

学位論文題名

非線形非最小位相系に関する研究

学位論文内容の要旨

最近、化学プラントや航空機のような非線形常微分方程式によって記述される系の制御において、制御対象の非線形性を直接取り扱う非線形制御理論の実用化が進んでいる。従来は制御対象の線形近似系を導出し、その近似系に対して線形制御理論を用いて制御則を設計する方法が主に用いられていた。しかし、最近の計算機の処理能力の向上により複雑な制御則を実システムに対して用いることが可能になったことや、厳密な非線形モデルに対して設計した制御則の方が近似モデルを用いたものよりも動作範囲を広く取れること、さらに宇宙ロボットのように線形理論の適用が不可能な系が存在することなどにより非線形制御理論の工学的必要性が増してきたことがその理由として考えられる。さらにその必要性に答える形で理論的な面での整備が近年進んできている。

非線形制御系に対する解析及び制御則の設計に関しては、幾つかの手法が提案されている。そのうちでも特に出力の制御問題においては幾何学的手法が主に用いられている。これは線形制御系に対するWonhamの諸結果を微分幾何学を用いて非線形制御系に一般化したものであり、幾つかの仮定を満足する非線形制御系に対して厳密な線形化、無干渉化、モデルマッチングといった問題が解決されている。

幾何学的手法を用いて制御則を設計した場合、一般にその制御則は制御対象の入出力関係に関する量から、それ以外の量、つまり内部状態を分離する構造を持つ。そのため、閉ループ系の安定性を保証するためには内部状態の安定性を保証する必要がある。制御対象が最小位相である、つまり出力を恒等的に零に拘束した場合の内部状態の挙動(ゼロダイナミクスと呼ばれる)が漸近安定である場合には出力を有界な値に制御した場合の内部状態の有界性が保証される。しかし、自由度よりも入力が少ない場合のロボットアームなどは漸近安定なゼロダイナミクスを持たず、そのような場合に対しては幾何学的手法とは異なった手法を用いる必要がある。

さらに幾何学的手法を用いた制御則は制御対象の状態の非線形関数の逆数、あるいは行列の逆行列を含んだ形式で記述されるので、制御対象の状態によってはそれらの関数が零になる、あるいは行列のランクが変化する場合が考えられる。そのような系は特異点を持つ系と呼ばれる。特異点を持つ制御系は有限次元の内部状態を持たないので、ゼロダイナミクスを用いた内部安定性の解析は不可能となる。

本研究ではこれらの二つの場合の制御系を非最小位相系と呼び、制御対象が最小位相ではない場合の制御系の構造を明らかにすることと制御則の設計方法を提案することを試みた。

本研究では最初に、ゼロダイナミクスが漸近安定ではない場合の漸近モデルマッチング制御問題を考えた。漸近モデルマッチング制御問題とは制御対象の出力の挙動を規範モデルの出力に漸近的に一致させる制御が可能であるための条件を求め、さらにその場合の制御則を導出する問題である。従来は幾何学的手法を用いた解析が主になされてきたが、本研究で

は不変多様体の概念を漸近モデルマッチング制御問題に適用することを試みた。そして制御対象が非最小位相系であっても、線形可安定であり、規範モデルとの間で定義されるある偏微分方程式を解くことが出来れば漸近モデルマッチング制御が可能であることを証明した。さらに、その偏微分方程式の近似解法を考え、誤差の評価をおこなった。そして制御対象の持つ幾何学的な性質を利用して可解条件を緩めることと、制御則を改良することが可能であることを示した。

特異点を持つ系に対する制御則の設計法として、特異点を持たないような近似系を導出し、その近似系に対する制御則を利用する手法が提案されている。そして出力トラッキング制御問題において出力誤差及び制御対象の状態が有界に保たれることが知られているが、本研究では従来の結果を拡張することを試みた。そして外乱無干渉化問題及びモデル追従制御問題において出力トラッキング制御問題と同様の結果を得ることに成功した。さらに従来は幾つかの具体的な問題に対して提案された近似法が一般の場合においても適用可能であることを示した。

