

報告番号	※ 甲 第 10609 号
------	---------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 非線形最適サーボによるパワートレイン制御

氏 名 梅村 哲央

### 論 文 内 容 の 要 旨

自動車開発を取り巻く環境は年々変化しており、市場ニーズや開発コスト削減の観点から新車開発期間は年々短縮される一方で、車両システムはさらに複雑化している。1980年代に始まった自動車の電子制御化はさらに進み、様々な電子制御ユニット（Electronic Control Unit：ECU）が自動車に搭載されるようになった。現在では駆動系ではエンジン制御用やトランスミッション制御用など、また走行系やボディ系ではシャシ制御用やエアバック制御用など、さらに通信系としてカーナビゲーションシステムやETCシステムなど車両の至る箇所にECUが搭載されている。また、これらは車載ネットワークにて相互に通信しており、車両システムとしてますます複雑化している。システムの複雑化と同時に、制御に対する要求もますます高度化している。これは、昨今の環境に対する意識の高まりを受けて燃費性能のさらなる向上が求められていること、燃費性能のみならずメーカー各社がそれぞれ自動車を高機能化することによって付加価値を高め、他社との差別化を図っていることなどに起因する。

ここで従来の制御開発について触れると、従来の制御開発はマンパワーに頼った開発にならざるを得ない一面があった。例えば、制御系設計の際に種々の制約条件が存在する場合、その制約条件を陽に考慮することが困難であるため、実機でのゲインチューニングを繰り返し行い、本来システムの持つ制御性能を落とすことによってその制約条件を満たすような設計がなされる場合があった。また、幅広い車両速度領域にて制御が要求される場合、その制御実施領域をカバーできるよう、様々な走行条件において適合を繰り返し、ゲインを決定するという設計手法を取られる場合もあった。制御開発が全てマンパワーに頼ったものではないが、今後ますます高度化するであろう制御を短期間で開発しなければならないという問題に直面しており、制御系設計の見直しが必要な時期に差し掛かっていると言える。つまり、短い開発期間のうちに高度化する制御要求を満たすべく、適合を主体としたマンパワーによる制御開発ではなく、システムの本質を見極め、理論的かつ合理的な制御系設計手法の構築が急務である。

制御理論の発展に目を向けると、線形システムに対する制御理論は1980年代後半に大成

した  $H_\infty$  制御によりほぼ体系化されたといえる。現在までに様々な場面にてその制御が実用化され、エンジンのアイドル回転速度制御、サスペンション制御をはじめ、数多くの適用例が存在する。しかしながら、実際のシステムはほぼ全てにおいて何らかの非線形性を有しており、これらの線形理論は平衡点周りまたは動作点周りで線形化されたモデルに対して適用されている。一方、システムをそのまま非線形として扱う非線形制御理論の歴史は古く、1920年代には研究がはじまっている。1950年代にはその制御理論も増し、主にリレー制御系、不感帯やバックラッシュ、摩擦および飽和などを含む系が扱われている。しかしながら、あらゆる非線形系に共通した決定的な制御系設計法はなく、それは現在にまで続いている。ここで実用を見据えた場合、種々の非線形制御理論においての評価規範を制御系へ直接取り込むことが可能である非線形最適制御理論が有効な手法の一つであるといえる。非線形最適制御問題は、ハミルトン・ヤコビ方程式と呼ばれる偏微分方程式を解くことと等価であることが知られているが、これは非線形偏微分方程式であるため一般に解析解を得ることが困難である。これが、有効性が期待されながら非線形最適制御の実用を阻む大きな障壁となっている。従来において様々な近似解法が提案されてきたが、そのいずれも近似精度の点や得られる解の複雑さから実用が難しい場合が多い。近年、状態量に非線形性を有するようなシステムに対するハミルトン・ヤコビ方程式の近似解法が提案された。これは安定多様体法と呼ばれ、様々な非線形システムへ適用されてその効果や実用性が報告されている。また、安定多様体法の拡張である中心安定多様体法が提案され、非線形最適出力レギュレーション問題の近似解を求めることで非線形最適サーボ系設計の可能性が示された。システムの安定化問題だけでなくサーボ系設計が可能となったことは、制御理論を実システムへ適用する際に特に重要であり、今後の非線形制御理論のさらなる発展が期待される。なお、安定多様体法ならびに中心安定多様体法は、それぞれある種の積分漸化式を解くことによってハミルトン・ヤコビ方程式の近似解を求める方法であり、漸化式を繰り返し解くことによって近似解の精度が向上し、有効領域が拡大される。また、数値演算的なアプローチによって近似解が得られるため、従来の非線形制御器に比べて計算機による計算が容易であること、得られる最適制御器が多項式や線形補間等で表すことができるため、実システムへの適用が可能であること、様々な非線形システムへの適用が可能であることが特徴としてあげられる。

