

《展望・解説》

フライト・シミュレータの諸問題

岡部 正典・川原 弘靖*

ABSTRACT Flight simulator has increased its effectiveness in designing and developing aircraft as well as in flight crew training. It is now an indispensable integral design tool of aircraft.

In this paper, authors tried to give a rough idea of technical problems about flight simulator, based upon their experiences at National Aerospace Laboratory, Science and Technology Agency.

はじめに：フライト・シミュレータは操縦の訓練、技量検定並びに航空機の設計・開発のための試験・研究の領域で効果的に使用できる段階に到達し、利用急増のすう勢にある。フライト・シミュレーション技術はデジタル計算機を中心にして日進月歩を続けており現時点における技術展望も極く短時日の間に時代遅れとなることは充分予測される所であるが、或る時点での技術動向の断面を整理しておく事は、将来の発展の方向を探る上で有意義であろう。

筆者等は科学技術庁・航空宇宙技術研究所において昭和38年以来航空機の設計開発のための飛行シミュレーション試験に係わってきた者であり、主として人間工学の側面からシミュレーションの忠実度を向上するためのパイロット・キュー (cues) 注1) に関する調査研究を行って来た。本論ではその範囲で、パイロット操縦を含む実時間フライト・シミュレーション技術の課題を展望する。ただし操縦の訓練並びに検定に関するフライト・シミュレータの問題点、及び航空機動特性の数学モデルの構成法等については触れないため、それぞれ専門家による他書を参照されるよう予めお断りしておく。

1. フライト・シミュレータの発達

1.1. 操縦訓練用フライト・シミュレータ (トレーナ) の発達

フライト・シミュレータはほとんど航空の開始と同

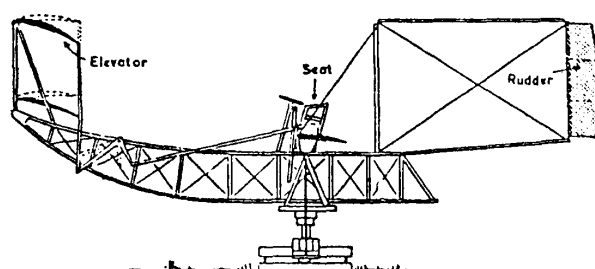


図 1 Sanders Teacher⁵⁾

時に操縦の練習用飛行模擬装置としてスタートした。装置考案の動機は経済性と安全性にあり、今日においてもそれは基本的に変っていない。1910年頃には英国において「大きな財布を持たない素人にとって最も厄介な問題は操縦練習中に機体を壊してしまう事である」¹⁾ ので、安全かつ経済的に操縦の練習ができることを唱い文句にして、図1に示すような野外設置の Sanders Teacher⁵⁾ や同巧の Erdly-Billings Oscillator 等が実用に供されている²⁾。

1920年代末に一般的計器飛行訓練を目的として Edwin Link がリンク・トレーナを考案し、大戦による操縦士大量養成の必要を背景にして改良を重ね、シミュレータと言えはリンク・トレーナを指す程の普及を見た。この装置は空盒や電動モータを使用したモーション発生装置を備え、更に50年代になると円型パノラマ視界等も試みている。こうした改良を支えてきたのは訓練効果の転移注2) に関する おびただしい数の研究

Some Technical Problems about Flight Simulator. By Masanori Okabe & Hiroyasu Kawahara (National Aerospace Laboratory).

*航空宇宙技術研究所

注 1) キュー：パイロットがその五感を用いて機体状況を把握するための手がかりをいう。

注 2) 転移 (transfer)：動作学習の分野の用語で、実機とは異なる道具を用いて訓練を行なった場合の正の効果を指す。

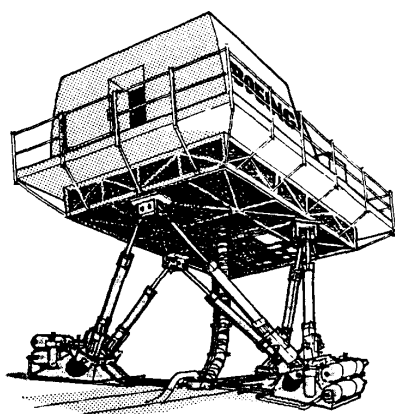


図 2 6自由度共働型モーション発生装置 (Redifon)

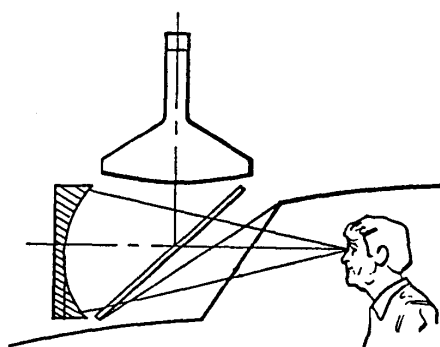


図 3 無限遠焦点表示装置の構成 (Redifon)

