

報告番号

※ 甲 第 2203号

主論文の要旨

題名 空力弾性翼の制御に関する研究

氏名 藤 森 篤

主論文の要旨

| 報告番号 | ※甲第 | 号 | 氏名 | 藤 | 森 | 篤 |
|--|-----|---|----|---|---|---|
| <p>本論文は、空力弾性問題の能動制御について、理論及び実験の両面から検討したものである。空力弾性問題で特に重要なフラッタにおいて従来から行われてきた対策では、重量増加をもたらし、飛行性能の向上や省エネルギー化によって障害となっている。このパッシブなフラッタ対策に伴うデメリットを避ける方法として、アクティブ・コントロール・テクノロジー (ACT) による方法が近年注目を集めている。これは、翼に設置したセンサの信号をフィードバックして補助翼等の舵面を駆動し、フラッタを能動的に抑止する方法である。一般に、このフラッタ抑止方法をアクティブ・フラッタ・サプレッション (AFS) または能動フラッタ制御 (AFC) という。また、乗り心地改善と疲労寿命延長を目的にした突風荷重軽減 (GLA) など、空力弾性問題に対する能動制御の研究が最近報告されている。しかし、これらの制御系設計法に関していくつかの問題点が指摘されている。例えば、一般に空力弾性系は構造及び空気力モデルの両者が偏微分方程式で記述されるので、制御系を設計するのに適した状態方程式に変換すると、システムを厳密に表現すればする程高次系となり、それに伴い制御則や制御装置が複雑化してしまう。また、この分野の設計法の主流である LQG 最適制御理論は、設計仕様を如何に評価関数に盛り込むかという基本的な設計要求に対する明確な指針が与えられていない。それゆえ、これらの能動制御系を設計するためには、モデルの妥当性や制御効果を考慮しながら、制御則の低次元化、非モデル化要素やパラメータ変動に対するロバスト性について検討していく必要がある。</p> <p>本論文はこれらの問題に着目し、二つの空力弾性問題の能動制御、AFS と GLA について理論及び実験両面からの検討を行う。これらの研究の準備として、第2章では考察する翼の力学モデルの定式化を行う。</p> <p>AFS に関する研究の第一歩として、操舵によるフラッタ抑止の物理的な意味や有効性を検討するため、第3章では翼の基本変形である振れ角または曲げ変位の単一比例フィードバックを施したときの二次元翼のフラッタ抑止効果を、根軌跡法を使って定性的に調べる。その結果、操舵によるフラッタ抑止方法は適切に舵を動かすことにより、翼の安定性に関与している質量中心、弾性軸及び圧力中心の相互位置関係を改善したことと等価な効果をもたらす、フラッタ速度を上昇させることがわかった。また、空気力表現の違いによる特性根の挙</p> | | | | | | |

主論文の要旨

| | | | | |
|------|-----|---|----|-------|
| 報告番号 | ※甲第 | 号 | 氏名 | 藤 森 篤 |
|------|-----|---|----|-------|

動及びフラッタ速度の推定については、空気力の非定常部分を無視した定常空気力や準定常空気力は評価が保守的であり精度的に問題がある。フィードバック変数を比較すると、翼の曲げ変位よりも捩れ角をフィードバックする方が安定速度領域がより広く（すなわちフラッタ速度を上昇させる）、より好ましいフィードバック変数といえる。しかし、ここで用いた制御則は、AFSの定性的理解を得るために使われた単純な方式であり、制御理論を用いたシステムティックな方法を研究していく必要がある。そこで以下の章では、制御系の設計に線形最適制御理論を基礎として考察する。

第4章では、設計仕様やロバスト性を評価関数に反映させることを目的に、特異値線図を用いた最適レギュレータの設計法を提案する。ここでは多入力多出力系に対する適用を前提として、低感度特性、ロバスト安定要求、交差周波数などの基本的な設計仕様を一巡伝達関数の特異値線図に盛り込み、制限域として具体的に表現する。次に、この制限域を満たすようなあらかじめ定めた望ましい特異値線図と開ループ系の特異値線図との差をいくつかの周波数点で考え、その二乗和が最小となるような重み係数を準ニュートン法によって求める計算アルゴリズムを示す。この計算アルゴリズムでは、逐次計算式やこれに含まれるパラメータ微分が陽な形で表現されている。また、重み係数を調整しながらフィードバックゲインを求めるという一見間接的な計算法ではあるが、閉ループ系の安定性が保証されている。この最適レギュレータ設計法は二つの数値計算例に適用され、逐次計算の収束性が良いことや、得られた最適レギュレータの応答特性が設計仕様値に従い改善されることが示された。

