

全舵面不作動時に推力増減のみで航空機を制御する技術

Thrust-Only Flight Control System as Backup to Loss of Primary Flight Controls



山崎 光一*¹
Koichi Yamasaki

市原 好将*¹
Yoshimasa Ichihara

安井 久子*²
Hisako Yasui

平沼 敏*³
Satoshi Hiranuma

航空機的全操縦舵面が不作動状態に陥るといった飛行継続に致命的な状況下においても、複数のエンジン推力を適切に増減することで機体の姿勢をコントロールし、安全な飛行や帰還を実現することができる。そのような航空機の操縦方法を、可能な限り正常時と変わらない操縦感覚で実現することを目指し、推力増減のみを用いる飛行制御則及び自動着陸オートパイロット並びにパイロット・インターフェースからなる推力飛行制御システムの開発を行った。またドーム型シミュレータを用いて、パイロットによる本システムの評価試験を行い、全操縦舵面不作動状態といった状況下においても安全な飛行・帰還が可能であることを確認し、航空機のさらなる安全性向上、生存性向上の目処を得た。

1. はじめに

航空機の操縦系統は、多重冗長系を構成しており、低い機体喪失確率を実現するよう設計されている。しかしながら、操縦系統の故障は皆無ではない。1974年、トルコ航空981便は、飛行中の貨物ドア脱落に伴い後部貨物室の床が陥没、舵面制御用のコントロール・ケーブルが損傷し、操縦不能に陥った。同機はその1分後に墜落し、乗員乗客全員が犠牲となった。一方1989年、ユナイテッド航空232便は、飛行中のエンジン部品の飛散に起因して、舵面制御用の油圧が失われ操縦不能に陥ったが、偶然乗り合わせていたパイロットが、スロットル操作のみを利用した機体の操縦方法を研究していたことが幸いし、パイロットの懸命なスロットル操作により空港までたどり着くことができた。その後、接地寸前に機体のバランスが崩れ、翼端が滑走路に接触して大破・炎上したものの最悪の事態は回避され、乗員乗客の半数以上が生還することができた。これらの事故例から、舵面制御系統の機能喪失は致命的であるものの、スロットル操作のみで機体を操縦できる可能性があることがわかる。ただしそのような操縦は、一部の優れたパイロットだけが実現可能な特殊技能であるのみならず、これを習得するには多大な訓練時間が必要となる。また実際の緊急時において、訓練により習得した操縦方法を実行したとしても、その際のパイロット・ワークロードは最大級であり、接地の瞬間まで意図どおり機体を制御し、安全な着陸を実現するのは困難であると推察される。

そこで当社では、全舵面不作動時においてもパイロットの操縦意図に対しエンジン推力を適切に増減して機体の姿勢を制御する技術、すなわち“推力飛行制御技術”の確立を目指している^{(1)~(4)}。同技術の確立により、全舵面不作動状態といった緊急事態においても、通常の操縦端の

*1 航空宇宙事業本部防衛航空機事業部航空機技術部

*2 航空宇宙事業本部防衛航空機事業部航空機技術部課長

*3 航空宇宙事業本部防衛航空機事業部航空機技術部次長

操作により機体を制御することができ、最寄りの空港への機体誘導や滑走路への着陸が可能となるため、航空機の安全性の向上が期待できる。

本稿は、推力飛行制御技術を適用して開発した推力飛行制御システム、及び当社ドーム型シミュレータを用いた同システムに対するパイロット評価について述べるものである。

2. 推力飛行制御システムの開発

本章では、開発した推力飛行制御システム(図1)の核となる推力飛行制御則及び自動着陸オートパイロット並びにパイロット・インターフェースについて述べる。なお、推力飛行制御システムの開発に当たっては、①推力飛行制御を適用可能なエンジン配置であること、②実際に運行されている機体であること、③公開文献が豊富で技術データが入手しやすいことなどを考慮し、Boeing 747-400 型機を対象とし検討を行った。

