

論文の内容の要旨

論文題目 多入力飛行制御系の安定余裕評価法と
Pilot-Induced Oscillation(PIO)特性
改善に関する研究

氏 名 片 柳 亮 二

航空機の飛行制御系は、近年フライ・バイ・ワイヤ（電気式操縦装置）に代表される多入力多出力フィードバック制御により特性改善が図られており、従来の機械式操縦装置と比較すると多くの長所が上げられる。その一つはいわゆる、Control Configured Vehicle(CCV)といわれる機体の出現を可能にした事である。機体固有の空力的安定度の低下を許容し、尾翼サイズを小さくした機体である。機体固有の安定度が小さいため、舵面のコントロール能力も小さくできる。極端なケースとして、水平尾翼および垂直尾翼もない機体も可能となっている。このような機体は従来の機械式の操縦装置でパイロットが技量でカバーすることはもはや不可能であり、コンピュータ制御のフライ・バイ・ワイヤによって初めて可能となる。

一方、この多入力多出力フィードバック制御系の機体は、その制御系の能力範囲内であれば非常に良い特性を示す反面、その能力を越えた場合は制御に頼ることを前提にしているため、急激に性能が劣化（Flying Qualities Cliff）

し、最悪は操縦不能に陥る。このように、フライ・バイ・ワイヤ等のコンピュータによるフィードバック飛行制御系はまだまだ解決すべき問題があるもののその利点は大きいため、今後益々コンピュータ制御が進むと思われる。従って、これから飛行制御系を設計するに当たっては、安全確実な系を実現するため、フライ・バイ・ワイヤ等に係わる制御系の問題点とその対策について十分理解し、同じような不具合をなくすことが重要である。

このような観点から、本論文では飛行制御系設計時に必要であるが、未だ明確になっていない次の二つの事項；

①系の安定性を十分確保するために必要な、“多入力飛行制御系の安定余裕評価法”、

②パイロットが操縦した結果、Pilot-Induced Oscillation (PIO) 自励振動が発生した場合においても、その自励振動量が小さい制御系を実現するために必要な、実用的で簡便な“PIO特性改善”の方法、

について明らかにした。

多入力飛行制御系の安定余裕評価法については、1入力系の一巡伝達関数を多入力系に拡張した“マイナス逆ベクトル軌跡 ξ ”および“ $-1/\xi$ 軌跡”という新しい概念を導入し、多入力系の安定余裕を正確に評価する方法を提案した。1入力多出力フィードバック制御系については、従来から1入力端で切った一巡伝達関数という非常に分かり易い安定余裕の指標があり、明快に制御系を評価することが可能である。ところが、多入力系においては従来から安定余裕に関する明確な解析手法が定まっていなかった。“マイナス逆ベクトル軌跡 ξ ”は、制御系の入力端にそれが挿入されると丁度系が発散することから、制御系の安定余裕を直接的に示す指標となる。そして、“ $-1/\xi$ 軌跡”は1入力系における一巡伝達関数に対応し、2入力系では2つの軌跡となる。ここで考えている安定余裕は、ゲインと位相が全てのループで同時に変動すると考えたもので、これは飛行制御系では動圧等で各舵面の効きが同時に変動すること、また空気力、アクチュエータ特性、デジタル演算等の種々のゲイン変動や遅れ（舵面が動いてから空気力としての効きを生じるまでの遅れも含む）等、い

ずれの場合も各舵面に共通する要素が重要であることに対応している。そして、多入力系の各入力端に挿入した共通の変動要素が ξ であり、 $-1/\xi$ の変換によって得られるベクトル軌跡を多入力系の一巡伝達関数と考える。

また、近年 H_∞ 制御理論等で多入力系のロバスト安定性や低感度特性を伝達関数のノルムで評価する設計理論が広く研究されているが、その方法は発振する条件は示すけれども安定余裕の評価には conservative な結果を与える。これに対して、本論文の方法は多入力系の安定余裕を正確に評価できる。

本論文の方法で設計された十分な安定余裕を持つ多入力制御系において、その閉ループ系の応答特性がどのような構造となっているか、すなわち安定余裕と応答特性との関係を明らかにした。その結果、安定余裕からの要求と応答特性からの要求の両方を満足する解を得るためには、 $-1/\xi$ 軌跡を