有限次元の内部状態を持つ場合に最小位相とはならない制御系の特徴的な例としてハミルトン制御系および非ホロノーム拘束を受ける制御系がある。

ハミルトン制御系とはハミルトンの正準方程式によって記述される制御系のことであり、摩擦や粘性を無視した機械系の多くがハミルトン制御系となる。ハミルトン制御系の状態空間はシンプレクティック多様体と呼ばれ、多くの幾何学的性質を持っている。また、最適制御問題において最大原理を用いた場合の随伴変数を導入した系もハミルトン制御系であると見なすことが可能であり、 H^∞ 制御問題との関連から近年着目されている。一般に制御系の持つハミルトン構造はフィードバックによって保存されない。そこでハミルトン制御系の諸変換の下での構造の変化を明らかにする必要がある。本研究では制御系の変換として座標変換、フィードバック変換、そして時間スケール変換を考察の対象とした。そしてハミルトン制御系の構造を保つ変換のクラスを特定することに成功した。さらにその結果の応用として、ハミルトン制御系ではない制御系を、フィードバックによってハミルトン制御系に変換する問題を無散逸化制御問題として定式化し、その可解条件を導出した。また、ハミルトン制御系の安定化問題を考える基礎として、系のハミルトン関数が一般化運動量の有限次多項式で表現されるための十分条件を導出した。

状態空間上の積分不可能な拘束条件は非ホロノーム拘束と呼ばれる。面上を球が滑らずに転がることやある種の系における角運動量保存則が非ホロノーム拘束となる。また、非ホロノーム拘束のうちでも、拘束条件が一般化座標に関する積分不可能な拘束か一般化速度までも含めた積分不可能な拘束であるかによってその系の持つ性質は大きく異なる。前者の拘束条件は古典的非ホロノーム拘束と呼ばれる。本研究では古典的非ホロノーム拘束を受ける系を主に対象とする。そして古典的非ホロノーム拘束を受ける制御系は、どのように出力を選んでも最小位相系にはならないことを示した。また、径路積分型の出力を持つ制御系と非ホロノーム拘束との間の関係を幾つか明らかにし、さらに積分不可能な径路積分型の出力を持つ系においては積分可能な出力を持つ系よりも同じ相対次数に対して内部状態の次元が出力の数だけ増えることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 島 公 脩

副 査 教 授 土 谷 武 士

副 査 教 授 嘉 数 侑 昇

学 位 論 文 題 名

非線形非最小位相系に関する研究

最近、化学プラント・電力プラント・移動体・航空機等の非線形動特性を持つ系において非線形制御理論の実用化の研究が盛んである。そうして、その過程において、従来の理論における必須の仮定であった、設計条件の正則性および内部状態の安定性を保証する制御対象の最小位相性を満足しない非最小位相系の設計論の重要性が認識されつつある。

本論文は、この非最小位相系の構造および制御系設計法に関する、不変多様体・近似表現・変換に対する不変性等の概念・手法を用いた理論的研究の成果をまとめたものである。

まず、系の入出力関係に関わらぬ内部状態の動特性であるゼロダイナミクスが漸近安定でない型の非最小位相系の漸近モデルマッチング問題に不変多様体の概念を適用し、制御対象がロバスト線形可安定でFBI方程式が可解であるならば、漸近モデルマッチング制御が可能であることを示した。さらに、入出力線形化フィードバックの併用により制御性能の向上とFBI方程式の簡略化が可能となる事を示し、精度の高い近似解法を与えた。

次に、設計条件に行列の階数が落ちるなどの特異点がある型の非最小位相系の出力トラッキング問題の従来の解法を拡張し、外乱無干渉化問題及びモデル追従問題の解法としても用い得ることを示し、Ball & Beam 問題に適用して導出した近似法の汎用性を示した。

力学系・ H^∞ 制御問題との関連において重要なハミルトン制御系は本質的に最小位相性を持たないが、その構造を不変に保つ座標変換・時間スケール変換・フィードバック変換のクラスを定め、多項式標準形を提案し、無散逸化問題を定式化し、それらの可解条件を与えた。さらに、古典的非ホロノーム拘束を持つ系はどのように出力を選んでも最小位相系とはならないことを示し、径路積分型の出力を持つ系と一般化速度まで含めて積分不可能な非ホロノーム拘束を持つ系との関係を明らかにし、積分不可能な出力を持つ系の内部状態の次元はその出力数だけ増加することを示した。

以上のように、著者は、非線形非最小位相系の構造と制御系設計法に関する研究において、非線形制御理論の実用化に有益な新知見を与え、制御工学の進歩に寄与するところ大である。

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あるものと認める。