

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1386

乗員行動解析ツール
その1 動作実行機能及び操作手順遂行機能

村岡浩治

1999年6月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

乗員行動解析ツール*

その1 動作実行機能および通常操作手順遂行機能

村岡浩治**

Simulation Tool for Analysing Crew Behavior -Part 1: Actions and Procedural Tasks -

Koji Muraoka**

ABSTRACT

This paper deals with an attempt to develop a crew behavioral model in an automated cockpit for use as an analytical engineering tool for issues including flight crew human factors. The model enables simulation of both physical and cognitive characteristics of human pilots. For the initial phase of development, a crew behavioral model with the ability to simulate actions and perform normal procedures was constructed in addition to the operational environment structure. The model was applied to reconstruction of an accident and simulation of an approach flight under normal procedures. Simulation results demonstrated that the model is able to provide a sequence of pilot behavior as a three-dimensional animation, with additional information such as cockpit verbal communication and flight status, in addition to the feasibility of the tool providing analysis of flight crew human factors.

Key words: *Human Modeling, Simulation, Aircraft Operation, Procedures, Accident Investigation*

概 要

航空ヒューマンファクタ解析の基盤技術確立を目的とし、乗員の物理的及び認知的特性を計算機上にモデル化した乗員行動解析ツールの開発を行った。本ツールは、コックピット内における乗員の行動シナリオおよび飛行状態を3次元アニメーションとして提供するものである。ここでは、コックピットを含んだ航空機モデルおよび乗員モデルを作製し、スイッチ操作などの動作および通常操作手順の模擬を可能にした。本ツールを、航空機事故における乗員行動の再構築及び通常操作手順の評価に適用し、ヒューマンファクタ課題の解決に利用可能なことを示した。

略 語		GA	Go Around
AP	Autopilot	ILS	Instrument Landing System
ATC	Air Traffic Control	NASA	National Aeronautics and Space Administration
CAP	Captain	MIDAS	Man-machine Integrated Design and Analysis System
CVR	Cockpit Voice Recorder	NAV	Navigation
DFDR	Digital Flight Data Recorder	ND	Navigation Display
FCU	Flight Control Unit	PF	Pilot Flying
FO	First Officer	PFD	Primary Flight Display
FMS	Flight Management System	PNF	Pilot Not Flying
FSPK	Flight Simulation Program of Kohgiken		

*平成11年3月10日受付 (received 10 March, 1999)

**飛行研究部(Flight Division)

1. はじめに

近年のアドバンスド・テクノロジー機と呼ばれる航空機の出現により、先端技術を反映したコックピットの自動化が一層進展した¹⁾。この結果、乗員のワークロードが軽減されるとともに、従来に増して安全かつ効率的な運航が可能となった。しかしながら、その一方で、1994年名古屋で発生したエアバスA300-600の事故や1995年にコロンビアの力にて発生したボーイングB757の事故に代表されるような、自動システムと乗員との関わり起因すると考えられる新たな事故も発生しており、今日、運航安全のより一層の向上のためにヒューマンファクタに関わる課題を解決することが急務であることは世界の航空界の共通認識となっている。自動化されたコックピット内での乗員の作業は、従来の手動操縦を中心としたものから、オートパイロットのコマンド入力や飛行管理装置(FMS: Flight Management System)へのデータ入力、それらのシステムの作業状態の監視等の、スーパーバイザリ型の作業が中心となっている。このため、特に自動化コックピットでのヒューマンファクタの課題は、人間の認知的特性にもとづいたうえで扱うことが必要であると言われている²⁾。

航空宇宙技術研究所では、航空安全・環境適合技術の研究の一環として、航空ヒューマンファクタに関する基盤技術の確立をめざした研究を推進している³⁾。乗員行動のモデル化に関しては、1980年代にパイロットの監視型行動を階層モデルで表したモデルを開発した例がある⁴⁾。ここでは、ラスムッセン(Rasmussen)の階層型行動モデル⁵⁾にもとづいてパイロットの操作手順遂行行動及びスキル規範行動を計算機上にモデル化しワークロードの推定に用いた。