- ①極力実軸正側の方向にする、
- ②極力虚軸負側の方向にする、

ように設計することが良いことが示された。(図1参照)

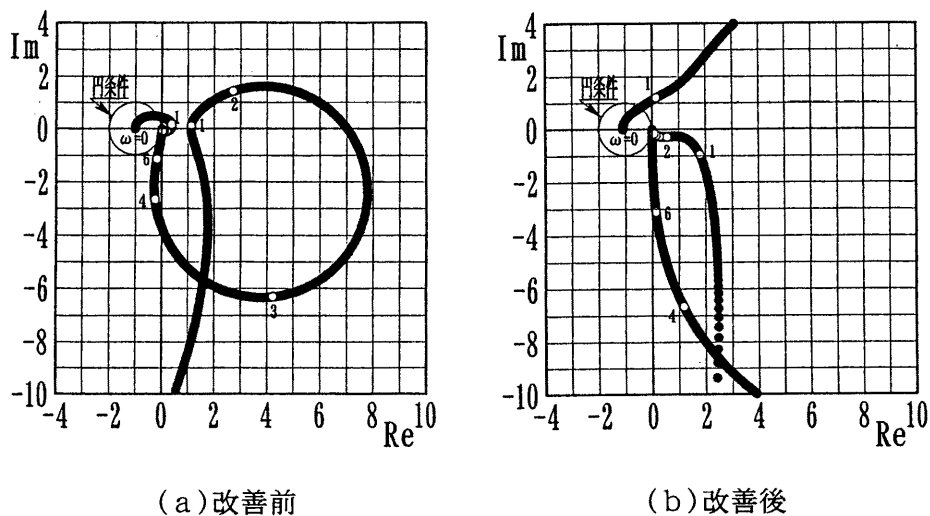


図1 $-1/\xi$ 軌跡を用いた飛行制御系改善結果

そして、このように設計された制御系は、操縦特性上最も厳しい状態である P I O特性が良好化されていることが示された。パイロットはこの P I Oとい

う現象を良く理解し操縦を止めればとまることが分かっているにもかかわらず、遅れて反応する機体を立て直して地上への激突等の危険を避けようとやむを得ずさらに大きな操縦を続け、これがさらなる大きな遅れを生じてPIOに陥るのが、PIO現象の典型的パターンである。この現象の引き金はパイロットであるが、その原因は制御系の特性に起因する。フライ・バイ・ワイアの出現により制御性能が大幅に向上した半面、制御能力を越えた領域での操縦性は極端に悪化するという従来になかった問題に悩まされている開発機種も多く、フライ・バイ・ワイア機の出現から25年以上も経過しているが、いまだに完全な解決策が見い出されていない。

本論文では、パイロットは何らかの要因で機体が傾いた時に直ちにスティックを反対側に急激フル操舵を行うという最悪ケースを想定して、これをリレー要素で表現し、これにアクチュエータのレートリミット、フィードバックの効果およびパイロットの操作遅れを模擬して、この時に生じる自励振動がどのようなパラメータによって引き起こされるのかを検討し、その振動発生条件と周波数および振動量を解析的に求めた。(図2参照)

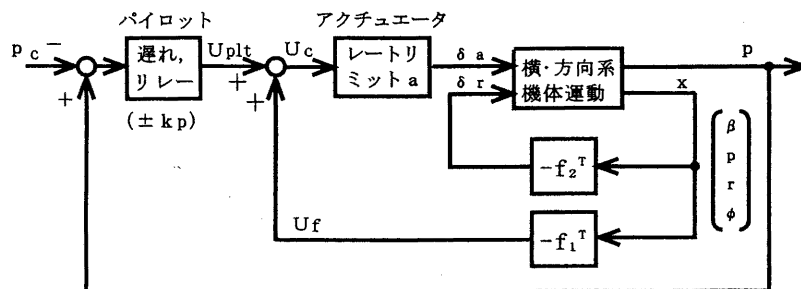


図2 PIO特性解析モデル

そして、図1に示した制御系についてPIO特性を解析した結果、改善前と比較して改善後のPIO自励振動量は約半分以下に下がることが確認された。

また、実際に実機で生じたPIO現象に対して、本論文の解析的方法を用いることにより見通し良く改善策を検討できることを示した。