輸送機の飛行制御とセンサ^{*1}久木田実守^{*2}

Key words: Flight control system; sensors

1. 飛行制御の歴史

ライト兄弟は1900年に実験用グライダー第1号を製作した際、人間による飛行を達成するためには飛行制御（とくに横方向の）が必須であるという認識をもち、ウイングチップ・ラッピング (wing tip wrapping) と垂直尾翼の同時制御による最初の横方向飛行制御機構を発明して特許を得た。これは操縦索を、パイロットがヒップを左右に振ってコントロールする揺り床 (cradle) に結んだ簡単なものであったと伝えられている。その後、方向舵、昇降舵、補助翼による三軸制御が定着し、今日の操縦装置に至ったわけであるが、パイロットの入力を操縦面に伝達する手段としては、もっぱら力と変位による機械的制御装置が使用されてきた。この機械制御システムの入力特性は比較的線型で、かつ自由度が少ないところから、高性能の航空機では飛行形態 (flight configuration) の変化や、高低速などの飛行領域変化に対して良好な操縦性を保持するのに障害の度合いがだんだん目立つようになってきた。この対策として、他系統との連動ギャ比可変機構の採用、あるいは極端な非線型特性をもったリンク機構を導入するなどして、ケース・バイ・ケースで解決を図ってきたが、これらの対策をもってしても理想的な系を形成するのは容易でなく、反ってシステムを複雑化させる結果となって、このことが操縦系統を電気

制御システムに移行させる大きな動機となった^{1,10)}。

一方、航空機の自動飛行制御システムは、初期の翼水平保持装置 (wing levelers)^{*3} や1940年代初めのヨーダンパーの発明^{*4} から1950年代～1960年代初めにかけて進められたヨーおよびピッチ・ダンパーの実用化を経た後、航空機の飛行形態に重大な影響を及ぼす今日のそれに至るまで発展を遂げてきた²⁾。現代的意味での飛行安定性を向上させるための自動制御、すなわちパイロットにその存在を全然感じさせない自動制御機構 (安定増大装置) の誕生は1947年初飛行のノースロップ YB 49 用に開発されたもので、その後1950年代および1960年代初めにかけて後退翼の超音速機にとってきわめて重大な開発であるピッチおよびロールのダンパーが生まれた³⁾。他方、パイロットの操作を楽にするためのオートパイロットが最初に民間輸送機に使用されたのは1930年イースタン航空のCurtis Condor 機におけるもので¹⁾、その後種々の型式や性能のオートパイロットが第2次世界大戦中の主要飛行制御装置として使用された。現在のオートパイロットの機能は、パイロット援助 (pilot assist) 機能と案内 (guidance) 機能とに分けられ、援助機能のほうはトリム状態における飛行姿勢、方位、高度などを保持するとともに、パイロットが行う釣合い旋回、上昇、下降などのフライト・パス・コントロールを容易にし、パイロットの疲労を軽減するもの、また案内機能のほうは、関連する航法装置あるいは航法用計算機で作られる操向信号 (steering signal) に従って自動的に飛行経路を制御するものであり、これには飛行ミッションによっていろいろなものがある¹⁴⁾。

航空機が大型化し飛行領域が拡大するにつれて、操

著者紹介

久木田実守 (正会員)

昭和4年生。昭和27年日本大学工学部電気工学科卒業。昭和27年米極東空軍電子ラボラトリー勤務。昭和29年日本航空入社 (主に航空電子技術関連業務に従事)。昭和55年同社技術部より日本航空宇宙工業会派遣、現職同工業会技術部長、技術士 (航空機部門)、計測自動制御学会、航海学会、各会員。

*1 昭和57年11月10日、第20回飛行機シンポジウムにて講演。昭和58年11月8日原稿受理 Flight Control Systems and Sensors for Air Transport

*2 日本航空宇宙工業会 Sanemori KUKITA

*3 wing levelers: ライト兄弟がノースカロライナ州キティホークで行った歴史的飛行のわずか11年後、Laurence Sperry はカーチス飛行艇に搭載した完全自動安定器と翼水平保持器 (fully automatic stabilizer and wing levelers) により le Concours de la Securite en Aeroplanes の最優秀賞に選ばれ 400,000 フランを獲得したとされている¹⁾。

*4 ヨーダンパーの発明: Dr. Karl Doethch によるジャイロ作動のヨーダンパー、ドイツの HS-129 爆撃機に採用して、安定飛行の実験に供された。

