

Graduate School of Advanced Science and Engineering  
Waseda University

# 博士論文概要 Doctoral Thesis Synopsis

## 論文題目 Thesis Theme

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  
(Applicant name)

Takayuki	KATSUKI
勝木	孝行

Department of Electrical Engineering and Bioscience,  
Research on Probabilistic Information Processing

Oct, 2016

情報処理の重要性は、データの増加と共に日に日に増している。あらゆるモノがセンサーを備え、インターネットと繋がるようになり、アクセス可能な大量のデータが、日々生まれている。人間もまたセンサーとしての役割を担い、モバイルデバイスやソーシャルネットワークを介して大量のデータを生み出している。情報処理では、これら大量のデータを種々の目的に活用する。

多くの情報処理は、観測されたデータから人間が解釈可能な形への変換を行う。例えば、観測された文章からそのトピックを見出すこと、与えられた画像に写る物体にラベルを付けること等が研究されている。この変換の過程は、数学的に記述することができ、それは、何を行いたいかを明示することと等しい。

情報処理における上述の変換の過程は、観測データを入力、変換結果を出力とする推定関数として表され、データの性質を表現したモデルと、推定関数がどうあれば望ましいのかを指定する評価基準とを複合した目的関数の最適化問題の結果として記述される。例えば、観測データから、そこから直接得られないある指標値を求める問題を考えた時、観測データとその指標値それぞれの振る舞い、及びそれらの関係性を記述するのがモデルであり、推定関数への要求を記述するのが評価基準である。

モデルは、データへの仮定・仮説であり、その構成を考えることをモデリングと呼ぶ。上述したデータは、組み込みセンサーやネットワーク帯域幅の制約、人間による曖昧な表現等によって、一般に不確かで構造化されていないデータを多く含む。これらのデータから有用な情報を抽出するには、適切なモデリングを行うことが重要である。例えば、文字の羅列である文章を単語列で記述すること、画素値の集合である画像を特徴的なパターンの集合で記述すること、がこれに相当する。これらの処理がうまく働けば、その後のデータの解釈は格段に容易になる。例示した自然言語や画像の処理では、抽出された単語列から文章のトピックを解釈したり、局所的な画像パターンの集合から画像全体の意味を解釈したりする。

評価基準は、何らかの量の最小化、もしくは最大化である場合が一般的である。最も成功しており、用いられることが多いものは、二乗誤差に関するものである。推定関数に基づいた推定結果とその正解とする値との間の二乗誤差のサンプル平均を最小化する方法は、特に最小二乗法と呼ばれ、多くの応用例において成功を収めている。また、上述の二乗誤差に限らず推定値の誤差を母集団において平均したものは、汎化誤差と呼ばれ、予測に重きを置く機械学習等の分野では、この最小化を評価基準とすることが多い。

ここで、モデルと評価基準は密接に関連しているため、モデリングは、採用す

る評価基準に基づき、それが計算可能な範囲で、問題の記述に必要な十分な複雑度で設計される必要がある。上述のように、モデルはより正確にデータの性質を記述することを求められるが、モデルと評価基準の相性によっては、最適化が計算困難となる場合がある。そのため、評価基準によっては、それを計算可能にするために、モデルの方に制約をかける場合もある。例えば、あらゆる問題に適用可能な極めて自由度の高いモデルを採用したとする。自由度はモデルパラメータの数とほぼ同じであるため、自由度の高いモデルでは、最適化されるべきパラメータの数が極めて多くなる。一般に最適化はパラメータの組み合わせの数に依存して計算量が増えるため、極端に自由度の高いモデルは最適化が困難である。一方で、極端に自由度の低いモデルが必ずしも良い訳でもない。自由度の低いモデルは問題の記述を正確に行えず、仮に最適化が成功したとしても、結果が所望の性能を満たさないことが多い。

