

放物型分布定数系の適応オブザーバに関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、放物型分布定数系の適応オブザーバに関する研究結果をまとめたものである。放物型分布定数系とは、熱伝導系などの拡散方程式で記述される制御系を意味し、適応オブザーバとは、未知パラメータを含む系において、そのモデル構造と入出力情報などから、パラメータ推定と状態推定を同時に行う推定機構のことをいう。分布定数系の制御問題では、積分変換や差分法などによる有限次元近似系として扱う方法と、発展方程式に変換して無限時限系として扱う方法とがあるが、どちらの立場においても、適応オブザーバに関する研究は十分行われているとはいえない。物性値の真値が一般に未知パラメータになることを考慮すると、適応オブザーバの研究は新規性のみならず応用的要請も汲んでいると考えられる。

本論文では、その未解決問題に対し、パラメータ推定だけでなく、その推定値を用いた安定化方法を提案する。これまで分布定数系の適応オブザーバにおいては、集中定数系にて提案された推定機構の分布定数系への適用手法が提案されている。しかし、それらは射影作用素を用いて有限次元のサブシステムを導出し、さらに固有関数との内積から得られる集中定数系に対して、その適応オブザーバを適用するに限られている。このことは、無限次元系特有の問題を直接扱ってないだけでなく、状態方程式内に入力と未知パラメータを持つ線形系に限られているともいえる。そこで、無限次元系の分布定数系に対して、次の3つの観点から、状態と未知パラメータを推定する新しい適応オブザーバの構成を提案する。

(1) 状態に入力と未知パラメータを持つ分布定数系(無限次元)の適応オブザーバ

まず安定なスペクトル作用素を用いて入出力表現を導出し、無限時限系の状態変数フィルタを導入する。そして、それらと Lyapunov 安定化法を用いて状態の推定器や適応則を設計した。その後、その機構により得られる推定値の真値への収束性を、PE 性を有する場合とそうでない場合とでそれぞれ評価する。PE 性が仮定される場合においては、パラメータ推定値だけでなく状態の推定値も真値へ収束することを示した。また PE 性が仮定されない場合では、無限次元系特有の問題から、未知パラメータの次元が有限次元に制限される場合や作用素の定義域がソボレフ空間の制限される場合に限り、出力誤差の収束性までが示された。以上は、集中定数系において、すでに提案されている適応オブザーバの無限次元系への自然な拡張となっている。

(2) 推定値を用いた状態フィードバック安定化

ここでは、推定値を用いた状態フィードバックにより、系全体を安定化する。(1)と同様に状態変数フィルタを導入して、未知パラメータと状態の推定を行う。そして、状態フィードバック系の制御則を固有関数のモード分解を通じて導出し、その制御則内のゲイン及び状態量に、パラメータ推定値と状態推定値を適用した。状態フィードバック系の制御則導出に際し、未知パラメータの次元が有限

次元に制限されてしまうものの、PE 性を仮定する場合において、適応オブザーバを含んだ系全体が有限発散時刻を持たないことと、状態推定値によるフィードバック系の安定性が示された。

(3) 境界条件内に入力と未知パラメータを持つ分布定数系の適応オブザーバ

境界条件内に入力と未知パラメータを持つ分布定数系では、それらが発展方程式において陽に現れない性質をもっている。従って、このような制御問題は、今まで難問として扱われてきただけでなく、何らかの変数変換により、入力や未知パラメータが陽に現れるように変形する必要がある。そこで、作用素の分数べきを用いて変数変換を行い、先の述べた適応オブザーバの適応可能な系へと変換する。そして、その系が複素ヒルベルト空間上の系となることから、その性質を精査しつつ適用し、最後に逆変換により元の系の未知パラメータ及び状態を推定する。この推定問題は、変数変換により複素ヒルベルト空間上に系が変換されるものの、その空間上においても、適応オブザーバが有効であることも併せて示されている。

以上より、本論文は、未知パラメータを含んだ放物型分布定数系 (無限次元系) に対し、無限次元系の状態変数フィルタを導入して、適応則を設計する適応オブザーバを提案した。また、この設計手法が有効であることを数値シミュレーションを通じて示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 下 裕
副 査 教 授 小野里 雅 彦
副 査 教 授 金 子 俊 一
副 査 准教授 石 動 善 久

