

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2014

課題番号：23650144

研究課題名(和文)点過程ネットワークに基づく統計モデルの研究開発

研究課題名(英文)Statistical Models based on Point Process Networks

研究代表者

駒木 文保 (Komaki, Fumiyasu)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：70242039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：さまざまな入力に対して点過程を出力とする確率システムを定式化し、これを組み合わせることで神経細胞の発火を始めとするさまざまな現象のシミュレーションや解析に利用できる統計モデルを構成した。多次元ポアソンモデルの同時予測と推定に関して縮小事前分布に基づく手法を提案し、従来の標準的な予測方法よりも性能が優れていることの証明を与えた。

研究成果の概要(英文)：A class of probabilistic input-output systems with a point process output are introduced. Statistical models useful for simulation and analysis concerning various phenomena such as neuronal firing are constructed by combining the input-output systems. A method based on shrinkage priors for simultaneous prediction and estimation for multivariate Poisson models are proposed.

研究分野：統計科学

キーワード：点過程 ベイズ統計

1. 研究開始当初の背景

神経細胞の発火は確率的な現象としてとらえることが可能であり、統計学の点過程モデルを利用して解析すること有効と考えられる。神経細胞の発火以外にも多くの現象が点過程モデルを用いて理解出来ると期待される。しかし、点過程の入出力システム、多次元の点過程、点過程ネットワークなどについての統計モデルに基づくシミュレーションや解析の手法は、十分に研究されていない。

研究代表者は、比較的早い時期に、生物の血中のホルモンの濃度の脳(視床下部)によるコントロールを考慮に入れたフィードバック制御のシステムに関する時系列解析のモデルと解析手法 (Komaki, 1993) を提案している。最近ではニューロンの発火について、点過程モデルを用いて統計学的なモデリングの研究を行っている。さらに、地震の点過程モデルに関する共同研究にも加わっている。これらの研究から、多くのニューロンのネットワークに基づく統計モデルが生体のある種の神経情報処理のモデルとして自然であり、また、汎用的な統計モデルとしても有望なものであるという着想を得るに至った。

人工ニューラルネットワークモデルは、脳の情報処理の神経回路モデルとして提案され、1980年代後半から数多くの研究が行われた。現在では、統計学分野においても基本的なモデルの一つとして定着するとともに、研究の興味を中心はベイジアンネットワークなど関連の深い他のモデルに移っているといえる。

本研究で扱うモデルにより、従来の人工ニューラルネットワークモデルよりも、ある種の生体の神経情報処理の本質をより忠実に表現することが可能になり応用が広がると考えられる。

2. 研究の目的

神経細胞の発火などを始めとするさまざまな現象を確率的現象としてとらえることにより、統計学の点過程モデルを利用して解析することが可能になる。従来、地震の統計解析に有効に利用されてきた点過程モデルは、そのままでは神経細胞の発火やその他の多くの現象のモデリングに直接適用できないものの、改良を施すことで神経細胞の発火やその他の多くの現象のモデルとして有効なものとなると考えられる。このようなモデルは、神経細胞の発火に関する Hodgkin-Huxley モデルや、Fitzhugh-Nagumo モデルの様な微分方程式に基づくモデルよりも扱いやすく、かつ McCulloch-Pitts モデルの様に現象を単純化しすぎないという利点をもつことが期待される。点過程の入出力システム、多次元点過程、点過程ネットワークに関する統計モデルを開発することにより、神経細胞の発火を始めとするさまざま

な現象について、統計モデルに基づくシミュレーションや解析を可能にする。

人工神経回路網モデルは、統計学の視点からはロジスティック回帰モデルを階層化・一般化したものとして理解することができ、その性質については解明が進められている。一方、タイミングを考慮した点過程のネットワークのモデルについての研究は非常に限られている。一つには、Hodgkin-Huxley モデルや、Fitzhugh-Nagumo モデルの様なニューロンの挙動を数学的にかなり忠実に表現する微分方程式によるモデルは複雑であり、統計モデルとして扱うのが困難なためであると考えられる。そのために、McCulloch-Pitts モデルやロジスティック回帰型の単純化したニューロンをもとにネットワークを構成したモデルに関する研究が進められた。しかし、これらのモデルでは、発火のタイミングに関する情報は表現できない。