本論文では、Bayes 的な評価基準を用い、その基準において現実的な推定アルゴリズムを導出するための、確率的モデリングに関する研究を行う。Bayes 的な評価基準に基づき最適化された推定関数は、一般に安定な解となることが知られている。それは、評価基準において、そのモデルの想定されうる確率的な変動の影響を考慮した推定を目指すためである。この性質を利用し、本論文では、一般にデータが不足しやすく、解が不安定になりやすい、教師なし推定や隠れ変数推定を行う問題を扱う。一方で、Bayes 最適な推定は計算コストが大きいことも知られており、それを行えるモデルのクラスは限定されることが多い。本論文では、Bayes 最適な推定が現実的な計算時間で行える範囲で、適切な複雑度を持つ確率モデルを、いくつかの応用例に合わせて事前知識を活用して設計・提案する。Bayes 最適な推定を行う場合、事後分布が必要となるため、具体的なモデリングでは、事後分布の導出に必要な観測モデル、事前分布を設計する。

本論文の構成を以下に示す。

1 章では、研究の背景、意義を述べ、本論文の導入を行う。

2 章では、本論文で扱う Bayes 最適な推定に基づくアルゴリズムの枠組みを示す。いくつかの Bayes 的な評価基準を導入し、それぞれに対して、どういった推定関数が最適化の結果として導出されるかを説明する。その際、各推定関数における効率的な計算アルゴリズムとして、Markov chain Monte Carlo 法、変分 Bayes 法に関するレビューを行い、具体的なアルゴリズムの導出を行う。更に、変分 Bayes 法についての近似手法を提案・導入する。

3 章では、具体例として、交通流推定問題を扱う。交通は、我々の生活・経済の基盤となる極めて重要な要素である。交通流は、交通を表す基本的な量である

交通流量と交通密度、交通速度から構成される。これらのうちどれか2つが求まれば残りの1つは一意に定まる。本章では、サンプリングレートや画質、画角の悪いウェブカメラ画像から交通密度と交通速度をそれぞれ教師なしの設定で推定する問題を扱う。従来法における前提条件であった高いサンプリングレートや画質、画角を要求せず、人手によるラベル付けを行った教師データをも用いないことから、一般に推定は不安定になりやすいが、2章の枠組みに基づき、Bayes 最適な推定を行うことでこれを解決する。提案法は従来法と比べて高度なインフラやコストの高い教師データを必要としないため、導入コストの低い方法となる。実データを用いた実験において、サンプリングレートや画質、画角の悪い条件でも、提案法が良好に交通流推定を行えることを確かめた。

4章では、別の例として、画像超解像問題を扱う。画像処理の研究において、劣化した観測画像からその原画像を推定・復元することは、非常に基本的かつ重要な問題である。本章では、特に位置ズレ、ボケ、解像度の低下等の線形劣化変換を受けた観測画像から元画像の復元を行なう超解像問題を扱う。従来法よりも劣化変換を適切に表現できる観測モデルを提案し、画像の事前分布として、画像の滑らかさと不連続性を同時に表現できる複層 Gauss-Markov 確率場とその派生モデルを用いる。超解像推定は、観測データが不十分な場合、解が一意に定まらない不良設定問題となることがあるが、2章の枠組みに基づき、Bayes 最適な推定を行うことでこれを解決する。実験においては、提案法が既存法よりも高精度に推定を行えることを確かめた。

5章では、入力選択的回帰を扱う。回帰は、情報処理における基本的な問題設定であり、入力と連続値の出力との間の関数を学習する。観測データから連続値を予測する問題一般に応用できる非常に重要な問題である。本章では、特に学習データにおいて、教師データが観測データの一部の領域のみに基づいて付されている状況における回帰を扱う。入力である観測データの一部を隠れ変数モデリングによって選択的に教師データと対応付けることで、この問題設定を適切に扱うモデルを提案する。隠れ変数を利用したモデリングは、推定するパラメータの数が多くなるため、観測データが不十分な場合、解が不安定になることがあるが、2章の枠組みに基づき、Bayes 最適な推定を行うことでこれを解決する。実験において、既存法に比べて提案法がより高精度な推定を行えることを確かめた。

6章では、本論文のまとめを行い、今後の展望を述べる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 勝木 孝行 印

(2017年 1月 現在)

