

博士論文審査報告書

論文題目

A Study on Bayesian Optimal Estimation with Probabilistic Hidden Structure Modeling

確率的隠れ構造モデリングを用いた Bayes 最適な推定に関する研究

申請者

Takayuki	KATSUKI
勝木	孝行

電気・情報生命専攻 確率的情報処理研究

近年、計測技術の発展により膨大なデータが発生するようになり、更に情報のデジタル化とインターネットの発展により、伝送・蓄積が容易となった。一方、データから知りたいことを抽出するための情報処理技術は、依然、不十分なレベルに留まっている。特に古典的な手法は、少数の質の良いデータを、強い前提の下で正確に解析することに特化しているのに対し、近年は多数の質の悪いデータが主流になっており、情報処理技術の更なる発展が望まれている。

情報処理を、データを一定の規則に基づいて知りたいものに変換することとすると、確率的情報処理とは、データを確率分布に基づく確率変数の実現値と解釈した上で行う情報処理である。また、Bayes 推定は Bayes 理論を用いる推定手法の総称であり、確率的情報処理の主要な部分を占める。確率的情報処理においては、1)モデル、2)推定量、3)計算手法の三要素が重要である。1)モデルはデータの生成過程（順変換）を表すことが多く、一般的情報処理では確定的なモデルが多い一方、確率的情報処理では確率的なモデルを用いる。また、Bayes 推定を行う場合は、事前分布もモデルに含む。2)推定量は、データから知りたいものを導き出す関数であり、一般的情報処理ではデータの統計量や、順変換に対する逆変換が用いられることが多い一方、確率的情報処理では不良設定問題が多く、自明な統計量や明確な逆変換が存在しないため、解の良さの基準を用いて定義することが多い（例えば、真の解との平均二乗誤差を最小にするような推定関数といったもの）。Bayes 推定を行う場合は、推定量は事後分布に基づくものになる。3)計算手法は、データに対する推定関数の値を求めるためのアルゴリズム全般であり、単純なものは解析的かつ平易な数式で求まる一方、複雑なものは高次元最適化問題に帰着することが多く、少ない計算量で精度よく解く方法が熱心に研究されている。Bayes 推定を行う場合は、高次元の積分や総和に帰着することもある。また、確率的情報処理という言葉は、計算手法において非確定的な（確率的な）アルゴリズムを用いることを指す場合もあるが、ここでは触れない。

本論文では、申請者は、近年の多量低質データに対する解析ニーズに応えるべく、工夫を凝らしている。1)モデルに関しては、階層構造と潜在変数を持った確率的モデルを採用し、可能な限り少数のパラメータで柔軟に多彩なデータを表現できるようにしている。また、事前分布は恣意的にならないよう、無情報事前分布を極力採用している。2)推定量に関しては、Bayes 最適と呼ばれるある種の最適性が明確な推定量を採用しており、合理性が明らかである。3)計算手法に関しては、高速かつ近似的に解を求める変分 Bayes (VB) 法や、低速であるが応用範囲の広い Markov 連鎖 Monte Carlo (MCMC) 法を駆使して、現実的な精度と計算時間でデータから推定値を求めている。本論文は 6 章で構成されており、以下に順に評価する。

第 1 章は導入であり、近年のデータに対する上記の背景を概説し、モデルの複雑度と推定量の計算難易度がトレードオフの関係にあるため、適切な粒

度のモデリングが重要であることを説明している。

第2章は本論文で用いられる表記の定義および、確率的情報処理の三要素であるモデルの概説、Bayes 最適な推定量の説明、計算手法で用いる、事後分布を近似的に求める VB 法や、MCMC 法の一つである slice sampling 法について説明している。特に推定量に関しては、推定量の評価基準として平均二乗誤差を最小にしたい場合は事後平均を、ピンポイントで当てる確率を最大にしたい場合は最大事後確率推定を行うことが最適であることを Bayes 理論的に説明している。以下、第3~5章の推定量、計算手法に関する説明はほぼ共通するので、必要に応じて特記するに留める。

