

博士学位論文審査結果要旨

平成29年8月24日

研究科、専攻名 バイオ・情報メディア研究科 コンピュータサイエンス専攻

学位申請者氏名 石 奇

論文題目 等価入力外乱手法を用いた非線形特性の推定・補償に関する研究

審査結果の要旨

平成29年8月23日東京工科大学において、学位申請者 石奇 の学位審査公開発表会が開催され、以下の要旨に示す博士論文に関する発表と関連する質疑応答が行われた。

メカトロニクス系に存在する非線形特性は、系の制御性能に大きく影響する。このような非線形特性は駆動条件に強く依存し、取り扱いが困難である。その影響を抑え制御性能を高めるために、従来から、ハイゲインフィードバックによる手法とモデルに基づく手法などが提案されてきた。しかし、ハイゲインフィードバックの場合、操作量の飽和問題が存在している。また、モデルに基づく手法の場合、様々な非線形モデルを用いてその非線形特性を正確に表現し、それに基づき非線形特性の完全補償を図るので、非線形特性に関して、そのパラメータや内部状態が正確に推定できることを前提とし、現場での実現が難しい。なお、非線形モデルのパラメータは制御の進行状況に応じて変動する場合、そのロバスト性を保証するシステムの構築は複雑になる。一方、所属する研究室では、メカトロニクス系の制御性能向上を図るため、外乱を能動的に抑える手法として、等価入力外乱手法が提案された。等価入力外乱とは、制御出力に対して、実際の外乱と同じ効果をもたらす制御入力チャンネルにおける制御入力信号のことである。本研究は、この等価入力外乱手法をメカトロニクス系の非線形特性の推定・補償に拡張する。具体的に、まず、非線形特性を入力または状態に依存する外乱として見立てる。次に、制御対象の線形部分システムの状態オブザーバを構築し、状態オブザーバにより推定された線形部分システムの情報を生かし、等価入力外乱推定器を用いて非線形特性を推定する。そして、ローパスフィルタを使用し、外乱推定の角周波数帯域を選択することにより、高い角周波数帯域におけるノイズを除去し、推定精度を確保する。さらに、推定された非線形補償成分を制御入力チャンネルに印加し、従来のサーボ系の制御則と融合することにより、非線形特性を補償し、システムの制御性能を向上させる。本手法は、従来手法とまったく違う発想から取り組むため、従来手法の問題点を根本から解決し、メカトロニクス系に存在する強い非線形特性の影響を抑え、システムの高性能制御を実現することができる。

本研究では、まず、等価入力外乱に基づく非線形特性の推定・補償法を提案する。次に、低次元オブザーバに基づく等価入力外乱手法を考案する。さらに、等価入力外乱手法を用いた非線形メカトロニクスシステムの運動制御に拡張する。

メカトロニクスシステムの制御系設計を行う際には、システムが有する様々な不確かさを補償する必要がある。そのうち、入力信号の不感帯の存在または状態に依存する非線形摩擦は多くのアクチュエータに固有する非線形特性であり、制御性能を劣化させることが知られている。本研究では、等価入力外乱に基づく非線形特性の推定・補償を行うシステムの安定性を保証し、出力に対して、等価入力外乱と非線形特性と同じ効果をもたらすために、まず、システムに存在する不感帯や非線形摩擦などの数学表現を示し、一次ローパスフィルタの時

定数と非線形補償精度との関係を明確にする。次に、それらの非線形特性を補償する等価入力外乱制御系を設計する。最後、回転制御系を例に、シミュレーションと実験を行い、等価入力外乱手法の有効性を検証する。

制御対象の次数が高い場合、オブザーバの次数も高くなる。それにより、計算コストは高くなるだけでなく、制御のリアルタイム性を保証することは難しくなる場合もある。そのため、本研究ではシステムの構造を吟味し、低次元オブザーバを設計し、それをを用いて等価入力外乱を推定することにより、非線形特性の推定・補償法を提案する。具体的に、まず、低次元オブザーバを用いて等価入力外乱の推定可能条件とその構造を明らかにする。次に、低次元オブザーバに基づく等価入力外乱推定・補償器の設計法を検討する。それから、回転制御システムを例に、シミュレーションと実験を通して、本研究で提案した手法を検証し、低次元オブザーバを利用した等価入力外乱の推定・抑制効果を示し、また、その外乱推定・抑制効果は同一次元オブザーバのものとはほぼ同等であることを示す。最後、等価入力外乱手法とほかの非線形補償手法と比べ、本手法の簡便性と優位性を明らかにする。従来手法と比べ、等価入力外乱に基づく非線形特性の推定・補償法の特徴は、以下の通りである。

- 1) 等価入力外乱に基づく非線形特性の推定・補償法が幅広い非線形特性に対して統一した枠組みで取り扱うことができる。
- 2) 非線形特性に関して、そのパラメータと内部状態を調べずに、角周波数帯域において、その影響を事前に見積ることが可能であり、ローパスフィルタを設計することにより、非線形特性の補償精度が指定できる。
- 3) 制御対象を線形部分システムと非線形特性に分離して考え、線形部分システムの状態オブザーバを用いて非線形特性を推定するため、非線形推定は非常にシンプルである。
- 4) 非線形特性に対する補償器の構造及び設計は非常に簡単である。しかも、線形部分システムの状態オブザーバの設計も簡単である。
- 5) 非線形補償性能のロバスト性は高い。非線形特性変動のリアルタイムでの推定・補償が可能である。

等価入力外乱手法はマッチング条件を満たす外乱だけでなく、マッチング条件を満たさない外乱の出力に対する影響も補償できる。本研究では、等価入力外乱手法のこの特徴を生かして、非線形システムの非線形特性を補償することにより、メカトロニクス系の運動制御に拡張する。等価入力外乱手法に基づいた運動制御系は、従来のサーボ系、すなわち、「内部モデル」、「状態オブザーバ」及び「状態フィードバックコントローラ」と、等価入力外乱を推定する「等価入力外乱推定器」を融合するものと考えられる。また、等価入力外乱手法を用いた運動制御系の設計において、系の安定性だけを考える限り分離定理が成り立つ。すなわち、状態フィードバックゲインの設計と、状態オブザーバのゲイン及びローパスフィルタの設計を独立に行うことが可能である。本研究では、非線形システム安定性の立場から、等価入力外乱手法に基づいた運動制御系の安定条件を導出する。さらに、その安定条件をもとに状態フィードバックと状態オブザーバとローパスフィルタの設計について具体的に行い、制御系の設計法を提案する。最後、典型的な非線形メカトロニクスシステムである二輪型倒立振り子ロボット NXTway-GS の倒立・走行制御シミュレーションにより等価入力外乱手法の有効性を検証する。

本研究をまとめると、システムに存在する非線形特性を制御入力および状態に依存する外乱と見立て、等価入力外乱手法という外乱の影響を能動的に推定・補償する手法をその非線形特性の推定・補償に拡張し、代表的な非線形特性である入力不感帯と非線形摩擦の補償にその手法の有効性を検証した。また、さらに、低次元オブザーバによる等価入力外乱の推定法を提案し、等価入力外乱手法を用いた非線形メカトロニクスシステムの運動制御系の安定条件を導出した。これらの研究は、メカトロニクスシステムの高精度・高性能に大きく貢献できるものであり、実用性の高い研究であると評価できる。

また、学位審査公開発表会などにおける発表および質疑応答も妥当なものであったので、審査委員会は、本論文の著者に対して、博士（工学）の学位を授与するための十分な学識と能力を有しているものと認めるものである。

審査委員 主査

東京工科大学 教授 余 錦華