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者 (申請者含む)
論文(査読有り)	<p>○ <u>Takayuki Katsuki</u>, Tetsuro Morimura, Masato Inoue, “Traffic Velocity Estimation From Vehicle Count Sequences”, IEEE Transactions on Intelligence Transportation Systems, to appear, 2016.</p> <p>○ <u>Takayuki Katsuki</u>, Akira Torii, Masato Inoue, “Posterior Mean Super-resolution with a Causal Gaussian Markov Random Field Prior”, IEEE Transactions on Image Processing 21(7), pp. 3182—3193, IEEE, 2012.</p> <p>Tsuyoshi Idé, <u>Takayuki Katsuki</u>, Tetsuro Morimura, Robert Morris, “City-Wide Traffic Flow Estimation From a Limited Number of Low-Quality Cameras”, IEEE Transactions on Intelligence Transportation Systems, to appear, 2016</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
国際会議 予稿（査読 有り）	<p>○ <u>Takayuki Katsuki</u>, Masato Inoue, “Bayesian Regression Selecting Valuable Subset from Mixed Bag Training Data”, In Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR2016), to appear, 2016.</p> <p>○ <u>Takayuki Katsuki</u>, Tesuro Morimura, Tsuyoshi Idé, “Unsupervised Object Counting without Object Recognition”, In Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR2016), to appear, 2016.</p> <p>○ <u>Takayuki Katsuki</u>, Masato Inoue, “Posterior Mean Super-Resolution with a Compound Gaussian Markov Random Field Prior”, In Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2012), pp. 841—844, 2012.</p> <p>Satoshi Hara, <u>Takayuki Katsuki</u>, Hiroki Yanagisawa, Takafumi Ono, Ryo Okamoto, Shigeki Takeuchi, “Consistent and Efficient Nonparametric Different-Feature Selection”, In Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS2017), to appear, 2017.</p> <p>Daisuke Sato, Tetsuro Morimura, <u>Takayuki Katsuki</u>, Yosuke Toyota, Tsuneo Kato, Hironobu Takagi, “Automated Help System for Novice Older Users from Touchscreen Gestures”, In Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR2016), to appear, 2016.</p> <p>Kumiko Maeda, Tetsuro Morimura, <u>Takayuki Katsuki</u>, Masayoshi Teraguchi, “Frugal signal control using low resolution web-camera and traffic flow estimation”, In Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, pp. 2082—2091, 2014.</p> <p>Takayuki Osogami, <u>Takayuki Katsuki</u>, “A Hierarchical Bayesian Choice Model with Visibility”, In Proceedings of the 22nd International Conference on Pattern Recognition, pp. 3618—3623, 2014.</p> <p>Vikas Joshi, Nithya Rajamani, <u>Takayuki Katsuki</u>, Naveen Prathapaneni, LV Subramaniam, “Information fusion based learning for frugal traffic state sensing”, In Proceedings of the 23rd international joint conference on Artificial Intelligence, pp. 2826—2832, 2013.</p> <p>Tsuyoshi Idé, <u>Takayuki Katsuki</u>, Tetsuro Morimura, Robert Morris, “Monitoring Entire-City Traffic using Low-Resolution Web Cameras”, In Proceedings of the 20th ITS World Congress, #3143, 2013.</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名, 発表・発行掲載誌名, 発表・発行年月, 連名者（申請者含む）
研究会（査読なし）	<p>勝木 孝行, 森村 哲郎, “低フレームレート時系列画像からの Bayes 交通速度推定”, 第 16 回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2013), 2013.</p> <p>飯田紘士, 勝木孝行, 恐神貴行, 中川 裕志, “ベイズ推定を用いた指数忘却型自己回帰モデルによるトレンド, 季節性を含むデータの予測”, 第 92 回数理モデル化と問題解決(MPS)研究発表会, 2013.</p> <p>勝木孝行, 森村哲郎, 井手 剛, “低画質な定点画像からの教師なし車両台数推定”, 第 15 回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2012), 2012.</p> <p>勝木 孝行, 井上 真郷, “混合モデルとしての複層 Gauss-Markov 確率場による画像の修復と領域分割”, 電子情報通信学会技術研究報告, 111(275), IBISML2011-75, pp. 223-230, 2011.</p> <p>勝木 孝行, 鳥居 英, 井上 真郷, “複層 Markov 確率場と線形劣化変換に対する Bayes 超解像”, 電子情報通信学会技術研究報告, 110(83), NC2010-10, pp. 63-68, 2010.</p>