

高専教育のための飛行シミュレータの開発

Development of a Flight Simulator for College Education

田中 敬司¹⁾

Keiji TANAKA

Abstract: A flight simulator for educational purposes has been developed to be utilized as a basic facility of the Aerospace Engineering Course of Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology (CIT). This paper deals with research and development of this flight simulator. Modern flight simulators have been introduced not only as flight trainers but also as aircraft design tools. It is also useful to apply the flight simulator to college education by making use of its real time calculation of accurate responses of flight dynamics and its realistic human interfaces. In this context, the designed flight simulator was aimed at using for practices of learning dynamics, and for actual flight training of an aircraft such as the glider being manufactured by the students targeting the Birdman Flight Contest. The system is comprised of a personal computer and a set and control devices. The newly developed software includes functions of real-time control management, numerical integration of 6 degrees of perturbed differential equations, virtual control panel, real-time data recording, and graphical instrument panel. Advantages of this simulator include easily modifiable programs, and a simple setup with minimum cost. Examples of application of the simulator as well as future courses of its improvement are also mentioned.

Keyword: flight simulator, aircraft dynamics, aeronautics, college education

1. はじめに

飛行シミュレータは、飛行訓練を補完するために実機の操縦席部を用いて地上で操縦操作を行わせたことを起源としている[1]。爾来、同装置は簡便で安全な操縦訓練手段として発達してきた。現在では、空力的動力学的な飛行運動だけでなく、航法管制を含む運航全体をカバーする高性能かつ高い模擬レベルが実現され、航空会社等において乗員訓練に使用されている。また、設計段階の機体の飛行特性や極限的な状況での飛行性能を安全かつ詳細に推定できる有力な設計ツールとして、航空機の設計開発用のエンジニアリング飛行シミュレータが用いられている[2]。

飛行シミュレータは機体を製作して実際に飛行させることなく飛行性能の見通しを得ることができるため、教育研究にも有用である。従来は製作、整備に要するコス

トの面から、飛行シミュレータを設置している教育機関は限られていた[3]。しかし、パソコンの大幅な性能向上及び周辺機器の低価格化を背景として、高等専門学校等で進められている実践的工学教育にも飛行シミュレータを利用できるようになった。こういった状況を踏まえ、市販の安価で高性能なハードウェアとソフトウェアを最大限に活用して、教育研究用飛行シミュレータの開発を進めた。

本校の航空宇宙工学コースでは、航空宇宙工学を若年から学ぶ高専唯一の専門コースとして、ものづくり人材の育成／実践的教育に取り組んでいる。現在とくに、実験・実習と講義の密接な関係を図った教育プログラムの構築を模索している[4]。本稿では、実際の滑空機等の開発や訓練に活用するだけでなく、力学の分野の講義に実験・実習の要素を取り込むことのできるツールとして飛行シミュレータを位置づけ、その概要を報告する。

¹⁾ 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

2. 教育研究用飛行シミュレータ

2.1 開発目的と経過

高専の工学教育は、通常講義を通した理論的概念的な理解と、それに並行した実験・実習を通した実践、すなわち自ら設計したものを製作し動作させることによる理解が相補うように組み立てられる。例えば制御工学では、制御理論の一方で、ハードウェアを使用した実験だけでなくMATLAB(The MathWorks社)等を活用したシミュレーションで視覚的に理解することが可能である。同様に、飛行力学を中心とする航空工学分野においても、飛行力学の学習に並行して飛行シミュレータを利用すれば機体の運動や機器の挙動を効果的に把握することが可能である。

このような教育研究用の飛行シミュレータは、より具体的には以下のことができなくてはならない。

- (1)学生自らが航空機の運動方程式のプログラムを作成し、実時間飛行から体験的に学習する。
- (2)飛行時間記録から空力係数で表現された航空機の特徴を把握する技術を習得する。
- (3)学生自ら作成した飛行制御システムを含めた航空機の性能評価を実施する。

