

	いしかわのぶゆき		
氏名	石川 信行		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成16年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	2自由度制御系における目標値応答特性の近似的実現法に関する研究		
指導教官	東北大学教授 阿部 健一		
論文審査委員	主査 東北大学教授 阿部 健一	東北大学教授 一ノ倉 理	
	東北大学教授 吉澤 誠	東北大学助教授 郭 海蛟	

論文内容要旨

第1章 序論

制御系における設計指標である、フィードバック特性、目標値応答特性を設計時に独立に設定可能な2自由度制御系において、所望とする目標値応答特性を実現するためのフィードフォワード補償要素の近似設計法として、連続時間系および離散時間系で表現された制御対象に対してそれぞれの特徴を活かした設計法を提案している。本研究では、モデルマッチングによる目標値応答特性の実現法を検討の対象として近似設計手法を提案している。提案手法では、フィードフォワード補償要素の次数を適宜指定して近似設計を行い、低次元フィードフォワード補償要素を得ることを指向している。連続時間系に対する設計法として、伝達関数の分母系列表現のパデ近似による方法を提案する。この方法の特長としては、分母系列表現のパデ近似によりフィードフォワード補償要素の伝達関数を低周波から近似するもので、目標値応答で主要な低周波特性を実現するのに適している。また、パデ近似の次数を自由に選択できるため、2自由度制御系の特徴を活かした設計が行える。離散時間系に対する設計法としては、安定有理関数でパラメータ表現された2自由度制御系に対して、規範とする目標値応答を実現するためのフィードフォワード補償要素の近似設計法を提案する。この方法では、有限時間区間における制御対象の出力時系列を規範モデルの出力時系列に一致させるようなフィードフォワード補償要素を最小二乗法により設計しており、離散時間系において時系列表現が容易にできることを利用したものがある。本手法においては、設計すべき補償器の有理関数パラメータと制御対象の出力系列の関係が簡潔な線形連立方程式で与えられるため、有理関数パラメータの次数を指定した低次元設計が可能である。また、不安定零点を有する非最小位相系の制御対象に対しても、パラメータ表現された制御系の特徴を活かして、有理関数パラメータを多項式型とした設計を行えば、所望の目標値応答特性の近似的実現が可能である。さらに、この手法では、線形連立方程式の設計式に数値計算の反復解法を適用することにより、パラメータの反復的調整機能を容易に実現できる。パラメータ調整機能も、制御系の設計問題の範疇で定式化している点に提案手法の特徴があるといえる。

以下で本論文の要旨を各章ごとにまとめる。

第2章 2自由度制御系

本章では、制御系設計において要求される特性である、フィードバック特性、目標値応答特性の観点から2自由度制御系の一般的特性について述べる。そして、目標値と出力の偏差に基づき操作量を決定するフィードバック制御系では、フィードバック特性と目標値応答特性を独立に設定することができないが、2自由度制御系ではフィードバック要素とフィードフォワード要素の2つの補償要素により、それぞれの特性を独立に設定できる利点があることを述べる。

モデルマッチングにより所望の目標値応答特性を実現するようなフィードフォワード要素を直接的に設計する場合、その次数は制御対象の次数に比べて高次になる。補償要素が必要以上に高次になることは実装の点からも、また、補償器の動作を把握する点からも好ましいものではない。3章以降では、連続時間系、離散時間系を対象とした場合について、それぞれの特長を活かした2自由度補償器フィードフォワード要素の近似設計法を提案する。

第3章 連続時間系に対する近似設計法

本章では、2自由度制御系フィードフォワード要素の低次元化のための近似設計法として、伝達関数の分母系列表現のパデ近似による方法を提案する。この方法は伝達関数の低次元近似に基づく方法である。伝達関数近似の際に分母系列表現を用いることにより、低周波特性を重視した特性実現が図れるため目標値応答特性の近似には適しているといえる。本方法により設計した補償器を原子炉の出力制御に適用した場合の制御特性を、簡単な原子炉動特性モデルを用いた数値シミュレーションで評価する。図1はその結果であり、フィードフォワード要素の伝達関数が(分子:4次/分母:5次)、および(分子:6次/分母:6次)の場合の応答を示している。(分子:4次/分母:5次)の場合には、フィードフォワード要素の次数が低すぎるため所望の目標値応答が実現できていない。一方、(分子:6次/分母:6次)の場合には、完全モデルマッチングにより設計したフィードフォワード要素の場合と同程度の応答が得られている。完全なモデルマッチングにより設計したフィードフォワード要素の伝達関数の次数は分子・分母ともに13次である。