一方、空力弾性翼の制御に最適制御理論を適用する上で問題となることは、モデルの高次元化に伴う制御則の複雑化であり、実際の制御においては制御装置や計算量の面から、なるべく簡単でしかもLQG補償器の制御性能に近い制御則を得ることが望まれる。そこで第5章では、補償器の低次元化に関する検討を行う。制御系の低次元化は、モデルを低次元化してその補償器を構成する方法、または、補償器自体の低次元化を行うという二つの方法が考えられるが、前者の方法では切り捨てたモデルからの影響により閉ループ系を安定化することが難しい。そこで、後者の考え方に沿った二種類の低次元コントローラの構成法を提案する。その一つは、一般化ハッセンベルグ表現(GHR)を使った

主論文の要旨

| 報告番号 | ※甲第 号 | 氏名 | 藤 森 篤 |
|--|-------|----|-------|
| <p>時間領域での設計法である。この方法はオブザーバを考慮した動的補償器を、各状態変数間の連成成分を限られた部分に集約させた状態方程式表現，すなわちGHR形に変換し，連成成分に対して非連成化近似を施してオブザーバの低次元化を行うことによりコントローラを構成する方法である。本論文で提案する非連成化近似手法は，ノルム最小化法，特異摂動法，トランケーション法の三種類で，実際の計算ではこれらの近似手法をGHR変換アルゴリズムに組み合わせて実行する。もう一つの低次元コントローラの構成法は周波数領域での方法であり，ナイキスト線図に基づいた周波数応答近似（NFA）法を提案する。この方法は，閉ループ系の安定余裕を増加させることを主目的にしたもので，AFSシステムのような不安定な制御対象の制御系設計では重要度の高い要求である。NFA法の低次元コントローラ設計では，系の安定性に関与している周波数範囲において，ゲインと位相を同時に表現することのできるナイキスト線図を用いて，一巡伝達関数の軌跡を望ましい系の軌跡と一致させるように，あるいは安定余裕をより増加させるようにコントローラの伝達関数が決定される。これらの設計法を13次の状態方程式で表される二次元翼のAFSシステムに適用して評価した結果，GHR法は二次形式評価関数を最小にするという意味で，元のシステムの最適性を踏襲している低次元コントローラが構成された。一方，NFA法では計算法に若干の試行錯誤を要するが，計算例ではどのケースでも閉ループ系を安定化する2次系のコントローラが構成でき，GHR法で得られたコントローラより低次元化や安定余裕の面で優れている。</p> <p>第6章ではこれらの理論的な考察を実際に検証する目的で，片持弾性矩形翼のGLAに対する制御系設計と風洞実験を行う。AFSでは制御対象が不安定状態にあるのに対し，GLAでは安定状態ではあるが突風による強制振動状態にある。しかし，制御の目的は共に変位をゼロとするレギュレーション問題であるので，制御系の設計は同様に取り扱うことができる。GLA実験に先立ち，フラッグ方式，格子方式及びそれらの複合方式により突風を発生させ，突風の計測とそのモデルの推定を行った。これらの方式で作られる突風は，赤池のAIC規範により次数の決定を行った結果，比較的低次のARMAモデルでその特性を表現することができた。さらにこの突風の連続時間モデルを2次系で近似し，片持弾性矩形翼の力学モデルに組み込んだ。一方，片持弾性矩形翼の力</p> | | | |

主論文の要旨

| 報告番号 | ※甲第 号 | 氏名 | 藤 森 篤 |
|--|-------|----|-------|
| <p>学モデルは、翼の最低次モードの振動を低減するという制御目的と駆動系の能力を考慮しながらモデルの簡単化を行い、制御で重要な周波数範囲で実験値と良好な一致を得た。この力学モデルを用い、設計仕様を満たし、かつロバストな最適レギュレータの設計（第4章）を行い、低次元のコントローラを第5章で述べたGHR法とNFA法の二つの方法で設計した。得られたコントローラは1次または2次まで低次元化されたものであるが、LQG補償器と同程度の制御効果があり、特にNFA法で構成したコントローラの優位性が目立った。実験では、制御則の計算にデジタル・コンピュータを使用している関係上、演算時間を考慮しなければならないこと、また、解析では突風を2次系の線形近似モデルで表現したことにより、解析と実験の評価値に多少の相違があった。しかし、構成されたコントローラを使った風洞実験では、最高66.2%の突風荷重軽減効果が実証された。また50%アップした風速でもGLA効果が確認されたことから、得られた補償器はプラントのパラメータ変動に対してもロバストであることが示された。</p> | | | |