第1図 飛行制御システム（操縦系統）発展の過程⁹⁾

作力の点でも応答速度の点でも人間の能力を超えたものとなり、電気/電子飛行制御とともに油圧作動機構が操縦系統に導入されて、いまや遷・超音速輸送機にとって、油圧式舵面サーボの採用は必須のものとなってきている。それにつれて速応性と安定性を両立させるべく油圧サーボの安定性解析が進み、信頼性向上のために冗長性が付加されるなど、さまざまな工夫がこらされると同時に、パイロットに操舵感覚を保持させるためのマッハ・フィール等の人工感覚装置も進歩してきた。いずれにしても現用の油圧サーボ、あるいは今後導入が予想される電気サーボが操縦系統に組み込まれることによって、パイロットと舵面間の直接的結合がなくなり、これを契機として飛行制御システム的设计思想の転換が図られたといえる¹⁰⁾。

一方、飛行安定装置の歩みについてみると、ヨーあるいはピッチ・ダンパといった安定増大装置 (stability augmentation system: SAS) はオートパイロットのパイロット 援助 (pilot assist) 機能が受け持つ航空機の静安定問題処理に対して、動安定問題の処理を受け持つものであるが、この SAS は外乱に対する航空機の応答を安定化してパイロットに余分な負担を与えないようにする反面、パイロットが操縦桿を操作して機体をコントロールしようとしたとき、どちらかといえばこれを妨げる方向に作動するものであるため、厳密な意味での操縦性を改善するものではなく、航空機が高性能化するにつれて、このような弊害をもつ SAS に代わる機能が求められるようになったのは当然であ

る。それまで高い信頼性が得られなかったために補助的制御手段としてしか利用されなかった電子システムは、その信頼性が飛躍的に高まってきたことから、より積極的に電子制御技術を操縦系統に取り入れて、従来の機械的操縦装置の欠点であったリンケージのガタなど非線形性の悪影響を解消するとともに、飛行状態で変わるパラメータをインプットして操縦性を最適化したり、正確な姿勢制御を行うシステムの開発が進められた。その成果の一つが第2図に機能ブロック・ダイアグラムを示すコントロール・オーギュメンテーション・システム (Control Augmentation System: CAS) であるが、このような CAS は次世代の輸送機にその導入が必須とみられるフライ・バイ・ワイヤや能動飛行制御技術 (Active Control Technology: ACT) といった新しい飛行制御技術の先駆をなすものといえる⁴⁾。

2. 電子飛行制御システムの発展

すべての機械的リンケージを電氣的リンケージに換えるフライ・バイ・ワイヤ (Fly By Wire: FBW) の思想はすでに半世紀以上前からあったが、信頼性の点で不安があるという理由から、現在迄量産機に広く応用されるまでには至らなかった。一方、電子技術の部門では、半導体素子の開発が進み、演算素子はトランジスタから IC 化された演算増幅器 (operational amplifier) に変わり、1970 年代に至って、ディジタル MSI から LSI に発展、数百～数千のゲートをワン・

第2図 コントロール・オーギュメンテーション・システム (CAS) の機能ブロック・ダイアグラム¹⁰⁾ 第3図 三重冗長系のフライ・バイ・ワイヤ (Fly-by-Wire: FBW) システムの構成例¹¹⁾

チップに納めたマイクロ・プロセッサが容易に入手できるようになり、これを素子の開発により電子機器を含む構成コンポーネントの信頼性は格段に向上し、電子制御のみによるフライ・バイ・ワイヤ(第3図参照)が現実のものとなってきた。さらに機上用電子計算機を中心に電子飛行制御システムは従来のアナログ・シ

ステムからデジタル・システムに急速に移行しつつある。すなわちデジタル・プロセッサを中核としたデジタル・システム技術はアナログ・システムに比較して、①多くの入力や変数を処理する能力が高い、②演算速度が早く、より精妙な制御方程式の組込みができる、③他のシステムや中央制御計算機との両立性

第4図 電子制御分野における主要演算素子の変遷¹²⁾ 第5図 電子技術利用の制御システム¹²⁾

が求めやすい、④同じハードウェアでもソフトウェアの組み方で数種の異なる応用目的に合わせることができ柔軟性に富む、などといった点で従来のアナログ・システムではなかなか突破できなかった技術障壁を打破しうるツールを提供したのである¹¹⁾。