本飛行シミュレータは、これらを実現することを目ざして開発した。開発に当たり、とくに以下の点に配慮した。

- (1)整備さらには複製が安価で迅速に可能となるように、入手の容易な市販のハードウェア及びソフトウェアを最大限に活用する。
- (2)ソフトウェアの開発においても、普及し事例の豊富なマイクロソフト社のWindowsをプラットフォームとする。
- (3)MATLAB等の既存の工学解析ソフトとのデータの接続が容易となるように考慮する。
- (4)飛行力学の機体開発や解析、グラフィックソフトウェアの開発評価の際に、専門的予備知識を多くは必要としないようなプログラム構成とする。

飛行シミュレータはその用途に係らず、正確な力学モデルと、精密な実時間管理が飛行シミュレーションの前提であることは言うまでもない。本飛行シミュレータでは、精密に時間管理ができるように工夫した実時間演算制御部を開発した。飛行運動演算部と、入出力制御部分は実時間演算制御の管理の下で周期的に実行される形で作成した。

機体モデルは、既存の航空機に関しては公開されたデータ[5]等から引用して利用している。一方で、本校の人力飛行機研究部の滑空機の機体モデルは、主翼翼型、機体形状、飛行記録から推算して作成された[6]。

2.2 システム構成

本飛行シミュレータの全体構成を図1に示す。演算装置及び画像発生装置として通常の汎用パソコンを中心に置く。その入力機器として、操縦装置(コラム、ヨーク、ペダル)、スロットル、その他のスイッチ類といったUSB接続可能な市販の操作機器を配置する。模擬視界と計器表示は、パソコンの通常のディスプレイ端末あるいはプロジェクタ1台でグラフィック表示させる。マルチウィンドウの複数台に表示することも可能である。シミュレーション制御用スイッチは、画面上の「飛行シミュレーションモード制御パネル」に表示され、マウスで操作する。

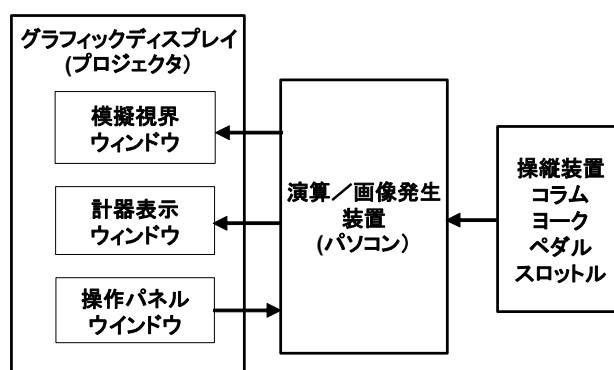
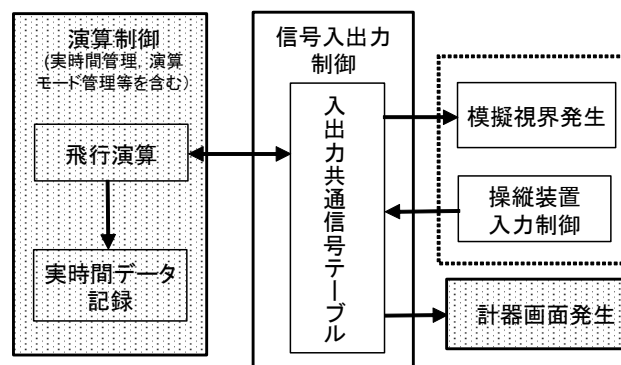


図1 システム構成



ドット部は新規開発部分、白抜き部は既存のソフトウェアである。

図2 ソフトウェア機能構成

2.3 ソフトウェア構成と機能

ソフトウェアの構成を図2に示す。現時点ではシミュレーション実行時には、オペレーティングシステムの下で大別して次の4つのソフトウェアが同時に並行して実行される。

- (1) 飛行シミュレーションプログラム

この中には、演算制御プログラム、飛行演算部、実時間データ記録部がある。

まず、演算制御部は、ディスプレイ上の「開始」、「停止」、「リセット」等のスイッチの状態に基づく飛行シミ

ュレーションの制御及びサイクル時間に基づいた実時間管理を行う。飛行シミュレーション制御の方法は、実時間演算中でもシステム制御が可能となるように、また、機能拡張や応用が容易となるように、オペレーティングシステムの提供するタイマーを利用したイベント駆動方式とした。その一方で、時間管理では、精密カウンタを利用して厳密な実時間性を確保した。