であり²⁾、実機の操縦に対して個々のトレーナが正の訓練転移効果を持つことを確認しつつ装置の改良・考案が進められてきたのである。

1950年代以降航空機は大型化し、燃料は高騰を続け、環境保全のために空港使用制限が強化される状況下では軍民を問わず実機使用の訓練時間を最小限に抑え、更に元来実機では危険が大き過ぎたり、實際上実施が困難な訓練を可能にしてシミュレータによる訓練範囲を拡張するために訓練用シミュレータの機能・性能の向上に拍車がかかり今日見られるが如き発達を遂げた。

FAA(米連邦航空局)はトレーナの機能・性能の拡充に即して、訓練における実機使用義務を減免し、訓練内容の充実を図る方向で、トレーナによる訓練、再教育、査察、検定等の枠を拡大して来ている。1980年には連邦航空法を改正して、トレーナによる訓練・検定の科目及びそれに使用することができるトレーナの機能・性能の基準を明示した Advanced Simulation Plan を打出してエアライン及びシミュレータ・メーカーの指導に乗り出している³⁾。この計画によると最終段階(フェーズⅢ)での総合的なトレーナの機能・

性能の達成目標は以下のように設定されている。

- (1)パイロットの操縦に対して計器、視界、モーション等の追従遅れは 150msec 以下であること。
- (2)クリティカルな空力特性の模擬には32ビット語長演算に匹敵する分解能を有すること。
- (3)6自由度モーション装置によるモーション・キューと同等かそれ以上のモーション・キューが発生できること。
- (4)視界は30°(縦)×75°(横)の視野に4000エッジ乃至1000面以上の画素を分解能3分弧以下で表示し、夜間、薄暮、昼間の視界を構成し、昼間の明るさは6ft-L以上であること。

現用のトレーナは6自由度共働型(Synergistic)のモーション発生装置(図2参照)を備え、CGI方式(Computer Generated Image)で発生した視界を無限遠焦点表示器(Infinity Display Unit, 図3参照)でコックピットの前方・側方風防位置に表示するシステム構成が一般的となっており、上記フェーズⅢの目標性能基準が達成されるのは時間の問題と目されている。

かように大規模トレーナによって総合的シミュレーションの忠実度が追求される一方で、動力、航法、操縦、エンジン、燃料等各サブシステムの操作手順の部分訓練に使用するCPT(Cockpit Procedures Trainer)や機関士及び整備士専用の訓練機材が実用されており、今後ますます目的に応じた機材の分化が進むと共に、それに伴って訓練教程の体系化、合理化が進められることになる。

1.2. 設計開発用フライト・シミュレータの発達

前節で述べたようにフライト・シミュレータは操縦訓練の分野で発達してきたが、1950年代から航空機に関する試験・研究及び設計・開発の分野でフライト・シミュレーションの技術の一つの補助手段として使用するようになった。当初「従来は飛んでみるまでは判らないとされていた安定操縦性について設計者が十分な自信をもって初飛行にのぞむ」⁴⁾ための道具或いは飛行実験中や事故に際してのトラブル・シュートの道具として位置付けられていたが、その後トレーナの技術を取り入れつつ使用範囲を拡大して次第にその効用が認められるようになった⁵⁾⁶⁾⁷⁾。今日では制御システムや表示システムの個別研究、飛行性並びに操縦性に関する設計確認、更に飛行試験の安全性確認、操作手順の決定、パイロットの慣熟等航空機の設計の当初から開発における不可欠な試験装置となっている。

航空機の開発プロジェクトが欧米に較べて比較的少い我が国ではこの分野でのシミュレータ利用はその分

だけ遅れているのが現状であるが、機体メーカ並びに航技研の設備を使用して1960年代後半からXT-2, C-1, PS-1, US-1, STOL 実験機等の開発過程でシミュレーション試験が実施され、設備の多くの不備を克服しながら実績を積み⁴⁾、その有用性を実証することによって、設計・開発に必須の試験設備としての地歩を漸く確立し得た段階にある。

参考までに航技研に設置されたフライト・シミュレータの構成を図4及び図5に示す。図4は昭和38年に設置された汎用飛行シミュレータ設備であり、図5は現在当所が進めているSTOL 実験機開発のために目下製作中のシミュレータ設備の系統図である。両者を比較するとこの20年の間に飛行シミュレーション技術が如何に進歩したかが良くわかる。即ち、

- 1) 飛行運動計算機部が、アナログ計算機からデジタル計算機に更新され、飛行運動の実時間演算の規模並びに精度が格段に向上した。
- 2) 視界模擬方式は上空での角運動模擬のみが可能なスライド投写方式を出発点として、滑走路模型—閉回路TV方式を経て、CGI方式の模擬が可能になった。
- 3) モーションの発生は昭和38年当時、角運動の模擬が精一杯であったが、低摩擦長尺アクチュエータを使用した共働型モーション発生装置が使用できるようになって可動範囲の大きい6自由度モーション・キューの発生が可能となった。
- 4) デジタル計算機の飛行シミュレーションへの貢献は1)で述べたように、空力係数の非線形特性を忠実に模擬できるようにした点に在るが、他方外見からは比較的解り難い飛行シミュレーション試験法を改良する上で、大きな効果をもたらしている。即ち試験場合の変更、試験データの計測処理等をプログラム制御によって容易に、かつ手早く行なえるようにし、試験の実際面を大幅に効率化した。