近年の計算機技術の急速な進歩により、演算性能や描画速度が著しく向上した。この技術を利用して人間の特性を組み込んだ設計・解析ツールが製品化されている。このようなツールのほとんどは人間の身体寸法にもとづいた作業空間解析などを行う電子的マネキン・パイロットと称されるものであり、すでに航空機製造会社のコックピット設計現場などでも利用されている⁶⁾。一方で、米空軍および航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)は、ヒューマンファクタに関わるエンジニアリング・ツールとしてMIDAS (Man-machine Integrated Design and Analysis System)を共同で開発している^{7,8)}。MIDASでは、乗員とコ

ックピット機器との関わりについてのシミュレーションが可能である。MIDASは、乗員の身体寸法、視野、判読性、知覚過程、意思決定過程等、物理特性及び認知特性の両方を組み込んだツールである。このツールを用いて行った設計及び解析として、将来型の航空管制システムにおける乗員性能の推定やヘリコプタのコックピット設計などが報告されている。

本研究では、これまでの航技研における研究成果に基づいて、乗員の身体寸法等の物理的特性および情報処理等の認知特性を計算機上にモデル化し3次元グラフィックを用いた乗員の行動解析を行うツールを提案することを目的とする。本研究で開発するツールは、MIDASのような航空機のハードウェア設計から乗員の性能解析までを応用範囲とする包括的なツールではなく、運航環境における乗員行動のシミュレーションに特化したものを目指している。本ツールは、コックピット内における乗員の行動シーケンスおよび飛行状態を3次元アニメーションとして提供するものである。このツールによって、飛行シミュレーションや飛行実験を実施する前の事前評価が計算機上で可能になる。航空機事故・インシデント解析、操作手順の設計あるは改修時の評価、パイロット地上訓練用ユーティリティなどを、本ツールの応用先として考えている。

本報告では、開発の第一段階として制作した航空機モデルおよび乗員モデルとその機能について記述する。現在の乗員モデルでは、スイッチ操作などの動作および通常操作手順の模擬が可能となる。本ツールを、航空機事故における乗員行動の再構築及び通常操作手順の評価に適用しその実用性について検討した。

2. 乗員行動解析ツールの構成

2.1 概要

まず、乗員行動解析ツールの概念について記述する(図1)。本ツールの目的は、コックピット内における乗員行動のシミュレーションを行うことである。したがって、基本となる構成要素は乗員モデル及び運航環境モデルである。乗員モデルには人間の物理特性および認知特性が組み込まれる。物理特性は例えばパイロットの身体寸法や幾何学的姿勢、動作に要する時間などである。また、認知特性は、情報処理過程や意思決定などである。運航環境モデルには、航空機モデルとしてのコラ

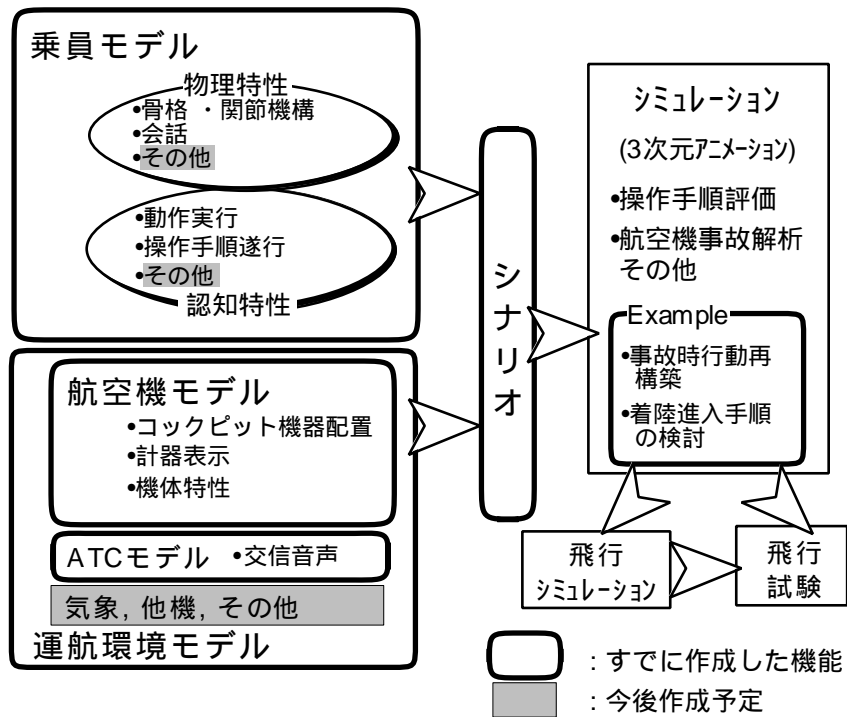


図1 乗員行動解析ツール概要

ム・ホイールやスイッチ等のコックピット機器配置，計器表示内容，機体のダイナミクスおよび機体搭載システム等の機能が含まれる。そのほかに，気象，航空管制なども運航環境モデルに含まれる。乗員行動のシミュレーションを行うためには，乗員のタスクを記述したシナリオを用意する必要がある。シナリオで指定された作業に従って，乗員モデルが運航環境モデルの中で作業を行う。シミュレーション結果である乗員の行動シーケンスおよび機体の挙動は，3次元アニメーションおよび計器表示等の形で出力される。