飛行演算部では、初期値設定後は、入力取り込み、飛行機の6自由度運動方程式による加速度、その数値積分としての速度、位置、姿勢の計算、結果出力をそれぞれサイクル時間毎に1回実行する。

さらに、飛行シミュレーション中は、実時間データ記録部により任意のデータをサイクル時間毎にファイルに書き出すことができる。作成されたデータファイルは、Excelによって読み取ることができ、飛行シミュレーション終了後の時間履歴作成、統計処理等に供される。

(2) 信号入出力制御部

入出力信号テーブルの読み出し書き込みを行う既存のソフトウェア(FSUPIC[7])である。この入出力制御部を介して、同時に実行されているプログラム同士がテーブル上のデータの授受を行う。

(3) 模擬視界発生及び操縦装置入力部

既存のソフトウェア(Microsoft Flight Simulator 2004)を利用して、飛行前方視界を表示し、またエレベータ、エルロン、ラダー、スロットルからの信号を受け取ることができる。

(4) 計器画面発生プログラム

5個の基本飛行計器を描画したウィンドウである。ウィンドウに表示される計器は、通常のT型に配置した。左上から右に、速度計、姿勢計、高度計、中央下の方位計、右下の昇降計である。Windowsのグラフィック機能を活用して従来型の基本飛行計器をカラー表示のものと白黒の簡便なもの二種類を作成した。表示される飛行情報の値は信号入出力制御部を経由して0.1秒毎に取り込まれる。

2. 4 飛行機の運動方程式

現在用いている運動方程式は、釣り合い飛行からの微小擾乱を仮定した線形の6自由度の機体軸周りのもの(剛体の運動方程式)である[8]。このため、模擬の対象となる飛行機の数値データとしては、28個の安定微係数の他、定常速度、定常経路角、定常ピッチ姿勢角が必要である。初期高度、初期方位角、初期位置等も計器パネル及び視界表示のために必要である。

運動方程式から算出した3軸方向の加速度と3軸周りの角加速度を2回積分してサイクル時間後の位置と姿勢角を求める。地球座標系への変換にはクォータニオンを用いている。この部分のプログラムはC++の一つの関数の中にまとめて記述されているため、C++あるいはCの技法に習熟していない学生でも追加変更が容易である。

また、運動方程式の関数部分その他を自ら作成することもできる。

2. 5 実現した飛行シミュレータの機能性能

一組の操縦席を図3に示す。図4は操縦装置であり、ペダル、操縦輪、センタペデスタルを配置している。また、画面表示例を図5に示す。図中の右上に「飛行シミュレーションモード制御パネル」を表示している。この上のスイッチをマウスでクリックすることで、飛行シミュレーションを開始、停止、あるいはリセットできる。



