

【171】

氏 名	井 上 紘 一 いの うえ こう いち
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 139 号
学 位 授 与 の 日 付	昭 和 43 年 7 月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 数 理 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Studies on optimal and suboptimal design of control systems (制御系の最適および近似最適設計に関する研究)

論文調査委員 (主 査)
教 授 榎 木 義 一 教 授 得 丸 英 勝 教 授 萩 原 宏

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は制御系の最適設計およびそれに付随して生ずる種々の問題点、特に実際的あるいは工学的観点から重要となる問題点を提起し、それらに関する主として理論的研究をまとめたものである。論文は緒論、第1部、第2部および結論からなっており、第1部は4章、第2部は5章に分けられている。

緒論では、研究目的、従来の研究との関連、および研究内容の梗概について述べている。制御系の設計に対する従来の手順を説明し、制度系に課せられる要求が高度になるにつれ、解決を迫られるようになった主要な問題点を、特に最適制御系の設計という立場から列举し、本研究の動機および目的を明確にしている。

第1部は主として非線形制御系の近似最適構成法に関する研究であり第1章から第4章までを含んでいる。第1章は、実在の制御対象が必ず何らかの非線形特性を含んでいることに鑑み、非線形制御対象に対する近似最適制御系の設計手法について論じている。提案された近似手法は観測された時時刻々の状態量をもとに非線形特性を線形近似するいわゆる瞬時線形化法と呼ばれる一種の線形化手法に基づくものである。この手法の特徴は容易に近似的最適制御系を閉回路構成で求めることができる点にあり、その制御性能も優れたものであることを例題を用いて示している。またこの手法は計算機制御系の設計にも役立つことを指摘し、それに便するように離散的記述が採用されている。

第2章は、第1章で提案された瞬時線形化法を近似最適リレー制御系の構成問題に適用したものである。リレー制御系においては、設計者によって無視された微少な非線形特性の存在により、リレー制御系にとり極めて好ましくないチャタリング現象のような悪影響がしばしばあらわれることを示し、瞬時線形化法に基づく近似構成法を適用すれば、全然チャタリングを生ぜず、しかも制御性能の優れているリレー制御系が構成されると指摘している。

第3章では、制御系の最適設計において重要な役割を果す評価規範の選定について論じている。まず、評価規範は制御に課せられた要求をよく反映するものであること、かつ最適解を容易に閉回路構成で求め

うることが必要であるという観点から、改変形評価規範なるものを提案している。つぎにこの改変形評価規範の応用例として、制御系に速度緩飽和特性を生ぜしめる方法および非線形制御対象に対する近似最適制御系の構成方法とを与え、きわめて簡単な手続きで、種々の目的にかなう非線形制御系を構成できることを示している。またこの手法は試行錯誤的な要素を含むため、計算機の助けを借りる設計法としても有用であると述べている。

第4章は、電子計算機を用いて最適制御装置を構成する際に問題となる計算時間遅れの制御性能におよぼす影響について述べたものである。まず、従来の最適論では、計算機による情報処理のための時間遅れに考慮が払われていないこと、従って制御性能の劣化を免がれないことを指摘し、ついで計算時間遅れを予め考慮に入れた最適制御問題を定式化し、それに解を与えている。具体例により、従来の計算時間遅れを無視した制御方策と、ここで提案されている計算時間遅れを考慮に入れた最適方策とを比較し、ここで提案された手法により計算時間遅れの介入による制御性能の劣化をある程度まで補償しうることを明らかにしている。

第2部は、最適制御系の解析あるいはさらに一步進んで、構成に感度解析的な概念を導入したものであり、第5章から第9章までを含んでいる。

第5章前半は、未知パラメータを含む制御対象の最適制御を取扱ったものである。まず制御対象パラメータの値を誤認することによって評価規範に生ずる評価規範損失なる量を導入し、それに基づく二つの最適制御の考え方、すなわち(i)未知パラメータの統計的データを利用して平均評価規範損失を算出し、それを最小にするパラメータの値を用いて最適制御装置を構成するもの、および(ii)未知パラメータがその系にとり最悪の値を取ったときの評価規範損失(最大評価規範損失)を求め、これを最小にするパラメータの値を決定するというミニマックス法的な考え方とを述べている。上述の考え方を簡単な例題に適用し、同一の未知的性格を持つパラメータでもそのパラメータが制御対象のどの位置に存在するかによって、かなり異なった性格を示すことを明らかにしている。

さらに後半では、最適制御系を実際に実現する際に要求される実現精度について検討を加えている。すなわち、制御装置の実現精度と評価規範損失との関連を解析する手法を示し、評価規範損失をある定められた水準以下に保ちたい場合、制御装置に要求される実現精度を検討している。

第6章は、実在の制御対象と数学モデルとの間には必らず誤差の生ずることを予め考慮に入れた新しい意味での最適制御について基礎的考察を加えている。この新しい最適制御の概念は、考察の対象として、数学モデルのみならず、変動しうるパラメータに関する感度方程式をも同時に含む仮想的制御対象(結合系)を考えれば自然に導かれることを示している。特に、この新しい最適制御の実現性は結合系の可制御性にかかっていることを指摘し、結合系の可制御性について詳細な解析を行なっている。

