

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月11日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20300085

研究課題名（和文） 物理カオス結合系による実数コンピューティングシステムの研究

研究課題名（英文） Real Number Computation through Physical Coupled-Chaotic Systems

## 研究代表者

堀尾 喜彦 (HORIO YOSHIHIKO)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：60199544

研究成果の概要（和文）：脳の意識・無意識過程の相互作用による情報処理様式にヒントを得た高次元カオス結合系による情報処理システムを提案し、これを実数（すなわち連続値）演算が可能なアナログ回路を活用して実装した。また、非線形サポートベクターマシンを連想記憶モデルの結合係数設定に応用した。さらに、カオス結合系ダイナミクスにより大規模な組合せ最適化問題を効率よく解く手法を提案するとともに、どのようなダイナミクスが計算に有効であるかを解析した。

研究成果の概要（英文）：We proposed and implemented with an analog circuitry a real-number computational system that uses high-dimensional coupled-chaotic dynamics. We applied nonlinear support vector machine to associative memory model for connection weight representations. We also proposed efficient methods to solve large-scale combinatorial optimization problems through coupled-chaotic dynamics, and analyzed the efficient dynamics.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

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：カオス、実数コンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

ダイナミクスによる実数計算の原理について、比較的低次元なカオス力学系を用いて、カオスの縁による情報処理の可能性や、カオスの遍歴によるメモリサーチなどの研究が行われていた。カオス結合系についても、少数の素子から成り、かつ、結合形態も比較的単純な系が対象であった。さらに、不可避なノイズの影響についてもきちんと議論されていなかった。一方、結合カオス力学系を用

いた組合せ最適化の研究は、主として、問題の状態が時間によらず一定な「静的な問題」が対象となっていた。具体的には、巡回セールスマン問題、二次割当問題等である。また、これらの問題をカオス力学系により解く際の性能とカオス力学系の特徴についてはほとんど議論がなされてこなかった。

このような状況下で、我々は大規模な物理的なカオス結合系をハードウェアで実装する研究を進めており、その基本技術を確立し

つつあった。同時に、カオスダイナミクスを連想記憶や組合せ最適化問題に応用するための一般的な枠組みを構成しつつあった。

## 2. 研究の目的

物理カオス結合系による実数コンピューティングの研究をさらに発展させ、研究開始時に未解決であった課題を解決すると共に、ノイズ付き実数コンピューティングの計算原理の理論的理解を目的とする。これと同時に、既存のノイマン型計算機との協調・融合を図った、新しいハイブリッド計算システムを提案・構築する。また、ハードウェア大規模カオス結合系のための構成要素を提案、実装する。さらに、多数の素子からなる、大規模な結合カオス系にも適用可能なネットワーク構造の構築法と学習則を確立し、連想記憶、最適化、時系列予測などの問題に適用する。特に最適化問題においては、動的な組合せ最適化問題を対象として、カオスダイナミクスによる解探索性能の有効性を数値実験により調査する。また、カオス力学系の特微量とカオスを用いた組合せ最適化性能との関係を調査する。

## 3. 研究の方法

大規模なカオス結合系を実装した実数計算システムの構築については、まず、その基本構成素子となるカオス発生回路を開発した。次に、脳における意識過程と無意識過程の相互作用による柔軟な超並列情報処理様式にヒントを得た、アルゴリズムによる計算とダイナミクスによる計算の相互作用によるハイブリッド計算システムを提案し、これを実装した。

カオス結合系での学習については、従来の連想記憶向けの学習則とは異なる学習法として、非線形サポートベクターマシンを導入した。

組合せ最適化問題への応用に際しては、動的な組合せ最適化問題としてパケット配送問題を対象とし、種々の複雑ネットワーク構造を導入することで検討を行った。また、リアプノフ指数、サロゲートデータ法などの時系列解析法を用いることで、カオスの特徴と解探索性能との関係を調査した。

