

平成23年4月1日現在

機関番号： 82401

研究種目： 基盤研究(C)

研究期間： 2008～2010

課題番号： 20500279

研究課題名(和文)

心的過程の神経機構に基づく動的情報検索アルゴリズムの構築

研究課題名(英文) Spatiotemporally organized retrieval of information inspired by the neural mechanism of mental processes

研究代表者

岡本 洋 (OKAMOTO HIROSHI)

独立行政法人理化学研究所・脳回路機能理論研究チーム・客員研究員

研究者番号： 00374067

研究成果の概要(和文)：

本研究は、心的過程の神経機構、すなわち、脳が手掛かり依存的に時系列を生成する仕組みをモデル化し、それに基づいて情報を時間的・空間的に構造化して抽出するアルゴリズムを構築することを目的として開始された。まず、単一ニューロンあるいはニューロン集団(ユニット)に多重ヒステリシス特性を仮定することにより、これらのユニットをノードとするネットワーク上に、初期状態に連続的に依存するアトラクター(連続アトラクター)として表される神経活動パターンを生成できることを示した。次に、単一の多重ヒステリシスユニットが完全積分器として機能することを見出した。以上の結果は、研究開始にあたって立てた仮説「心的過程、すなわち、神経活動の手掛かり依存的な時空間パターンの生成の仕組みは、連続アトラクター力学により記述される」を支持する。さらに、連続アトラクター力学を用いて実世界における様々な複雑ネットワークから手掛かり依存的に時系列を読み出せること、この読み出しがベイズ推定として定式化できることを示した。

研究成果の概要(英文)：

The purpose of this study is to develop a method of extracting temporally organized information by analogy to memory retrieval in the brain. We have demonstrated that stochastic dynamics of a grand network of recurrent neural networks, which models a minimal structure of cortical circuits, can produce transient and sequential activation of neurons. Different cue presentations represented by the initial state of grand network activation generate different temporal sequences. Statistical-mechanical exploration has revealed that retrieval of temporal sequences by this model conforms to Bayesian inference.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	180,000	540,000	2,340,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：脳型記憶想起・時間積分・複雑ネットワーク・時系列想起・ベイズ推定

## 1. 研究開始当初の背景

我々は時系列的に生起する外界事象を目撃あるいは経験した後、今度は外部からの誘導なしに同様な時系列を心の中に再生することができる。また、我々の思考とは、心の中で自発的に生成される時系列ととらえることができる。

心的過程の神経機構、すなわち、脳が時系列を再生あるいは生成する仕組みの解明は、脳科学が目指す究極目標の一つである。さらに、心的過程の神経機構が解明されれば、それを工学的に模倣することにより、所定のデータベースから情報を動的に構造化して（例えば時系列として）読み出すことが可能になると期待される。

現在はまだ、心的過程の神経機構の確立からは程遠い。しかしながら私は、「漸次的持続活性」の現象に注目することが、心的過程の神経機構の解明への糸口になると考えた。

振動触知弁別課題実行中のサルの前頭前野、あるいは、サッカーボール運動中の金魚視覚系において、一時的に与えられる手掛かり刺激の大きさに漸次的に依存する、あるいは、眼球運動履歴の積分値を表わす神経活性が観測されている。このような神経活性を、従来のニューラルネットワーク（NNW）情報処理における記憶想起のパラダイムである離散アトラクター力学で説明することは困難である。そこで、初期状態に漸次的に依存する不動点（=連続アトラクター）を持つ力学系で記述される神経機構のモデルが、複数の研究者により提案された。

連続アトラクター力学は、漸次的持続活性生成の神経機構を説明する枠組みとして、有望と思われる。しかしながら、連続アトラクターとして読み出される情報は、従来のNNW情報処理で離散アトラクターとして想起される情報と同様に静的である。一方、我々が自身の心の中を観察（内観）するとき、記憶想起の記述としては、ある観念が固定的に浮かび続ける様子よりも、心象風景が動的に変化してゆく様子の方がふさわしいと思うであろう。