こうした各装置の改良によって飛行シミュレーション試験はその効用を拡大すると共に航空機設計開発のための試験として、風洞試験、エンジン等要素試験と実機飛行試験とをつなぐ重要な役割を荷うに至った。

更に最近、航空機の飛行性に関する米軍規格が改訂され(MIL 8785C, Flying Qualities of Piloted Airplanes), 実機で行なおうとしても危険が大きく、また実際に遭遇するのが極めて難しい大気擾乱条件での飛行確認にシミュレータを使用することを規定し、更に飛行性評価法の一つとしてフライト・シミュレーション

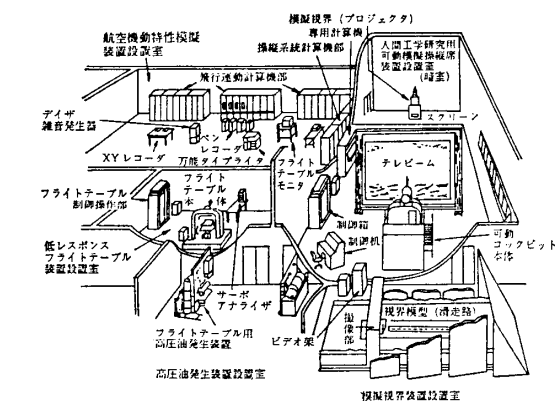


図4 航技研の汎用飛行シミュレータ全体構成図⁴⁾

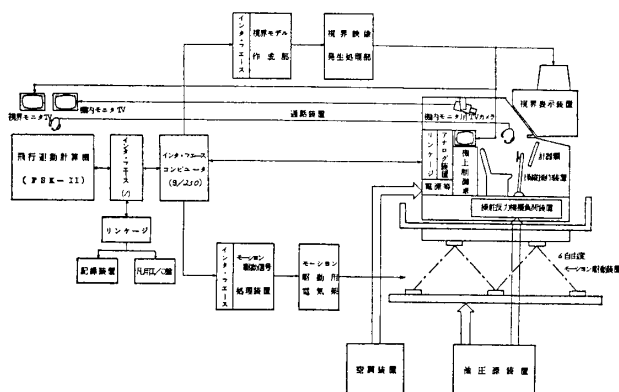


図5 STOL 実験機開発用フライト・シミュレータ系統図

ン試験の実施を指定する等シミュレータが実機飛行試験に代り得る役割を認め、それを拡大してきていると伝えられている⁸⁾⁹⁾。

従って訓練の領域でトレーナを抜きにしては操縦要員の養成及び技量維持が成り立たないように、航空機的设计・開発においてもフライト・シミュレータを使用しないと、単に開発の経済面・効率面・安全面で不利となるだけでなく、飛行性・耐空性の実証ができなくなる状況にきている。今後機体メーカも開発機に適用する新技術の設計確認試験設備としてシミュレータを備える必要があろうし、設計の要所要所はパイロット操舵を含むシミュレーション試験結果に基づいて定めるとい方向に変わっていくであろう。

2. フライト・シミュレータの役割

筆者等は操縦訓練の実際を論じる資格はないので、航空機的设计開発過程においてフライト・シミュレータが具体的にどのように使用されているかを米空軍及びボーイング社が1973~76年に開発した双発STOL (Short Take-off & Landing) 実験機YC-14の開発に即して¹⁰⁾以下に述べてみよう。

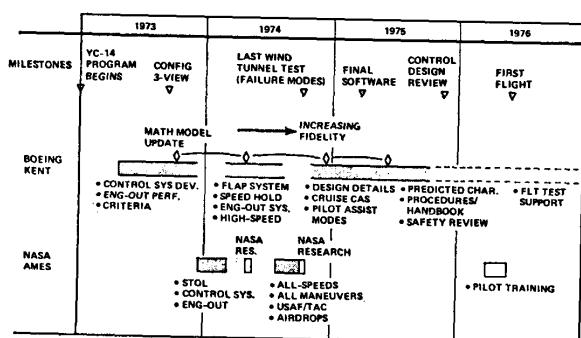


図 6 YC-14 開発のためのシミュレーション試験の実際¹⁰⁾

YC-14 型機は米空軍の将来型中型 STOL 輸送機 (AMST) プログラムとして1980年代の戦術輸送機を目指して開発されたものであり、610m の不整地滑走路に12.2トンのペイロードで経路角 -6° 、進入速度86ノットで着陸できる等の STOL 性能を実現するためにエンジン排気を利用した高揚力装置として USB (Upper Surface Blown) フラップを備え、自動飛行制御システムにデジタル3重系を採用するなど多くの開発要素を含んだ意欲的な設計となっている。

そのため開発の当初より、設計及びその確認のために開発の全期間にわたってほとんど定常的に飛行シミュレーション試験を実施している (図6参照)。試験内容に対応して2台のシミュレータ設備が使用されている。即ち、固定ベース (Fixed-Base) の中規模のシミュレータ (図6中 Boeing Kent と記した設備) 及び6自由度のモーションを発生できる大規模な可動 (Moving Base) シミュレータ設備がそれである。