本研究の目的は、自動車制御のさらなる低燃費化、高機能化要求また開発期間の超短縮要求に応えるべく、システムの本質を見極めた理論的かつ合理的な制御系設計手法を構築することである。以下、本研究で取り扱った2件の制御系の課題とそれに対する解決策を示す。

#### (a) モータによるトルク制御

モータトルク制御においては、過電流からの回路保護のため、状態量である電流に対して上下限の制約が、また、電圧供給源であるインバータ電圧にはノルム制限が存在するが、これらの制約を陽に考慮する場合システムが非線形系となり、その制御系設計が困難であった。このため、あらかじめ応答性を犠牲にして電流または入力電圧が制約を超えないよう、トライアンドエラーを繰り返しながらゲインを決定するといった適合を主体とした多大な工数のかかる設計がなされてきた。自動車制御の高機能化のためには素早く精度の良い目標値追従性が不可欠であり、応答性を犠牲にすることなく、また適合の工数が出来るだけ

少なくなるような制御系設計が必要である。また、さらなる燃費性能の向上を視野に入れた場合、バッテリーに充電されている電力の消費をできるだけ抑えることが望ましい。加えて、モータのトルク制御は一般的に  $100[\mu\text{s}]$  程度の周期で制御が行われているため、実用上、あまり複雑な演算を必要とする制御器は望ましくないという条件も課される。このような課題に対し、本研究では以下の手法を取り入れた。

- 非線形最適制御理論：入力電圧に対して評価関数を与え、その消費電力を陽に考慮することを可能とする。
- 非線形最適出力レギュレーション問題：非線形システムのサーボ系設計を可能とする。
- 非線形重み関数：状態量の制約を非線形重み関数としてあらわし、評価関数に加える事で状態制約を陽に考慮することを可能とする。
- ラグランジュの未定乗数法：ラグランジュの未定乗数法を用いることで入力ノルム制約を満たしながら与えられた評価関数を最小化する制御器の設計を可能とある。
- 安定多様体法 / 中心安定多様体法：ハミルトン・ヤコビ方程式の精度の良い近似解を求めることができ、適合に頼らない合理的な制御系設計を可能とする。また、得られる制御器が実用可能な程度の簡易さで表される。

#### (b) ロックアップクラッチのスリップ回転速度制御

従来においてロックアップクラッチのスリップ回転速度制御系は、ある一定のタービン回転速度においてシステムをモデル化し、タービン回転速度の変動に伴う特性変動を非構造的な不確かさとして扱う  $H_\infty$  制御系設計が用いられてきた。しかしながら、先に述べたとおりスリップ回転速度制御領域の拡大にともない特性変動はさらに大きくなっている。また、乗り心地の観点からは素早く正確な目標値追従性が要求されている。これらの要求に対し、従来の安定性を重視した  $H_\infty$  制御系設計では望ましい応答性を達成することが困難であり、応答性を達成するためにハイゲイン化した場合、特性変動に対して脆弱となるばかりでなく、電子制御ユニットへ実装するための離散化、量子化においてその誤差の影響によって閉ループ系が不安定になってしまう場合さえある。このような課題に対し、本研究では以下の手法を取り入れた。

- 線形パラメータ変動系 (Linear Parameter Varying : LPV) システム：タービン回転速度に起因する特性変動を LPV システムとして表し、大きな特性変動を陽に考慮することを可能とする。
- 非線形最適出力レギュレーション問題：状態量と変動パラメータからなる非線形システムのサーボ系設計を可能とする。
- 制御器の分割：LPV システムに対する制御器とアクチュエータに対する制御器を分割することによって演算を簡易化し、ECU への実装が容易となる。

次に主論文の構成を示す。まず 1 章では本研究の研究背景として、自動車産業におけるパワートレインの進化の歴史に触れ、現在のパワートレイン制御の現状と解決すべき課題、そして課題を解決する主な手法を示す。2 章では、状態制約を陽に考慮した直流モータの回

転数制御系設計手法を示す。状態制約を非線形重み関数として表し、安定多様体法を適用する。これにより、従来では困難であった状態制約を陽に考慮した制御系設計となる。3章では、一般的にハイブリッド車両に用いられる永久磁石同期モータのトルク制御に対して新たな制御法を示す。中心安定多様体法を用いた非線形最適出力レギュレーション問題を適用し、従来考慮することが困難であった入力ノルム制約を陽に考慮した制御系設計を行うことで、より素早く目標値に追従し、かつ消費エネルギーの少ない制御系設計となる。4章では、一般的な自動変速機に用いられるトルクコンバータのスリップ回転速度制御に対して新たな制御法を示す。制御対象をパラメータ変動系として表し、非線形最適出力レギュレーション問題を適用することで、従来より広い領域で、かつ高応答な制御系設計となる。また、実車両を用いてその効果を確認する。6章にて本研究をまとめ、自動車制御の将来展望と本研究が果たす役割について示す。