以上の機能のうち今までに，運航環境モデルとして航空機および航空管制交信音の模擬機能を，乗員モデルとしてスイッチ操作などの動作実行機能および操作手順実行機能を整備した。以下に，これらのモデルについてまとめる。

2.2 運航環境モデル

運航環境モデルは，航空機モデルおよび航空管制モデルにより構成される。航空機モデルはさらに，(1) コックピット機器配置，(2) 機体特性および(3) 計器表示から構成される。

2.2.1 航空機モデル

(1) コックピット機器配置

コックピットの物理形状を3次元空間上に定義し

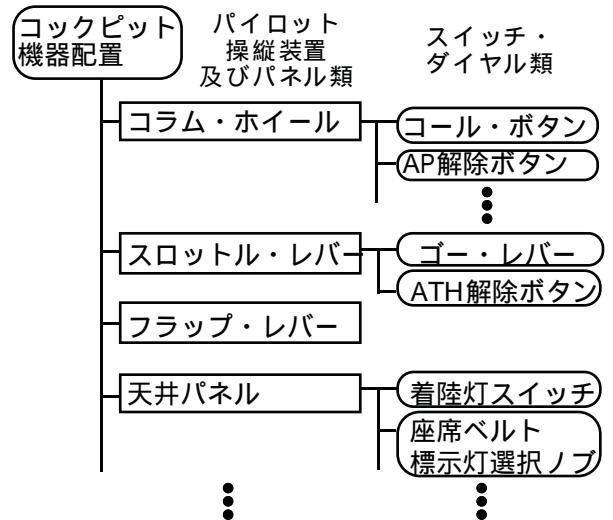


図2 コックピット機器配置の定義

た。コックピット機器配置は，コラム・ホイール，スロットル・レバー，フラップ・レバー，正面計器パネル，天井パネル等のパイロット操縦装置及びパネル類と，これらに付属するスイッチ及びダイヤル類により構成した(図2)。パイロット操縦装置及びパネル類は，それぞれ3次元形状データおよびコックピット配置位置によって規定した。また，これらを乗員モデルが操作する際に接触する点(以下，接触点)も機器ごとに定義した。コラム・ホイール，スロットル・レバー，フラップ・

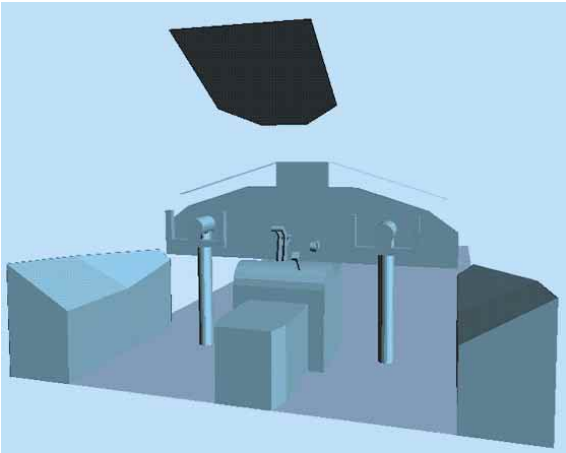


図3 コックピット機器配置

レバー、ギア・レバー等の可動機器については、乗員モデルによる操作や機体の飛行状態にもとづいて、操作角度等が変化するものとした。天井パネルや正面計器パネル、コラム・ホイール等に配置されるスイッチおよびダイヤル類については、3次元の形状及び配置位置は定義せずに、オン・オフ等の状態とそれが属するパイロット操縦装置及びパネル類の名称で規定した。例えば、着陸灯スイッチは、天井パネルに属し、オンあるいはオフの状態をもつものとした。乗員モデルがスイッチおよびダイヤル類を操作する際には、属するパイロット操縦装置あるいはパネル類の接触点に触れて操作し、スイッチ及びダイヤル類の状態が変化するものとした。

