

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

増田 直紀

20世紀初頭から続く脳科学の多くの研究努力にも関わらず、脳の高次機能はまだほんの一部しか解明されていない。しかしながら、特に90年代初頭から実験技術の発展に伴って時間・空間分解能が高い時空間興奮パターンが記録されるようになってきた。特に、多電極同時計測によって様々な状況におけるニューロンの同期発火の存在が明らかにされてきた。本研究は、これらの実験事実を背景にして、脳の情報コーディングの二重性を論じるものである。

本論文は、‘Dualities of Information Coding in Pulse-coupled Neural Networks’ (和文題目「パルス結合ニューラルネットワークにおける情報コーディングの二重性」) と題し、8章および結論より成る。

本論文では、パルス結合ニューラルネットワークの解析を通じて、興奮性ニューロンから成るニューラルネットワークにおいて同期の起こる仕組みとその脳機能的意味を明らかにした。その結果、様々なニューラルネットワーク構造を規定するパラメータの同期への影響が明らかになるとともに、2つの支配的かつ対立的とされてきた脳内情報処理様式、すなわち、発火率コーディングと時空間スパイクコーディングが単一モデルで統一的に説明されることがわかった。これは脳が状況に応じて適切なコーディング様式を選ぶというコーディングの二重性を示唆しており、最近の生理実験的事実とも定性的に符合する。

第1章では、本研究の背景とその脳科学における位置付けがなされた。特に、同期発火と発火時間間隔の脳機能における重要性と、脳のコーディング理論において従来対立している2つのパラダイムについて詳しく説明された。

第2章では、パルスによって結合された興奮性の漏れのある積分型 (LIF) ニューロンからなるネットワーク、およびその時間離散型モデルの同期現象について解析している。まずはじめに、周期パルス入力下においては、振動型 LIF ニューロンに対する同期条件の定理を用いることにより、興奮性 LIF ニューロンでも、広い条件で同期が達成されることがわかった。非周期的入力の場合、離散時間の南雲・佐藤ニューロンの場合も類似の結果を得た。

第 3 章では、第 2 章の結果をフィッツヒュー・南雲ニューロンのパルス結合系に拡張した。位相変数による記述により LIF 型のとおり同様の結果が得られた。

第 4 章では、連続入力信号の時空間スパイクコーディングが論じられた。単純な発火率コーディングでは時間平均操作が必要なため、脳内で実際に生起している速い情報処理過程を説明するには遅すぎる。そこで、単一スパイクの伝播やその詳細な発火時刻も情報処理に関わっているという考え方が提示された。そのような時空間スパイクコーディングに関連して、サウアーはスパイク間隔時系列はカオス的な外界入力連続情報を保持できることを証明した。スパイク間隔列に関する先行研究は、連続的な外界刺激を直接受け取る感覚ニューロンのコーディングのみを扱ってきたが、本章では複数の感覚ニューロンからスパイク時系列を受け取る興奮性皮質ニューロンもやはりスパイク間隔列を用いて情報をコードできることを明らかにした。

第 5 章では、ノイズ強度の変化に伴う発火率コーディングと時空間スパイクコーディングの二重性について解析した。第 4 章のモデルを拡張して多数の興奮性皮質ニューロンがある場合を扱った。皮質ニューロンに与えられるノイズが小さいときは皮質ニューロンは同期し、同期発火間隔が頑健的に外部入力をコードすることがわかる。ノイズ強度が中程度のときは皮質ニューロンは非同期発火し、外部刺激の時間波形を集団的発火率コーディングによってより詳細にコードできる。さらにノイズ強度を上げると、単に情報コーディング効率が悪化する。すなわち、ノイズ強度パラメータの変化に伴って、単一の枠組のもとで集団的発火率コーディングか時空間スパイクコーディングかが効率的に選択される。ノイズは外部刺激や脳内の他の部位からの入力によって背景アクティビティとして時間的に変化するるので、動物は状況に応じて適切なコーディング様式を選択している可能性が示されたことになる。

第 6 章では、第 5 章の結果をさらに拡張して、shared connectivity、結合強度、膜電位の漏れ率、ニューロンの非一様性等のパラメータ変化に対しても同様にコーディングの二重性が現れることが示された。実際のニューラルネットワークは、これらのコーディング方式を二重的に用いていると考えられる。新しい環境や緊急的状況では、動物は推定精度のよい集団的発火率コーディングを用いて外界情報をいち早く正確に把握し、安定な環境では、必ずしも精度は高くないが頑健でエネルギー効率のよい同期発火コーディングに移行している可能性がある。また、解析的にオーダーパラメータを 1 つ定義することによって各パラメータ変化の影響を統一的に記述することができた。

第 7 章では、空間発火率コーディング、特徴抽出、および同期発火コーディングを解析した。実際のニューラルネットワークは高いクラスター性と小さい平均頂点間距離に代表

されるスモールワールド性を持つ。そこで、ここでは様々な結合トポロジーによる数値実験・理論解析を行い、結合の乱雑さに対応するパラメータの変化が、2つの空間的コーディング様式、すなわち時間精度は低いが頑健な同期が得られる大域的同期発火コーディングと、精度は高いが同期の範囲が限定される局所的同期発火コーディングを橋渡しすることを示した。前章までの時間的二重性と対照的に、本章の結果はコーディングの空間的二重性と要約される。

第 8 章では、第 7 章を補足するために、連想記憶モデルにおける記憶パターンの安定性を調べた。安定性が結合密度に依存することが示され、第 7 章で論じられたコーディングの結合構造依存性を支持している。

以上を要するに、本論文は、パルス結合された興奮型ニューロンから成るニューラルネットワークにおいて、同期発火の意味での時空間スパイクコーディングと集団発火率コーディングによって情報がコードされる条件を調べたものである。その結果、両者は時間的にも空間的にも、対立的でなく相補的に現れる二重性が示された。これは脳科学、そして数理工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。