以上のような技術変遷を経て、飛行制御を含む今日の機上電子制御システムは第5図にブロック・ダイアグラムを示すとき構成が一般的なものとなっている。すなわち制御システムを人間にたとえれば、目や耳などの役目を果たすセンサ部分と、頭脳の役目を果たす情報処理部ならびに制御部、それにパイロットに航空機の飛行状態や制御システム自身の作動状態を伝える役目の表示部門、さらにパイロットの意思を制御システムに注入する手の役目を果たすコントロール・

パネル類の機器に電子技術が導入されてきた¹²⁾。

一方このような電子制御システムの発展に支えられた飛行制御システムの信頼性向上は、従来伝統的に航空機本体に付与さるべきものとされてきた安定余裕率 (safety margin) の一部をも受け持つようにさえなってきた⁶⁾。すなわち、電子制御の利用により航空機の設計に課せられた空力的あるいは構造上の制約を緩和し、これまで不可能とされてきた飛行形態の最適化 (configuration optimization) をも可能としたのである²⁾。このような技術が能動制御技術 (Active Control Technology: ACT) と呼ばれるもので、その具体例を示すと第1表のごとくである。現在この能動飛行制御を利用している輸送機としては、翼寿命延長のために揚力配分を能動的に行う装置をリトロフィットした

第1表 能動制御技術 (ACT) の飛行制御への応用

ACT 機能	機能 応 用 の 概 要
安定性緩和 (RSS) Relaxed Static Stability	機体の重心位置を後退させて固有の安定性を緩和し、尾翼面積を姿勢保持に必要な最小値まで減らすことにより、構造重量および抗力を減少させ、輸送機では燃料節減、戦闘機では運動性向上を図ることができる。実質的な安定性は舵面を自動的に作動させることにより確保する。
運動荷重制御 (MLC) Maneuver Load Control	機体の引き起こし、または旋回操作の際、補助翼、フラップ等を連動させ、主翼に働く揚力の中心を内舵側に移し、曲げモーメントを減少させる。この結果生じた強度余裕分だけ縦横比を増せば誘導抗力が減り、燃料節減が図れる。戦闘機の場合は、運動中の誘導抗力が減少するように作動させれば余裕推力が増して運動性が向上する。
突風荷重制御 (GLC) Gust Load Control	飛行中に遭遇する突風の強さに応じて補助翼・フラップ方向舵等を自動的に作動させることにより、荷重または加速度の発生量を減らし、構造重量の軽減、疲労寿命の延長または乗心地の改善を図る。
フラッター制御 (FMC) Flutter Mode Control	主翼の曲げ振動を打ち消すように補助翼・フラップ等を作動させることにより、フラッタ発生速度を増大させ、結果として機体構造重量を軽減できる。
直接揚・横力制御 (DFC) Direct Force Control	従来の航空機では飛行経路角を制御する場合、姿勢角の変化によって生ずる揚力または横力を利用するために必然的に4次の遅れを伴う。DFCは従来の三舵とは別の翼面を設け三舵と併用することにより、かかる遅れを減らして経路角の制御応答特性を向上させたり、経路角と姿勢角を独立に制御することを可能にする操縦機構であって、運動性および離着陸時の安全性向上に役立つ。

第6図 ACT 技法が航空機設計サイクルに与える影響⁹⁾

ロッキード C5A, 翼構造に大きな変更を加えることなく翼幅を延長するために運動荷重制御 (MLC) を採用したロッキード L1011/500がある^{5), 15)}。また NASA のスペース・シャトルには地球への帰還飛行中の幾つかのポイントに必要な安定性を得るために、飛行制御システム全体を電子自動制御装置としたデジタル・フライ・バイ・ワイヤが装備されている²⁾。

このように電子制御技術が飛行制御システムに大幅に採り入れられるようになると、従来機体の基本設計が終了した後飛行制御システムが設計されるという設

計パターンは大幅に変更されざるをえなくなる。第6図はその模様を示したものである。すなわち今後の航空機的设计を考える場合、第7図のような異なった技術分野が相互に協同して進めるインターディシプリナリー設計の (interdisciplinary design) 方向に進むものと考え⁶⁾。

3. 電子飛行制御システムのセンサと演算装置

飛行制御システムが機能するために必要な情報すなわち前掲第5図のセンサ部で採取すべきデータとし

第7図 インターディシプリナリー設計（航空機設計の展望）（Interdisciplinary Design—Future Aircraft Design）¹³⁾

の相關状態（航空機が大気中を飛行する移動体である以上、飛行の基本情報となる）、④外界状態、であり、これら情報および、その検知、受感装置、あるいはシステムを列挙したものが第2表である。