学 位 論 文 題 名

放物型分布定数系の適応オブザーバに関する研究

本論文は、放物型分布定数系の適応オブザーバに関する研究結果をまとめたものである。放物型分布定数系とは、熱伝導系などの拡散方程式で記述される制御系を意味し、適応オブザーバとは、未知パラメータを含む系において、そのモデル構造と入出力情報などから、パラメータ推定と状態推定を同時に行う推定機構のことをいう。分布定数系の制御問題では、積分変換や差分法などによる有限次元近似系として扱う方法と、発展方程式に変換して無限次元系として扱う方法とがあるが、そのどちらの立場においても、未知パラメータと状態を同時に推定する適応オブザーバに関する研究は、不十分であった。物性値の真値が一般に未知パラメータになることを考慮すると、分布定数系の適応オブザーバの研究は、新規性のみならず応用的要請も汲んでいると考えられる。

著者は、その未解決問題に対し、推定機構だけでなく、その推定値を用いた安定化手法を提案している。これまでの分布定数系の適応オブザーバにおいては、集中定数系にて既に提案されている推定機構の有限次元近似系への適用手法が提案されていたが、それらは、無限次元系特有の問題を直接扱っていないだけでなく、状態方程式内に入力と未知パラメータを持つ線形系に限られているものだった。そこで、無限次元系の分布定数系に対して、3つの観点から未知パラメータと状態を同時に推定する新しい適応オブザーバを提案し、さらに数値シミュレーションを通じ、その有効性を述べている。

本論文は、8章から構成されており、以下にその概要を示す。

第1章は緒言である。第2章・第3章では、偏微分方程式を扱うための基礎として、バナッハ空間やヒルベルト空間、そして発展方程式への変形や半群を用いた方程式の解などを解説している。また、第4章では、分布定数系の制御における可制御性や可観測性、初歩的な安定化手法について詳説している。

第5章では、著者が提案する分布定数系の適応オブザーバについて述べている。まず、安定なスペクトル作用素を用いて入出力表現を導出し、無限次元系の状態変数フィルタを導入している。そして、それらと Lyapunov 安定化法を用いて状態の推定器や適応則を設計している。その後、その機構により得られる推定値の真値への収束性を、PE 性を有する場合とそうでない場合とでそれぞれ評価している。PE 性が仮定される場合においては、パラメータ推定値だけでなく状態の推定値も真値へ収束することが示されている。また、PE 性が仮定されていない場合では、無限次元特有

の問題から、未知パラメータの次元が有限次元に制限される場合や作用素の定義域がソボレフ空間に制限される場合に限り、出力誤差の収束性までを示している。以上は、集中定数系において、既に提案されている適応オブザーバの無限次元系への自然な拡張である。

第6章では、推定値を用いたフィードバック制御により、系全体の安定化手法を提案している。第5章と同様に、まず状態変数フィルタを導入して、未知パラメータと状態の推定を行っている。そして、状態フィードバック系の制御則を固有関数のモード分解を通じて導出し、その制御則に、パラメータ推定値と状態推定値を適用している。また、フィードバック系の制御則導出の際に、未知パラメータの次元が有限次元に制限されてしまうが、PE性を仮定する場合において、適応オブザーバを含んだ系全体が有限発散時刻を持たないことと、フィードバック系の大域的漸近安定性を示している。

第7章では、境界条件内に入力と未知パラメータを持つ分布定数系においても、適応オブザーバを設計できることを示している。ここでの分布定数系は、発展方程式において未知パラメータや入力が陽に現れない性質を持っているため、何らかの変数変換により、それらが陽に現れるように変形する必要があった。そこで、作用素の分数べきを用いて変数変換を行い、先に述べた適応オブザーバを適用可能な系へと変換している。そして、その系が複素ヒルベルト空間上の系になることから、その性質を精査しつつ適用し、最後に逆変換により元の系の未知パラメータと状態の推定を行っていた。この推定問題は、変数変換により複素ヒルベルト空間上に系が変換されたとしても、提案した適応オブザーバが有効であることを併せて示している。最後に、第8章にて結論を述べている。

これを要するに、本論文では、未知パラメータを含んだ放物型分布定数系に対し、無限次元の状態変数フィルタを導入し、未知パラメータと状態を推定する適応オブザーバを提案している。さらに、それらを用いた制御器との組み合わせが大域的漸近安定であることを示している。これらの成果は、システム情報工学の分野に寄与するところが大きなものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。