

工学修士 片柳亮二 提出の論文は「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」と題し、本文 6 章と、付録 1 項よりなる。

航空機の飛行制御系はデジタル・コンピュータの高度で柔軟な処理能力を利用した電気式操縦系（フライ・バイ・ワイヤ）に移行しつつある。フライ・バイ・ワイヤは操縦系にフィードバック制御系を挿入することで、機体の運動性能を向上させるだけでなく、飛行状態の監視機能を強化することによって飛行安全性の向上にも寄与している。しかし、フライ・バイ・ワイヤ機においては、正常に操縦しようとする人間の意図に反して自励振動が持続する Pilot-Induced Oscillation(PIO)が発生する場合があります問題となっている。PIO には多くの要因が指摘されているが、フライ・バイ・ワイヤ機における PIO は、入力装置と操舵面に機械的な結合が無い場合、パイロットの素早い操作に舵面のアクチュエータが追従できない入力の飽和現象が関連する場合が多い。本論文ではこうした PIO の対策として、多入力多出力線形システムにおける安定性を十分確保することによって、不安定な PIO に陥ることを避けると共に、PIO に陥ったとしても、自励振動の振幅を小さくすることを検討し、その実現のために必要な解析法の提案と検証を行っている。

第 1 章は序論で、本研究の背景を整理するとともに、多入力多出力系における安定余裕評価法の研究、および PIO に関する研究の流れを概観している。

第 2 章は多入力多出力線形システムの安定余裕を正確にかつ簡便に評価するための手法を提案している。一入力系においては一巡伝達関数を用いた安定余裕の評価法があるが、多入力系においては設計現場で正確にかつ簡便に利用できる方法が確立されていなかった。本論文では、各入力に同一のゲインと位相からなる複素数  $\xi$  を挿入し、フィードバック制御系が不安定になる限界を求め周波数に対する  $\xi$  の軌跡を求める方法を検討している。この軌跡は一入力系における一巡伝達関数の逆数にマイナスを付けたものに相当し「マイナス逆ベクトル軌跡  $\xi$ 」と名づけている。また、 $\xi$  の逆数にマイナスを付けたものは一入力系の場合は一巡伝達関数と一致し、「 $-1/\xi$  軌跡」と名づけている。多入力系の場合、「 $-1/\xi$  軌跡」は入力の数だけ存在するが、その軌跡から安定余裕を評価することが可能となることを示している。本手法は簡便な方法であるばかりでなく、H 無限大制御理論で用いられる特異値による評価よりも厳密な

安定余裕を与えることができることを指摘している。

第3章は提案する「 $-1/\xi$ 軌跡」を用いて航空機のロール制御系を設計し、制御系設計問題への具体的適用を試みている。航空機の制御においては安定余裕と応答性の両立が重要な課題であり、両者の要求と「 $-1/\xi$ 軌跡」の関係を明らかにすることで、設計指針を与えることに成功している。

第4章はPIOが発生する条件と、自励振動の周波数および振幅を解析的に求める方法を示し、フィードバック制御系が備えるべき特性について考察している。具体例として、ロール制御系を考え、人間パイロットが人間固有の遅れを持つものの、ロール角速度の変化に応じて瞬間的に最大のエルロン操作を行うものと仮定して解析をすすめている。こうした機敏な操作は人間にとって振動を止めようとする最善の操縦となり、最悪な自励振動を調べることを可能としている。結果的には入力からシステム全体への位相遅れが180度以上となると自励振動が発生することを確認し、舵面のアクチュエータ速度の制限に掛かるとフィードバック制御の補償が効かなくなり、自励振動の振幅が大きくなることを指摘している。そして、自励振動の振幅を下げるためにはフィードバック制御を有効とするために入力の大きさを制限することが必要で、しかも、前章に示した制御系の設計指針がPIO対策にも有効であることを明らかにした。

第5章では実際にPIOが発生した際の飛行データをもとに、第4章で示した解析手法と設計指針の妥当性を検証している。PIOの予測値と、実機での飛行データとは、ほぼ対応が取れ、本論文の解析手法の妥当性が検証された。また、実機で行われたフィードバックゲインを抑えるという対策の理論的根拠の説明を試みている。すなわち、フィードバックゲインを抑えることは、アクチュエータの速度制限に掛かる範囲を少なくし、フィードバック制御の効果を生かすことで自励振動の振幅を小さく出来ることを説明している。

第6章は結論で本研究の成果を要約している。

以上要するに、本論文は多入力多出力制御系の安定余裕を簡便にかつ精度良く評価できる新たな手法とPIOの解析手法を提案するとともに、航空機のロール制御系を例に安定余裕と応答特性の両者を改善できる設計指針を導き、この設計指針がPIO特性の改善にも有効であることを示すとともに、実機の飛行データによってその有効性を検証しており、航空工学上寄与するところが大きい。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。