これらの情報は、現在の航空機上ではほとんどが機上電子装置で得られ、そこで採取された生の情報、すなわちセンサ信号がそのまま飛行制御システムの表示部、あるいは制御部に送られることもあれば、制御部や表示部に適合する形にするため、航法計算機などの演算装置を利用して、演算、統合が行われるものもある。航法計算機および飛行制御用計算機の演算機構はともに乗除や微積分などの数値計算回路や応答遅れとかフィルタリングのための論理回路が含まれるが、飛行制御計算機と航法計算機とは、それらの演算機能

では、①自機の位置、②自機の運動状態、③対空気と

第2表 飛行システムのセンサの役割

検 知 ・ 受 感 の 対 象			検知・受感の計測装置および手段
自 機 の 位 置	VNAV (Vertical Nav)	飛行高度 進入角度	高度計（気圧・電波） グライドスロープ（ILS） 高低誘導装置（MLS-EL）*
	LNAV (Lateral Nav)	測 角 コース偏位 測 距 測 距離差	ADF……………（対）LF/MF レンジビーコン VOR/TACAN……（対）VORTAC ステーション DME……………（迄）VORTAC/DME ステーション オメガ } …………… 地上局からの距離差（双曲線） ロラン } ローカライザ（ILS） 方位誘導装置（MLS-Az）*
	V/LNAV	三次元位置	GPS（人工衛星利用）*
	Dead Reckoning に依る	経緯度計算	Doppler 航法装置（対地速度→位置） 慣性航法装置（加速度→対地速度→位置）、オメガ
自 機 の 運 動 状 態	機首方位		方位計（磁気コンパス、Gyrosyn Compass） 真方位（慣性基準システム、HARS） VOR/TACAN……（対）VORTAC ステーション
	飛行方位 運動角速度 運動加速度 飛行速度		レート・ジャイロ（コマ、レーザ*） 加速度計、慣性基準システム（INS） 対気速度計（IAS, TAS, Mach） 自立航法装置（INS, Doppler）
	上昇、下降速度 姿 勢 旋回（横すべり）		昇降計（気圧） ジャイロ（コマ、レーザ*）慣性基準システム ジャイロ（コマ、レーザ*）
	対気速度 大気温度 対気昇降度 対気高度 迎え角 偏流（風向対飛行方向）		IAS, Mach 計、ピトー動圧 大気温度計（SAT, TAT, RAT） 昇降計 大気高度計 Angle of Attack 計 自立航法装置+エア・データ・システム
外 界 状 態	風 向 雲（含雷雲） 晴天乱気流 突 風 後 流 管制情報		自立航法装置+エア・データ・システム（気象情報） 気象レーダ* 機上 CAT（赤外線、レーザ）*、気象レーダ* 大気温度計+対気速度計+加速度計*、温度計* WVAS（後流回避システム）* SSR* モードS, TCAS*, Aerosat（衛星）*

* 開発中

に対する重点の置き方に差異があり、さらに入出力の精度、演算速度および関連する並列の計算経路の数にも相異がある。航法計算機の主たる特徴としては高い計算精度や入出力の数と並列計算経路の数が比較的少ないことが挙げられ、一方制御用計算機には、航法計算機のそれほど高い計算精度は要求されないものの、演算速度については、飛行制御システムの動応答とも関連するが比較的高速度のものが必要となる。このように航法用演算と制御用演算とは要件が異なるので、アナログ型機上電子計算機の場合、通常別々の電子計算機が使用されてきた。しかしながら、計算機のデジタル化とくに演算素子の発達は、これら異なる要件を十分に満足する機上電子計算機の出現を可能にした。その典型例が飛行管理用電子計算機 (Flight Management Computer: FMC) である¹⁶⁾。

技術の進展あるいは経験が蓄積されるにつれて視野が拡大され、従来分散して機能していたものを幅広く統合して考慮する動きがでてくるのは当然であるが、第8図に示す飛行管理システム (Flight Management

System: FMS) は、こういった機上装備のトータル化の動きの延長上で出現したシステムであるといえる。この FMS は、今後、既定の飛行計画をベースにした現在のものから、空地間のデータ・リンクを通じて航空管制を含め運航システムを一つのトータル・システムとして管理するものへと発展していくであろう¹²⁾。

