

氏 名	芳 村 敏 夫 よし むら とし お
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第 691 号
学位授与の日付	昭 和 49 年 5 月 23 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	STUDIES ON ESTIMATION OF STATE VARIABLES AND UNKNOWN PARAMETERS IN NOISY NONL- INEAR SYSTEMS (雑音に乱された非線形系の状態変数および未知パラメータの推定 に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 榎 木 義 一 教 授 得 丸 英 勝 教 授 明 石 一

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は確率的手法に基づいた独立な不規則外乱および雑音をうける離散時間非線形力学系の状態変数および未知パラメータの推定問題に関する基礎的な研究であって全編8章より構成されている。

本論文の内容を大別すれば次のようになる。

第1章から第4章までは不規則外乱および雑音をうける非線形力学系の状態変数および未知パラメータの最尤推定値を近似的に決定する手法を記述している。

第5章および第6章は、非線形力学系の状態変数および未知パラメータの推定に対する近似フィルタの定量的検討とモンテカルロ法によって実際に最小分散推定値を決定したものである。

第7章および第8章は、力学系内に時変パラメータが存在する場合の実用的な近似推定手法について記述している。

まず第1章においては正規性不規則外乱および雑音をうける非線形力学系において観測データ列が与えられたとき状態変数および未知パラメータの事後確率密度関数を最大にする規範に基づいて最尤推定値が2点境界値問題の解として与えられることを述べ、その解析的手法を提案している。周知のように非線形系の場合は一般に解析的に求めることが困難であるので予測子・修正子法によって得る方法を与えている。その方法はまず力学系を線形近似して近似推定値を求め、つぎにこれを基にして2点境界値問題の解として満足されるまで修正を繰り返す。この方法はアルゴリズムが複雑であるが修正前に比較して十分に推定性能が改善されている。第2章においては、前章の方法のアルゴリズムを簡単化するために2点境界値問題の境界条件を観測時点とともに移行させている。前章と同様に推定値を得るために予測子・修正子法を用いているが、前章の方法に比較して推定性能は若干劣るけれども計算時間は大幅に短縮されている。第3章においては、第1章および第2章で扱った力学系の非線形性よりかなり強い非線形性が系内に存在する場合の推定手法を提案したものである。状態変数および未知パラメータの推定値を非正規分布で表示した事後確率密度関数に基づいて評価している。非正規分布としてはテラー級数の有限項を用い、

観測の各時点で循環的にこれを決定している。この手法と事後確率密度関数を正規分布で近似した場合を比較すれば前者が推定性能においてかなり優れていることを述べている。第4章においては、不規則外乱および雑音が非正規分布をしている場合の非線形力学系の状態変数および未知パラメータの最尤推定値を決定する方法について記述している。力学系の非線形特性、不規則外乱および雑音の確率密度関数をテラー級数展開によってそれぞれ非線形性および非正規性を有する2次の非線形項を考慮し、しかるのち得られた非線形方程式より線形解とその修正解を求めて推定値を決定する方法を提案している。またこの場合アルゴリズムが非常に複雑となるのでそれを減少させる工夫がされている。第5章においては、推定誤差の事後確率密度関数をエルミート直交関数列で表示し、種々の近似フィルタによる推定値の偏りを解析的に評価している。またこの偏りを用いて近似フィルタによる推定値を修正すれば推定性能が改善されることから妥当な手法であることが証明されている。第6章においては、非線形力学系の状態変数および未知パラメータの最小分散推定値をモンテカルロ法によって評価する方法について記述している。推定値は一般に多重積分によって与えられるが、サンプリング誤差を減少させるために事後確率密度関数を前章と同じくエルミート直交関数列で表示し積分回数を減少させている。また多重積分を一様乱数を用いて計算しているが、擬似乱数よりも準乱数の方が精度がよいことを確めている。数値例では近似フィルタによる推定値をこれと比較することによって定量的に検討している。第7章においては、パラメータがマルコフ過程をなす場合についての推定手法を考察している。まずその変動が既知である場合は状態変数とみなして従来の近似フィルタによって推定値が求められることを述べ、つぎにその変動が部分的に未知である場合でもパラメータの確率密度関数に対して最尤推定の手法を適用すれば、同様の手法で扱うことができることを示している。最後に第8章においては、パラメータの変動特性が完全に未知である場合の推定手法を記述している。まずパラメータが時間に対して不変であるという仮定のもとに近似フィルタを設計し、つぎにそのフィルタのイノベーション過程が設計仕様上の分布からのサンプルであるかどうかの仮説検定をおこない、その結果に基づいてフィルタを修正し性能を改善させる方法を提案している。これによって、パラメータ変動の誤認のために生じるフィルタの発散現象が防止できることをシミュレーションによって確めている。