前者は YC-14 同等の計器・操縦装置を備え、モノクロームの閉回路 TV 方式の視界模擬を行う設計試験用シミュレータであり、運動模擬計算は38K語のプログラムをフレームタイム 40msec で行なっている。この設備は機体メーカーである Boeing 社の保有設備であって、設計開発のために飛行シミュレータが必須不可欠になって来た事を示唆している。我が国においても飛行シミュレータの重要性が認識されてきて、各機体メーカーも自社試験設備としてシミュレータを整備する気運にあることは誠に慶賀すべきことである⁹⁾。

前掲図6によると、風洞試験データの補充に伴って数学モデルを改訂してシミュレーションの忠実度を高めながら約3年間にわたって個別設計試験を消化している。個々の試験内容は初期においては制御則の開発試験、エンジン停止時の性能確認、飛行性基準の開発試験、USB フラップ性能試験、自動飛行制御システムの各モードの機能確認並びにパラメータ決定等基本

的な要素試験が中心となり、後半になると臨界性能試験、パイロット操縦手順の決定、安全確認試験等要素試験結果を折込んだ総合性能試験或いは飛行試験の準備のための試験へと試験内容が移行している。かように設計者が一歩一歩設計を固めていく過程で、自由自在にほぼ定常的に使用できるシミュレータとしては、ここで用いられている規模の設備が最もふさわしいものと考えられる。

後者は NASA が所有する大規模シミュレータであり、設計のしめくりになる時点で総合的設計確認並びに飛行実験直前のパイロット訓練のために使用されている。本設備の計算機部 (XDS SIGMA 8) はフォートラン言語でプログラムでき、浮動小数点演算によって YC-14 の47K語に及ぶ運動計算プログラムをフレーム・タイム 48msec で処理している。

更に視界の模擬はカラー閉回路 TV 方式で現実感を高め、かつ6自由度のモーション・キューを発生でき、エンジン音その他操縦室環境の模擬が完備していて、総合的模擬レベルの高い設備である。従って要素試験結果を総合して、実飛行環境に近い条件で STOL 飛行特性、飛行制御システム、エンジン停止特性、運動飛行性能、戦術飛行ミッション等の確認並びに評価を行い、その結果を更に定常的シミュレーション試験に反映して両設備を有効に使用している。

設計用固定シミュレータは YC-14 製造担当のボーイング社のテスト・パイロットが搭乗し、NASA の総合試験用可動シミュレータには上記テスト・パイロット以外に開発機のユーザーである空軍のパイロットが多数参加する、というようにそれぞれの試験目的に応じた試験体勢を設定している。約3年間のシミュレーション試験期間に延べ16人のテスト及びライン・パイロットが参加し、ボーイング社の設計用固定シミュレータで400時間、NASA の総合試験用可動シミュレータに78時間搭乗して、数百種に及ぶ試験を消化した。(これに要する準備時間を含めると、この数倍のシミュレータ使用時間を費したものと考えねばならない。)

以上、その概要を述べた YC-14 の開発における飛行シミュレーション試験を振り返って、飛行制御系統の設計を担当した R. E. Spitzer は、数多くの先進開発要素を含む YC-14 のような機体の設計・開発においては「piloted simulator は不可欠の integral tool であった」と述べており¹⁰⁾、今後の航空機開発の実際がどのように行なわれるかを示唆しているものと言えよう。即ち、飛行シミュレーション試験は今後、風洞試

験、エンジン性能試験、構造強度試験と並んで、更に開発の進行のポイントとなる時点で設計の妥当性を確認し得る機能を發揮して、航空機開発を効果的に推進する中心的な役割を荷うことになるう。

3. フライト・シミュレータの技術課題

フライト・シミュレーション技術には大別して、図 7 に示す通り、対象機の数学モデルの構成及びそのリアルタイム演算に係る主として飛行力学並びに計算機技術の領域と、飛行模擬の忠実度に係るパイロットの感覚の領域がある。両者は密接に関連しており、この分類は極めて便宜的であるが、ここでは後者について航技研での経験に基づいて飛行・操縦の模擬方式に関する具体的技術課題を概観する。

3.1. 模擬操縱室裝置

トレーナは模擬対象機の操縦室の機器の配置、形状、寸度、塗装、可動範囲、特性等全てをできる限り忠実に模擬する事が使用目的に照らして極めて重要である。従って計器や操縦操作機器に実機部品が使用されることが多い。地方、設計・開発用シミュレータにおいては外観形状・寸度・塗装等より機能面の模擬忠実度の方が重要であるため、機器は対象機が異なっても汎用的に使用される事が多い。

