

氏名 信川 創
学位の種類 博士 (応用情報科学)
学位記番号 博情第 28 号
学位授与年月日 平成 25 年 9 月 25 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当 (課程博士)
論文題目 スパイキングニューラルシステムにおける信号応答性に関する研究

論文審査委員 (主査) 教授 西村 治彦
(副査) 教授 申 吉浩
(副査) 教授 堀尾 裕幸

学位論文の要旨

脳・神経系において情報処理を行う素子であるニューロンは、その本体である細胞体と入力を受ける樹状突起、出力を行う軸索を持っている。ニューロン同士の信号伝達は、ニューロンの膜電位の急峻な上昇である発火により、ニューロン間に存在するシナプスを介して行われる。これまで、脳・神経系における情報の伝達は発火頻度によって担われるとされてきた。しかし、計測技術の進歩により、現在では数[ms]の精度で発火時刻の計測が可能となり、発火頻度ではなく、発火のタイミングによって情報が伝達されることが明らかになってきた。それに伴って、膜電位の活動を再現することで発火のタイミングを記述できるスパイキングニューロンモデルを用いた情報伝達の研究が盛んに行われている。

ところで、信号応答や情報の伝達がノイズの存在下で増強される現象として確率共鳴(stochastic resonance: SR)が知られている。更に、この SR 的現象については、ノイズ源として確率的な (白色) ノイズに限られるわけではなく、決定論的カオスもゆらぎ源としてその役を担うことがわかっている。これは、システムにノイズを付加するという立場ではなく、非線形システムが持つ動的な揺らぎに着目するものである。これまで Anishchenko らをはじめとして、ノイズフリーなカオスシステムで微弱信号に対する応答性の増強が起こること(以降、カオス共鳴(chaotic resonance: CR))が簡単なシステムに対して示されている。この SR や CR の脳・神経系における研究は、これまで主に平均発火率に基づくモデルを用いて行われており、発火タイミングを記述できるスパイキングニューロンモデルを用いた検討は十分になされていない。そこで本研究では、スパイキングニューラルシステムにおける SR と CR の信号応答性について、数値シミュレーションを用いた詳細な解析により、その特性を明らかにした。以下、各章の概要について述べる。

第 2 章では、まず SR の概念を説明する為に、双安定なポテンシャルを持つシステムを対象に SR のノイズ依存性、信号強度依存性、信号周波数依存性について評価を行った。これにより、微弱な入力信号に対して、適切なノイズ強度の下で信号応答性が増強し、その応

答性は周波数依存性を持つ SR の基本的な特性を有することが明らかになった。次に、CR の概念を説明する為に、cubic 離散写像システムという 2 対のカオスアトラクタを持つシステムにおいて、システムのオーダパラメータ、信号強度、信号周波数に対する信号応答性の評価を行った。その結果、カオスアトラクタが併合するオーダパラメータ付近で微弱的な入力信号に応じてアトラクター間の往来が生じ、その度合は信号周波数に依存するという CR の基本特性を示すことが明らかになった。

第 3 章では、小脳学習において運動誤差情報の伝達を担う下オリーブ(inferior olive (IO))ニューロンのモデルである Velarde-Llinás IO ニューロンモデルに着目し、単体の IO ニューロンと IO ニューロンの結合系を対象に、入力信号とそれに対する発火頻度のサイクルヒストグラムとの相互相関、及び相互情報量により、CR と SR の信号応答性を評価した。更に、信号応答時において、IO ニューロンの生理学的特性である、低発火頻度、閾値下振動状態及び非同期発火状態が保持されているかについても評価を行った。その結果、CR 信号応答性はこれらの生理学的特性を満たし、高い信号応答性能を保持することが確認された。一方、SR の信号応答性においては、これらの特性を満たすパラメータ領域は著しく限定され、CR の場合のような高い信号応答領域とこれらの特性との整合性は見られなかった。このことは、実際の IO 核においては、確率的ノイズではなく、カオスによって信号応答性の向上が担われている、すなわち CR が機能している可能性が確認された。

第 4 章では、実験的に確認されている主要な発火パターンを再現でき、そのスパイクパターンの多様性が高いモデルとして注目されている Izhikevich ニューロンモデルを取り上げ、その CR 信号応答性について評価を行った。まず、Izhikevich ニューロンモデルのような発火後のリセット動作により、システム状態の跳躍が生じるシステムにおいても、カオス性の評価が可能なポアンカレ断面(PS) 上のリアプノフ指数(PS-リアプノフ指数) を導入した。この PS-リアプノフ指数の評価によって、Izhikevich ニューロンモデルは強カオス状態と弱カオス状態の 2 つの性質の異なるカオス状態を持つことが明らかになった。次に、Izhikevich ニューロンモデルにおける信号応答性をサイクルヒストグラムと入力信号間における相互相関量及び相互情報量を用い評価した。これによって、強カオス状態と弱カオス状態において、微弱的な信号に対する高い信号応答、すなわち CR 信号応答性を確認した。更に、弱カオス状態は強カオス状態と比較して微弱的な信号に対する感度が高く、即応的であることが明らかになった。

