

論文内容の要旨

博士論文題目

Analysis of Dynamics and Learning of the Stochastic Spiking Neurons
確率スパイキングニューロンのダイナミクスと学習についての解析

氏 名

雨森 賢一

本論文はスパイキングニューロンに確率的なスパイク入力 that 供給された場合のダイナミクスと学習の解析を行う。計算論的神経科学における主要な研究課題のひとつに、ニューロンにおける情報処理のメカニズムの解明があげられる。本論文は、スパイクが確率的な性質を有するという仮定のもとに、この neural coding の問題を取り扱うことを目標としている。採用するニューロンモデルであるスパイキングニューロンモデルは、単一スパイクに対する神経の応答 (応答関数) の線形和で膜電位を近似するというモデルのことで、スパイクを直接扱うことが出来、また確率過程による解析が可能であるという利点がある。

はじめに、一般的なスパイク応答関数に対する、確率スパイキングニューロンの理論的な枠組みを与える。入力スパイクが非一様 Poisson 過程に従うものと仮定すると、膜電位の分布の確率過程は、Gauss 過程で書くことが出来る。一般的な形状の応答関数を仮定すれば、その確率過程は、Markov-Gauss 過程となる。本論文では、この一般的な応答関数に対する膜電位分布と発火確率分布の計算法を開発する。この方法は、従来よく用いられてきた拡散近似に基づく定式化の自然な拡張になっている。

確率スパイクに対する学習法を議論するために、スパイク依存のヘブ型学習に対する理論的枠組みを与える。スパイク依存のヘブ型学習は、スパイクの入射と発火に依存して変化する内部変数に分解して表記できる。これらの理論的枠組みの応用として、スパイク一致検出ニューロンのネットワークの自己組織化によるスパイク系列学習モデルを作成した。競合学習を通して、ネットワークはスパイクパターンを記憶するようになる。

最後に、モデルの生理学的妥当性を議論するために、確率スパイキングニューロンと Hodgkin-Huxley (H-H) モデルとの比較を行う。本論文で提案する減衰振動応答関数によるモデルは、複雑なダイナミクスをもつとされる H-H 方程式の発火閾値下の振る舞いをうまく模擬できる。このモデルに対する確率過程の解析を通して、ニューロンがある周波数で強度が変化する Poisson スパイク入力に対して、共鳴を起こすことを見出した。この共鳴周波数は、実際のニューロンで観測されている、いわゆる natural frequency と対応づけられるものである。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、脳の情報処理要素（ニューロン）のモデルであるスパイキングニューロンに対し、確率的なスパイク時系列を入力したときの、膜電位の分布や、発火確率などのダイナミクスの解析を行ったものである。

本論文の主な成果は以下に要約される。

1. スパイク応答関数の線形和によって膜電位を表現するスパイキングニューロンモデルの確率過程による解析を通して、応答関数の形状の変化を考慮したニューロンモデルの発火確率の計算法を開発した。これにより、従来の確率ニューロンモデルでは取り扱っていなかった、高階の Markov 過程に対する発火確率密度の計算が可能となった。
2. スパイク依存のヘブ型学習則の、ニューロダイナミクスによるモデル化を行い、学習がスパイクの同期によって進行することを見出した。それを精緻なスパイク時系列に対する自己組織化学習に応用した。
3. 複雑な非線形方程式である Hodgkin-Huxley ニューロンモデルの閾値下のダイナミクスが、スパイキングニューロンモデルで表現できることを示し、その確率過程による解析を通して、これらのニューロンが、特定の周波数に共鳴する現象を見出した。これにより本論文で提案するニューロンモデルの生理学的な妥当性を示した。

以上のように、本論文はスパイキングニューロンモデルへの確率的なスパイク入力に対するダイナミクスの解析をおこない、さらに、その生理学的現象に対するモデルの妥当性と理論的な解釈の可能性を示した。これにより、ニューロン集団のダイナミクスの確率過程による表現をとおした生理学的現象の理論的な理解を進めることを可能とし、計算論的神経科学、および脳科学に対する学術上の寄与が少なくない。よって本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。