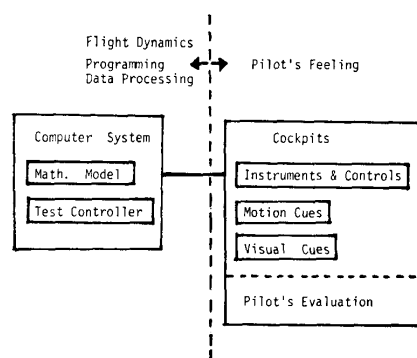
3.1.1. 操縦・操作機器

主要操縦装置並びにレバー・ハンドル類の設計で最も重要なのは操縦並びに操作を行なった時の感覚である。従来機械的な発条・ダンパーや電動モータで模擬されていた操舵反力（Feel と呼ぶことが多い）は最近図8に示すような電気・油圧サーボ機構によって模擬されるのが一般的である。操舵反力を模擬するための一般式には次の式が用いられている。

$$F = I\dot{\delta} + D\dot{\delta} + B \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} + f(\delta - \delta_{TRIM})$$

ただし F : 操舵反力, δ : 操舵量, I : 慣性係数
 D : 粘性摩擦係数, B : クーロン摩擦係数, f : 操舵
 力関数 (普通直線近似で勾配), δ_{TRIM} : トリム舵角

I , D 及び B は電気回路の可変抵抗器等による定数設定により可変であり, f の形はディジタル折線関数アルゴリズム (又はアナログ関数発生器) によって可変として, 対象機種に応じた任意の操舵反力が発生できる. 設計・開発用シミュレータにおいては, 操舵反力の設定範囲が広いことが望ましく, 装置の持つ汎用性の重要な要件である. 今日の技術水準でコントロール・コラム及びホイールの操舵反力の設定誤差は ± 5



7 Categories of FLIGHT Simulation Technology

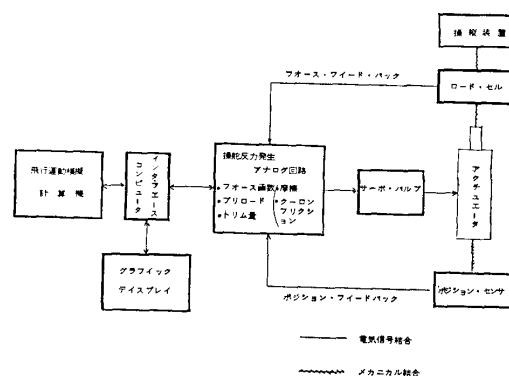


圖 8 操舵反力模擬負荷裝置系統圖

% (乃至± 2 LBS) 以下に抑える事が可能となっている。またフィールに望ましくない非線形特性があると、これにパイロットは非常に敏感で、飛行性の評価に重大な支障となる。更に油圧サーボ系の制御部の演算フレーム数が100回/秒以上でないと自励発振を起し、かつ速い操舵時のガタの原因となるので注意を要する。レバー・ハンドル類の操作反力は機械的摩擦によって与えるのが普通である。

最近の航空機は程度の差はあれ、自動操縦能力を備えているためシミュレータにおいても自動モードで、舵面駆動信号によって3舵は言うまでもなく、レバー・ハンドル類をも駆動する必要がある。

3.1.2. 計器表示

飛行シミュレータのパイロットにとって自機の状態を把握するための最大の情報源は計器表示である。現用の航空計器は長年の実用によって改良洗練されて来ており、特に飛行計器は多くの情報が1つのダイヤルに集約されて複雑な機構となっているため、シミュレータ専用計器を新規に設計するか、或いは実機用計器を使用するか（この場合は信号変換器が必要）の何れかの方法が経費とのトレード・オフで採られている。

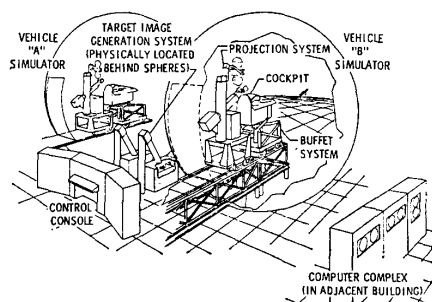


図9 コンパクト・シミュレータの一例
(NASA LANGLEY)

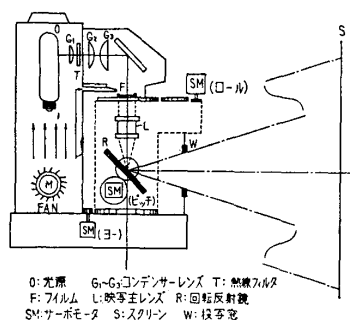


図10 スライドプロジェクタ原理図

計器指示の模擬に当って注意を要する事は、実機計器の動特性に合せて指示を行なうと同時に、後述のモーション装置や視界装置の動特性と整合性を保って、実機飛行の物理現象を再現しなければならない点である。実機搭載の空盒計器（気圧高度計、昇降計等）を電流計や電圧計で模擬した場合、模擬計器の動特性が良過ぎるためにパイロットが違和感を持つ事はよく起る例である。

新しい航空機の開発においてはボーイング 767 型機の CRT 型統合計器の採用に見られるように計器自体が開発要素になっている事が多いため、シミュレータの計器盤は着脱が容易な構造になっている事が望ましい。

3.1.3. 模擬操縦室の飛行環境

飛行模擬の忠実度乃至臨場感を向上させる補助手段として、照明、擬音、空調等の手段が動員され、就中エンジン音、警報・警告音、脚・フラップ等の形態変化に伴う騒音、接地音、エアフロー音等の擬音は心理的に大きな効果を持っている。