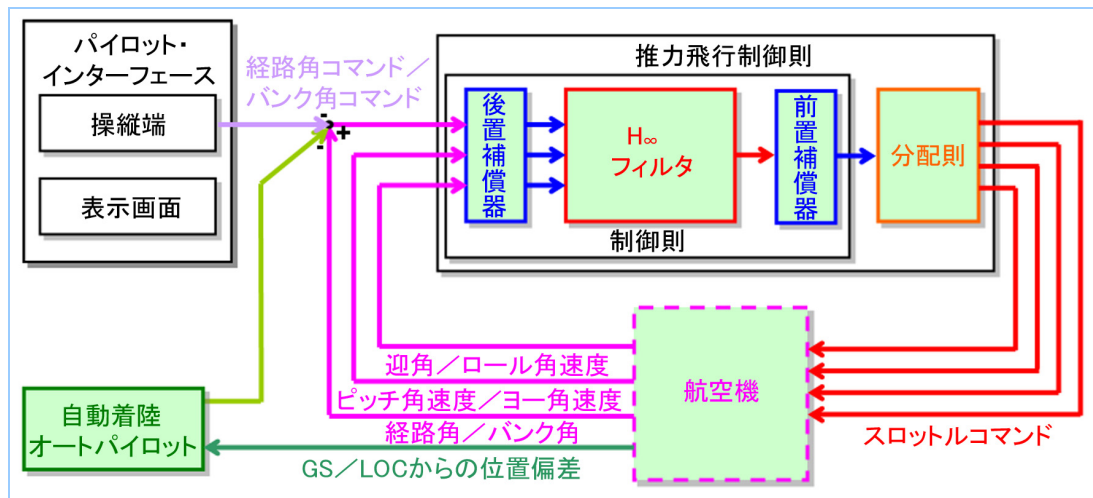


図1 推力飛行制御システムのブロック図

2.1 推力飛行制御則及び自動着陸オートパイロットの開発

(1) 制御量の選定

舵面を用いて機体を制御する場合、縦系であれば垂直荷重倍数やピッチ角速度、横・方向系であればロール角速度や横滑り角といった状態量を制御量とするのが一般的である。しかしながら、推力による機体応答特性は舵面によるそれと大きく異なるため、推力飛行制御則においては、必ずしも前述の状態量が制御量として適切であるとは言えない。そこで、対象とする航空機の数式モデルを用いて推力飛行制御に適した制御量の検討を行った。その結果、エンジンが応答可能な周波数範囲において、エンジン推力に対する応答が大きい状態量の中から、縦系については経路角、横・方向系についてはバンク角を制御量として選定した。これにより、パイロットの操縦端からは、経路角コマンド及びバンク角コマンドが入力される構成とした。

(2) 推力飛行制御則の設計

推力飛行制御則には、角加速度コマンドを算出する制御則と、その角加速度を実現するよう操作量を最適に配分する分配則を使用する構成とした。これにより、飛行条件及びパイロット入力に応じて、航空機に搭載された4基のエンジン推力を個別にかつ適切に使用することが可能となる。なお、このような構成をとる推力飛行制御則の研究・開発は世界においても類例がなく、本推力飛行制御システムの特徴の一つとなっている。制御則設計に際しては、Loop Shaping Design Procedure を適用し、前置・後置補償器及び H_{∞} フィルタによる構成とした。フィードバック量については、縦系は経路角・迎角・ピッチ角速度、横・方向系はバンク角・ロール角速度・ヨー角速度とし、推力飛行制御則からは、4基のエンジンに対するスロットルコマンドが出力される。

(3) 自動着陸オートパイロットの設計

滑走路への進入・着陸時に高まるパイロット・ワークロードを緩和するため、自動着陸オートパイロットを付加する方針とし、インナーループ制御則としての推力飛行制御則に対し、アウトーループ制御則として PID 制御にて設計を行った。その際フィードバック量については、縦系はグライドスロープからの位置偏差、横・方向系はローカライザからの位置偏差とした。なお、パイロットが操縦端から入力する経路角コマンド及びバンク角コマンドに対し、自動着陸オートパイロットが出力する経路角コマンド及びバンク角コマンドをそれぞれ加算した後、推力飛行制御則へ入力することで、自動着陸オートパイロットをエンゲージ中であっても、パイロットによるオーバーライドが可能な構成とした。