4. 情報伝達手段とマン・マシン・インターフェイス

制御システムがアナログからデジタル化に変わるにつれて信号伝達の形も大きな変化を遂げつつある。従来のアナログ・システムでは信号ごとに発信源から受信部に専用の伝送ラインを設けねばならず、このため、情報が増えると、それに伴って伝送ラインの数が増え、多機能のシステムでは全重量の大半が伝送ラインで占められるといった状態さえ招きかねない。そこで第9図に示す時分割多重の手法で同じ伝送ラインを使用し、多くの情報信号を送るマルチプレキシ

第8図 飛行管理・飛行制御ブロック・ダイアグラム

第9図 時分割回線交換の原理

グ (multiplexing) 技術が登場してきた。この技術を適用すれば伝送ラインの数や重量を抑えることができ、単位時間に送りうる情報量が増加し、時分割を細分化することで情報の伝達量を飛躍的に増加させることができる。この技術は、すでに慣性航法装置や AIDS、さらには機内音楽放送システムに採用されているが、今後は飛行制御システムのデータ・バスとして大幅に採用されてゆくであろう。この新しい信号伝送システム、すなわちデジタル・データ・バス方式としては民間用規格の ARINC-429 および軍規格の MIL-STD-1553 とがあり、伝送速度や信号変換方式にそれぞれの特長がある。

以上は、すべて電気信号を使用したものであるが、現在伝送路に軽量の光ファイバーを用い、外部雑音に強い光伝送技術の導入が開始されており、今後飛行制御システムのセンサ部や制御部に光技術を取り入れたフライ・バイ・ライト・システム (fly by light system) が雷害や電磁障害から飛行制御機能を守る革新的手段として開発が進められつつある⁹⁾。

航空機の性能向上や運用の複雑化につれて機上シス

第10図 マン・マシン・インタフェース¹³⁾

テム、なかんずく電子装備システムの数や種類が増え、構成も複雑となりつつあり、マン・マシン・インタフェース (man machine interface) の問題が重要視されるようになった。man-machine-interface とは人間と機構が相補的に互いの特長を生かして、ある目的の仕事をするシステムを一つのマン・マシン・システムとして構成するとき、人間と機械的な接続面となるものをいうが、航空機の電子装備システムでいえば、操縦室内の計器表示、配列や操作盤、スイッチ類、さらには操縦室自体のコンフィギュレーションが、これに当たり前掲の第5図のブロックダイアグラムでいえば、表示部とパイロット、パイロットと操作部や制御部とが相対する部分である。man machine

第3表 技術と職種の関係

技術 職種	コンピュータ応用	計 測	マンマシンインタフェース	制 御
設 計 ・ 製 作	異常診断 自己診断 自動診断 信頼性 ソフトの信頼性 計算機の耐震性 運転ガイド 総合監視システム 支援システム	デジタルセンサ センサ信頼性 耐環境センサ 非接触検出 異常検出システム 計測多様化	計算機応用 操作盤最適化 有効情報表示 パターン標識 最適表示 警報最適抑制 誤操作防止 運転ガイド デジタル全自動化 集中監視システム 対話型コンソール	信頼性 (機器、計算機応用、耐環境) フェイルソフト 伝送 校正点検フリー 自己構成型制御装置 機器性能改善
運 航 ・ 保 守	異常診断システム 自己診断 信頼性 インテリジェントターミナル 監視立体化 機器の小型化 省力化点検保守システム	センサ信頼性 信頼性 耐環境センサ 異常診断用センサ 異常正常判定 非接触センサ メンテナンスフリー 省力化点検保守システム	操作盤最適化 有効情報提供 パターン認識 ヒューマンエンジニアリング改善 誤判断防止	伝送 (光、多重) 機器信頼性 自動操縦 制御の統合化 機器性能改良 自動対処システム 人間の接点 省力化点検保守システム
研 究	異常診断システム 自己診断 信頼性 運転監視 ソフト標準化 分散型制御システム 階層化制御 ガイド	信頼性 耐環境センサ 非接触検出 点検用高性能センサ センサの異常診断 メンテナンスフリー	操作盤改善 CRT運転コンソール 有効情報表示 作業負荷軽減 (音声パターン認識等) ヒューマンエラー低減 操作容易 カラー CRT 解像度	伝送 (光、多重) 信頼性 デジタル化 (全)自動化 多次元パラメータ最適化 モジュール統一 アダプティブ・コントロール

* (含) 運航会社、航空機製造会社

interface を人間と機械の情報伝達のマッチング機能を果たす部分として捉え、その関係図を示したものが第10図である。すなわち、一方は、人間の感覚を通じて、知覚、認識・行動という人間側の情報処理機構に接続され、他方は電子計算機や通信あるいは制御システムの操作盤や端末機器を通じて情報処理機械に接続されている。この部分を通過するのは多様な形態の表現をもった情報というものである。

