

氏 名	たか ぎ やす お 高 木 康 夫
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3853 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	厳密な状態空間の線形化理論を応用した非線形制御系の実用的設計法に 関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 荒 木 光 彦 教 授 大 澤 靖 治 教 授 萩 原 朋 道

論 文 内 容 の 要 旨

自動制御の対象となる現実のシステムは本質的に非線形な動特性を持つ。このような実システムに対して高速高精度な制御を実現しようとする、多くの場合、対象の非線形性を考慮した制御理論が必要になる。この問題を克服するために、従来から多様な手法が研究されてきた。その中で、幾何学的アプローチに基づいて状態空間を大域的に線形化する手法(「厳密な状態空間の線形化法」と呼ばれている)は、制御器を非線形補償器と線形補償器という2つの部分に分割してわかりやすい形で制御系設計を進めることができる点、および大域的に制御系の動作を保証できる点において、最も有力な手法と言える。しかし、これまでの研究で得られている設計法は、線形化変換によってシステムの動的特徴がその次数を除いてすべて失われるためロバスト設計を体系的に進めることが出来ない、および線形システムに変換できる非線形システムのクラスがあまり広くない、という2つの欠点を残していた。本論文は、これらの欠点を取り除く方法を考案し、その有用性を数値計算および実システムへの応用を通して検証したものである。

第1章は序言であり、研究の背景と本論文の位置づけを述べている。

第2章では、本手法の基礎である厳密な状態空間の線形化法について述べている。同手法はまず入力の変換と状態空間の座標変換により非線形システムを線形システムに変換し、得られた線形システムに対して線形制御則を設計するという手法である。したがって、得られる制御器は、線形化のための非線形補償器および線形制御則を実行する線形補償器の2つの部分からなる。本章では、このような設計法の概略を述べるとともに、円錐形タンクの例について設計過程を具体的に示している。

第3章では、本論文の中心的テーマであるJ保存線形化法について論じている。実用的立場からは、制御対象の経時変化・劣化などに対して一定のロバスト性を持たせること、また著しい性能劣化に対して制御器の再調整が容易に行えることが欠くことのできない重要な要素である。しかしながら、従来の厳密な状態空間の線形化法により得られる線形化システムは、元のシステムの特徴を失った積分システムとなるため、ロバスト設計を行ったり制御器の再調整を行う上で困難が大きい。この点が、厳密な状態空間の線形化法を実用的に用いる上での大きな障害となっていた。この問題を解決するために、元の非線形システムのヤコビ行列を保存する線形化の手法(これを「J保存線形化法」と呼ぶ。)をここで提案している。またJ保存線形化が可能な条件と、従来から知られていた厳密な状態空間の線形化が可能な条件との関係をも明らかにしている。これらの理論的考察に加えて、第2章で例として扱った円錐形タンクの非線形モデルを用いたシミュレーションにより、J保存線形化により設計した制御系のロバスト性を検証している。シミュレーションでは、線形制御、従来の厳密な状態空間の線形化法による非線形制御、およびJ保存線形化による非線形制御についてノミナルモデルに対する応答およびパラメータ変化時の応答を求め、主としてロバスト性の観点からJ保存線形化法の優位性を明らかにしている。

第4章と第5章では、上のJ保存線形化法をダイレクトドライブマンピュレータと電力系統の安定化制御系(PSS)に応用し、高い制御性能が実現できることを示している。

第4章ではダイレクトドライブマンピュレータへの応用を述べている。このマンピュレータは、ヒステリシスや関節の

振動モードが少ないという長所を持つ一方で、軸間の非線形な干渉が制御性能に大きな影響を与えるという短所がある。そのため、非線形干渉を抑制する補償器を組み込んだ制御則を適切に構成することが実用化のかぎとなる。マニピュレータの制御方式は従来から数多く提案されているが、なかでも、標準的な Newton-Euler の式を用いて非線形特性をリアルタイムで補償する動特性補償方式 (Computed Torque Method) が代表的である。しかし、このような設計法では、非線形補償がずれたときの安定性や精度劣化に対する考慮が十分なされていないので、正確な動特性の事前把握がなければ制御器が十分には機能しない。本章では、この問題を三角関数近似を併用した J 保存線形化法によって解決した。すなわち、J 保存線形化の導入により制御系のロバスト性を確保するとともに、三角関数近似により多軸のマニピュレータの動特性方程式計算に必要とされる演算量を大幅に減少させた。設計した制御系をダイレクトドライブマニピュレータに適用して良好な制御性能が得られることも確認している。