本研究では、地震の研究で利用される点過程モデルを、ニューロンの挙動をより良く説明できるように改良したものを、モデルとして採用する。これは点過程を出力とする確率的な入出力システムとなる。この入出力システム、及び入出力システムを複数組み合わせたものは一つの統計モデルとなる。このようにして、統計学的に明確に定式化された点過程モデルを構成することができる。このモデルにより、ある種の生体情報処理の機構の本質を、従来のニューラルネットワークモデルに比べてより忠実に表現することを目指す。これにより、進んだ統計的推測理論やベイズ理論を、情報処理のモデルに直接適用できるようになることが期待される。神経情報処理の分野での最近の研究では、脳の情報処理とベイズ統計学との類似が指摘されている。脳の情報処理のモデルの一つとして最近提唱され注目を集めている predictive coding の考え方はベイズ統計学やベイジアンネットワークと概念的には非常に近いものといえる。

しかし、これら分野での統計学に基づく研究成果はまだ限られている段階である。本研究では、統計科学と生体の神経情報処理を繋ぎ、神経情報処理の統計科学の立場からの研究を進展させるものとなることを目指す。さらに、点過程ネットワークモデルは、従来型のニューラルネットワークで研究が進められた、学習や連想記憶容量などの理論的問題にも新しい課題を提供する。

さらに、神経や神経情報処理のモデルという当初の視点を離れて、汎用的な統計モデルとしてもさまざまな広い応用範囲をもつモデルとして利用出来るものとなることが期待される。

3. 研究の方法

出力が点過程となる確率の入出力システムのモデル化を進め、シミュレーションアル

ゴリズム, パラメータ推定アルゴリズムの開発を行う。この入出力システムは, より複雑な点過程ネットワークを扱う基礎となるものである。神経細胞の発火は確率的な現象であり, 統計学の点過程モデルを利用して解析することが有力な方法である。さらに, 出力から入力を推定する方法について研究・開発を進める。入出力システムを複数組み合わせたより複雑なモデルの取り扱いについての研究を進める。

地震の統計解析に利用されているモデルは, そのままでは神経細胞の発火のモデリングには利用できないものの, 神経現象へ適合するように改良を施すことで, 神経細胞の発火モデルとして有効なものとなること, 研究代表者らの最近の研究により明らかになった。このモデルは, Hodgkin-Huxley モデルや Fitzhugh-Nagumo モデルの様な微分方程式によるモデルよりも扱いやすく, かつ McCulloch-Pitts モデルの様に現象を単純化しすぎないという利点がある。発火現象を説明するのに数学的に複雑になりすぎず, ある程度現象を忠実に再現できるモデルとしては leaky integrate-and-fire モデルが有名であるが, 本研究で扱うモデルは leaky integrate-and-fire モデルよりも統計モデルとして扱いやすいという利点がある。

この特徴を生かして, 入力に対する神経細胞の応答や神経細胞が複数結合したモデルの研究を進める。このモデルのパラメータ推定アルゴリズムを構成する。パラメータ推定アルゴリズムは, 神経情報処理において基本的な Hebb 型の学習則の一種になると予想される。

統計モデルとしての, 従来の(点過程モデルではない)人工ニューラルネットワークモデルの研究では既に多くの知見が得られ, 統計科学における基本的な方法の一つとして広く利用されている。点過程モデルは, 従来のニューラルネットワークモデルでは表現できない, 発火のタイミングに関するモデル化が可能であるという特長がある。発火のタイミングに依存した学習則を明らかにすることは, 生体の神経情報処理の意味からも重要であると考えられる。

また, 神経情報処理のモデルという位置付けから離れて, タイミングを自然に表現できる一つの基本的な統計モデルとしての点過程ネットワークモデルの応用について取り組む。

統計解析用のプログラミング言語 R を用いて, 点過程ユニットの挙動をシミュレーションするプログラムや, ベイズ法に基づき出力から入力を復元するプログラム, パラメータ推定のプログラムなどを開発する。

さらに, 多次元の点過程モデルの統計的推測と学習に関する基礎的な研究と点過程に応用可能なベイズ予測に関する理論研究を進める。多次元の点過程に対する統計的推測のプログラムを開発する。

4. 研究成果

連続的な信号の入力に対し点過程を確率的に出力する入出力システムに関する研究を行った。開発した入出力システムの統計モデルは神経細胞の挙動を模倣するものであり, さまざまな現象に応用が可能である。モデルは, 神経細胞の発火の不应期などを説明できる柔軟性のあるものとなっている。

点過程の入出力システムモデルに基づいたシミュレーションプログラムを開発した。入出力システムを組み合わせることにより, さまざまな多次元点過程現象のシミュレーションが可能になった。