## 4. 研究成果

物理カオス結合系による実数計算装置を実現するため、高次元ダイナミクスによる超並列計算を脳の無意識過程に、ノイマン型計算機でのアルゴリズムによる逐次的計算を意識過程に対応させたハイブリッド計算装置を提案し、さらにこれを実装した。同時に、このシステムから観測されたデータを基に、計算に有効なダイナミクスの解析を行い、局所的にはインターミットtentな弱いカオス状態

であるが、大域的にはカオスの遍歴を伴う高次元カオスの状態が有効であることを示した。さらに、空間および時間相互情報量による解析では、指数的に減衰する相互情報量、すなわち、適度な空間的、時間的な相互相関が計算に利用されていることを明らかにした。

また、より高速化を図るため、完全同期方式による超並列システムの構成法と、そのための並列化アルゴリズム（二重割当法とSlide and Insert法、ニューロン選択法）も提案し、完全同期システムが、非同期システムより良い性能を示すことを確認した。

一方、大規模なハードウェアシステムの構成要素として、マルチヒステリシスを用いたマルチスクロールカオス回路、周期解の接続による強制カオス回路(図1)、Duffing方程式を内蔵するカオスニューロン回路、遷移領域にカオスを伴う動的な論理回路素子(図2)などを提案・回路実装し、提案回路の有効性を確認した。

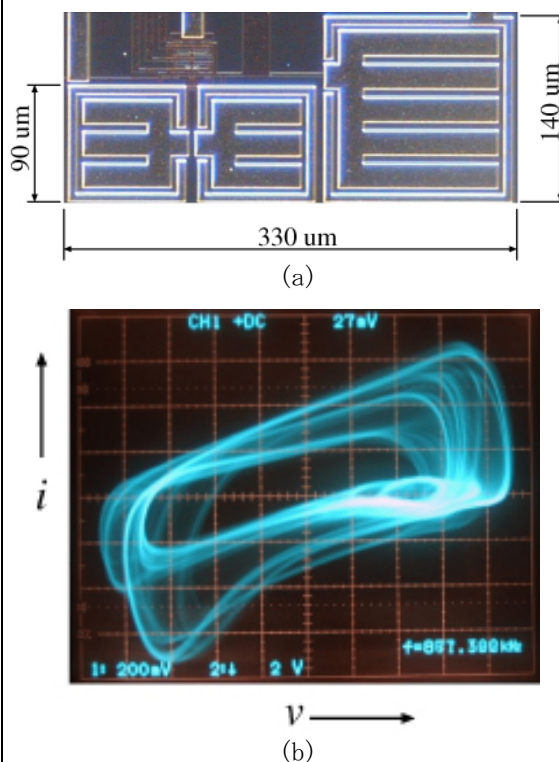


図1：(a)周期解の接続による強制カオス集積回路のチップ写真。(b)チップより観測されたカオスアトラクタの例。

連想記憶については、非線形サポートベクターマシンによって連想記憶モデルの結合係数を設定する手法を提案し、これをカオスニューラルネットワークに適用することで、従来のモデルより想起頻度が高い動的連想記憶が実現できることを示した。また、自己相関行列による連想記憶カオスニューラルネットワークモデルに適応的格子ダイナミクスにより生成した  $1/f^a$  揺らぎを印加したモ

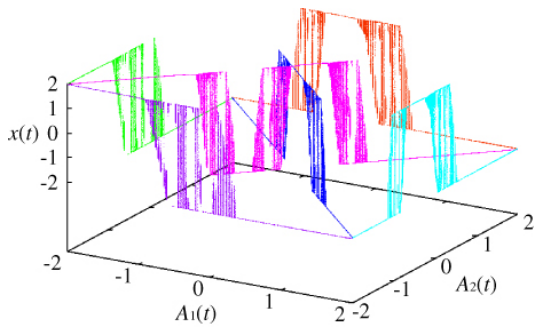


図2：遷移領域にカオスを伴う動的なNOR論理回路素子の実験より得られた特性。

デルにおいて、従来のノイズ印加手法よりパターンへの偏りが小さい高頻度の想起が実現できることを示した。

さらに、最適化問題の解法において、複数の手法を自動的に切り替えるために、カオスニューロダイナミクスを利用する手法を提案した。具体的には、非対称巡回セールスマン問題の2種類の解法を1つのカオスニューロンによって切り替える手法を提案した。さらに、多目的最適化問題を解く粒子群最適化において複数の手法を切り替えるためにカオスニューラルネットワークを用いる手法を提案し、その有効性を確認した。

