

論文の内容の要旨

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

1. 序論

新型コロナウイルス蔓延に伴う宅配需要の急拡大から、無人航空機（UAV: Unmanned Aerial Vehicle）に注目が集まっている。日本政府は「空の産業革命に向けたロードマップ」と題して、UAV を用いた宅配や測量などを実現するためのロードマップを公開した。このロードマップには 2022 年度を目安として、都市部を含む友人地帯における目視外飛行を可能とするレベル 4 の実現を目標としている。これを受けて、UAV の開発が急速に進められている。そこで、我々は航続距離が長く、一度に多くの物資を運ぶことができる固定翼型の UAV に注目した。

UAV を自律飛行させるためには飛行制御系を設計する必要がある。多くの制御器はモデルベースで設計されるが、このときに使用するモデルが実際のシステムに対して不確かさを有している場合は制御性能に大きく影響を及ぼすことになる。そこで、このようなモデル化誤差に対してロバストな制御器に関する研究が数多く行われている。ロバスト制御の代表とされる H_{∞} 制御は高いロバスト性を有しているが構造の複雑さによって調整が困難となり、実用化されている例は多くない。

このような調整を自動的に行う制御器として単純適応制御（SAC: Simple Adaptive Control）が開発された。しかし、この制御器は概強正実性（ASPR: Almost Strictly Positive Real）を有しているシステムでなければ安定性を保証することができない。ASPR 性を有する制御対象はほとんど存在しないため、SAC の実用化は非常に困難である。

そこで、システムの ASPR 性を補償するために我々は直列微分補償器（SDC: Serial Differential Compensator）を用いた手法を提案する。システムが ASPR 化されることで SAC による安定性の保証をすることができる。これまでも ASPR 性を補償する手法は提案されていたが、適用される制御対象に条件が存在していた。提案手法ではこのような条件を必要とせず、外部の環境に応じて調整されるため、着陸フェーズで外部環境が変化するような正確なモデルを取得することが困難な状況においても有効な飛行制御系であると考えられる。このとき、状態量の制約を考慮して着陸軌道を設計する新たな手法も提案する。提案手法の有効性を示すために風外乱と地面効果を想定した自動着陸の数値シミュレーションを行う。

2. 従来の適応制御

一般的な制御器はシステムの数学モデルを用いて設計され、これまで多くの研究者が有効的な手法を提案している。しかし、このときに用いる数学モデルには不確かさが少なからず存在する。この不確かさはモデル構築時の測定誤差の他に周囲の環境変化によっても生じる。そこで、周囲の環境に応じて制御器を自動的に調整することが求められて開発されたのが適応制御である。これを用いることによって、数学モデルが未知であっても自動的に適応、調整することによってシステムの安定性を保証することができる。

適応制御が開発された当初は、モデル規範型適応制御（MRAC: Model Reference Adaptive Controller）と呼ばれる制御対象の望ましい特性を伝達関数や状態方程式などで表される規範モデルで与えて、実際の応答が設計した規範モデルの応答に追従するように制御器のパラメータを調整する手法が提案されていた。これによって、制御対象の数学モデルが未知であっても良好な制御性能を得ることが可能となった。

しかし、MRAC では制御対象の次数に応じた補償器が必要となり、高次のシステムに対しては制御構造が複雑化するという問題があった。そのため、調整が必要となるパラメータが多く存在することになり、実用化することが困難となっていた。

この問題を受けて、制御器の構造を単純化する単純適応制御が提案された。この制御器はシステムの ASPR 性を利用することで安定性を保証している。しかし ASPR 性を有している制御対象はほとん

ど存在しない。システムが ASPR であるための条件は「i. 相対次数が 0 もしくは 1」, 「ii. 最高位係数が正」, 「iii. 最小位相系である」の 3 つである。SAC を利用するには, ASPR 性を補償する機構が別途必要となる。ここで提案されたのが並列フィードフォワード補償器 (PFC: Parallel Feedforward Compensator) である。この手法は制御対象に対して並列に補償器を設計することで拡大系を ASPR なシステムとする。このようにすることで拡大系に対して SAC を構成することで安定性を保証することが可能となる。しかし, この手法は制御対象の数学モデルを考慮して適切に PFC を設計しなければ ASPR 性を補償することができない。そこで, PFC の係数を周囲の環境変化に応じて適応する適応 PFC が提案されている。これによって, 制御対象に関する事前情報がなくても ASPR 化することが可能となる。しかし, 安定性は PFC を含めた拡大系に対して安定性が保証されるため, 実際の制御対象については定常偏差が生じることになる。また, この手法を適用するためには制御対象最高位係数が正であることや最小位相系でなければならないなどの条件が存在する。

