み合わせ、決定論的に作動可能なシステムとして新たに構成した。②確率共振現象を利用した論理回路構成法を遺伝子ネットワークモデルへ適用し、さらに新しい並列論理演算方式を提案した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we have proposed a novel computational architecture exploiting noise-induced phenomena in the concept of harnessing noise in real world systems. In particular, we focused on two systems. One is the calculation system driven by fluctuations called Brownian circuits, which achieve computational universality. We have developed the theory of the Brownian circuits to work under deterministic noise, namely chaotic fluctuations, using chaotic synchronization. The other is a stochastic resonance theory for logical operations. We have applied this theory to higher dimensional systems such as a genetic network model and proposed a new method how to parallelize logic gates in such systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,060,000	318,000	1,378,000
2010年度	960,000	288,000	1,248,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,020,000	606,000	2,626,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：雑音誘起現象，ブラウン回路，カオス同期，確率共振現象，Logical stochastic resonance，遺伝子ネットワーク，並列論理ゲート

1. 研究開始当初の背景

昨今のインターネットや携帯電話の普及に伴い、情報技術は飛躍的に進歩しており、これをうけて、社会的需要が高い新たな問題が生じている。たとえば、大規模コミュニケーションに伴う通信容量・速度の増加に対する大容量情報処理問題、基盤配線・配送計画・VLSI 設計などのNP困難な組み合わせ最適化問題などである。しかし、こういった問題は、現行のコンピュータの基本原則である逐次処理型の計算方式（ノイマン型）では、その処理が原理的に困難になってきている。そこで、このような問題にも対応する、原理的に新しい計算アーキテクチャの構築へ向けて、特に雑音誘起型カオス同期現象、確率共振現象などの非線形システムに特有のゆらぎを有効活用した現象の理論的枠組みの構築と、その計算原理への応用を主な研究テーマとして考える。

この方針は、近年、計算機科学や非線形物理の分野において、ゆらぎを利用して論理回路を構成するという応用研究が盛んに行われてきていることを背景に、従来の非線形現象の工学的応用研究に、新たにゆらぎで制御するという側面を導入するというものである。さらに、単なる確率的情報処理ではなく、その背景に決定論性をもたせることで、ゆらぎをより効果的に利用するという重要な研究テーマと考えられる。また、このような非線形ダイナミクスのゆらぎ制御を大規模システムにおいても適用し、その情報処理技術への応用を開発する。これは、脳に代表される非線形大規模システムの計算機構を構成論的に実現しようという意味でも、重要なアプローチとなる。実際、カオスダイナミクスで制御さ

れるニューロコンピュータは、上述の組み合わせ最適化問題を現行のコンピュータよりはるかに高性能に処理する能力を備えている。

2. 研究の目的

以上のような問題意識のもと、本研究では、非線形システムにおけるゆらぎによる制御を利用して新たな計算アーキテクチャの構築を目指す。以下のような具体的な課題を通じて、ゆらぎによる制御の数理的性質を明らかにし、実用研究の基礎となる理論の確立を目指す。

①雑音誘起型カオス同期を用いたトークンベース計算アーキテクチャの構築：

確率的ゆらぎに基づいたトークンベースの計算アーキテクチャ（ブラウン回路）はPeper 博士（NICT）らによって構築されつつあり、その計算万能性などが示されている。この枠組みにカオスゆらぎを適用することにより、より高速で効率的な計算システムを構築することを目指す。

②遺伝子ネットワークなどの高次元システムにおける確率共鳴現象を利用した並列論理回路の構築：

確率共鳴現象の2 状態間遷移を利用した論理ゲート（Logical Stochastic Resonance (LSR)）の構築がSinha 教授（インドIISER）らによって進められてきている。しかしながら、ここで利用されているポテンシャル関数は単純な1 次元系のため、実用上重要なXOR ゲートなどはまだ実現されていない。そこで、この枠組みをさらに発展させて多様な論理演算を実現するために、高次元系における確率共鳴現象の理論を整備し、XORゲートやより複雑な論理回路の構築を目指す。