論文審査の結果の要旨

不規則外乱および雑音をうける力学系の状態変数および未知パラメータを推定する研究は、カルマンおよびブーシーに始まり現在でも理論面ならびに応用面から極めて活発におこなわれている。特に実際の見地から、力学系に非線形特性が含まれた場合の推定手法の開発およびその精度を定性的・定量的に検討することは極めて重要な問題である。しかし推定手法の開発にともなう精度の定量的裏付けはまだ十分完成されてはいない。

著者はこれらの点を解明するため離散時間非線形力学系に注目し、その状態変数および未知パラメータの推定に関する実際の見地に基づいた近似的手法を開発し、極めて興味深い結果を得ている。その要点を挙げれば次のようになる。

- (1) 従来、非線形力学系の状態変数およびそれに含まれる未知パラメータを推定する手法は系を種々の方

法で線形化し、近似フィルタを設計したものであった。しかしながら、それらのほとんどのものは非線形特性の度合いを考慮しないで線形化をおこなっているのので性能の悪いフィルタが得られることをしばしば経験した。したがって、ここでは非線形特性の度合いが弱い場合と強い場合に分け、それぞれに対して以下の手法によりその最尤推定値を得る手法を開発した。すなわち非線形特性が弱い場合は予測子・修正子法を適用し、非線形特性が強い場合はテラー級数を用いた非線形推定法を適用することによって最尤推定値を得た。これらの方法は全く新しいものであり、その優秀性はシミュレーションによっても保障されている。

(2) 非線形系に対して設計された近似フィルタから得られた推定値は、一般に不偏性を有しないが、その偏りを知ることは実用面から極めて重要である。したがって、まずその値を定量的に知る方法を確立した。その評価手法は推定誤差の事後確率密度関数をエルミート直交関数列で表示し逐次その偏りを計算したものである。さらにその推定性能をより厳密に評価するためには上記の偏り以外に誤差の分布形を知ることが有用である。そのために状態変数の事後確率密度関数を著者が独自に開発したモンテカルロ法を用いて簡便に解く方法を提案した。これらの結果は今までよく用いられている拡張カルマンフィルタとして知られる三種類のフィルタ、すなわち1次フィルタ、2次フィルタおよび等価線形化手法フィルタの性能を比較し、さらにその適用範囲を決めるのに極めて有効である。

(3) 力学系内に存在する時変未知パラメータがマルコフ過程をなすという以外はその特性が未知である場合とその未知パラメータの変動特性が全くわからない場合を考え、その各々に対し適当なパラメータ推定法を提案した。すなわち前者は最尤推定の手法を適用して解決し、後者は適応フィルタの一種である仮説検定法を適用して解決した。これらの結果をたくみに利用すれば、フィルタの設計上よく問題になる、パラメータ変動の誤認によるフィルタの発散も防止できることをシミュレーションによって検証した。このようなことは推定理論の実用上への応用に対して極めて価値があると思われる。

したがって、学術上、工業上寄与するところが少なくないので、本論文を工学博士の学位論文として価値あるものと認める。