また、複雑ネットワーク構造を有するエコーステートネットワークを用いた、カオス力学系の分岐図再構成法を提案し、再構成分岐図の定量的評価法により、提案手法では、従来法より低計算コストで高精度の分岐図が得られることを示した(図3)。

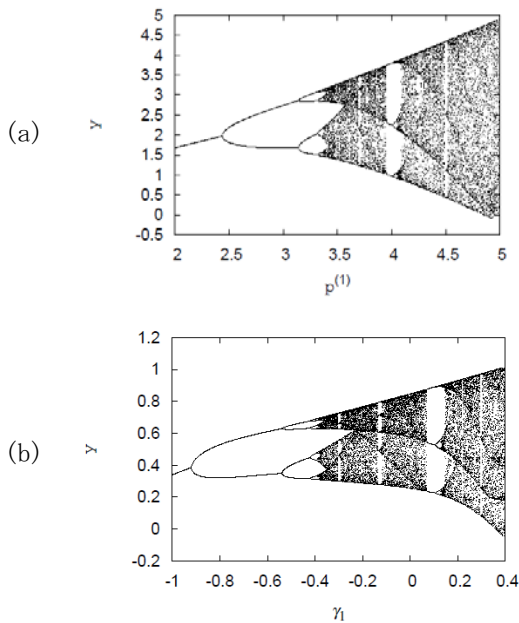


図3：(a) レスラー方程式の1パラメータ分岐図と(b) 本研究の手法で再構成した分岐図の例。

一方、動的な組合せ最適化問題の例であるパケットルーティング問題を対象として、カオス力学系のダイナミクスが問題の解法に有効である理由を数値実験により確認した。この結果、カオスニューラルネットワークの有する不応性が効率的な記憶として作用することが確認された。また、具体的なネットワーク構造として、スケールフリーネットワーク、スモールワールドネットワークなどの典型的な複雑ネットワーク構造に対してカオスダイナミクスを適用した結果、優れたパケット配送性能を得ることが出来た。さらに、現実世界のネットワーク構造への適用可能性を検討するために、コミュニティ構造を有するスケールフリーネットワークに対して提案アルゴリズムを適用した。その結果、カオスダイナミクスの不応性を有効活用する手法が最も効率よくパケットの配送が可能であることなどを示した(図4)。

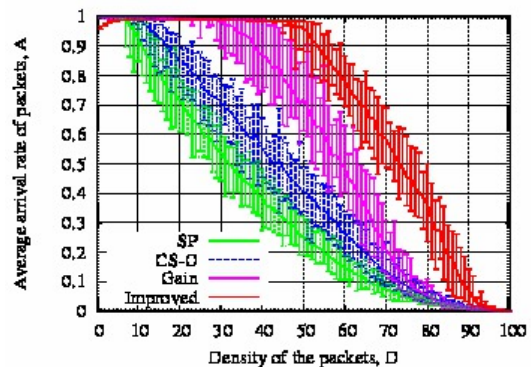


図4：コミュニティ構造を有するスケールフリーネットワークに対するパケット密度(D)と平均パケット到着率(A)の関係。最短経路法(SP)、最短経路情報にカオスを用いるルーティング(CS-0)、配送待ち時間を考慮したルーティング(Gain)、Gainにカオスを用いるルーティング(Improved)。提案アルゴリズムは全てのDの値において最も良い性能を示す。