第 5 章では、シナプス前後の Pre ニューロンと Post ニューロンの発火タイミングに依存したシナプス可塑性(spike-timing dependent plasticity (STDP)) を持つ、ノイズの存在下における Izhikevich ニューロンシステムの同期発火伝搬について評価を行った。その結果、適度なノイズ強度の下でシナプス結合強度が増強され、階層型ニューラルネットワークにおいて同期発火が安定して伝搬することを、regular spiking (RS), intrinsically bursting (IB), chattering (CH) という発火パターンの異なるそれぞれのシステムにおいて確認した。また、IB や CH といったバースト発火を起こすニューロンにおいては、シナプ

ス結合強度の成長速度が速く、それによって同期発火の安定した伝搬が生じるレベルに短い学習時間で達することが明らかになった。

以上の取り組みによって、発火頻度に基づくニューラルシステムではなく、実際の脳・神経系のような発火タイミングによって情報伝達が担われるスパイクニューラルシステムにおいて **SR** と **CR** の特性とメカニズムが明らかとなった。これにより、実際の脳・神経系においても、カオスやノイズといったゆらぎによって、情報伝達が促進される可能性が示唆された。本研究において示された以上の結果が、脳・神経系での情報処理特性の理解への一助となることが期待される。また近年、生体の持つ柔軟で頑健な情報処理のメカニズムに注目が集まっており、本研究において示されたスパイクニューラルシステムにおける **SR** や **CR** の優れた情報伝達特性が、将来その工学的応用につながってゆくことが期待される。

論文審査の結果の要旨

本研究は、スパイクニューラルシステムにおけるカオス共鳴(**chaotic resonance: CR**)と確率共鳴(**stochastic resonance: SR**)による信号応答性について、数理モデルに対する数値シミュレーションによる詳細な解析を通して、その評価手法の検討も含め、具体的な分析と特性の解明を展開している。

まず第2章では、**CR** の概念の説明事例として **cubic** 離散写像システムを取り上げ、2対のカオスアトラクタが併合するオーダパラメータ付近で微弱な入力信号に応じたアトラクター間の往来が生じ、その度合は信号周波数に依存することが数値実験により明らかにされている。これにより **CR** と従来の **SR** の基本特性の違いが明確化された。次に、小脳学習において運動誤差情報の伝達を担う下オリーブ(**inferior olive: IO**)ニューロンのモデルである **Velarde-Llinas IO** ニューロンモデルに着目し、その信号応答性を調べた第3章では、**CR** 応答は **IO** ニューロンの生理学的特性（低発火頻度、閾値下振動状態及び非同期発火状態の保持）との整合下にあるが、**SR** 応答はこの生理学的特性を満たすパラメータ領域が著しく限定されるという結果が示されている。この結果は、現実の脳の **IO** 核における信号応答性の向上が、確率的ノイズではなくカオスによって担われている可能性を示唆しており、非常に興味深い知見である。

続いて、皮質ニューロンの多様なスパイクパターンを再現できる **Izhikevich** ニューロンモデルを取り上げ、その信号応答性について評価した第4章では、本ニューロンモデルには強カオスと弱カオスの2つのカオス状態が存在し、弱カオス状態は強カオス状態よりも微弱な信号に対する感度が高く即応的であることが新たに見出されている。また、状態変化のプロセスに跳躍（リセット動作）が含まれる本ニューロンシステムでのカオス性評価のために、ポアンカレ断面上でのリアプノフ指数を導入した点にも新規性が認められる。さらに第5章では、シナプス前後の **Pre** と **Post** のニューロン間の発火タイミ

ングに依存したシナプス可塑性を持つ Izhikevich ニューロンシステムでの同期発火伝搬の検討がなされ、適度なノイズ強度の下でシナプスが增強され、階層型ニューラルネットにおいて同期発火が安定伝搬するようになることが確認されている。

スパイクングニューラルシステムに対して確認された以上の結果は、脳・神経系での情報伝達が発火頻度ではなく発火タイミングによって担われていることが判ってきた現在の脳科学にとって、カオスやノイズによるゆらぎの存在が情報伝達の機能を促進している可能性を強く示唆するものであり、今後の情報伝達技術のパラダイムシフトへの糸口を与えるものとしても大いに期待される。

以上を総合して本審査委員会は、本論文が「博士(応用情報科学)」の学位論文に値するものと全員一致で判定した。