

論文審査の結果の要旨

氏名：石 岡 将太郎

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：適応直列微分補償器を用いた単純適応制御による無人航空機の飛行制御系設計

審査委員：（主査） 教授 内 山 賢 治

（副査） 教授 奥 山 圭 一 准教授 安 部 明 雄

防衛大学校教授 山 崎 武 志

航空機の運動は非線形微分方程式で表され、制御系を設計する際には線形化された状態方程式を取り扱うケースが多い。航空機の姿勢や速度は3舵(エルロン, エレベータ, ラダー)及びスラストにより制御され、かつ多くのセンサ出力を利用することから、状態方程式は多入力多出力系(MIMO)で表現されるため、優れた制御性能を有する制御系の設計は容易ではない。とくに、非線形運動を正確にモデル化することは難しく、また、線形化した状態方程式を利用するケースでは、モデル化誤差に対するロバスト性の確保は最重要課題の一つと考えられる。このような数学モデルで表現できない不確かさに対して、 H_{∞} 制御をはじめとするロバスト制御理論に関する研究が盛んに行われている。 H_{∞} 制御では、不確かさの変動の幅を用いて制御器を設計し、ある程度のモデル化誤差や外乱に対して頑強な制御系を構築することが可能となる。ただし、制御構造が非常に複雑で、優れた制御性能を得るためには十分な知識と経験を要するため、実機へ適用した例は非常に少ない。このことから、数学モデルを必要としない学習ベースの制御系設計手法が注目を集めている。この手法では制御系を設計する際に制御対象のモデル化を必要としないため、複雑な運動をするシステムに対しても良好な制御性能が得られると期待されている。しかし、精度の良い学習結果を得るためには多くの試行回数を必要とし、このことから実証実験において実機の破損可能性が増大し、費用や資源などの面から経済的ではないと考えられている。さらに、学習に時間がかかるため、障害物回避や衝突回避のようにリアルタイムの対応を要する問題に対しては不向きな手法とも言える。

本論文では、モデル化誤差に対してロバスト性能を有する新たな適応制御を提案している。適応制御は、環境条件や動作条件の変化によってプラントの動特性が変動し、その変動の値を事前に想定することが困難な状況にも対応することが可能な手法である。しかし、従来の適応制御は、制御対象の次数に応じた補償器を必要とするため、高次システムに対しては、制御器の複雑化や計算負荷の増大は避けられず、この点が実用化に対して大きな障壁となっていた。この問題に対して、概強実(ASPR)性という概念を導入することで制御構造を単純化した単純適応制御(SAC)が提案されている。SACは非常に有効な手法として注目されたが、ASPR性の条件を満足するシステムはほとんど存在しないため、実用化された例は無い。

そこで申請者は、システムをASPR化する新たな手法として直列微分補償器(SDC)を提案している。とくに、システムをASPR化するためのパラメータを自動的に決定する適応SDCはすぐれたアイデアであり、これにより、モデル化誤差を有するシステムに対して優れた制御性能が期待できるだけでなく、容易に実用化可能な手法となっている。無人航空機の飛行制御系設計に本手法を応用した数値シミュレーションでは、優れた制御性能を示している。さらに、無人航空機の飛行制御系設計において、新たな自動着陸手法も提案し、その有効性を数値計算により検証しており、適応SDCと併せて、優れた研究成果をしめしている。

本論文は6章で構成されている。審査の結果、次のように考えられる。

第1章「序論」では、無人航空機に関する我が国の取り組みに対して、制御工学の観点から世界的な研究動向について説明し、従来の制御手法の特徴を挙げるとともに、無人航空機の実用化に必要な制御理論上の問題点を整理している。さらに、無人航空機の制御系設計における現状の課題を確認し、申請者が提案する手法の必要性について総合的に論じている。

第2章「従来の適応制御」では、提案手法のベースとなる適応制御手法について詳説し、適応制御の

問題点を示している。はじめに、適応制御とはどのような制御器なのかを解説し、これまで提案されてきたモデル規範型適応制御の利点と問題点について、理論的かつ数値計算を用いた説明をしている。さらに、より実用的に改良された SAC について説明している。具体的には、SAC を利用するには、制御対象に対して ASPR 性という厳しい条件が必須となり、その条件を緩和するための手法を述べている。とくに、これまで提案されている有効な手法である並列フィードフォワード補償器 (PFC) について説明している。SAC を適用する際に問題となる ASPR 性とは、制御対象は最小位相系であるということ、伝達関数の相対次数は 1 以下であること、伝達関数において最高位係数は正であること、となっている。本章では、PFC の設計方法とともに、システムが ASPR 性を有することの困難さを、ASPR 性の視覚化及び数値計算によって示し、その特徴を明確にしている。SAC や PFC の考え方や ASPR 性の概念は、申請者が提案する適応制御の基礎になっている手法で、この手法の利点や欠点を明確にすることで、提案手法の理論的妥当性につなげている。