次に、カオスダイナミクスの有効性(解探索性能)を調査するために、力学的特徴量の代表例であるリアプノフ指数と非線形時系列解析において用いられる統計的解析技法であるサロゲートデータ法を用いて解析を行った。サロゲートデータ法を用いた解析は、統計的特徴量の代表例である相関関数を用いて解析することに対応する。数値実験の結果、解探索法を構成するカオスニューロンのリアプノフ指数は、解探索性能と直接的に関係しないことが明らかとなった(図5)。また、カオスニューロンの不応性時系列に対してサロゲートデータ法を適用した場合は、解探索性能が著しく劣化することが分かった。そこで、カオスニューロンが発火した後の不応



性強度に着目し、これに対するサロゲートデータ解析を適用した結果、発火後の不応性強度を保持することで高い解探索性能が実現されることを明らかにした。これらの結果は、最初に述べたハードウェアシステムからの実測データによる解析の結果と定性的に一致する。

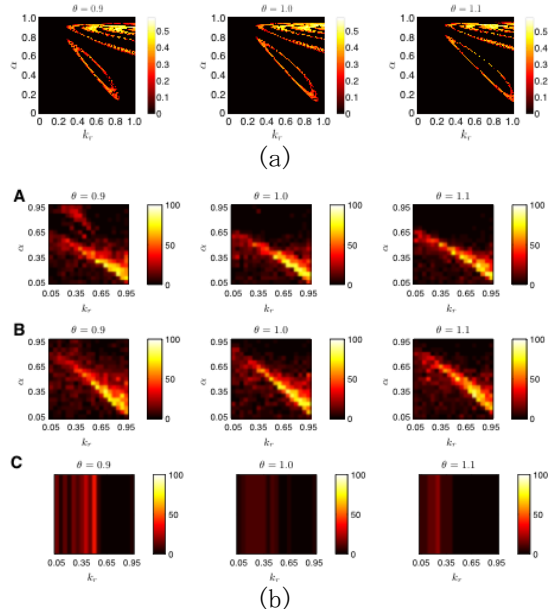


図 5 : (a) リアプノフ指数と (b) 解法能力の関係。各図において横軸はパラメータ  $k_r$ 、縦軸はパラメータ  $\alpha$  である。

## 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 8 7 件)

- ① T. Matsuura, K. Numata and T. Ikeguchi, Searching Characteristics of Chaotic Neurodynamics for Combinatorial Optimization, 査読有, to appear in Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 2012.  
<http://www.nolta.ieice.org/>
- ② T. Kimura, T. Hiraguri and T. Ikeguchi, An Effective Routing Algorithm with Chaotic Neurodynamics for Optimizing Communication Networks, to appear in American Journal of Operations Research, 査読有, VOL. 2, No. 3, September 2012.  
<http://www.scirp.org/journal/ajor/>
- ③ 橘俊宏, 安達雅春, ブロックシフト操作とカオスニューロダイナミクスを用いた非対称巡回セールスマン問題の解法, 電気学会論文誌 C, 査読有, VOL. 132, NO. 5, pp. 774-781, 2012.  
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieejciss/-char/ja/>

- ④ T. Kimura, T. Ikeguchi and C. Tse, Efficient Routing Strategy with Memory Information for Complex Networks, 査読有, American Journal of Operations Research, Vol. 2, No. 1, pp. 73-81, 2012.  
DOI: 10.4236/ajor.2012.21008

- ⑤ K. Shibata, Y. Horio and K. Aihara, The double-assignment method for the exponential chaotic tabu search in quadratic assignment problems, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, VOL. 2, pp. 472-484, 2011.

<http://www.nolta.ieice.org/>

- ⑥ 椿友介, 関川宗久, 堀尾喜彦, CMOS 可変能動インダクタを用いた強制カオス発生回路, 電気学会論文誌(電子・情報・システム部門), 査読有, VOL. 131, pp. 499-506, 2011.

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieejciss/-char/ja/>

- ⑦ 河村鉄夫, 堀尾喜彦, 長谷川幹雄, 二次割当問題のための同期更新指数減衰カオスタブサーチのニューロン選択法の相互情報量による解析, 電気学会論文誌(電子・情報・システム部門), 査読有, VOL. 131, pp. 592-599, 2011.

