

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤原 寛太郎

脳は、不確実な環境下でロバストな計算を実現している非常に高度で精巧な情報処理機構を有している。脳内で情報がどのように表現されているのかという情報符号化の問題は、脳科学に残る大きな未解決問題のひとつである。一般には神経細胞の発するスパイク信号によって情報が表現されていると考えられるが、より高次機能を司ると言われる大脳皮質の神経細胞は、非常に不規則で再現性の低いスパイク時系列を発する。一見確率的で曖昧な神経細胞が集まっているのにも拘らずなぜ脳は斯くも精巧に働くのか、という問題は、神経細胞の発するスパイク時系列の意味を探る研究に拍車をかけた。

また、脳の情報処理機能を数理モデル化する神経回路網理論研究においては、現実の神経の発火特性を解析し、観測される発火パターンの時系列を再現可能な神経回路網モデルを構築することが重要な研究テーマとなる。

こうした観点から、発火パターンを詳細に解析するための数理的研究が行われている。その中でも発火時系列の点過程解析に関する研究は、複雑なスパイク時系列の単純化や確率モデルとの相性の良さなどの利点から近年ますます盛んになりつつある。これまでの脳神経データの解析は、主として発火率や発火の相関などの比較的低次の統計を扱うことで神経発火を特徴付けてきたが、最近の研究では高次統計量や局所統計量などの新たに提案されている統計量にも種々の有益な情報が含まれることが示唆されてきている。本論文では、こうした新たな統計量を用いて、神経数理モデルの構築および神経データ解析のツール作りを行っている。

本論文は“Theory and Application in Point Process Analysis of Neural Spike Trains”（「和文題目：神経スパイク時系列の点過程解析における理論と応用」）と題し、6章より成る。

第1章では、「序論」（General Introduction）と題し、脳神経データにおける点過程解析の現状を述べ、そこで現れる統計モデルの定義や概念を紹介し、本論文の構成をまとめている。

第2章では、「大脳皮質味覚野のバースト時系列におけるスパイク間隔統計の再現」（Reproducing Bursting Interspike Interval Statistics of the Gustatory Cortex）と題し、ラットの生理学実験で得られた神経スパイクデータに対して統計解析を行い、数値実験結果との非整合性から従来の神経数理モデルの性能の限界を示している。そして、従来のモデルの欠点を補う新たな数理モデルを構築し、その実験結果との整合性を示している。大脳皮質味覚野で見られるバースト発火の原因は生理学的には解明されていないが、その新たな知見を理論的側面から提言している。本章の研究は、これまであまり考慮されてこなかった神経モデルそのものの妥当性を明らかにした点、理論と実験を融合して統計解析を実データに適用したという点、そして実際の神経細胞の発火メカニズムを明らかにしたという点が特色である。

第3章では、「時間的相関源の弁別によるスパイク時系列の分類」(Classification of the Spike Sequences by Discriminating their Sources of Temporal Correlations)と題し、スパイク時系列に見られる時間的構造が、神経情報の流れの中でどのように生じるのかを検証している。スパイクの時間的相関を、入力、細胞内相関、そしてそれらの混合によるものと定義し、スパイク列の統計解析という立場からそれらを弁別するアルゴリズムを提唱している。提案されたアルゴリズムにスパイク列を適用することで、その時間的相関源を特定することができる。また、実際の生理データに適用してアルゴリズムの妥当性を示している。このアルゴリズムは、神経スパイク列の統計的性質のみから神経情報がどこにのっているのか、どのように流れているのか、を推定することが可能であるという明快な点のみならず、任意のスパイク列に対して適用可能である点で汎用的であるといえる。

第4章では、「神経スパイク時系列の高次エルゴード性」(Higher Order Ergodicity of Neural Spike Trains)と題し、多試行および複数の神経細胞のデータに対する新たな解析手法を提案している。これまで単純に平均化されてきた試行毎の発火変動に着目し、時間、試行、及び複数のスパイク時系列の不規則性という新たな指標を導入することによって、神経細胞の性質や神経細胞間の結合、および入力に関する情報が推定可能であることを示している。また、実際に生理実験データに適用して神経細胞の電気的結合の強度推定を行っている。この統計解析手法を実データに適用することで、神経情報の断片がこれまで用いられてこなかった統計量に埋め込まれている可能性を検証することができると考えられる。

第5章では、「多試行スパイク時系列における不規則性の時間変動」(Time-varying Irregularities in Multiple Trial Spike Train Data)と題し、多試行スパイク時系列に対する新たな統計解析手法を提案している。提案手法は、多試行スパイク時系列において統計量の時間変化を解析するにあたっての統計的問題点を解決しており、従来の生理学実験の解析で用いられてきた手法に比べて利点が多いことを解析的に示している。さらにこの手法を実データに適用することで、神経細胞における情報符号化との関連を議論している。本章の研究は、統計的難点を解決するために新たな統計解析手法を開発して情報符号化の問題に取り組むという点が特色である。

第6章では、「結論」(General Conclusions)と題し、以上の結果に対するまとめと議論を行っている。

以上を要するに、本論文は従来行われてきた神経スパイク時系列の点過程解析手法を拡張して様々な神経情報の統計的推定を行うとともに、従来の問題点を克服して新たな点過程解析手法を開発している。これは数理情報学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。