

学位論文題名

非線形制御系の設計に関する研究

学位論文内容の要旨

今日、制御理論は工学の広い分野で使われている。実際の応用の大半が線形の制御であるが、ほとんどすべての制御対象は非線形であり、非線形制御理論の潜在的な需要は高いものと推察される。

制御対象の非線形性に対処する方法としては、線形のロバスト制御系を構成する方法がある。しかし、非線形性が既知の場合でも単なる等価外乱と考えているので、ロバスト性の達成のために本来の制御目的の達成がそこなわれる。

もう1つの方法として、制御対象の非線形性を積極的に補償する方法がある。しかし、補償要素が直感的に求められない系が数多く存在する。

本論文では、幾何学的アプローチと invariance の理論を融合した非線形制御理論により、非線形制御系を設計する方法について考察した。本論文で考察する非線形制御では、上記の非線形補償を理論的に求める手段を提供した。非線形制御理論が単なる直感的な非線形補償要素と大きく異なる点は、非線形の座標変換を考える点である。

非線形制御理論において主流となっているのは、線形系での幾何学的手法を微分幾何学を用いて非線形系に拡張したものである。本論文では、微分幾何学と島らによる invariance の理論を同時に用いる。変分を用いた invariance 理論の微分幾何学的な切口から見たものが、本論文の output invariance である。

幾何学的手法と本論文が大きく異なるもう1つの点は、数式処理言語を用いた制御系設計の CAD システム等に組み込む方法・アルゴリズムを中心に考えていることである。幾何学的手法では、実際に制御則を導くために、ディストリビューションで規定される局所座標を求める必要がある。これは連立偏微分方程式の一般解を求めることに帰着され、この局所座標を一般に求める手順が存在しない。本論文では、ディストリビューションを考えるよりもそれを積分した関数を主な考慮の対象としている。

非線形制御理論において主に考える制御対象はアフィン系と呼ばれるものであり、状態量に関

して解析的 (C^∞) あるいは C^∞ 級, 入力に関して線形な非線形系である。本論文でも, まずアフィン系に対して, 以下に述べる研究を行った。

まず, 島によって変分法を用いて得られた 1 出力非線形系の出力可制御性・output invariance の条件を, 局所座標とは独立な記述に書き直した。出力可制御性の定義を多出力非線形系に拡張し, 弱出力可制御性・強出力可制御性の定義をおこない, その必要十分条件を求めた。

また, 非線形系のブロック無干渉化・外乱無干渉化問題について考察し, 新しい必要十分条件, 制御則の導出法を明らかにした。これらの問題については, 幾何学的アプローチによる研究がすでにあるが, 先に述べたように, 高次元の系に対して制御則を求めることは簡単ではなかった。そこで本論文では, 数式処理言語によって $\ker dh$ に含まれる最大の (f, g) -不変ディストリビューションを積分した関数の局所的な基底を簡単に得る方法として, 最小観測空間アルゴリズムを示した。最小観測空間アルゴリズムを用いれば, 容易にブロック無干渉化あるいは外乱無干渉化を達成する制御則を得ることができる。

以上の無干渉化は静的状態フィードバックを用いる場合であるが, 動的補償器を用いれば無干渉化可能な系のクラスが拡大する。本論文では, Morgan の問題, すなわち 1 入力 1 出力サブシステムに分解する問題に対して動的制御則の導出に用いられる動的拡張アルゴリズムを改良し, その計算量を減少させた。

また, これらの応用として, 人工衛星の大角度姿勢制御問題を考えた。人工衛星の状態方程式を四元数で記述し, 状態量の多様体を 4 つの局所座標で覆って 4 通りの局所的な制御則を導き出した。さらに, 局所的制御則を合成して大域的に安定な制御則を導いた。

入力に関して線形とは限らない一般的な非線形系に対しても, output invariance の必要十分条件・無干渉化問題 (Morgan の問題)・入出力線形化問題について考察した。output invariance の条件を求めるにあたっては, まず, 状態量の取りうる多様体 M と入力の取りうる多様体 u の直積 $M \times u$ 上で話を進めた。さらに, その直積上のあるディストリビューションの垂直成分が Tu となることを用いて, M 上での話に戻した。アフィン系の可到達ディストリビューションに相当するものの特異点における議論もおこない, ある種の特異的な部分多様体からは, 有界な入力では脱出できないことを示した。

一般的な非線形系の Morgan の問題については, 幾何学的アプローチを用いて既に条件が求められているが, ここでの方法はもっと簡単に無干渉化する制御則が得られる。入出力線形化問題では, アフィン系と同様にボルテラ級数を用いて問題を定義し, 入出力関係が線形であるための条件を求めた。さらに一般的非線形系に対して構造アルゴリズムを拡張し, 入出力線形化が可

能であるための必要十分条件, および制御則の求め方を導いた。

さらに, 離散時間系に対しても, output invariance の条件・無干渉化問題・強制ダイナミックスについて考察した。一般的な連続時間系に対する理論に類似した方法で, 非線形差分方程式で表される系に対しても制御系を構成することができる。強制ダイナミックスは, ゼロダイナミックスの拡張であり, トラッキング問題などにおける非線形最小位相系を定義するのに用いることができる。