現今の多様な運航環境のなかで、飛行ミッションの責を負うパイロットにとっては、たんに航空機の操縦を行うだけが仕事ではなく、その飛行環境やミッションの種類に応じて航空機を安全に、しかも効率よく運航する管理者であり、その業務遂行上、どのような情報をいかなる時点で、またどのように取得しなければならないかという問題がある。man machine interface でむずかしいことは、表現がシステムにより、個人により、また場所や環境によって、時間により変化することであり、その設計仕様がきわめて流動的なことである。操縦室内の重要な man machine interface である計器を例にとって考えると、これまで一つの表示目的ごとに設けられてきたが、近年に至り計算機を用いてカラー・ブラウン管に図形を表示する新しいディジタル統合表示装置が出現してきた。また表示形態も図形のほか文字表現も可能で、一方人間の注意集中力をより敏速に、また理解をより容易なものとする警報表示形式も開発されつつある⁷⁾。このように従来のアナログ・システムでは表示、機能とも固定的であったのに比べディジタル・システムでは柔軟性が高く、かつ色彩表示や統合表示といった高い識別性をもつものも出現しつつあるが、これらハードウェア技術をいかに最適の man machine interface として実現させるか、人間工学、心理学といった他の学術分野との協同にもとづく学際的 (interdisciplinary) なアプローチが今後強く求められてゆくことになろう。

現在日本の航空産業界でも、この面の研究が活発に進められつつあるが、ここではたんに航空機やシステムの製造会社の技術者のみでなく、運航に直接たずさわる乗務員や、航空医学あるいは心理学など諸学界の

専門家の協力が、これら研究の成果をより充実したものとする方途であるということが出来る (第3表参照)。

参考文献

- 1) Howard, R. W.: Automatic Flight Controls in Fixed Wing Aircraft—The First 100 Years, *Aeronautical J.*, Nov. (1973), pp. 10-20.
- 2) Rediess, H. A.: Impact of Advanced Control Concepts on Aircraft Design, ICAS Congress, 1981, pp. 1-44.
- 3) Bondreau, J. A.: Impact of CCV Requirements on Flight Control System Design, *J. Aircraft*, 14(11) Nov. (1977), pp. 20-30.
- 4) Rediess, H. A.: Advanced Control Technology and Its Potential for Future Transport Aircraft, NASA TMX-3409 (1976), pp. 10-15.
- 5) Urie, D. M.: L-1011 Active Controls Design Philosophy and Experience, AGARD-CP-260 (1979), pp. 11-20.
- 6) Kurzahls, P. R.: Active Controls in Aircraft Design, AGARD-AC-234, Nov. (1978), pp. 25-30.
- 7) Lamber, J. K.: Aviation Technology and Flight Crew, International Aeronautical Symposium, Tokyo. Aug. (1982), A 4, pp. 1-19.
- 8) 日本航空宇宙工業会: 昭 54 長期構想報告書, pp. 312-332.
- 9) 日本航空宇宙工業会: 革新航空機技術開発センター企画委員会“フライ・バイ・ライト”調査報告書(1983. 3), pp. 1-20.
- 10) 久木田実守: フライ・バイ・ワイヤーフライト・コントロールの歩み, 航空技術各号 (1979-1980).
- 11) 久木田実守: アビオニクス技術の動向—ディジタル技術の導入, 東京大学宇宙航空研究所 昭 54 航空学シンポジウム, pp. 84-94.
- 12) 久木田実守: 民間航空機における飛行管理システム, 計測自動制御学会誌, 20(6) (1981. 6), pp. 27-36.
- 13) 電子通信学会編: 電子通信ハンドブック, オーム社, 1979, pp. 1444-1453.
- 14) Andeer, R. E.: Function and Application of Automatic Flight Control, Aviation Navigation Systems, J. Wiley & Sons Inc., New York, 1969, pp. 492-519.
- 15) Edwards, J. W., Breakwell, J. V. and Bryson, A. E., Jr.: Active Flutter Control Using Generalized Unsteady Aerodynamic Theory, AIAA J. Guidance and Control, 1(1), Jan.-Feb. (1978), pp. 125-130.
- 16) 久木田実守: 飛行管理システム用計算機の動向, 日本航空宇宙学会第 18 回飛行機シンポジウム (1980), pp. 32-36.