2.2 パイロット・インターフェースの開発

(1) 操縦端の検討

開発する推力飛行制御システムにおいて、操縦端は非常に重要なファクターである。なぜなら、エンジン推力の増減のみを利用した機体制御は、通常の機体制御に比べて非常に応答が遅いため、パイロットと推力飛行制御則の仲介をする操縦端を適切に設定しなければ、パイロットの意図通り操縦することが難しくなるだけでなく、場合によっては Pilot-Induced Oscillation のような危険な振動的機体運動を引き起こす可能性があるためである。一方、推力飛行制御システムは、新規開発機・既存機に関わらず、航空機に対して広く適用可能なシステムとして確立することを目指している。そこで世界初の試みとして、操縦端については、一般的な航空機における既存の操縦端をベースに、コラム・ホイール方式及びトリムスイッチ方式の2方式を用意した上で、当社ドーム型シミュレータにてパイロットによる評価を実施し、推力飛行制御に適した操縦端を選定することとした。図2(a)に用意した2操縦端の概要図を示す。

(2) 表示画面の検討

本章冒頭にて触れたように、推力飛行制御システムの開発に際しては、Boeing 747-400 型機を対象として検討を行っている。したがって表示画面の検討に際しては、同機の計器表示に対し、推力飛行制御において有効と考えられる表示を追加することとし、他に類例のない以下のような特徴を有する Primary Flight Display (PFD) 及び Engine Indication & Crew Alerting System (EICAS)を開発した。

- ・トリムスイッチ操作により生成される縦系及び横・方向系のコマンド量を表示する。
- ・滑走路へのアプローチの際のパイロット支援表示として、目標速度ベクトルを表示する。
- ・スロットル操作による操縦の際のパイロット支援表示として目標 N1(回転数比)を表示する。

図2(b)に PFD 及び EICAS 表示画面を示す。

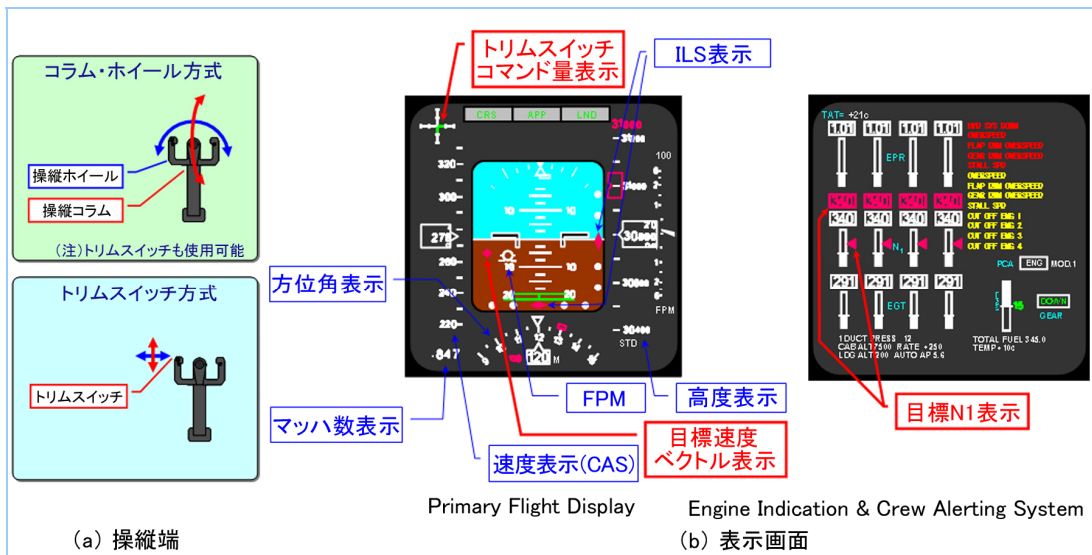


図2 パイロット・インターフェース概要

3. 推力飛行制御システムのパイロット評価

開発した推力飛行制御システム、すなわち推力飛行制御則及び自動着陸オートパイロット並びにパイロット・インターフェースに関し、パイロットによるシミュレーション試験を実施した。本章では、当該試験の概要、試験ケース、及び得られた結果と評価の一例を示す。

3.1 試験概要

以下に、パイロット・シミュレーション試験の概要をまとめる。

- (1) 実施日 :平成 22 年 12 月 1 日～2 日
- (2) 実施場所 :当社ドーム型シミュレータ
- (3) 操縦者 :国内航空会社 パイロット
- (4) 実施内容 :用意した各種操縦方式(表1)に対して評価を実施。