実際の制御対象の相対次数などを取得するのは困難であるから, これらの仮定を満たすためには事前に同定実験などが必要となる。また, 本論文で対象とする固定翼 UAV は最高位係数が負で非最小位相系である要素を含んでいるため, 上記の方法による ASPR 化を行うことはできない。

3. 新たな適応制御手法

そこで, 我々が提案する手法は SDC を用いることによって制御対象を ASPR 化する。この手法は PFC とは異なり, 補償器を制御対象に対して直列に接続する。これによって SDC と制御対象を含んだ拡大系が ASPR 性を有することになる。これによって, 拡大系の出力と制御対象の出力が一致するため, 拡大系に対して保証されても, 定常偏差が生じることはない。また, SDC の係数は周囲の環境変化に応じて適応的に変化させる。着陸時のような固定翼 UAV は飛行環境が変化する。このような状況においては機体に働く空気力が変化することから, 係数を固定してしまうと ASPR 性を保つことができなくなる恐れがある。そこで常に ASPR 性を保てるように SDC の係数を適応させることで, SAC により安定性を保証することができる。また, 上記のように微分器を用いるのは, 制御入力が高くなる恐れがあるため通常は使用されない。しかし, 1 次以上の微分器の係数の初期値を 0 として係数を適応することによって上記のような問題点を解決することができる。また, 厳密な微分器を用いることは不可能であるから, 疑似微分器を用いることでさらに制御入力が高くなることを防ぐ。このときに用いる適応則はリアプノフの安定定理を用いて導出される。これによって, 従来手法の条件であった最高行け数が正であることや最小位相系でなければならないといった問題を解決することが可能である。

4. 自動着陸手法の提案

従来の自動着陸では, 一般的に Glide Path と Flare Trajectory の二つから構成される軌道を用いている。しかし, この軌道は機体が着陸を行う前から設計されているため, 機体にトラブルが発生して着陸軌道から大きくそれてしまった場合は旋回をして着陸をやり直す必要がある。また, 着陸軌道が途中で切り替わるため, 姿勢が不安定になることやそれぞれの軌道ごとに制御ゲインの調整が必要になることがある。そこで, 我々は機体の状態量を考慮した切り替えを必要としない, 新たな着陸軌道の設計法を提案する。

本研究では Dynamic Window Approach (DWA) という軌道設計手法の機能を拡張して着陸軌道の設計を行う Extended DWA (EDWA) を提案する。DWA では速度場で制約を定義し, 速度・角速度, 加速度・角加速度の制約を考慮した軌道の設計を行うことができる。ここで, 速度場で定義されるそれぞれの制約を window と呼び, window の積集合を軌道設計時の制約として用いる。我々はこの DWA を着陸問題に適用するために「i. 目標地点到達時の姿勢を指定」, 「ii. 角度の制約を考慮」, 「iii. バックサイド領域を考慮」, 「iv. 操舵の動特性を考慮」, 「v. 着陸可能判断機能」, 「vi. 計算量の改善」といった改良を行った。

DWA では軌道設計のために window を格子状に区切って評価関数を最大化する格子点の速度場を指令値として与えている。しかし, この方法だと計算量が格子の解像度に依存して大きくなるため, 固定翼 UAV のような高速で移動する物体には現実的ではない。さらに, 解像度によって最適性にも大きな影響を及ぼす。そこで, 本研究では最適化計算を用いて, 制約を考慮して参照軌道に追従するように設計された評価関数を最小化する指令値の算出を行う。

5. 提案手法の有効性検証

提案手法は外乱を考慮して設計されていないが、外乱環境下における有効性検証を行う。ここで想定する風外乱は Dryden model で表現されるものを使用し、風速 0.5m/s ほどの乱気流の一種である連続突風が吹いていることを想定している。着陸問題に提案手法を適用する数値シミュレーションを行うことで、環境変化に適応して制御目標を達成できるかを検証する。現実の問題に近づけるために地面効果を考慮する。その結果、機体が設置したとき接地時の降下率は -1.09m/s 、ロール角 ϕ およびピッチ角 θ はともに 0rad となっており、安全に着陸ができていることが確認できた。また、着陸中に速度と姿勢角がともに乱れることなく安定した飛行ができていることが数値シミュレーションによって確認できた。

6. 結論

本論文では適応 SDC を用いて制御対象を限定せずに ASPR 化し、単純適応制御によって安定性を保証した手法を提案した。さらに着陸問題において、機体の状態量の制約を考慮することができる新たな着陸軌道設計手法である EDWA を提案した。数値シミュレーションでは風外乱や地面効果が生じる環境下で自動着陸を行い、提案手法が有効であることが確認できた。これらの提案手法を用いることで、空の産業革命におけるレベル4の実現に近づくことが期待できる。