第3章では、上記の枠組みに基づいて、交通流推定という具体的な問題に対して安価かつ高精度な解析手法を開発、提案している。交通流とは、道路における車の挙動の統計的な性質の総称で、単位時間当たり通過台数である流量が特に重要である。これは、車の空間密度と速度の積で計算される。交通流の推定は、渋滞の軽減回避や、道路建設計画等において重要である。計測には、道路に車両検知器を埋め込む、スピードガンを設置する、GPS 情報を用いる、可視光動画を解析する等の手法がある。申請者は、途上国でも設置が容易な安価な web カメラで撮影された低頻度（毎秒 1 回程度の撮影）可視光動画からの交通流推定に取り組んでいる。

章の前半ではカメラに映った車の台数を推定する手法を開発している。まず、画面全体に占める車が映っている画素数を簡便な手法で算出した後、この画素数は、1 台当たりの画素数×車の台数（0 を含む自然数）という仮定から、平均値が等間隔に並んだ混合正規分布に従う、というモデリングを行っている。また、事前分布には stick breaking process を用いて、台数に上限を設けずにモデル化することに成功している。章の後半では前半の手法をベースにして、連続するフレーム画像から車の速度を推定する手法を開発している。具体的には、速度が遅い場合は同じ車が何度も撮影されるため、台数はフレーム間で相関を持つ一方、速度が速い場合はその逆というモデリングを行っている。これらの性質に着目した台数推定、速度推定は、本手法が初めてである。既存手法は、個々の車を識別して数えたり、フレーム間で追跡したり、膨大な正解データからの学習（パラメータ調整）を必要としたりするが、提案手法は何れも必要としない点で非常に簡便であり、画期的である。

第4章では、同様の枠組みに基づいて、画像超解像問題に対して、高精度な推定手法を開発、提案している。画像超解像とは、複数の粗い画像から 1 枚の高解像度の綺麗な画像を推定するもので、元画像は、それぞれが別々の位置ずれを含み、ボケを含んでいる場合もある。このような問題は、綺麗な画像が持つべき特徴を事前分布に用いることで、推定精度を上げることができる。申請者は、生成過程（順変換）モデルとしては、位置ズレ、回転、ボケを実装している。特にボケに関しては、正規分布に基づく点像分布関数を無限遠まで正確に計算するモデルを開発している。事前分布にはこの分野で

良いとされる複層 Markov 確率場，及びこれを簡略化した因果 Markov 確率場の二つを採用している．後者は前者と混同されてきたが，本研究によって相違点が明確になった．推定量に関しては，既存研究は，位置ズレ等のパラメータを点推定で求めており，理論的に性能が劣る一方，開発手法はこれらの潜在変数を周辺化消去しており，最適性が保たれる．計算手法には，Taylor 近似を駆使することで VB 法を初めて適用した．当時，複層 Markov 確率場を用いた画像超解像は，複雑過ぎて MCMC 法や焼きなまし法等でしか解けない，VB 法は共役事前分布が必要なため適用困難と思われており，画期的であった．

第 5 章では，同様の枠組みに基づいて，入力選択的回帰問題に対して，高精度な推定手法を開発，提案している．回帰・分類問題とは，入出力がペアになったデータを多数学習することで，新しい入力に対する出力を予測するもので，出力の尺度が間隔尺度のものを回帰問題，名義尺度のものを分類問題と呼ぶ．入力選択的とは，入力が多次元変数で，各データインスタンス毎に特定の一部の次元のみが出力に反映されるという問題設定で，近年の多量低質データに対して，「関係なさそうなデータが混じっていてもとりあえず解析にかける」というニーズに応えるものである．申請者は本問題に対し，潜在変数を用いた構造的なモデリングを行っている．また，計算手法に VB 法を用いることに成功している．

第 6 章は結語であり，これまでの要点と展望を述べている．

以上より本論文は，近年のデータの特徴等の背景，確率的情報処理の三要素，Bayes 最適な推定量について纏めた後，これらの理論に基づいて多量低質データに対する三つの情報処理課題について，隠れ構造を伴う適切なモデリングと現実的な計算手法の開発実装を行い，優れた成果を挙げたものと評価できる．よって，博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる．

2017 年 1 月

審査員

主査 早稲田大学 教授 博士(医学) 京都大学 井上 真郷

(署名)

早稲田大学 教授 博士(工学) 東京大学 村田 昇

(署名)

早稲田大学 教授 工学博士 早稲田大学 内田 健康

(署名)

早稲田大学 教授 博士(工学) 早稲田大学 渡邊 亮

(署名)