試験ケースの詳細は次節に示す。

表1 パイロット・シミュレーション試験にて評価する各種操縦方式

	操縦方式名称	概要
シ ス テ ム 従 来 操 縦	従来操縦方式	スロットル操作による操縦
	PCA MODE1	スロットル操作による操縦(パイロット支援表示あり)
本 研 究 に て 開 発 し た 操 縦 シ ス テ ム	PCA MODE2	推力飛行制御システムを介した操縦(コラム・ホイール方式)
	PCA MODE3	推力飛行制御システムを介した操縦(トリムスイッチ方式)
	PCA MODE4	推力飛行制御システムを介した操縦(コラム・ホイール方式) +自動着陸オートパイロット(自動フレアあり)
	PCA MODE5	推力飛行制御システムを介した操縦(コラム・ホイール方式) +自動着陸オートパイロット(自動フレアなし)

3.2 試験ケース

パイロット・シミュレーション試験においては、巡航飛行中に舵面制御系統が故障し、全舵面が巡航時のトリム舵角にて固着した状況を想定し、以下のような試験ケースを設定した。なお、フラップ及び脚は代替機構(電気式又は機械式)による緊急系統で作動できるものと想定した。

(1) 巡航時軌道変更

巡航飛行中に全舵面固着が発生した後、緊急着陸する空港へ向かうため、エンジン推力増減のみで降下及び方位角変更を実施する状況を想定し、各種操縦方式にて緊急降下、方位角変更に関する操縦性を評価する。

(2) 進入時軌道保持

全舵面固着状態において、エンジン推力増減のみで滑走路への進入を実施する状況を想定し、各種操縦方式にてグライドスロープ及びローカライザへの追従に関する操縦性を評価する。

(3) 着陸時接地位置及び沈下率制御

全舵面固着状態において、エンジン推力増減のみで滑走路への着陸を実施する状況を想定し、各種操縦方式にて接地位置及び沈下率制御に関する操縦性を評価する。

(4) 自動着陸

全舵面固着状態において、自動着陸オートパイロットを使用し滑走路への進入及び着陸を実施する状況を想定し、各種操縦方式にてグライドスロープ及びローカライザへの追従や接地位置及び沈下率制御における機体応答及びパイロット・オーバーライド時の操縦性を評価する。

3.3 試験結果及び評価

パイロット・シミュレーション試験にて取得した航空機の運動時歴の中で、代表として進入時軌道保持の試験ケースに関し、各操縦方式における飛行軌跡を図3に示す。同図より、従来操縦方式に対し推力飛行制御システムを介した操縦(PCA MODE2, 4)は、グライドスロープやローライザへの追従が良好であり、操縦性が大きく向上したことが見て取れる。

