

氏 名 中江 健

学位（専攻分野） 博士（統計科学）

学位記番号 総研大甲第 1420 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 統計科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Statistical Estimation of Phase Response Curves

論文審査委員 主 査 教授 樋口 知之
准教授 伊庭 幸人
教授 福水 健次
准教授 青柳 富誌生 京都大学

論文内容の要旨

Phase response curve (PRC) describes the response of an oscillator to external perturbation; it is useful to predict and understand synchronized dynamics of oscillators. In recent years, neuroscientists have focused on neurons' PRCs, and measured them experimentally. This originates from the leading hypotheses that the synchronization of neurons has a functional meaning in the brain.

In this thesis, we propose two statistical methods for estimating PRCs from data; it allows for the correlation of errors in explanatory and response variables of the PRC. This correlation is neglected in previous studies.

The first method is implemented with a replica exchange Monte Carlo technique; this avoids local minima and enables efficient calculation of posterior averages. A test with artificial data generated by noisy Morris-Lecar equations shows that, in terms of accuracy, this method outperforms conventional regression that ignores errors in the explanatory variable. Experimental data from the pyramidal cells in the rat motor cortex is also analyzed; a case is found where the result with the first method is considerably different from that obtained by conventional regression.

The second method is developed using a transformation that mixes the variables; it effectively removes the correlation. The computation time of this method is considerably less than that of the first method. The same test using the noisy Morris-Lecar equations shows that the second method also outperforms than conventional regression in terms of accuracy.

博士論文の審査結果の要旨

提出された論文原稿は英文で3つの部からなり、脳科学などで興味を持たれている「位相応答曲線」の実験データからの推定について、2種類の新しい手法を提案している。

第I部は4つの章からなり、研究の背景と動機、先行研究、手法が説明されている。1章では非線形振動子の同期現象とその脳科学的な意味が解説されている。2章では位相応答曲線概念が導入され、その同期現象との関係や神経科学における意味についての解説がなされている。3章では位相応答曲線の統計的推定についての先行研究が解説されている。また、本研究の主題である「説明変数（パルスを入力するタイミング）と被説明変数（発火した時刻）の誤差の相関」を考慮した統計解析の必要性についても、ここで説明されている。4章ではII部以降で使われる手法である階層ベイズモデリングとレプリカ交換モンテカルロ法の要約が示されている。

第II部は3つの章からなり、階層ベイズモデルとレプリカ交換モンテカルロ法を用いて、上述の相関を考慮した新しいデータ解析手法が定式化され、検証されている。5章ではモデル、6章では多数の局所解のあるモデルのための計算アルゴリズムが説明され、7章はニューロンモデルを用いた模擬データ及びラット運動野からの電気生理実験のデータの解析にあてられている。模擬データに対する結果では、相関を考慮しない従来法よりも提案手法が2乗誤差においてすぐれていることが示され、実際のラットのデータでも従来法との違いが見られる場合があった。

第III部は3つの章からなり、第II部と同じ問題について、異なるアプローチからより高速のデータ解析手法を提案している。8章では、第III部の方法の欠点として計算量が大きいことが述べられ、モンテカルロ法を用いるかわりに、データを非線形変換してから回帰するという代替手法が提案されている。9章では8章で提案された手法を模擬データで検証し、II部の方法よりは精度が劣るもののはるかに高速となり、従来法よりは精度で優ることが示されている。10章は論文全体のまとめと今後の課題を述べている。

本論文では、位相応答曲線の推定という主題について、従来考えられていなかった誤差の相関を取り入れた手法を開発し、その有効性を示しており、独創的な研究であると認められる。位相応答曲線の微妙な差異が同期特性の大きな違いを生むことから、データから正確に位相応答曲線を推定することは重要である。本論文では、データ生成の構造を素直に表した統計モデルを構築することにより、従来法では活用されずにいた範囲のデータからも位相応答に関する情報の抽出を可能とした点において画期的である。提案された統計モデルのクラスは統計科学全体から俯瞰すると広いとはいえないが、同期現象という興味深い自然現象の解明に取り組む研究者層の厚さを鑑みると、統計科学の果たす重要な役割を明快に示した点で本論文の価値は高い。用いられている個々の方法は既存のものであるが、現代的な統計手法をうまく組み合わせ、データが解析される計算機環境にも十分留意しつつ実世界の問題を解決している点も評価できる。

以上述べてきたことにより博士論文審査委員会は、申請者の学位請求論文が博士（統計科学）を授与するに十分な内容であると判断する。