

氏名	伊 東 弘 一 い とう こう いち
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論工博第564号
学位授与の日付	昭和47年11月24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 Control Problems of Distributed Parameter Systems with Spatially Concentrated Controls (操作量が空間的に集中している場合の分布定数系の制御問題に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 榎木義一 教授 得丸英勝 教授 近藤文治

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、放物型偏微分方程式で記述される分布定数系、すなわち熱伝導系または物質拡散系に関する種々の制御問題を考察したもので、6章よりなっている。

第1章では、まず分布定数系の制御問題に関する研究の必要性ならびに集中定数系の制御問題との関連性について述べている。つぎに、上述の研究分野の歴史的発展について概説するとともに、本研究の目的について言及している。さらに、次章以下で考察の対象となる制御系の数学的記述を一般的に行なっている。すなわち著者は、操作量が空間座標に関して連続的に変動するような制御装置を実際に構成することは物理的に困難であるという観点から、操作量が空間的に集中しているものとするという仮定の下に議論を展開している。また、この仮定を満たす分布および境界制御入力に対する制御系の応答をグリーン関数を用いて表わし、特にこれらの制御入力関数が、デジタル計算機の導入によって時間に関して階段関数状になった場合の応答について詳論している。すなわち、離散時間形式の場合の応答を、ある線形積分作用素を導入することによって簡潔に記述し、さらにこの作用素の持つ種々の数学的性質について考察し、次章以下の理論展開の基礎としている。

第2章では、熱伝導系において特に熱応力の影響を考慮した場合の一つの最適制御問題が取り上げられている。従来、熱伝導系の最適制御問題の評価関数としては、目的温度からの偏差により制御成績を評価する形式のものを採用した論文が大多数であるが、たとえ上述の評価関数に対する最適制御方策を実施することにより、被加熱物体を目的温度に近づけることができたとしても、その際に被加熱物体内に大きな熱応力が発生することは望ましくない場合が多い。すなわち、熱伝導系の主な制御目的としては、できる限り熱応力を発生させないで、制御対象を目的温度に近づけることであるという立場に立ち、本章では、熱応力の発生は温度こう配に深い関連性をもつものとし、新しく温度こう配を考慮に入れた二次形式の評価関数を導入した一つの最適制御問題に対する考察を行なっている。まず3次元熱伝導系に対して実際に最適制御方策を求めるための数値解法に関する一般論を展開し、つぎに1次元の場合の一例についてより

詳細な検討を加えている。最後に、デジタル計算機による数値計算例を掲げることにより、本手法の有効性を実証している。

第3章および第4章では、第1章で述べた観点より操作量が空間的に集中しているものとして、放物型偏微分方程式で記述される分布定数系の最適制御問題を一般的に考察している。一般に集中定数系の場合と比較して、分布定数系がヒルベルト空間などの無限次元空間において定義されることを考慮すれば、実際に分布定数系に対する最適制御方を近似計算するためには相当量の数値計算を行わねばならず、デジタル計算機などの制御装置への導入は必要不可欠となる。第3章では、上述の点を考慮に入れて時間に関して離散的な分布制御関数および境界制御関数に対する最適制御問題を取り上げている。二次形式の評価関数に対する最適制御方が、動的計画法によりフィードバック形式で求められ、集中定数系の多段決定過程問題のフィードバックゲインを決定する漸化式に対応する関数漸化式が導き出されている。上述の関数漸化式は、積分作用素などを含んでおり相当複雑であるが、実際に最適制御方を計算するための数値計算法を同時に提出している。その手法は、ある積分作用素に関する完全正規直交系をなす固有関数展開によるアルゴリズムで、その有効性が一つの数値計算例によって示されている。

第4章では、理論的な立場から、第3章の制御関数が時間に関して連続的に変化する場合の最適制御問題が検討されている。制御関数は分布制御関数であっても境界制御関数であってもかまわないが、それぞれに対する最適解の導出の過程は多少異なっている。結果として、上述の最適制御問題は、リカッチ型の非線形積分偏微分方程式を解く問題に帰着され、最適制御方はフィードバック形式で求められている。また本章の後半においては、前章で求められた離散時間形式の最適解とここで得られた連続時間形式の解の関係について検討を加えている。すなわち第3章で求められた最適フィードバックゲイン決定のための関数漸化式から、上述のリカッチ型の方程式がここで述べられた方法と独立して導き出せることを示している。