実際、本研究に先立ち我々は、最も単純な心的過程である「情報の時間積分」の神経機構を、連続アトラクター力学にノイズを導入してこれを拡張した枠組みである「連続アトラクター確率過程動力学」によりモデル化できることを見出した。このモデルでは、時間積分の過程は、連続アトラクターが構成する多様体上における状態点の、ノイズによる駆動される（しかしながら秩序立った）移動として記述される。我々はこの結果を敷衍し、よ

り複雑な心的過程も連続アトラクター確率過程動力学により記述できるのではないかとこの着想を得た。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、心的過程の神経機構、すなわち、脳が時系列を再生あるいは生成する仕組みをモデル化し、それに基づいて情報を時間的に構造化して抽出するアルゴリズムを構築することである。この目的を遂げるための鍵は、次の仮説である：心的過程の神経機構は連続アトラクター確率過程動力学により記述される。本研究はこの仮説に基づいて実施された。

以下に述べる三項を目標として設定した。

### (1) 脳における記憶想起とのアナロジーによる大規模複雑ネットワークからの情報読み出し：アルゴリズム構築・評価・実課題への適用

漸次的持続活性を説明する枠組みとしての連続アトラクター神経機構モデルはすでに複数の研究者により提案されている。我々は連続アトラクター力学が、実験的に観測されている漸次的持続活性という特定の現象を説明するためだけのものではなく、脳がデータベースとしての長期記憶から手掛かり依存的に短期記憶を読み出す過程を記述する枠組みであると考えた。そして、連続アトラクター力学による読み出し過程を模倣することにより、実世界における様々な大規模複雑ネットワーク（WWW/インターネット、文書引用ネットワーク、遺伝子制御/タンパク相互作用ネットワーク、SNS等の社会・人脈ネットワーク、…）からユーザの要求に応じた情報を構造化して読み出すことができると考えた。この考えに基づき、大規模複雑ネットワークから情報を構造化して読み出すアルゴリズムを構築する。そして、類似の機能を有する他のアルゴリズムとの間で性能を比較し、提案アルゴリズムの優位性を示す。さらに、提案アルゴリズムの実際的な有用性を示すために、これを実際の学術論文の引用関係が構成する大規模複雑ネットワークを適用する。

### (2) 完全積分器の生物物理学的神経機構モデルの構築

最適意思決定の機構を説明する心理学モデルは、情報の完全積分（non-leaky integration）を仮定する。しかしながら、完全積分がどのような神経機構で実現されているかは、まだ全くわかっていない。本研究では、連続アトラクター確率過程動力学で記述されるニューロンネットワークモデルが完全積分を実行することを示す。さらに、この完全積分において何が非積分関数（積分される情報がどのような神経基質として表現されるか）を明らかにする。

### (3) 手掛かり依存的な時系列想起とその情報論的意味

連続アトラクター確率過程動力学に基づくことにより、任意のフィードフォワード型ニューラルネットワークから初期パターン（初期時刻に活性を付与したノード群）に連続的に依存した時系列を生成できることを示す。さらに、このような時系列の読み出しの情報論的意味を明らかにする。

### 3. 研究の方法

- (1) 脳における記憶想起とのアナロジーによる大規模複雑ネットワークからの情報読み出し：アルゴリズム構築・評価・実課題への適用

大規模複雑ネットワークのモデルを用意する。後に我々のアルゴリズムの適用を試みる文書引用ネットワークの特徴を最もよく再現する Klemm & Eguiluz により提案されたネットワークモデル (KE ネットワーク) を用いる。KE ネットワークの個々のノードに多重ヒステリシス入出力を仮定する。