第 3 章「新たな適応制御手法」では、SAC の課題を解決するとともに、新たな適応制御手法を提案している。第 2 章で述べたように、SAC は従来の適応制御と比較して制御構造の単純化に成功しているが、そもそも適用可能な制御対象がほとんど存在しないことが問題であった。この問題に対して、PFC やバックステッピング法などを導入することにより、さまざまな制御対象に対して単純適応制御を適用できるようになっていることを説明している。これらの手法の問題点として、システムの相対次数や最高位係数の値等の事前情報や拡大系が高次なるという点を挙げている。さらに、定常偏差が残る等、制御目的を達成できないという問題点があり、これらの問題点を改善する必要性について説明している。申請者は、前述の問題点を改善するための新たな手法として SDC を提案している。この方法は、制御対象に対して直列に微分補償器を接続し、制御対象の ASPR 性を確保するものである。さらに、SDC のパラメータを適応的に変化させることで、制御対象の特徴が未知であっても制御性能の劣化を防ぐことが可能となっている。制御対象が非最小位相系の場合、システムは ASPR 性を有しないことになる。そこで、一巡伝達関数の零点を安定零点になるよう SDC の係数を適応的に変化させ、制御系の ASPR 化を図っている。適応 SDC におけるパラメータの適応則は、リアプノフの安定定理から導出していることから、システムの不安定零点を安定零点に収束させる、すなわちシステムの ASPR 化が保証されている。一方、制御系設計において微分補償器を用いることは、高周波領域においてゲインが増大するため、実機への実装には十分注意する必要がある。本研究では、SDC において微分器の代わりに広域通過フィルタ (HPF) を用いることを提案している。本章では、微分器と HPF の比較を数値計算により比較し、高周波領域の信号が制御性能に与える影響を低減化することを示している。また、提案した適応 SDC を、単純に MIMO に適応することができない点を明らかにしている。当初案では、適応 SDC のパラメータを対角行列で定義しており、そのため MIMO システムにおいて、最高位係数が負の場合や非最小位相系であった場合は ASPR 化できなかった。そこで、MIMO における適応 SDC のパラメータを対称行列で表現することで SDC に対する新たな適応則を導出し、MIMO システムの ASPR 化を数値計算により検証している。応用例として、無人航空機の縦運動及び横・方向運動に提案手法を適用し、制御性能や操作量の妥当性についても検証している。このように、申請者は適応 SDC というシステムの ASPR 化を実現する新たな手法を提案し、あらゆる角度から提案手法を検討することで、無人航空機などの MIMO システムに対して有効な手段を示し、実機実装への可能性を広げており、これらの点は高く評価できる。

第 4 章「自動着陸手法の提案」では、無人航空機の着陸問題に対して本手法の適用を試みている。無人航空機を利用する際に大きな問題点の一つとして自動着陸が挙げられる。とくに、着陸面付近では地面効果などの影響により、システムモデルのパラメータ値が変化する。そのようなシステムに対しても、提案手法が有効であるということを示している。さらに無人航空機の自動着陸には、Glide Path と Flare Trajectory を用いた従来の手法が用いられているケースが多く、各軌道の接続点における制御不安定性や、着陸まで長距離を要するという問題点を明確にするとともに、Dynamic Window Approach (DWA) の考え方を採用した新たな着陸法について提案している。DWA では、制御対象の状態量に対する制約を考慮して軌道を設計する。また、状態空間を離散化し、格子点に対して最適な状態量を推定することで、目標値までの軌道に対して最適性を考慮することができる。DWA を採用することで、無人航空機の着陸問題に対して状態量の制約を考慮し、急激な姿勢変化を伴わない安定した飛行を実現

する着陸軌道の設計が可能となることを示している。ただし、DWA は位置を目的とした軌道を設計することはできるが、各格子点における姿勢、例えば着陸地点における機体の姿勢を指定することはできない。航空機の着陸では、一般的に着陸地点における姿勢も重要となるため、無人航空機の着陸問題に対して DWA を単純に適用しただけでは、安全な着陸を実現することはできない。また、DWA は状態空間を離散化し、全ての格子点における機体の状態量を推定する必要があることから、計算負荷が大きく、リアルタイムで軌道を設計することはできない。さらに、そこで申請者は、Dynamic Window という概念とシグモイド関数を用い、状態空間の離散化を不要とする新たな方法として、Extended DWA (EDWA) を提案している。数値計算では、地面効果の他、速度が大きくなることにより飛行経路角が大きくなるというバックサイド領域についても考慮している。つまり、システムの零点は不安定零点となり、非最小位相系となる。EDWA で生成された指令値に対して、3章で示した提案制御手法を適用し、無人航空機の自動着陸シミュレーションを実行し、EDWA 及び提案制御手法の有効性を確認している。ここでは、実機への適用を想定し、着陸時における着陸可能判断機能も追加している。このように、無人航空機の自動着陸問題に対して問題点を明確にし、その問題に対して新たな手法である EDWA を提案し、数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示した点は高く評価できる。

第5章「提案手法の有効性検証」では、他の制御手法と比較することで、本手法の有効性を数値シミュレーションにより検証している。まず、ロバスト制御理論の中で、最もロバスト性が高い手法と言われているスライディングモード制御との比較を行っている。スライディングモード制御は、マッチング条件を満たせば、モデル化誤差に対して強いロバスト性を有し、かつシステムの安定性が保証されているという特徴がある。数値シミュレーションの環境としては、地面効果の他に Dryden model の風外乱を考慮するとともに、システムのモデル化誤差についても検討している。このような外乱環境下において、モデル化誤差を有する制御対象に対して、3章で提案した適応 SDC を適用するとともに、4章で提案した EDWA も適用し、申請者が提案した両手法の有効性を検証している。他手法による制御結果との比較し、各手法の制御性能の違いを明確にすることで、無人航空機の制御手法として、提案手法の優れた点を示した事は大いに評価できる。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。適応制御はシステムの状態や周囲の環境に応じて、制御ゲインを適応的に変化させることでシステム全体の安定性を保証することができる制御器である。しかし、従来のモデル規範型適応制御では構造の複雑さから実装した際の計算量が過大になることが問題とされており、実用化には至っていなかった。システムの ASPR 性を利用して構造を単純化した SAC も対案されたが、制御対象の多くは ASPR 性を有していないという問題を含んでいた。申請者は、適応 SDC を用いてシステムを ASPR 化する制御手法を提案し、その特徴を整理するとともに、提案手法の課題及び今後の展望について示している。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和5年2月16日