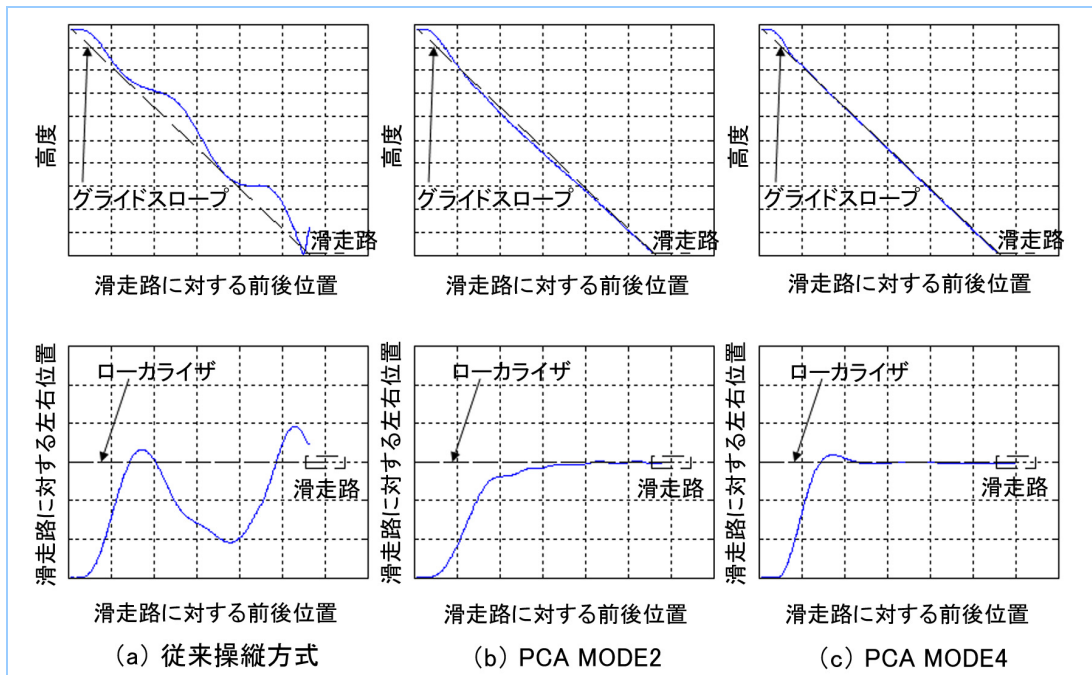


図3 各操縦方式における飛行軌跡

また同試験にて取得した主なパイロットコメントを表2に示す。同表より、スロットル操作により操縦する従来操縦方式及び PCA MODE1に比較して、推力飛行制御システムを介して操縦する PCA MODE2 及び 3 は、格段に操縦性が良好であり、中でもコラム・ホイール方式の PCA MODE2 が優れていることがわかる。したがって推力飛行制御の操縦端としては、コラム・ホイール方式が適しているものと考えられる。自動着陸オートパイロットについては、パイロット・オーバーライドによりフレアを行う必要のある PCA MODE5 に対し、自動フレアを実施する PCA MODE4 の方が望ましいことがわかる。

他の試験ケースも含めて、開発した推力飛行制御システムは操縦性が格段に向上し、全舵面が不作動状態となった際の代替飛行制御手段として有効であることが確認できた。

表2 主なパイロットコメント

	操縦方式名称	主なパイロットコメント
システム 従来操縦	従来操縦方式	評価を行う以前のレベル。操縦不能。
	PCA MODE1	・目標 N1 表示を追いかける様スロットルの操作をするのが精一杯。 ・従来操縦方式と比較して、結果的にグライドスロープなどへの追従は上手くできているものの、タスク実施可否の観点で評価ができない。
本研究にて開発した 操縦システム	PCA MODE2	・従来操縦方式、PCA MODE1 に比べて格段に操縦性が良く有効。 ・現有機にはないトリムスイッチコマンド量表示が参考になる。
	PCA MODE3	・従来操縦方式、PCA MODE1 に比べて格段に操縦性が良く有効。 ・PCA MODE2 に比べて若干慣熟が必要。
	PCA MODE4	自動着陸オートパイロットの操縦は安心でき、任せることができる。
	PCA MODE5	自動フレアを行う PCA MODE4 の方が安心でき、望ましい。
全般	・スロットル操作による操縦では帰還は不可能。 ・推力飛行制御システムは着陸操作まで実施可能であるため、非常に有効かつ十分。 ・実機において同システムがあれば、全舵面不作動時においても空港へ向かい滑走路への着陸まで実施しようという気になる。	

4. まとめ

推力飛行制御則及び自動着陸オートパイロット並びにパイロット・インターフェースより構成される推力飛行制御システムの開発を行うとともに、当社ドーム型シミュレータにてパイロット評価を実施した。その結果、“開発した推力飛行制御システムは非常に有効であり、実際の緊急時にも十分対応可能である”との高い評価を得ることができた。今後、小型飛行実験機や実機による飛行実証により、実空力環境における同システムの有効性が確認できれば、実用化へ大きく近づくものと考えられ、引き続き検討を進めていく予定である。

本研究は、(社)日本航空宇宙工業会革新航空機技術開発センターからの委託研究事業、“航空機工業の競争力強化に関する調査研究など補助事業”の一環として、当社が委託を受け実施したものである。

参考文献

- (1) 澁谷宏永ほか、耐故障飛行制御システムの研究開発—エンジン推力のみによる MuPAL- α の誘導制御の検討、第 45 回飛行機シンポジウム講演集、2007、p.465～469
- (2) 山崎光一ほか、全舵面不作動時の推力による代替飛行制御技術に関する研究(第1報)、第 48 回飛行機シンポジウム講演集、2010、p.31～39
- (3) 山崎光一ほか、航空機工業の競争力強化に関する調査研究 成果報告書 全舵面不作動時の推力による代替飛行制御技術に関する研究、社団法人 日本航空宇宙工業会、No.2109、2010
- (4) 山崎光一ほか、航空機工業の競争力強化に関する調査研究 成果報告書 全舵面不作動時の推力による代替飛行制御技術に関する研究、社団法人 日本航空宇宙工業会、No.2202、2011