3.1.4. 試験効率向上のためのシステム構成

設計・開発段階での飛行シミュレーション試験においては、前述のように風洞試験の進行に応じて頻繁に空力パラメータをアップデートし、或いは制御則及び制御系のパラメータを幅広く変更して、最適設計点を捜すことが主眼となる。従って試験場合の設定変更並

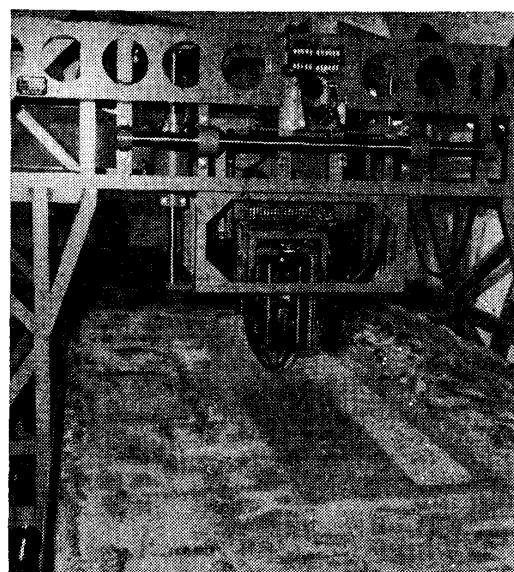


図11 滑走路模型—TV 方式視界模擬装置

びに各場合の試験結果の検討は効率良く進める事が肝要である。そのためには各装置を有機的に結合して、実験者の使用の便宜及び作業能率の観点を重視して、プログラム開発システム、入出力制御、試験データの記録及び表示、故障診断システム等のハードウェア並びにソフトウェアに関するシステム構成を行なう必要がある。

3.2. 視界模擬装置

トレーナ発達の古い時代から現在まで固定パノラマ風景画、スライド、映画、閉回路 TV、コンピュータ・グラフィックス、レーザー表示等あらゆる表示媒体を動員して空港域を中心とした視界模擬に努力が払われて来た。これは操縦訓練では、外部視界を手掛りとする離着陸操作訓練が大部分を占めるためであり、また設計・開発の分野においても飛行性・操縦性の評価を行なうためのクリティカルな操縦操作には、引起しや進入着陸のように視界情報が不可欠である場合が多いためである。ただし軍用コンパクト・シミュレータの場合には空戦訓練用視界として全天空及び下方を含む広域視界が必要となるので、球形ドームスクリーン等が使用されており¹¹⁾¹²⁾、(図9参照) ここで同列に論じることとはできないが、1章2節で触れたように今後は、CGI 方式で発生した多色高解像度視界を無限遠焦点表示器に投写する視界模擬システムが一般的となる傾向にある。

航技研では飛行シミュレーションを開始した当時は35mmのスライド・フィルムの映像に図10に示す如きスライド・プロジェクタによってピッチ、ロール、ヨー

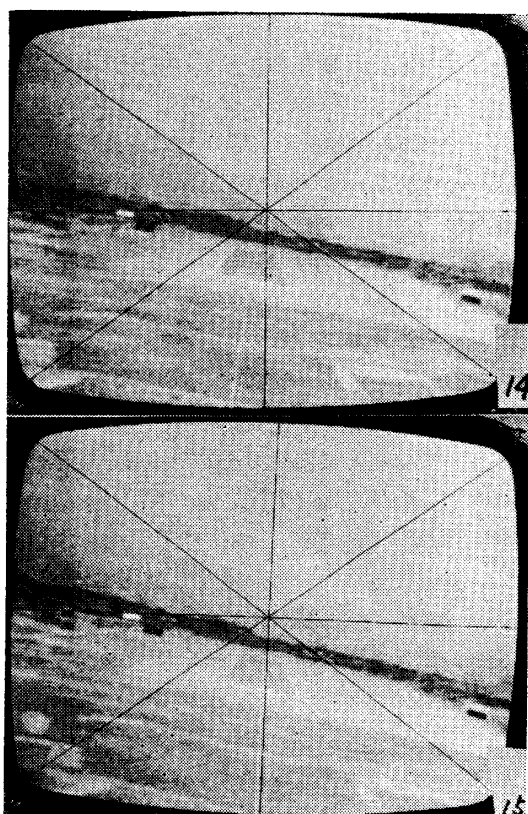


図 12 カメラのロール角駆動における横偏位補正

の3軸まわりの角運動を与えて、操縦席前方の透過式スクリーンに投影する方式を用いていた。しかしこの方式では前進、左右及び上下の位置変化を模擬できないため離着陸は不可能で、上空での姿勢変化の感覚を与えることができるのみであった¹³⁾。(前掲図4参照)

離着陸飛行を視覚的に模擬するためには線運動の模擬が不可欠であり、図11に示すように滑走路の縮尺模型上をモノクローム閉回路TVカメラがシミュレータ機と同じ姿勢で同じ航跡を「飛ぶ」ように駆動される方式の装置を製作して現在に至るまで使用して来た¹⁴⁾。