ユーザ要求 (何について知りたいか) を「種ノード」で表現する。種ノードとは、ユーザが、自身が知りたいことに関連すると判断して提示したノード群である。種ノードをベクトル  $\bar{\tau}$  で表わす。 $\bar{\tau}$  を初期状態とする活性伝搬を行う。個々のノードが有する多重ヒステリシス特性により、活性伝搬は  $\bar{\tau}$  に連続的に依存する定常状態  $\bar{x}(\infty)$  (連続アトラクター) を導く。 $\bar{x}(\infty)$  を出力とみなす。ノード  $n$  が定常状態において獲得した活性  $x_n(\infty)$  を、ユーザ要求に対するノード  $n$  の関連の度合とみなす。

$\bar{\tau}$  から  $\bar{x}(\infty)$  の読み出しの適切さを、パターン修復の考え方に従って評価する。 $\bar{\tau}$  を正解パターン  $\bar{\xi}$  が劣化したものととらえる。読み出しの適切さを、 $\bar{x}(\infty)$  がどれだけ正しく  $\bar{\xi}$  を再現しているかで評価することができる。これを定量的に表わすために、 $\bar{x}(\infty)$  と  $\bar{\xi}$  との間の相関係数  $\gamma$  を用いる。

提案アルゴリズムの優秀性を示すために、パーソナライズドページランクアルゴリズム (Personalized PageRank algorithm, PPRA) をベンチマークとして設定する。提案アルゴリズムと PPR との間で、相関係数  $\gamma$  で定量化された修復性能を比較する。さらに、提案アルゴリズムを神経科学論文の引用ネットワークに適用する。

- (2) 完全積分器の生物物理学的神経機構モデルの構築

Leaky-integrate-fire モデルで記述される興奮性ニューロンの一様なカレントネットワークを考える。各ニューロンに双安定性を仮定する。以上の構成により、このリカレントネットワークに多重ヒステリシス特性が付与され、連続アトラクターが生成される。

各ニューロンは、ランダムな興奮性および抑制性の照射を受ける。これは背景ノイズとして作用する。さらに、リカレントネットワ

ークへの外部からの入力を、上とは別のランダム興奮性照射で表わす。これは受け手のニューロンに揺らぎを伴う興奮性電流 (外部入力電流) を生じる。外部入力電流は平均振幅と分散で特徴付けられる。

リカレントネットワークの活性 (リカレントネットワークを構成するニューロンの発火頻度の集団平均) の時間変化をコンピュータシミュレーションおよび解析的手法により調べる。どのような条件の下でリカレントネットワークが完全積分器として機能するか、外部入力電流のどこに積分される情報がコードされているかを明らかにする。

- (3) 手掛かり依存的な時系列想起とその情報論的意味

ランダムかつフィードフォワード型の結合を持つネットワークネットワークを考える。各ノードは、相互結合した興奮性ニューロンの小集団およびこの小集団特異的にフィードバック抑制をかける抑制性ニューロン群から構成されていると仮定する。この仮定に基づき、各ノードを、ヒステリシス特性を持つ入出力ユニットとして記述する。さらに、各ニューロンは、ランダムな興奮性および抑制性の照射を受けると仮定する。この仮定に基づき、各ユニットの入出力に確率性を持たせる。初期パターン (初期時刻に活性を付与したノード群) を様々に変化させたとき、それぞれに対してどのような時空間神経活動パターンがネットワークに生成されるかを、コンピュータシミュレーションで調べる。さらに、初期パターンと生成される時空間パターンとの間の関係を確率推定の枠組みで定式化する

### 4. 研究成果

- (1) 脳における記憶想起とのアナロジーによる大規模複雑ネットワークからの情報読み出し：アルゴリズム構築・評価・実課題への適用

KE ネットワークにおけるパターン修復課題として、提案アルゴリズムと PPRA との間でパフォーマンスを比較した。提案アルゴリズムは PPRA よりも大幅に高い修復性能を示した (Okamoto 2011, Fig. 4)。提案アルゴリズムを除き、PPRA は、ネットワークにおいて活性伝搬を通じて各ノードに手掛かり依存的に活性を付与する唯一の方法である。従って、提案アルゴリズムは該機能を実現するための方法として、現在ベストである。