また, これらの考察をもとに, 離散時間非線形系をニューラルネットワークを用いて制御した。本論文では, 規範モデルを考えその出力に追従させる制御と, 外部入力を1ステップ予見するように与えてそれに追従させる制御の2つを, オフライン学習(学習制御)・オンライン学習(適応制御)の2方法で実現させる方法について述べた。新しいオフライン学習法・オンライン学習法およびニューラルネットワークの入力に一次変換を施すことによって学習能力を高める方法を提案した。

以上まとめると, アフィン系・一般的な非線形系・離散時間非線形系に対し, output invariance の条件を求め, それをもとにした制御系の設計法を示した。また, 不明確な動特性を持つ制御対象に対して, ニューラルネットワークを用いた新しい形の非線形制御系を構成した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 島 公 侑

副 査 教 授 嘉 数 侑 昇

副 査 教 授 土 谷 武 士

制御理論は工学システムの制御情報処理系設計の基本原理を与え、システムの所期の機能の実現にきわめて重要な役割を演ずる。制御の対象となる工学システムには非線形な動特性を持つものが多いのであるが、従来は動作点近傍あるいは特定の軌道の近傍における線形近似モデルを制御系設計の対象とする線形制御理論が主として用いられてきた。そうして、系に内在する非線形性は記述関数法により線形理論の枠内に納め、あるいは系が安定であるとの前提のもとで等価外乱とみなしてその影響を軽減する設計法が用いられている。したがって、システムが良好な挙動を示す範囲は用いた制御手法により自ら限定されているものであり、適用範囲のより広い理論の

研究が望まれるところである。

本論文は非線形動特性を近似せずにそのまま用いる制御系設計法の確立を目的として著者が行った一連の研究をまとめたもので、動特性に制御入力線形に現われる制御系（アフィン制御系）、その線形性を持たない一般の非線形系、および動特性が未知の系に対する制御系設計法を提案している。

まずアフィン制御系に対しては、島らが変分の方法により導いた不変性と出力可制御性の条件に微分幾何による大域的な表現を与え、多入力多出力系にそれらの条件を拡張し、弱出力可制御性・強出力可制御性の定義および必要十分条件を与えている。その拡張した条件は、著者の考案した最小観測空間アルゴリズムとともにブロック無干渉化の必要十分条件および状態フィードバック則の導出に用いられている。微分幾何の方法ではディストリビューションの積分つまり一階連立偏微分方程式の積分を求めなければならないが著者の方法によれば数式処理言語を用いて直ちにフィードバック則を計算できる利点がある。また1入力1出力サブシステムへの分解（Morganの問題）および外乱無干渉化問題はブロック無干渉化問題に包含され、二十年来研究されてきた静的状態フィードバックによる無干渉化問題は著者の研究により最終的に解決された。この無干渉化可能なシステムのクラスは動的補償器を用いる動的拡張アルゴリズムにより拡大できる。著者はMorganの問題に対して計算量が少なく済む動的拡張アルゴリズムを与えている。

本論文では、これらの設計法を人工衛星の大角度制御問題に応用し、運動方程式を四元数により記述し、多様体を四つの局所座標で覆い、四つの局所制御則を導入し、その合成法を工夫して大域的安定化制御則を導いている。

次に、入力に関する線形性を持たない一般の非線形制御系についても、変分の方法により出発して不変性の条件を導き、微分幾何による表現を与え、無干渉化問題に用いて既知の方法よりも計算の容易な設計法を導き、さらに一般の非線形系に対する構造アルゴリズムを確立して、入出力線形化可能性の必要十分条件および入出力線形化制御則の計算法を導いている。これらの設計法は、たとえば入力について多項式型である非線形制御系の設計に用いることができる。本論文では、さらに一般の離散時間非線形制御系における不変性および無干渉化可能性の必要十分条件を求め、無干渉化制御則の導出法を与えている。これらの設計法は陰関数の定理を用いているので、陰関数の表現を近似的にでも求めることが出来るならば実システムへの応用が可能である。

本論文では、続いて動特性が未知の離散時間制御系の出力を規範モデルの出力あるいは外部よりの参照入力に追従させる制御を、ニューラルネットによるオフライン学習（学習制御）とオン

ライン学習（適応制御）により実現する新しい方法を提案しており，シミュレーションにより良好な結果を得ている。このことは，非線形制御系の設計は非線形関数の計算に帰着されるものであるから，ニューラルネットに非線形関数を学習する能力があるならば当然予想できることであり，本論文の設計法を実現する一つの方向を示している。著者は，さらに，ニューラルネットへの入力に一次変換を施すことによりその学習能力を高める方法を提案し，シミュレーションにより有効性を示している。この方法は，少なくとも平衡点近傍における制御においては，線形制御理論に基づく方法よりも有効であろうと予想される。

これを要するに，本論文は変分法と微分幾何をあわせて用いて非線形制御系の設計法を提案し，それらの設計法は数式処理言語による計算あるいはニューラルネットによる学習・適応制御が可能で実用に適し，制御工学に寄与するところ大である。

よって，著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。