本装置に下記の改修を施して視界模擬性能の向上を図り一連の国産開発機のシミュレーション試験を実現して来た。

1) 分解能の改善：当初350本であった分解能を750本に改修し、ビデオ・イメージ・エンハンサーを組込んだ。また焦点距離を深くする必要上レンズを絞り込むため照明を増設した。

2) 投写器の改善：ビデオ映像の拡大投写器としてシュミット・レンズ、アイドホール、更に無限遠焦点表示器(前掲図3参照)の順に交換して視野の拡大、明るさ、奥行き感覚等の改善を図って来た。現在使用している模型・TV方式で得られる映像は画質の点で最も

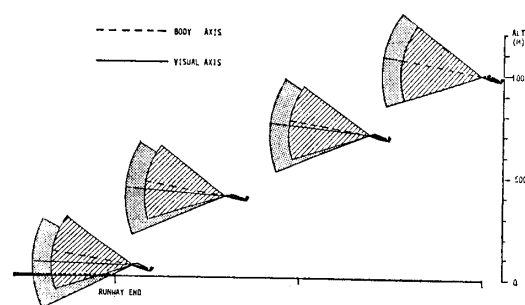


図 13 進入着陸時のピッチ角駆動の補正

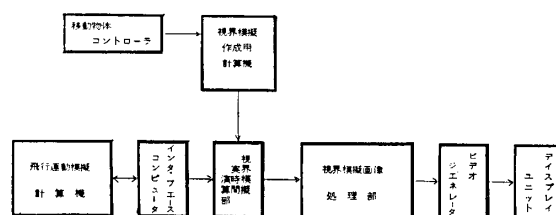


図 14 CGI 視界模擬方式の系統図

優れているが、模型照明用大電力並びに可動部の保守等を要する点で難点がある。最近レーザー・スキャン方式のビデオ機器が使用されるようになり、使用電力については問題が解決する可能性がある。

3) カメラ駆動方式の改善：撮像管の中心を角運動の中心とする機構のためロール角運動を模擬するためのカメラ駆動によってコース偏位を錯覚させることになるので(図12参照)それを打消すための補正、更に上下視野が狭いため大迎角での最終進入時には目標接地点を見失うので、カメラのピッチ角運動に図13に示す下方への補正を施した¹⁵⁾。

現在は模型・TV方式とCGI方式が共存して使用されているが、今後主流となる傾向にあるCGI方式は、コンピューター・グラフィックスの性質上、その画質は映像の実時間処理性能によって左右される。光点処理による夜景から出発して現在では昼景も実用されるようになった。昼景の場合、模型・TV方式による視界や自然景と比較するとモザイク的視界となるため違和感があるが、映像発生部の実時間処理能力の向上によって画質の向上が期待できる。

昭和56～57年度にわたって航技研が整備を進めているCGI方式視界模擬装置は図14に示す構成で下記の性能を有している。

- 1) チャンネル数/ウインド数・前方1チャンネル2ウインド及び側方1チャンネル1ウインド
- 2) 視野：1ウインドに付き水平 $42^\circ \times$ 垂直 26°
- 3) 映像更新：30^{Hz} (画面遅れ67msec)
- 4) 画素数：4000エッジ+4000光点/2チャンネル

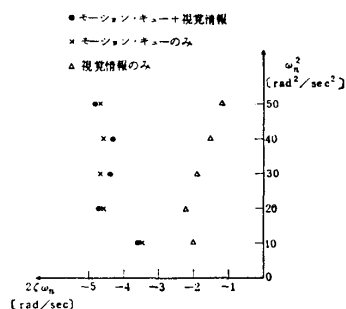
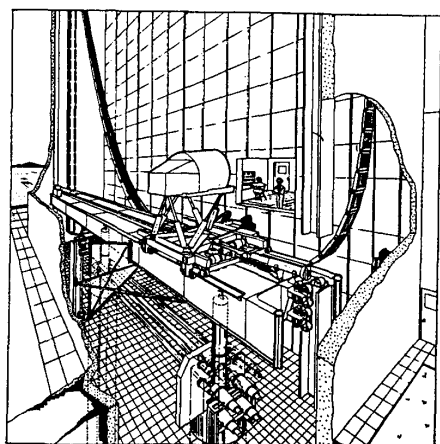


図 15 操縦限界の比較

図 16 Vertical Motion System
(NASA Ames)

- 5) カラー表示：64色，8色調，明暗 256 レベル
- 6) 隠顕処理：128 レベル
- 7) 特殊映像効果：スムーズ・シェード，スムーズ・フェード，スムーズ・エッジ等
- 8) 輝度：3.5FL
- 9) 汎用性：対話型データ作成，移動物体制御可，汎用物体発生プログラムのライブラリー化等

3.3. モーション発生装置

操縦や手動制御のシミュレーション試験においては一般にモーション・キュー (cue) が与えられていると人間オペレータの制御限界が図15に示すように拡大される。この場合のモーション・キューの効果は手動制御特性に進み動作，即ち進み特性を与えて中枢での負担を軽減するためと考えられる¹⁶⁾。