シミュレーション手法に加え, パラメータ推定のアルゴリズムの研究・開発とその実装, 出力された点過程データから入力信号を推定する手法の研究・開発と実装を行った。粒子フィルタの基づくスムージングにより, 入力信号を推定する手法を提案した。これらの開発した手法は神経細胞の発火だけでなく, さまざまな現象の解析に利用できる。開発したモデルに基づく方法は, 例えば知覚交替現象の解析についても, 従来にない新しい知見を与えることが期待できるものとなっており, この方向でも現在共同研究を進めている。

また, 多次元点過程モデルに関する基礎的な理論研究, 特に, 多次元点過程モデルに基づく予測に応用可能なミニマックスベイズ予測に関する基礎理論と縮小型事前分布を用いるベイズ予測に関する研究を行った。研究成果として, 多次元のポアソン点過程モデルに関して, 従来知られていなかった同時予測方法を開発した。この方法が, Kullback-Leibler ダイバージェンスに基づき予測分布の性能を評価したとき, 標準的な手法より優れていることについて数学的な証明を与えた。さらにこのベイズ同時予測方法に関して情報幾何学的な視点からの理論研究を行った。調和時間(harmonic time)の概念を導入し, 多次元のポアソン過程の同時予測問題を調和時間に基づく非斉時ポアソン過程の予測問題として定式化しなおした。このことにより, 予測問題がある損失関数に基づくパラメータの推定問題に帰着させることができる。このとき, 予測を考慮に入れた計量, 予測計量(predictive metric)が各調和時刻において定義される。この計量は観測量と予測量が同じ分布にしたがう場合には, 情報幾何学において基本的な Fisher-Rao 計量と一致する。この意味で, 予測計量は Fisher-Rao 計量の拡張となっている。新たに提案した予測性能の優れた事前分布とジェフリーズ事前分布との比が, 予測を考慮に入れた計量のもとで, すべての時刻でモデル多様体上の正值優調和関数となっていることを示した。さらに, 同時予測分布を数値的に評価するプログラムを開発し, モデルの次元が大きい時に提案した事前分布を用いることによる改良の効果が大きくなることを明らかにした。また, ベイズ予測で現れる多

変量確率分布が従来知られていなかった多変量の離散確率分布となることから、この確率分布族に基づく統計モデルを利用する研究を進めた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

[1] Komaki, F. (2011) Bayesian predictive densities based on latent information priors, *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol. 141, pp. 3705-3715. (査読有)

[2] Komaki, F. (2012) Asymptotically minimax Bayesian predictive densities for multinomial models, *Electronic Journal of Statistics*, vol. 6, pp. 934-957. (査読有)

[3] Hirose, Y. and Komaki, F. (2013) Edge selection based on the geometry of dually flat spaces for Gaussian graphical models, *Statistics and Computing*, vol. 23, pp. 793-800. (査読有)

[4] Komaki, F. (2013) Bayesian testing of a point null hypothesis based on the latent information prior, *Entropy*, vol. 15, pp. 4416-4431. (査読有)

[5] Yano, K. and Komaki, F. (2014) Asymptotically constant-risk predictive densities when the distributions of data and target variables are different, *Entropy*, vol. 16, pp. 3026-3048. (査読有)

[6] Komaki, F. (2015) Asymptotic properties of Bayesian predictive densities when the distributions of data and target variables are different, *Bayesian Analysis*, vol. 10, pp. 31-51. (査読有)

[学会発表](計4件)

[1] 浅見征平, 北城圭一, 山口陽子, 駒木文保, 瞬き及び脳波入力を考慮した知覚交替の点過程モデリング, 第6回日本統計学会春季集会, 2012年3月4日, 一橋大学(東京都)。

[2] Mizoe, S and Komaki, F. Statistical Analysis of Neuronal Spike Data Based on a Point Process Model, The 2nd Institute of

Mathematical Statistics Asia Pacific Rim Meeting (IMS-APRM 2012), July 2-4, 2012, Tsukuba International Congress Center, Japan.

[3] 松田孟留, 北城圭一, 山口陽子, 駒木文保. 脳波を用いた知覚交替の点過程モデリング, 2013年度統計関連学会連合大会, 2013年09月11日, 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府)。

[4] Komaki, F. Prior Construction Based on the Predictive Metric, 42nd Annual Meeting of the Statistical Society of Canada (招待講演), May 28, 2014, University of Toronto, Canada.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

駒木 文保 (KOMAKI, Fumiyasu)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号: 70242039