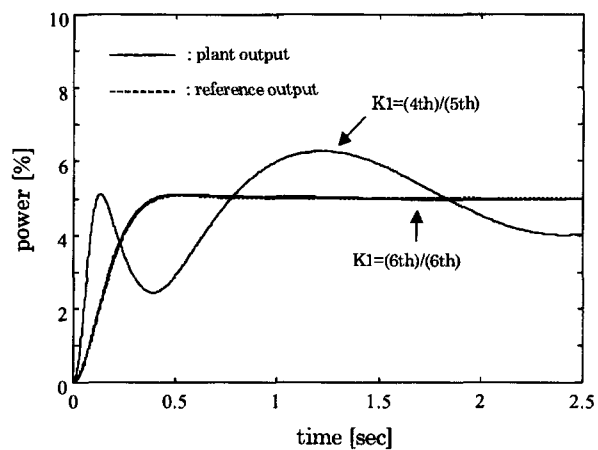


図1 パデ近似による近似設計

第4章 離散時間系に対する近似設計法

本章では、安定有理関数でパラメータ表現された離散時間型2自由度制御系に対して、規範とする目標値応答特性を近似的に実現するためのフィードフォワード要素の設計法を提案する。本提案手法では、設計すべき有理関数パラメータの係数と制御対象の出力系列の関係は簡潔な線形連立方程式で与えられるため、有理関数パラメータの次数を指定した低次元設計が可能である。さらに、パラメータ表現された制御系の特徴を活用して、有理関数パラメータを多項式型とした設計を行えば、不安定零点を有する非最小位相系の制御対象に対しても所望の目標値応答特性の近似的実現が可能となる。非最小位相系の制御対象において所望の応答特性を実現する際に問題となる操作量応答の振動についても、時間領域における応答系列のフィティングに基づく設計法の特徴を活かして、最小二乗法に正則化定数を導入した正則化最小二乗法を用いることにより操作量振動の抑制を図ることが可能である。本章では、これら

の特徴をもつ離散時間型2自由度制御系フィードフォワード要素の設計法を提案するとともに、上述のことを数値例により確認して提案手法の有効性を示す。図2は、非最小位相系の制御対象に対して、正則化最小二乗法によりフィードフォワード要素を設計した場合の結果を示す。正則化定数を、それぞれ $\gamma=0$, 5×10^{-3} , 5×10^{-4} , とした場合の出力応答, 操作量応答を示している。正則化定数を適当な値に選ぶことにより、正則化定数を用いない場合と比較して操作量応答は滑らかになっている。本手法では、正則化定数を適当な値に選ぶことにより操作量振動の抑制と所望の目標値応答の実現とのトレードオフを図ることができる。

第5章 パラメータ調整法

4章で提案した離散時間型2自由度制御系フィードフォワード制御要素の設計法では、設計すべき有理関数パラメータの係数と制御対象の出力系列の関係が簡潔な線形連立方程式で与えられる。そのため、数値計算における反復解法の手法を適用することにより、パラメータ調整機能を容易に実現できる。有限時間区間の応答系列により設計問題を表現していること、ならびに、制御系の安定有理関数パラメータ表現を用いているためパラメータ調整の意味合いが明確になっていることが、パラメータ調整機能の実現を容易にしている。本章では、反復解法としてMarquardt法を適用した場合について、パラメータ調整による目標値応答特性の改善効果を数値例により確認し、提案手法の有効性を示す。図3にノミナル設計された補償器を実際の制御対象特性に対して適用した場合の応答を示す。モデル化誤差の影響で規範とする目標値応答からのずれがみられる。一方、図4は20回の反復調整を行った後の応答である。パラメータ調整により、規範とする目標値応答に近づき目標値応答特性が改善されていることがわかる。