図3は、航技研汎用飛行シミュレータ・コックピット⁹⁾の寸法データを用いて構築したコックピット機器配置を、グラフィック・ワークステーションに表示したものである。

(2) 機体特性

機体特性には、航技研汎用飛行シミュレータ用の機体数学モデルのソフトウェアとして開発されたFSPK-II (Flight Simulation Program of Kohgiken)を利用した¹⁰⁾。同ソフトウェアは機体のダイナミクスおよび機体システムの機能を模擬したものである。同ソフトウェアのシミュレータ・コックピット・ハードウェアからの操舵、スイッチ等電気信号入出力部分を、前記コックピット機器配置からの入出力に対応して書き換えることによって、コックピット機器配置と機体特性を連結した。

(3) 計器表示

シミュレーションにおける乗員の動作シーケンスに加えて、機体の挙動を表示するためにPFD

(Primary Flight Display) およびND (Navigation Display)を表示した。これらのディスプレイはコックピット機器配置を表示するウィンドウとは別のウィンドウでそれぞれ表示した。

2.2.2 航空管制モデル

航空管制官の会話通信を後述する発声機能を利用して、音声により模擬した。現時点では他機や交話法(プロトコル)は模擬しておらず、シナリオに指定した会話文章が管制官の送信内容として発声される。

2.3 乗員モデル

図4に乗員モデルの機能ブロック図を示す。乗員モデルは、(1) 物理特性および(2) 認知特性により構成される。物理特性部では乗員モデルの機構学的特性および身体寸法を規定した。認知特性部では、機器の操作や手順遂行などのコックピット内での行動および記憶領域を規定した。

2.3.1 物理特性

現時点では、この解析ツールをコックピット機器設計時の作業範囲解析などに用いることは想定していない。したがって、本乗員モデルの物理特性は、乗員の動作シーケンスを三次元アニメーションとして提示することを第一の目的として構築することとし、乗員の身体構造を骨格と関節からなる機構で構成されると単純化して表した(図5)。すべての骨格は質量及び太さのないリンクであるとした。そして関節を、首、両肩、両肘、両手首、腰、両足および両膝に設定した。コックピット内における乗員の作業のほとんどは着席したままで行われるため、下半身部分、すなわち両足および両膝の関節は座位で固定した。また、簡略化のために両手首関節は固定し、腰、両肩、両肘および首を回転可能な関節とした。回転の自由度は腰、両肘は1、首は2、肩は3とした。これらの回転の自由度は図6に示す軸まわりに設定した。また、コックピット機器を操作する際の接触点を両手のひらに設定した。乗員モデルが機器の操作を行う場合はこの点と前記のコックピット機器の接触点と一致する。また、乗員モデルが計器などを見るために首を回転する際の参照点として、目に相当する接触点を定めた。