第5章では、第3章の制御系において、実際にデジタル計算機を制御装置に導入した場合に生じる計算時間遅れに起因する評価関数の劣化について検討を加えている。すなわち、第3章の最適フィードバック制御方策決定においては、制御系の状態量の推定ならびにその推定値に基づく最適制御入力決定には、計算による時間遅れが生じない理想的な場合について議論を展開している。しかしながら、第3章で述べたように、分布定数系に関する制御問題においては特に多量の数値計算が必要とされ、フィードバック形式の制御方策の場合、上述の状態推定や最適制御入力の計算による時間遅れの影響は無視できない問題点になってくる。ここでは、動的計画法を応用して、前もって上述の計算時間遅れを考慮しておくことにより、制御成績の劣化を減少することができることを示している。

最後に、第6章では可制御性と状態推定の問題が研究されている。前半では、第3章で取り上げられた離散時間形式の制御入力関数に対する $\text{null-}\delta$ -可制御性の問題が論じられている。制御対象と外部との間に熱放射がある場合とない場合、また操作点の位置によって制御系が上述の意味の可制御性を満足するかどうか、ある積分作用素に関する固有値の性質に基づいて考察され、その結果は二つの定理にまとめられている。つぎに、フィードバック形式の最適制御方策を実現する場合、系の状態推定問題は重要となるが、一般に分布定数系の状態量を完全に観測することは不可能であり、現実の制御系においては多点観測方式が広く採用されている。ここでは、観測が時間に関して離散的に行なわれ、また観測雑音が存在する場合

の多点観測方式による最適推定問題を取り上げ、数値計算法についても検討を加えている。

論文審査の結果の要旨

1960年に、A. G. Butkovskii と A. Ya. Lerner によって最初に取り上げられた分布定数系の制御問題に関する研究は、その後多くの研究者によっていろいろな角度から考察されてきたが、現在までに得られた成果は集中定数系に対するものと比較してまだ十分とはいえない段階にある。その理由は、分布定数系自身が持つ数学的解析の困難さにあり、また種々の制御問題に対する解析結果は、一般にいずれの場合も相当複雑で、現実の制御系に適用することが困難な場合が多いのが現状である。しかしながら工業界においては、科学技術の発達にともなって、より精度の高い制御技術を要求される時代であり、熱伝導や物質拡散などの分布定数系に対する制御理論の確立は、鉄工業や化学工業、原子力工業などの各分野のみならず、環境汚染制御の諸分野でも強く要望されている。

そこで著者は、放物型偏微分方程式で記述される分布定数系の種々の制御問題について、工学的な視野から現実の制御系を構成する際に必要となる基礎理論を展開することを意図して、本論文においては分布制御関数または境界制御関数が空間的に集中しているものとして議論を展開している。

この研究で得られた主な成果はつぎの通りである。

(1) 熱伝導系においてできる限り熱応力を発生させないで制御対象を目的温度に近づけるという最適制御問題を取り上げ、これに必要な数値計算法を確立した。これは従来この分野の論文では考慮されなかった問題点であり、工学的に見て極めて意義深いものである。

(2) 一般的な放物型偏微分方程式で記述される分布定数系において、離散時間形式の制御関数を採用した場合の最適制御問題を考察し、二次形式の評価関数に対する最適フィードバック制御方策を決定するための解析手法を確立し、さらに数値計算のためのアルゴリズムを導出した。つぎに上述の最適制御問題において、制御関数が時間に関して連続的に変化する場合の考察を行ない、離散時間形式の場合の解析結果との関連性について検討を行なった。

(3) 分布定数系に対する最適フィードバック制御機構の構成において、オンライン・リアルタイム方式のデジタル計算機を採用した場合、計算機による計算時間遅れに起因する制御成績の劣化を減少するための手法が提案され、その手法の有効性が数値計算例により実証された。

(4) 離散時間形式の制御関数に対する $\text{null-}\delta$ -可制御性の問題が、ある積分作用素が生成する固有値の持つ性質を利用して考察され、操作点をどこに配置すれば可制御系となるかという設計問題への解答を与えた。

(5) 最適フィードバック制御系を実現する際に必要となる最適推定問題を考察し、多点観測方式による最適状態量推定のためのアルゴリズムを導出した。

以上要するに本論文は分布定数系の最適フィードバック制御系を構成する際に検討しなければならない種々の制御問題を、現実の工業プロセスへの応用を十分考慮しながら研究し、計算機制御装置設計のための基礎理論を確立したもので、学術上・工業上寄与するところが少なくない。

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。