第 5 章は電力系統の安定化制御系 (PSS) への応用である。PSS は送電電力の安定性を確保するために、発電機の界磁を制御する制御装置である。近年、電源が遠隔化したこと、また電力会社間での大電力融通の必要性が高まったことなどのため、長距離大電力送電の必要性が高まりつつある。この結果、PSS にも、従来の 1 Hz 程度の発電機対系統の動揺への対応のみならず、それよりも長い周期で揺れる系統間動揺への対応までが求められるようになった。また、長距離大電力送電に伴い、電力系統のグローバルな特性が、既存 PSS のチューニング時に想定した特性とは大きく異なるものとなり、新しい特性に合わせた再チューニングが必要とされている。以上により、今後の PSS には、系統変化の度に再チューニングする必要がないオートチューニング機能が必須であると考えられる。本章では、系統特性の変化を系統インピーダンスの変化と捉え、この変化に強い PSS の開発に J 保存線形化法を応用した。すなわち、一機無限大母線系の非線形動特性方程式を基礎とし、実システムに現れる非線形特性を適切な関数を使って近似することにより J 保存線形化が可能となる形で表現した。その表現を用いて非線形制御器を設計し、オブザーバおよび系統インピーダンス推定器と合わせて非線形制御 PSS を構成した。この PSS についてシミュレーションを行い、系統インピーダンスの変化に強く、安定化範囲を従来より拡大できることを確認した。さらに、この PSS を火力発電所に納入し、実機テストにより種々の動揺モードに対して実用上十分な安定化能力のあることを確認している。納入した PSS は、現在まで稼働しており、当該電力系統の安定化に寄与している。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、非線形システムに対するフィードバック制御系の設計法について研究したものである。すなわち厳密な状態空間の線形化理論について、実用的立場から検討を加え、J 保存線形化法という手法を考案した。さらに、同手法をダイレクトドライブマニピュレータの制御装置および電力系統安定化器 (PSS) の設計に応用して、有用な結果を得ている。主な成果は次の通りである。

第 1 に、従来から用いられていた厳密な状態空間の線形化手法を使うと、線形化された段階で制御対象の動的特徴が次数を除いてすべて失われてしまうため、制御系設計の見通しが極めて悪くなること、特にロバスト性への配慮が試行錯誤的にしか行えないことを指摘し、この問題を解決するために J 保存線形化法と称する手法を考案した。この手法は、制御を行う上で中心となる状態におけるヤコビ行列を保存する形で状態空間を厳密に線形化する方法であり、制御対象のヤコビ行列が線形化後のシステムの係数行列となるため、ロバスト性の高い制御器を比較的容易に設計することが出来る。従来手法による厳密な線形化が可能である条件と、J 保存線形化が可能である条件とは同じであることも示している。さらに、円錐形タンクのレベル制御系を本手法で設計し、シミュレーションで他の設計法との比較を行うことによって、J 保存設計法による制御系が、ノミナルなシステムに対して他手法と同程度の性能を確保しつつより優れたロバスト性を持っていることを数値的に明らかにした。

第 2 に、上の J 保存線形化法をダイレクトドライブマニピュレータの制御装置の設計に適用し、その有効性を示した。ダイレクトドライブマニピュレータは、ヒステリシスや関節の振動モードが少ないという長所を持つ一方、軸間の非線形な干渉の影響が大きく、これを抑制する補償器の構成が実用上の重要課題である。その解決のために従来から数多くの提案が

なされてきた。しかし、それらの手法ではロバスト性の考察が不十分であり、非線形補償がずれたときの性能劣化が問題となっていた。本論文では、三角関数近似を併用したJ保存線形化法を使ってこれらの問題を解決しており、高度な制御性能が実現できることを実験によっても確認している。

第3に、J保存線形化法を電力系統安定化器（PSS）の設計に応用し、その実用性を示した。PSSは送電電力の安定性を確保するために発電機の界磁を制御する装置であり、近年、電源が遠隔化したこと、および電力会社間での大電力融通の必要性が高まったことなどのため、その設計の見直しが必要となってきた。ロバスト性を考慮に入れた非線形制御器の設計が行えるJ保存線形化法は、この要求に対応する上で有望な方法と考えられる。本論文では、非線形特性の近似手法、オブザーバ、および系統インピーダンスの推定手法を併用したJ保存線形化法によって非線形PSSを構成している。さらに、構成したPSSを火力発電所に納入して実機テストを行い、種々の動揺モードに対して実用上十分な安定化能力のあることを確認している。

以上のように、本論文は、非線形システムに対するフィードバック制御系の設計法としてJ保存線形化法と称する手法を考案し、その有用性を実証したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。