図 3 模擬操縦席

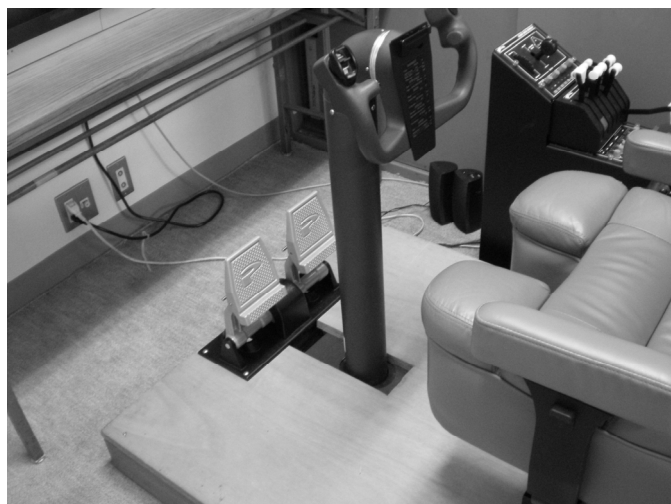


図 4 操縦装置



図5 計器パネルと視界表示例

表1 飛行シミュレータの機能・性能のまとめ

事項	機能・性能
サイクル時間	0.01秒以下
運動方程式	線形6自由度, 安定微係数入力
入力	三舵及びスロットル
表示	操縦計器パネル, 前方外部視界, 飛行シミュレーションモード操作パネル
計器情報	5個の基本飛行計器情報(速度, 高度, 昇降率, 姿勢, 方位角)
実時間データ 記録	任意の時間範囲で予め指定した飛行デ ータを取得可能
ハードウェア	パソコン1台, 操縦装置(USB接続)1式, 固定座席1台, 表示装置(グラフィックディスプレイ あるいはプロジェクタ)1台
ソフトウェア	飛行シミュレーションプログラム, 計器画面発生プログラム, Microsoft Flight Simulator 2004, FSUIPC[7]

また, 図5の中の下方は計器パネルのウィンドウである.

本飛行シミュレータの主な機能・性能を表1にまとめる.

3. 飛行シミュレーションの教育への応用

本飛行シミュレータの最も基本的な使用方法是, 水平飛行状態から各舵面をパルスあるいはステップ状に操作して飛行運動を励起し, その周期や減衰状況を操縦席の位置からの視界及び計器の動きで観察することである. 飛行機の固有振動モードの定量的な確認, あるいは, より詳しく解析するためには, 速度, 姿勢角等の時間履歴

を記録してグラフ化することになる. 図6は大型機の飛行シミュレーションでコラムのステップ操作により生じた縦の運動の例をグラフで表示したものである. この図から, フゴイド(長周期運動)の周期と減衰率を読み取ることができる.

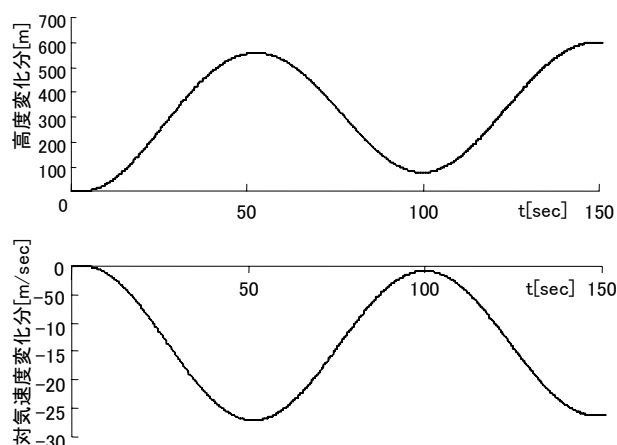


図6 飛行運動履歴の例(コラム引きに対するステップ応答)

実機を模擬し, その機体特性の評価や操縦訓練に使用することも本飛行シミュレータの重要な応用である[9]. 本校の滑空機の飛行シミュレーションに適用した例[6]は, 実機にける重心移動によるピッチ姿勢制御をコラム操作で代用した初期的な試みである. 図7の実線で示された軌跡は滑空機モデルの飛行シミュレーション結果の内比較的長時間飛行した場合の時間軌跡である. 同図中に, この結果との比較のために, 2006年の実際の飛行映像記録から再現した飛行高度の時間軌跡を破線で示す. 前述の推算機体モデルによって実飛行時とほぼ同様の機体の運動が再現されている.

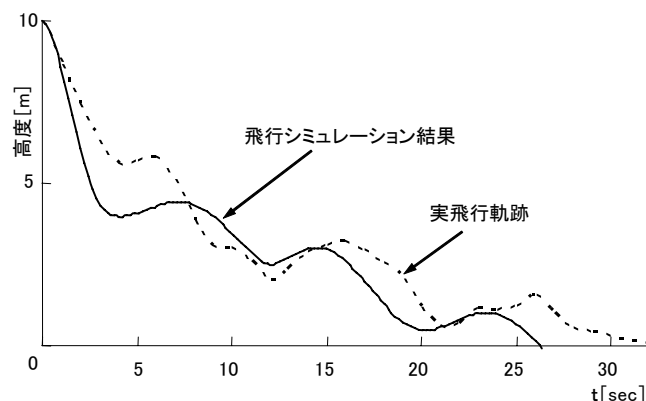


図7 飛行シミュレーション結果例と実飛行時の高度軌跡の比較[6]