3. 研究の方法

まず課題①に関しては、カオスゆらぎによる同期-非同同期間遷移現象を利用し、従来のブラウン回路の基本モジュールの振る舞いを、決定論的なゆらぎによって実現可能であることを確認する。そして、基本モジュールを結合してネットワーク化するために、分岐理論などの非線形系の解析手法を利用して、雑音誘起型カオス同期現象の数理的性質を理解する。その上で、基本モジュールを少数つないだ小規模ネットワークを構成し、その振る舞いを従来のブラウン回路と比較・検討する。

次に、課題②に関しては、高次元ポテンシャルの確率共振現象を検証し、そこから得られる特性を利用してXORなどの論理演算や、さらには複数変数を利用した並列論理演算、生体システムでの実現可能性などを検討する。以下の手順を軸に研究を遂行する。

- a) 提案した雑音誘起型カオス同期現象の理論解析を行い、パラメータ依存性や同期の安定性に関する数学的性質を、主に数値実験を用いて考察する。
- b) 決定論的に構成したブラウン回路の基本モジュールに関して、従来のトークンベースのモデルでの振る舞いと整合性を持った形で実現する。そのために、結合のさせ方に工夫を凝らす。とくに、トークン同士の干渉を避けるために、神経回路網にみられるような抑制性の結合様式を活用する。その際に、結合係数にかかわるパラメータが、カオスゆらぎにかかわる変数からのフィードバックによって抑制されるような自律的結合系を構成する。ここでは、パラメータと変数の時定数に関する考察や、信号が弱くなる瞬間の影響の回避などを詳細に検討する。
- c) 2次元のポテンシャル関数を有するシステムに関して、その確率共振現象の実現性を検討し、XORゲートなど従来のLSRでは実現し

ていなかった論理ゲートを構築する。ここではまず、遺伝子ネットワークのトグルスイッチモデルを対象として、そのLSRの実現可能性を検証する。さらに、2次元平面でのアトラクタの配置を活用した、並列論理演算の方式を提案し、半加算器や、独立な入力に対する並列論理回路を構成する。

4. 研究成果

まず課題①に関しては、雑音誘起型カオス同期現象の数値解析を行い、その上で、3つのブラウン回路の基本モジュールからなる結合系を完全な決定論的システムで構成することに成功した。ここでは、そのモジュール間結合部に、信号のやり取りを制御するオペレータを設置することで、従来と同様の不規則な信号伝搬を実現した。ただし、信号の伝搬の仕方は、システムの初期値に依存する。これらの成果は、下記リストの[論文5, 発表5, 8]において発表された。

次に課題②に関しては、遺伝子ネットワークのトグルスイッチモデルにおける2つの安定平衡点と1つの不安定平衡点に着目し、2次元系でのノイズによる2状態間遷移を利用して、LSRを実装することに成功した。また、このシステムは、2つの変数を別々の出力と見なすことで、2つの異なる論理演算を同時に実行するような並列論理回路としても解釈可能である。この概念を一般的な2次元の連続時間力学系に拡張して、ANDとXORを並列化した半加算器や、2つの独立な入力セットに対する並列論理演算を数値的に実証した。これらの結果は、[論文1, 2, 発表1, 2, 4]において発表された。

この他、カオスゆらぎ自体の制御法とその応用に関する成果として、[論文4, 6, 発表6, 7, 12, 13]がある。また大規模ネットワークでのその動作のエネルギー効率とダイナミクスの関係を調べた結果が、[論文3, 発表3]でまとめられた。最後に、ブラウン回路を駆動するカオス同期への応用も見据えて、ニューロンモデルにおけるカオス位同期を数値的に解析した[発表9, 10, 11]。

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6件)

① (査読有) H. Ando, S. Sinha, R. Storni and K. Aihara, “Synthetic gene networks as potential flexible parallel logic gates”, in *Europhysics Letters*, Vol. 93, pp. 50001-p1–p6, (2011).

② (査読無) 安東弘泰, S. Sinha, R. Stroni, 合原一幸, “遺伝子トグルスイッチによる並列論理ゲート”, 電子情報通信学会技術研究報告 110(122), pp. 43–45, (2010).