従って飛行シミュレーションにおいても，モーションを模擬した条件で訓練なり試験を行なう方がより有効であると考えるのが普通であるが，問題は発生されたモーション・キューの質であって，3次元的に運動している航空機の運動を実験室で物理的に再現することは装置のコスト有効性にも関連してほとんど不可能に近い。不完全なモーション・キューはかえってパイロットの操縦並びに評価を誤らせる結果となる。使用

できるモーション発生装置の規模・性能の範囲内で，試験場合に対応した最もふさわしい駆動方式を開発する事が急務となっている。

例えば NASA Ames R. C. に設置された最新のモーション発生装置は V/STOL 機やヘリコプターの開発に使用することを主眼としているためもあるが，図 16に示すように上下，左右方向の線偏位の可動範囲をそれぞれ 60ft (± 1 G)，40ft (± 0.75 G) と極端に大きくとっている¹⁷⁾。

航技研ではトレーナとして広く使用されている共働型 6 自由度モーション発生装置を整備する計画を進めているが，2 m 弱の線偏位で $\pm 0.7 \sim 0.8$ G を発生できるので短周期の G 変化 (突風応答，エンジン故障時の横力等) は模擬できても，持続的な G 変化の模擬はできない。従って見掛けの可動範囲を拡張するための Washout 回路や駆動軸間のカップリング駆動によって実機とは異なるいわゆる False Cue を除去する方式等を開発していく必要がある。更に小型高性能機の場合にはモーション・キューとして前庭器^{注3)}刺激を主体とするコクピット全体を駆動する方式を採らず，与圧服，座席の座・背面を圧迫する G シート，更にヘルメット重量を制御する G ヘルメット等によって運動感覚を発生することを試みている。

飛行性の評価においては前述の YC-14 の場合，操縦システムの故障やエンジン故障等急激な機体運動を伴う場合の評価はモーション・キューがあると，固定ベースでの試験に較べて，パイロット・レイティングで 1～1.5 程度良くなっている。従って開発段階での試験はモーション・キューのない条件で行なった方が安全側の評価が得られるという見方もできるが，他方臨界耐空性の評価や，緊急時の操縦手順の決定等のクリティカルな試験においてはモーション・キューがないと設計の判断を誤る危険もあるので，モーション発生方式及び装置，更にその運用に関して開発課題が山積している現状であると言わねばならない。

おわりに：航空機の設計開発の領域を中心にフライト・シミュレータ利用の現状と技術課題の概略を述べた。飛行シミュレーション技術は多くのジャンルにわたる総合技術であるため，小論はその一端に触れたにとどまる。航空機開発能力の一翼を荷うことになるこの分野で，広く関連分野の諸賢による討論が活発になる事を期待する次第である。小論もその一石となれば幸である。

注 3) 前庭器：内耳器管の内て三半器管及び耳石。

参 考 文 献

- 1) D.M. Haward : The Sanders "Teacher", Flight, December 10, 1906 (1910)
- 2) H.H. Valverde : A Review of Flight Simulator or Transfer of Training Studies, 15-6, 510/523 (1973)
- 3) FAA : Advanced Simulation, Federal Register Part V, June 30 (1980)
- 4) 鳥飼他 : 特集・航空機設計開発におけるシミュレータの利用, 日本航空宇宙学会誌, 24-271, 359/389 (1976)
- 5) G.B. Ringham et al : Flight Simulators, The J. of Royal Aero. Soc., 58-518, 153/172 (1954)
- 6) G.H. Perry et al : Flight Simulation for Research, The J. of Royal Aero. Soc., 68-646, 645/662 (1964)
- 7) K.J. Staples : Current Problems of Flight Simulators for Research, Aero. Jour., Jan. 1978, 12/32
- 8) 鷺津 : 飛行性に関する最近の 2, 3 の話題, 日本航空宇宙学会誌, 30-337, 65/77 (1982)
- 9) 大嶋他 : 航空機設計用フライト・シミュレータの開発について, 第 19 回飛行機シンポジウム講演集, 212/215 (1981)
- 10) R.E. Spitzer : Use of the Flight Simulator in YC-14 Design, AGARD CP-198 (1976)
- 11) 別府他 : 米国におけるコンバット・シミュレータについて, 第19回飛行機シンポジウム講演集, 200/215 (1981)
- 12) 増田 : 視界装置の動向, 同上, 204/207 (1981)
- 13) 松浦他 : 汎用飛行シミュレータ設備の計画, 構造および特性, 航技研報告 TR-70 (1965)
- 14) 樋口他 : VTOL 機操縦研究設備, 航技術研報告 TR-169 (1968)
- 15) 川原他 : 無限遠表示による単窓模擬視界と心理学的フィルターについて, 第18回飛行機シンポジウム講演集, 338/341 (1980)
- 16) 航技研人間工学研究室 : 手動制御中のパイロットにおけるモーション・キューの効果に関する研究, 航技研報告 TR-495 (1977)
- 17) ー : Vertical Motion Simulator, Simulation, 64/64, Feb. (1976)