第6章 結論

本論文の総括として、各章の結論をまとめる。

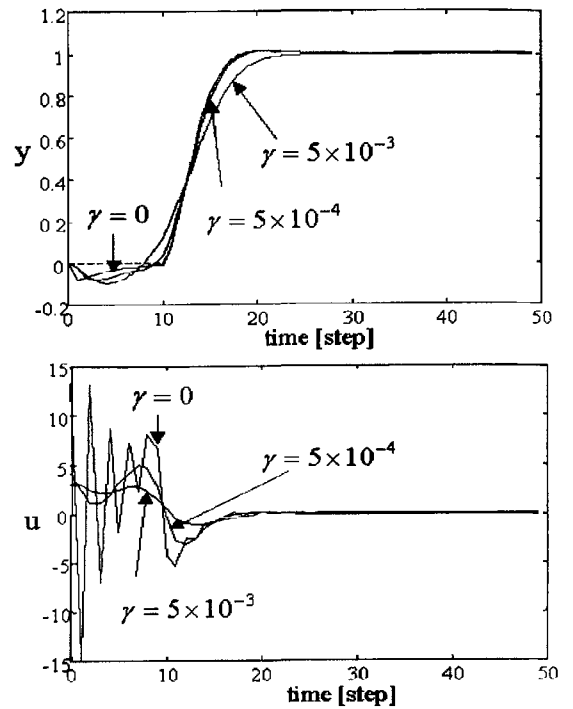


図2 正則化最小二乗法による設計

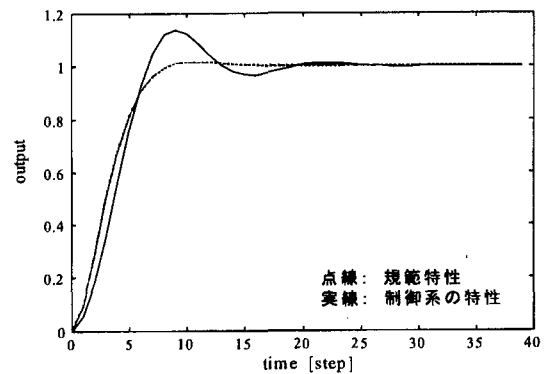


図3 実際の制御対象への適用時の応答

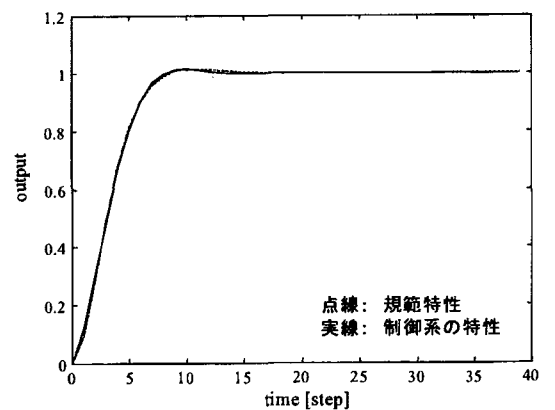


図4 パラメータ調整後の応答

論文審査結果の要旨

制御系の設計においては、良好な制御特性が保てる範囲であれば、補償器はできるだけ低い次元であることが望ましい。そのため、補償器の低次元化に関し多くの研究がなされ、種々の低次元設計法が提案されている。著者は、目標値応答特性の近似モデルマッチングを図ることを目指して、連続時間系と離散時間系のそれぞれについて2自由度制御系のフィードフォワード補償器の低次元設計法を与え、数値シミュレーションによりそれぞれの有効性を明らかにした。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、制御系の主要な特性であるフィードバック特性と目標値応答特性の観点から、2自由度制御系の性質と特徴を示すとともに、モデルマッチングによる目標値応答特性の実現法および伝達関数の低次元近似などに関する従来の研究のいくつかを概観して、次章以下の基礎を与えている。

第3章では、連続時間系に対する2自由度制御系のフィードフォワード補償器の設計法として、伝達関数の分母系列表現のパデ近似を用いた低次元設計法を提案している。この方法を原子炉の出力制御に適用して、簡単な原子炉動特性モデルを用いたシミュレーションによりその有効性を検証している。

第4章では、離散時間系に対する2自由度制御系のフィードフォワード補償器の設計法として、有限時間区間における時系列表現に基づく設計法を与えている。すなわち、この方法は、制御対象の有限時間区間における出力時系列を規範モデルのそれに一致させるように、フィードフォワード補償器の分母多項式と分子多項式のパラメータを最小二乗法により設計するものである。本手法の特徴を生かすことにより、非最小位相系に対しても所望の目標値応答特性の近似実現が可能であり、さらに、正則化定数の導入により操作量信号の振動抑制を図ることができるなど、本手法は優れた設計法である。

第5章では、前章の設計手法に数値計算の反復解法を適用したパラメータ調整法を与えている。この方法により、制御対象のモデル化誤差が存在する場合に制御特性のオンラインでの改善が可能となり、実用上有用な方法である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、2自由度制御系におけるフィードフォワード補償器の低次元設計法を与え、それが所望の目標値応答特性を良好に近似できることを数値シミュレーションにより明らかにしたもので、システム制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。