

様式VI

博士学位論文調査報告書

論文題目 Modeling problems using Bayes' rule for finite impulse response models and Markov models
(有限インパルス応答モデルとマルコフモデルに対するベイズ則を用いたモデリング問題)

申請者氏名 鄭 曼

最終学歴 平成 30年 3月
京都大学大学院情報学研究数理工学専攻修士課程 修了
令和 3年 3月
京都大学大学院情報学研究数理工学専攻博士後期課程
研究指導認定見込

学識確認 令和 年 月 日 (論文博士のみ)

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
(調査委員長) 教授 太田快人

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 山下信雄

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 大塚敏之

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	鄭 曼
論文題目	Modeling problems using Bayes' rule for finite impulse response models and Markov models (有限インパルス応答モデルとマルコフモデルに対するベイズ則を用いたモデリング問題)		
(論文内容の要旨)			
<p>システム制御における数理モデルは、対象の振る舞いの解析や制御システム設計に有用である。数理モデルを構築するにあたって、ベイズの定理は重要な役割を果たしている。本論文はベイズの定理を適用して、有限インパルス応答モデルに対するシステム同定問題、マルコフモデルに対する状態簡約化問題に取り組んでおり、全5章から構成されている。</p> <p>第1章では、ベイズの定理が中心的な役割を果たすベイズ式システム同定法と、同じくベイズの定理を原理として離散的な値をとる確率過程をモデル化する隠れマルコフモデルの実現について、その研究背景を述べている。</p> <p>第2章では、物質質量などを変数にする非負制約を有する動的システムである非負システムのインパルス応答列を入出力データから求める同定法について考察している。ベイズ式システム同定法の多くはガウス型事前分布を用いており、非ガウス型の前分布に関する研究は少ない。非負システム同定ではインパルス応答は非負に制限されることから、本論文では非ガウス型分布である切断ガウス型分布を事前分布とすることを提案している。そしてインパルス応答列の減衰率と相関性が切断ガウス型分布に含まれるハイパーパラメータに関係していることを示している。さらに切断ガウス型分布の場合には経験ベイズ法を用いてハイパーパラメータを調整するためのEMアルゴリズム (期待値最大化アルゴリズム) におけるEステップ (期待値ステップ) の計算法を与え、ハイパーパラメータ決定が容易にできることを示している。最後に、同定法の有効性をいくつかの例題で検証している。</p> <p>第3章では、ベイズ式システム同定法において、周波数応答の分散に関する制約を満たしつつなるべく小さな入力エネルギーをもつ同定入力設計問題について議論している。問題をそのまま記述すると非凸最適化問題になるが、周期的入力に限定して凸化する方法がこれまで提案されていた。まず本論文では、周期的入力に限定すると一般的には保守性をもつことを示した。次に入力がある共分散を有する定常過程によって構成されるとすると、この共分散を求める問題は凸最適化問題になることを示した。この凸最適化問題で定められた過程から信号をサンプルすることによって、制約条件を満たし、かつ入力エネルギーの小さな入力をできることを例題で検証している。</p> <p>第4章では、隠れマルコフモデルの部分クラスである集約マルコフモデルの実現問題を考察している。集約マルコフモデルの接続構造が与えられたとき、その構造をもつ集約マルコフモデルの可到達集合が全体空間に一致しないときには、実現次数を低減できることを示している。また可到達集合が全体空間に一致しないための節続構造の十分条件として、周期性やダイレーションと呼ばれる構造を解明し、そのときの状態を簡約化する方法も与えている。</p> <p>最後に第5章では、本論文の結論を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文はベイズの定理を適用して、有限インパルス応答モデルとマルコフモデルに対するモデリング問題を扱っている。特に、ベイズの定理を中心的な役割を果たすベイズ式システム同定法と、ベイズの定理を原理として離散的な値をとる確率過程をモデル化する隠れマルコフモデルの実現について、以下の研究成果を得ている。

1. 非負システム同定法における事前分布の選択

多くのベイズ式システム同定法では、インパルス応答列の事前分布としてガウス型分布を用いている。インパルス応答列が非負制約を受ける非負システムにとっては非ガウス型分布を考える必要がある。本論文では、切断ガウス型分布を用いることを提案し、その分布を定めるハイパーパラメータがインパルス応答列の減衰率ならびに相関性に関係していることを明らかにした。また経験ベイズ法を用いてハイパーパラメータを調整するためにEMアルゴリズム(期待値最大化アルゴリズム)を適用するときEステップ(期待値ステップ)の計算法を与え、ハイパーパラメータ決定が容易にできることを示した。さらに数値例によって有効性を確認している。これらの結果は非負システム同定法の提案として有用性があり、非ガウス型事前分布が効果的に用いることができることを示したことで理論的にも価値がある。

2. ベイズ式システム同定法での同定入力設計法

システム同定のための入力は、十分システムを励起する必要がある一方、過大になることを避けなければならない。本論文では、ベイズ式システム同定法において、周波数応答の分散に関する制約を満たしつつなるべく小さな入力エネルギーをもつ同定入力設計問題を考えている。これは非凸最適化問題になり、凸化する方法として周期的入力に制約する方法がこれまで提案されていた。これに対し、周期的入力に限定すると一般的には保守性をもつことを示した。次に入力がある共分散を有する定常過程によって構成されるとすると、この共分散を求める問題は凸最適化問題になることを示した。この凸最適化問題で定められた過程から信号をサンプルすることによって、制約条件を満たし、かつ入力エネルギーの小さな入力をできることを例題で検証した。このことはベイズ式システム同定法の有用性を高める意義がある。

3. 集約マルコフモデルの状態簡約化方法

離散的な値をとる確率過程のモデルとして隠れマルコフモデルを用いるとき、その最小状態数を求める問題は解決されていない。遷移行列の非負性を緩めた実現を擬似実現というが、その最小状態数は可到達空間と零空間の次元で特徴づけられることがわかっている。本論文では、隠れマルコフモデルの部分クラスである集約マルコフモデルに対して、可到達空間の次元を考えることによって状態を簡約化できるかを考察している。集約マルコフモデルの状態間の結合を表すグラフ上で周期性やダイレーションと呼ばれる構造を有すれば、可到達空間の次元が状態数を下回ることで、そのとき擬似実現ではなく遷移行列の非負性を保存して状態数を低減できることを示しており、理論的に重要な結果である。

以上、本研究は、ベイズの定理を用いて、有限インパルス応答モデルの同定問題やマルコフモデルの実現問題を考察し、学術上意義の大きな結果を与えている。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令

和3年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、（全文公表時期は未定）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降