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ieejciss/-char/ja/>

- ⑧ T. Matsuura and T. Ikeguchi, Chaotic motif sampler: detecting motifs from biological sequences by using chaotic neurodynamics, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, Vol. 1, No. 1, pp. 207-220, 2010.

<http://www.nolta.ieice.org/>

- ⑨ 堀尾喜彦, 複雑計算システムの基盤技術, IEICE Fundamentals Review, 査読有, VOL. 3, pp. 33-44, 2009.

<http://www.ieice.org/ess/ESS/Fundam-Review.html>

- ⑩ 堀尾喜彦, カオスニューラルネットワークシステムとその応用, システム制御情報学会誌:システム/制御/情報, 査読有, VOL. 53, pp. 33-38, 2009.

<http://www.iscie.or.jp/j/>

[学会発表] (計 1 4 件)

- ① 橘 俊宏, 安達雅春, S 二種類の粒子群最適化手法の切替を用いた多目的最適化問題の解法, 電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 21 日, 岡山大学 (岡山市).
- ② 原拓未, 堀尾喜彦, 合原一幸, SCMS 可変能動インダクタを用いた強制カオス集積回路の測定, 電子情報通信学会総

合大会, 2012年3月20日, 岡山大学(岡山市).

- ③ T. Kimura and T. Ikeguchi, 電子情報通信学会 2011 ソサイエティ大会, 2011年9月14日, 北海道大学(札幌市).
- ④ 橘俊宏, 安達雅春, ブロックシフト交換を用いた非対称巡回セールスマン問題の解法のGPGPUによる高速化の試み, 電子情報通信学会 2011年総合大会, 2011年3月14日, 東京都市大学(東京都).
- ⑤ Y. Kawamura, T. Ikeguchi, K. Jin' no, Adaptive  $\alpha$ -neighbors for the traveling salesman problem using particle swarm optimization, 電子情報通信学会 2011年総合大会, 2011年3月14日, 東京都市大学(東京都).
- ⑥ 柴田和亮, 堀尾喜彦, Lin-Kernighan アルゴリズムの考え方を取り入れた二次割当問題に対する局所探索法, 電子情報通信学会総合大会, 2010年3月16日, 東北大学(仙台市).

[図書] (計1件)

- ① 堀尾喜彦, 安達雅春, 池口徹, カオスニューロ計算, ナチュラルコンピューティングシリーズ, 第3巻, 近代科学社, 2012, 220.

[産業財産権]

○出願状況 (計4件)

名称: 負の $\beta$ 写像に基づくデータコンバータ方式

発明者: 堀尾喜彦, 神野健哉, 香田徹, 合原一幸

権利者: 独立行政法人科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 特願 2010-087474

出願年月日: 2010年4月6日

国内外の別: 国内

名称: スケール付き $\beta$ 写像に基づくデータコンバータ方式

発明者: 堀尾喜彦, 神野健哉, 香田徹, 合原一幸

権利者: 独立行政法人科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 特願 2010-085212

出願年月日: 2010年4月1日

国内外の別: 国内

名称: マルチスクリュウカオス発振回路

発明者: 堀尾喜彦, 濱田卓矢, 神野健哉, 合原一幸

権利者: 独立行政法人科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 特願 2009-071195

出願年月日: 2009年3月24日

国内外の別: 国内

名称: マルチヒステリシス電圧制御電流源システム

発明者: 堀尾喜彦, 濱田卓矢, 神野健哉, 合原一幸

権利者: 独立行政法人科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 特願 2009-025790

出願年月日: 2009年2月6日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計1件)

名称: フローティングゲート MOSFET を用いた非線形抵抗回路

発明者: 堀尾喜彦, 藤原徹哉, 合原一幸

権利者: 独立行政法人科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 特許第 4662115 号

取得年月日: 2011年1月14日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀尾 喜彦 (HORIO YOSHIHIKO)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号: 60199544

(2) 研究分担者

安達 雅春 (ADACHI MASAHARU)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号: 20312035

(3) 研究分担者

池口 徹 (IKEGUCHI TOHRU)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 30222863