さらに、提案アルゴリズムを神経科学論文の引用ネットワークに適用し、論文を手掛かり依存的にランキングできることを例証した (Okamoto 2011, Table 1 参照)。このランキングを眺めることにより、読むべき論文の優先順位が一目でわかる。これらは、提案アルゴリズムの実際的な有用性を示す。

- (2) 完全積分器の生物物理学的神経機構モデルの構築

リカレントネットワークの結合の強さを適切に選ぶと、リカレントネットワーク活性は厳密に一定の率で増加した (Okamoto & Fukai 2009, Fig. 2)。興味深いことに、増加率は外部入力電流の振幅で

はなく、分散の一次関数であることがわかった (Okamoto & Fukai 2009, Fig.4)。これらの結果は、双安定スパイク発生ニューロンのレカレントネットワークが完全積分器として機能することを示す。従来のニューラルネットワーク情報処理における標準的な考え方は、ニューロンはシナプス入力の総和から出力を算出するというものである。そこでは総和の平均が主役であり、その周りの揺らぎの役割は二義的である。これに対して、本研究の結果は、実際の脳では本質的な情報はむしろ揺らぎにコードされるという興味深い可能性を示唆する。

### (3) 手掛かり依存的な時系列想起とその情報論的意味

初期パターンに漸次的に依存して異なる時系列が生成された (図1)。時系列の確率分布は、初期パターンを観測証左とし、ネットワーク構造を事前知識として、ベイズの定理により事後分布として表現できることを示した：

$$P(\mathbf{s}|\bar{\tau}) \sim P(\bar{\tau}|\mathbf{s})P(\mathbf{s}) \\ \sim \exp\left(\beta \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [S_i(t)\tilde{I}_i(t) + \kappa S_i(t)]\right)$$

これらの結果は、脳における動的記憶読み出しが、ベイズ推定であることを示唆する。

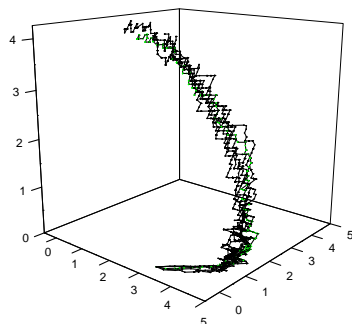


図1：漸次的に異なる初期パターンから生成される時系列

## 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3件)

- ①. Okamoto, H. Topic-Dependent Document Ranking: Citation Network Analysis by Analogy to Memory Retrieval in the Brain. LNCS 6791, 371-378 (2011).
- ②. Okamoto, H. & Fukai, T. Recurrent network models for perfect temporal integration of fluctuating correlated inputs. PLoS Computational Biology Vol. 5, e1000404 (2009).
- ③. Tsuboshita, Y. & Okamoto, H. Information extraction by neural-network dynamics with

multi-hysteretic neurons. Neural Networks Vol. 22, 922-930 (2009).

[学会発表] (計10件)

- ①. Okamoto, H. & Fukai, T. Neural basis of Hick's law: the hallmark of psychological timing of multi-alternative decision. Computational and System Neuroscience (COSYNE) 2011. Salt Lake City (UT), 24-27/02/2011.
- ②. Okamoto, H. & Fukai, T. Statistical properties of response times associated with perfect temporal integration of correlated fluctuating inputs. Society for Neuroscience 37-th Annual Meeting. Washington, DC (USA), 15-19/11/2008.
- ③. Okamoto, H. & Fukai, T. Perfect temporal integration of fluctuating inputs by a recurrent network of cortical neurons. Dynamical Neuroscience XVI: Neuronal Variability and Its Functional Significance. Washington, DC (USA), 13-14/11/2008.

その他、国内のシンポジウム・研究会・全国大会における発表、計7件。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡本 洋 (OKAMOTO HIROSHI)

独立行政法人理化学研究所・脳回路機能理論研究チーム・客員研究員  
00374067