しかし、これらの応用の試みを通じて、本飛行シミュレータの課題が明らかになってきた。現在は、力学モデルの構造が平易であること、データ入手の容易なことなどの観点から線形の運動方程式を使用している。これは通常の飛行運動の再現と分析のためには有効であるが、失速現象、空気密度の影響、フラップ操作等機体形状の変化を連続して模擬することはできない。一方、進入及びフレア、接地までの着陸のシミュレーションを実施するためには地面座標系を定義し、かつ脚の運動モデルを作成する必要がある。また、滑空機用の飛行運動では水面による地面効果の影響が大きいので、これを考慮しなければ精度良い飛行シミュレーションが行えない。

本飛行シミュレータの機能を拡張してこれらの課題を解決する試みを継続している。これまでは空中での定常飛行以外からシミュレーションを開始することはできなかったが、簡略化された脚モデルの整備[10]が完了し、また着陸までの誘導制御機能[11]を付加した航空機の自動飛行と自動着陸による着陸、接地、走行のシミュレーションを実施できるようになった。また、滑空機のシミュレータについても、機体モデルに地面効果の影響を付加すると共にパイロットの重心移動量を実際の操縦席から取り込む機能を追加し、操縦訓練に使用できる装置の実現を目指した整備を進めている。

4. おわりに

航空機の飛行運動を再現できる飛行シミュレータを開発した。実現した飛行シミュレータでは、プログラム作成に慣れていない学生でも航空機の運動方程式の組込み及びディスプレイ描画が可能である。また、既存のパソコンに今回開発したソフトウェアと市販のソフトウェア及び操縦装置を組み込むことで、容易にかつ安価に本飛行シミュレータを構成できる。これらの特長から、本飛行シミュレータを現在構築中の教育プログラムにおいて実践的教育手段として位置づけることが可能である。また、飛行力学の教育だけでなく乗り物を含む広範な力学の運動を実時間で再現解析するための設計・解析・教育用の共通のツールとして利用することも可能と思われる。

本稿を終えるに当たり、本システムの開発に協力いただいた大島達也氏、中山政克氏、中村環樹氏、若月太蔵氏、吉見弘光氏に感謝申し上げる。

なお、本飛行シミュレータは教育を目的としてソフトウェア等を利用している。

の飛行シミュレーション試験, 航空宇宙技術研究所報告, TR-713, 1982.

[3] 片柳 亮二, 竹中 千温, 山田 晃ほか: 金沢工業大学のフライトシミュレータ設備について, 第44回飛行機シナポジウム講演集, 814-821, 2006.

[4] 小出 輝明, 諏訪 正典, 飯野 明, 田中 敬司: 都立産業技術高専 航空宇宙工学コースにおける中長期教育計画と流体力学研究, 数理科学会論文集, Vol.9, No.1, pp.27-30, 2007.12.

[5] R. L. Heffley & W. F. Jewell: Aircraft Handling Qualities Data, NASA CR-2144, 1972.

[6] 大島 達也: 飛行シミュレータを用いた滑空機の縦運動特性の解析, 産業技術高専平成19年度特別研究論文, 2008.

[7] FSUIPC(<http://www.schiratti.com/dowson.html>).

[8] 加藤 寛一郎, 大屋 昭男, 柄沢 研治: 航空機力学入門, 東京大学出版会, 1982.

[9] 桑原 正幸, 小高 裕樹, 杉崎 巧弥ほか: 滑空機用フライトシミュレータの製作, 航空高専平成17年研究紀要, Vol.43, pp.99-101, 2006.

[10] 中山 政克: 航空機の着陸シミュレーション, 平成19年度卒業研究報告集, pp.29-30, 2008.

[11] 中村 環樹: フライトシミュレータ用オートパイロットの設計・製作, 平成19年度卒業研究報告集, pp.27-28, 2008.

[12] 田中 敬司, 大島 達也: 教育研究用飛行シミュレータの開発, 日本人間工学会 48 回大会講演集, Vol.43, pp.130-131, 2007.

文献

[1] J. M. Rolfe: Keeping up on the Ground, Aeronautical Journal, pp.281-292, 1977.

[2] STOL プロジェクト推進本部: 航技研 STOL 実験機