③ (査読有) H. Ando, K. Karthik and S. Chakravarthy, “Studying the Economy of Energy Expenditure in a Large Balanced Spiking Neuron Network”, in *Proceedings of International Joint Conference of Neural Networks 2010*, pp. 3847–3851, (2010)

④ (査読無) 堀尾喜彦, 安東弘泰, 合原一幸, “複雑計算システムの基盤技術”, *Fundamental Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 34–44, (2009).

⑤ (査読有) Hiroyasu Ando, Ferdinand Peper and Kazuyuki Aihara, “Chaotic synchronization and de-synchronization for a token-based computational architecture” in *Proceedings of 2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA09)*, pp. 647–650, (2009).

⑥ (査読有) Hiroyasu Ando, Aki Nakano, Yoshihiko Horio and Kazuyuki Aihara, “Adaptive Feedback Control of Chaotic Neurodynamics in Analog Circuits”, in *Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS09)*, pp. 2621–2624, (2009).

[学会発表] (計13件)

① H. Ando, S. Sinha, R. Storni and K. Aihara, “Flexible parallel logic gates by synthetic gene networks”, *The 1st International Symposium on Innovative Mathematical Modelling*, 2011年3月1日, 東京

② H. Ando, S. Sinha, R. Storni and K. Aihara, “Flexible Parallel Logic Gates by Synthetic Genetic Network”, *Dynamics Days Europe 2010*, 2010年9月7日, Bristol/UK

③ H. Ando, K. Karthik and S. Chakravarthy, “Studying the Economy of Energy Expenditure in a Large Balanced Spiking Neuron Network”, *International Joint Conference of Neural Networks 2010*, 2010年7月19日, Barcelona/Spain

④ 安東弘泰, S. Sinha, R. Stroni, 合原一幸 “遺伝子トグルスイッチによる並列論理ゲート”, 非線形問題研究会, 2010年7月12日, 金沢

⑤ H. Ando, F. Peper and K. Aihara, “Chaos-driven Computing Structure on a Token-based Architecture”, *1st International Workshop on Computing with Spatio-Temporal Dynamics 2010* (招待講演), 2010年6月23日, 東京

⑥ H. Ando and K. Aihara, “A Coding Method using Adaptive Chaos Control”, *The Third International Conference on Dynamics, Vibration and Control*, 2010年5月14日, 杭州/中国

⑦ 安東弘泰, 堀尾喜彦, 合原一幸, “カオスニューロダイナミクスの適応的制御”, 第52回自動制御連合講演会, 2009年11月21日, 大阪

⑧ H. Ando, F. Peper and K. Aihara, “Chaotic synchronization and de-synchronization for a token-based computational architecture”, *2009 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2009)* 2009年10月21日

⑨ 安東弘泰, 末谷大道, 合原一幸, “神経系モデルのカオスのバースト発火における位相同期現象について”, 日本物理学会 2009年秋季大会, 2009年9月28日, 熊本

⑩ Hiroyasu Ando, H. Suetani, and K. Aihara, “Chaotic phase synchronization in neural bursting systems driven by weak periodic force”, *Conference on Dynamics in Systems Biology*, 2009年9月14日, Aberdeen /UK

⑪ H. Ando, H. Suetani, and K. Aihara, “Phase Condensation in Bursting Chaos with Weak Periodic Forcing”, *Dynamics Days Europe 2009*, 2009年9月3日, Gottingen /Germany

⑫ 安東弘泰, 合原一幸, “適応的時間遅れフィードバック制御とその応用”, 第58回理論応用力学

講演会, 2009年6月10日, 東京

⑬ H. Ando, A. Nakano, Y. Horio, and K. Aihara, “Adaptive Feedback Control of Chaotic Neurodynamics in Analog Circuits”, 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2009年5月27日, Taipei/Taiwan

[図書] (計1件)

① Hiroyasu Ando, S. Boccaletti and Kazuyuki Aihara, “Adaptive Feedback Control of Periodic Orbits in Chaotic Systems” in Recent Progress in Controlling Chaos, edited by M.A.F. Sanjuan and C. Grebogi, World Scientific Publishers, pp. 45-71 (2010)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安東 弘泰 (ANDO HIROYASU)

独立行政法人理化学研究所・脳数理研究チーム

・基礎科学特別研究員

20553770