

氏 名	小 亀 英 己 こ かめ ひで き
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第1091号
学位授与の日付	昭 和 53 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Stochastic Methods for the Monitoring of Nuclear Reactor Systems: Kalman Filter Applications (原子炉システム監視のための確率的手法：カルマン・ フィルタの応用)

論文調査委員 (主 査) 教 授 服 部 嘉 雄 教 授 西 川 禎 一 教 授 若 林 二 郎

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、雑音を含む原子炉の動作を監視するために、カルマン・フィルタを利用する統計的手法を研究したものである。主として、中性子束分布の推定、反応度異常診断、パラメータ同定の3つの問題について理論的考察を行い、それぞれについて計算機シミュレーションを行うことにより、提示した方法の有効なことを検証している。論文は5つの章からなる。

第1章は、炉心内中性子検出器の観測データをもとにして中性子束分布を推定するために、分布型カルマン・フィルタを利用する方法を述べたものである。炉心動特性は1組の遅発中性子を含む拡散方程式で記述されるものとし、ゆらぎの大きさはショットキーの公式に従うと仮定している。固有関数展開法を用い、推定誤差分散を計算してフィルタの性能を評価している。また、推定精度を高めるための検出器位置を決定する問題をとりあげ、即発、遅発中性子に関連する1つの評価基準を設定して、検出器配置の最適化を検討している。2個の検出器を用いる場合に対して数値計算を行い、空間高調波の推定に対して特に有効な配置の得られることを指摘している。

第2章は、炉の異常反応度を早期に検出する方法を提案したものである。異常反応度は、制御棒の誤操作に対応してランプ状と仮定し、また、その発生時刻と大きさは完全に未知であることを考慮して、定常運転時の炉心に対して構成された離散型カルマン・フィルタのイノベーション過程に複合仮説の尤度比検定を適用している。特に実時間処理を容易にするため、近似技法を加味して検出方式を簡潔なものにまとめあげている。最後に、平均誤警報時間を一定とした上で、種々の反応度入力に対する平均検出時間の数値計算例を示し、他の検出方式と比較して本方式の有効性と限界について考察を行っている。

第3、第4の両章は第5章への数学的準備とみられるもので、制御終了時刻が自由な最適制御問題への確率動的計画法の適用に関連した理論的諸問題を検討している。第3章は、軌道が終端領域に到達した時に制御を終了する場合を扱っている。終端領域への可到達性という制約条件を除いて得られる問題群の特殊な場合としてこの問題をみる視点から、最適方程式の解の一意性が自明なものではないことを示すと共

に、最適コスト関数の可測性のための十分条件を与えている。次に、最適コストの完全な特徴付けが行われ、これに基づいて最適コストを求める発見的なアルゴリズムが提示され、さらに、一意解であるための十分条件、準最適制御の構成法が論じられている。第4章は、終端領域が事前に設定されず、制御と停止の結合問題として、終了時刻が設計者の判断に委ねられる場合である。前章同様、最適方程式の導出とその解の一意性の議論、また、最適コストの性質の解明を種々の条件下で行い、準最適方策の構成、最適コストの連続性についても考察を加えている。

第5章は、終了時刻が可変なパラメータ同定実験の最適計画を扱ったもので、具体的には原子炉反応度の推定問題をとりあげ、カルマン・フィルタの利用方法を提示したものである。フィルタは反応度真値に対する事後確率を算出するようにしている。同定実験の評価においては実験所要時間を重視し、実験中の各段階で、実験を続けるかあるいは打ち切るかの判断が許されるという形の定式化を行っている。この場合、問題は、パラメータの事後確率と最適状態推定値とを新たな状態量とする制御マルコフ過程の問題に変換され、第4章の結合問題に帰着することを示している。数值的に最適実験計画を求めることは困難であるので、これに代る有用な計画を得るために最適方程式から最適計画を得るプロセスを詳細に分析し、実験終了条件を訓練する学習過程を通じて準最適計画を行う方法を提案している。反応度推定に対する計算機シミュレーションによって、提案の方法による時は、実験終了時刻を固定した場合に比べ、大巾なコストの低減、反応度推定の精度向上が得られることを実証している。

論文審査の結果の要旨

近年、原子炉に対する信頼性、安全性の要求が一層高まるにつれ、現在では、確率統計的に精密な考察が従来よりも重視される傾向をもたらしているのが、関連分野における研究の一つの特徴である。本論文は、この趨勢に沿ってなされた一連の研究結果をまとめたものであり、現実的に雑音を含む原子炉の常時監視系を構成する目的で、カルマン・フィルタを利用する新しい統計的手法の幾つかを提示したものである。本論文の主要な成果について要約すれば次のとおりである。

(1) 炉心内中性子検出器から得られる観測データを用いて中性子束分布を推定するために、分布型カルマン・フィルタを利用する新しい方法を与え、その性能評価を推定誤差分散に基づいて行った。中性子束あるいは先行核密度の空間分布に対する推定精度に与える検出器配置の影響を、2本の検出器を用いる場合の計算結果をもとにして詳細に究明している。特に空間高調波の推定には、検出器位置の最適化が効果的であることを指摘した。

(2) 異常反応度を早期に検出するための監視系を構成することを目的として、計算機による実時間処理が容易な形の検出方式を提案した。これは、事故時反応度の時間変化がランプ状であることを想定したもので、その原理はカルマン・フィルタの生成するイノベーション過程に対してある尤度比検定を適用することにあるが、その際逐次計算上の難点を近似手法を用いて解決し簡潔な方式にまとめている。従来の方法と比較して、提案した方式の有効性を数値実験により検証する一方、その理論的限界についても明確に指摘した。

(3) 反応度推定問題を、カルマン・フィルタを利用するパラメータ同定実験という広い観点から捉えて、

その実験計画の最適化を図った。ここでは、推定精度のみならず実験所要時間をも評価基準に組み入れて、実験終了時刻を可変とする定式化を提示し、終了時刻の判定条件を訓練する学習過程を通じて準最適計画を行う方法を提案している。終了時刻固定の実験計画と比較して、本方法による時は、コスト、推定精度の面で優れた結果が得られることをシミュレーションにより明らかにしている。

(4) 上記実験計画の理論的根拠として、制御終了時刻が自由な最適制御問題に確率動的計画法を適用する際の諸問題を新たな角度から検討した。軌道が終端領域に到達した時に制御を終了する場合と、制御と停止の結合問題として与えられる場合とをとりあげ、まず、最適方程式の解の一意性が自明ではないことを明らかにした上最適コスト関数の特徴付け定理を与え、これを基礎として、種々の逐次代入法の最適解への収束性、準最適方策の構成法等について定理を導いている。

以上を要するに、本論文は、原子炉監視系の構成について幾つかの新しい統計的手法を提案すると共に、その有効性を計算機シミュレーションにより実証し、また、基礎的手法となる確率動的計画法に対しても新しい知見を与えたもので、学術上、工学上貢献するところは少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。