

論文審査の結果の要旨

氏名 濱口 航介

外界から我々の脳に入力する情報の多くは、視覚、聴覚、速度や加速度に代表されるアナログ量から構成される。ところが神経細胞は主として電氣的なスパイクによるデジタル情報表現を行っている。本研究は、デジタル情報表現を用いる神経回路網が、いかにして外界のアナログ情報を安定かつ迅速に処理するのかを神経回路の非線形動力学の観点から明らかにすることを目的としている。

大脳のいたる所で広く見られる現象に神経集団が同期して発火する同期発火がある。この同期発火が安定に伝播するモデルに、フィードフォワード型神経回路網がある。このモデルの利点は単純な構成で同期発火状態を安定に伝え得る事である。一方、短所として、アナログ情報が伝達できない、神経集団である利点が活かされていない、など幾つかの問題点が指摘されていた。

そこで本論文では、より生物学的に妥当かつ解析可能な単純さを持つモデルとして、メキシカンハット型の結合を持つ、フィードフォワード型神経回路網 (FFMH) を用いて上記の問題を解決し、その性質について理論的に解析した。メキシカンハット型結合とは網膜や視覚野、聴覚野など大脳皮質の至る所に存在する結合の様式を指し、刺激の空間情報を表現・伝達可能な局所的結合である。

本論文は、全5章よりなる。以下、本論文の構成に沿って研究の概要を述べる。

第1章では、神経細胞のモデル、本研究の背景、目的について述べている。

第2章では積分発火形ニューロンモデルを用いてFFMHモデルを構成し、

- 1) 刺激の空間アナログ情報コーディング、
- 2) 刺激強度のアナログ情報コーディング、

の二つが同時に可能なモデルを提案し、数値計算を用いてその性能を調べている。本章では強度が空間的にガウス分布で与えられた様々な刺激を考える。ここで、刺激の空間アナログ情報とはガウス分布の位置、刺激の強度とはガウス分布の峰の高さである。従来モデルでは、ガウス分布の分散はほぼメキシカンハットの分散と同じ大きさであったが、従来の値より大きな値を用いることで、発火状態は進行波状になり、メキシカンハット型結合のエッジ検出フィルターとしての性質を押える事ができる。この性質を用いて入力強度に依存して発火の領域を広げる事が可能になった。この結果は、従来の入力強度に依存しない情報処理とは異なり、入力強度依存の情報処理に関して得られた実験結果を説明し得るものである。

第3章では、解析的に FFMH の性質を調べるため、マカロク・ピッツ型ニューロンモデルを用いてこれを構成した。結合は余弦関数を用いて表現される。これは数学的に簡便であり、同時に活動状態の巨視的変数を単純な形で与えるためである。その結果3つの巨視的変数に関する閉じた発展方程式が導出され、各神経細胞全ての発火状態を知る必要はなくなる。これを用い、一様な発火、孤立局在興奮、非発火状態が安定に存在する事、さらにそれらが共存するパラメータ領域の存在を明らかにしている。これは同一のネットワークにおいても入力条件の違いによって異なった発火状態が安定に得られる事を意味する。

第4章では、第3章のモデルを発展させ、各神経細胞の性質の不均一性を導入する。不均一性は前シナプス依存の結合強度のバラツキとして与えられ、これが後シナプス層ではガウス分布する共通なノイズ入力として現れる。この共通ノイズの影響により発展方程式は、巨視的変数の確率分布の発展方程式として求められる。これを用いて理論と数値計算の分布が一致する事が確かめられた。また共通ノイズは各神経細胞に共通の入力であるため、層内さらに層間の神経の発火に相関が生じる。その結果、従来仮定されていた単峰性ではない、多峰性の相関構造を持つ事が示されている。さらに共通ノイズの機能的役割として、

システムの発火状態を安定な状態へ早く導くという結果を得た。これはこれまで信号検出における文脈で語られていた確率共振と同様の新しい現象である。

第5章においては本論文の総括と結論が述べられている。

以上を要するに、本論文は FFMH 型のモデルを用いて従来のモデルでは実現できなかった同期発火による 2 種類のアナログ情報コーディングを実現すると共に、その発火状態の理論的解析を行ない神経回路網としての性質を明らかにしたものである。この結果は、神経科学における未解決問題の一つである、時空間情報表現の機構に対する理解を深めるものである。これは神経科学そして複雑理工学に貢献する所が大きい。なお、第二章は合原一幸、第三章、第四章は岡田真人、山名美智子、合原一幸との共同研究であるが、論文提出者が主体となり解析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）学位を授与できると認める。