第7章は、第6章で示された新しい最適制御の基礎的考察を基にして、その考え方の一つの応用例として、終端に拘束条件をもつ最小エネルギー系設計問題を論じている。従来の取扱いでは、パラメータの変動は生じないという立場から最適設計がなされているため、パラメータ変動により終端拘束条件が大幅に乱される可能性があることを指摘し、それに対処するため、感度概念をいかに導入すべきかについて論じている。

特に、零感度最小エネルギー系について詳論している。簡単な例を与えることにより、この手法が従来の最適化手法に比較して極めて有効であることを明瞭に示している。

第8章は、第6章あるいは第7章で取扱われなかった特殊なパラメータ変動、すなわち制御対象の階数を変動させるパラメータ変動（ λ -変動）を問題とし、第6章あるいは第7章で述べられた理念がほぼ同様に適用できることを示している。系の階数を変化させるという特殊なパラメータ変動であるため、考察すべき結合系が操作の微分を含むという特殊な形となり、このままでは通常最適化法も可制御理論も適用できないという困難な問題に遭遇する。これに対処するため、ある種の変数変換の導入が提唱されている。一例としてある種の線形制御対象に対する結合系の解析を詳細に行ない、一つの可制御のための充分条件を導いている。さらに終端に拘束条件をもつ最小エネルギー系構成問題への適用を述べ、この手法の優位性を示している。

第9章は、上述の感度解析的あるいは感度構成的手法の実際問題への適用を論じたものである。実例として、製鋼における転炉の動的制御問題を取上げている。転炉の制御目的は終点における炭素含有量をある規定量に一致させることである。このことに注目し、パラメータ感度解析法により、転炉プロセスのパラメータ変動の終点炭素含有量におよぼす影響を明らかにし、その影響を減少させる転炉操業のパターン、操作時間等を考察し、実際操業への指針を与えている。

結論は本研究の結果を総括したものである。

論文審査の結果の要旨

すべての工業分野に涉って、制御に課せられる要求が高度になってきた今日、最適制御論に含まれる思想とその手法は、電子計算機の発達普及とともにきわめて重要になりつつある。しかしながら、最適制御論が実際問題の解決に適用可能となるためには、著者も指摘しているように、なお多くの解決すべき問題点が残されている。

著者は、これらの問題点のうち、近似最適制御系の構成法、非線形制御系の構成法、最適制御系におけるパラメータ変動等による性能劣化の解析とその対策および数学モデルに含まれる誤差の制御性能に与える影響の解析とその補償法等について論及し、多くの成果を得ている。

制御系に非線形要素を導入すれば、系の特性は格段に向上することは古くから知られているが、その導入に対する系統的手法は必ずしも存在しなかった。著者は瞬時線形化の概念あるいは改変形評価規範を提唱することにより、非線形近似最適制御系の構成を容易ならしめた。これらの手法は、計算機制御あるいは計算機を用いた設計という立場からも注目すべきものである。

ついで、オンライン計算機を用いる計算機制御系においては、情報処理のための時間遅れ、すなわち計算時間遅れが必ずしも介在することになり、制御性能の劣化が生じることを指摘し、これに対処する新しい最適化手法を論じている。さらに、最適制御系における制御性能劣化をもたらす要因として、制御装置を構成する各要素の精度不足があげられる。著者はこれら要素を製作する場合の精度と制御性能との関係を解析し、要求される精度に関して興味ある示唆を与えている。

本研究の特筆すべき成果は、最適制御論に感度解析的な概念を導入したことにある。すなわち、現在の

最適制御論の最大の欠陥は、実在の制御対象が厳密にモデル化されうるという仮定に立脚している点にある。しかしながら、実在の制御対象は、これを正確にモデル化することは実際上不可能であり、かつまた時間とともに変化するものである。著者は、これらの不正確さあるいは変動を予め考慮に入れた新しい意味での最適制御の必要性を強調し、そのため感度という概念を積極的に最適制御系の構成に導入すべきであると提唱している。

制御対象を表わす数式モデルに、感度方程式を付加した仮想的制御対象（結合系）を導入し、感度をも考慮に入れた設計が可能であるためには、この結合系が可制御でなければならないことをまず指摘している。したがって、結合系の可制御性については詳細な検討を加えており、多くの興味ある成果を得ている。

以上の基礎的な考察のもとに、終端に拘束条件をもつ最小エネルギー問題に、感度を考慮した新しい設計法を適用し、この手法が通常の最適化手法よりはるかに優れたものであることを明確にしている。同時に、実際の応用例として、同様な観点から転炉の動的制御問題を取扱い、転炉操作法に興味ある示唆を与えている。

これを要するに、本論文は最適制御系の設計に関し、種々の角度から問題点の提起ならびに解法の提案を行ない、従来実際問題の解法としては余りにも高踏的であった最適制御論をより一層実際問題にも有効な理論となるように検討を加えたものであり、学術上・工業上寄与するところが少くない。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。