このような骨格・関節機構にもとづいて、乗員モデルの姿勢すなわち腰関節のピッチ角、両肩関

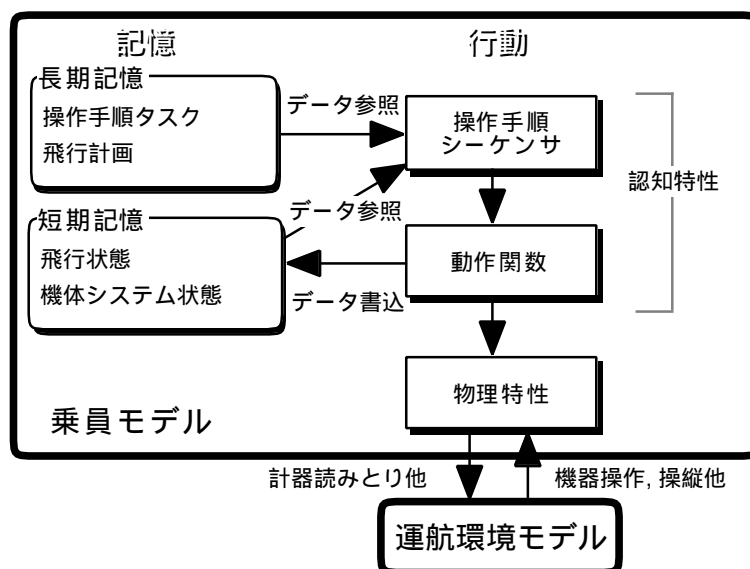


図4 乗員モデル機能ブロック

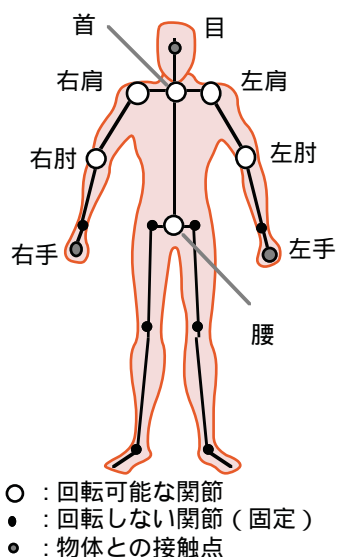


図5 骨格・関節機構

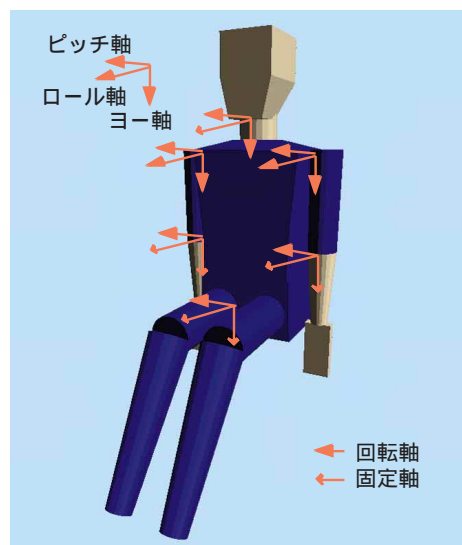


図6 乗員モデル・マネキン

節のロール、ピッチ、ヨー角および肘のピッチ角を付録1のアルゴリズムで計算した。また、首関節の角度は、乗員モデルが計器などの対象物を見る際、対象物と目接触点を結ぶ直線と顔面が垂直になるものとして計算した。

以上のように、乗員モデルの物理特性は骨格・関節機構で構成したが、グラフィック・ディスプレイ上には、実際の人体のようにボリューム感のある乗員モデル・マネキンを提示した。図6は航空自衛隊員の標準身体寸法¹⁹⁾を用いて作成した乗員モデル・マネキンである。

この骨格・関節機構に加え、乗員同士の会話や航空管制との会話通信を模擬するために、発声機

能を作成した。発声機能には、音声合成サーバ・プログラムを利用した。本音声合成サーバは、クライアント・プログラムから発声内容をテキストの形で送ることによって、人間の発声を模した音声合成される。機長、副操縦士および航空管制の音声を識別するために声門や声音のパラメータをそれぞれ任意に設定し、発声内容テキストを音声合成サーバに送った。

2.3.2 認知特性

コックピット機器の操作や手順遂行などの乗員の行動はこの認知特性部によって規定されるものとし、Rasmussenの人間の行動モデルに基づいた階

層型構造とした。乗員の行動をRasmussenの行動モデルに当てはめると、スイッチ・ダイヤルなどのコックピット機器操作や航空機の操縦はスキル規範(Skill-based)型の行動に分類され、マニュアルに記述された操作手順の遂行や航空法に定められている管制との通信プロトコルなどはルール規範(Rule-based)型の行動に分類される。気象の変化にともなう飛行計画の変更や代替空港の選択など、経験や問題解決を必要とする行動はナレッジ規範(Knowledge-based)型の行動に分類されると考える。

ここでは、まず、人間の記憶を模擬するために(a) 記憶領域を設けた。そして乗員の行動機能として、ルール規範に分類される、(b) 通常操作遂行機能および、スキル規範に分類される、(c) 動作実行機能を設けた。動作実行機能による脚の上げ下げや、飛行状態モニタ等コックピット機器操作は、乗員モデルの物理特性の制約のもとで行われるものとした。また、操作手順実行機能に関しては、現段階では通常操作手順の実行に限った。

(a) 記憶領域

記憶領域には、運航環境モデルにより模擬された航空機の飛行状態や操作手順等に関するデータが格納される。乗員モデルはこの記憶領域に格納されたデータを利用して行動する。記憶領域は、短期記憶および長期記憶から構成される。短期記憶領域には、機体の高度や速度などの飛行状態、また、脚の位置や選択された自動操縦のモードといった機体システムの状態など、作業用のデータが格納される。短期記憶領域のデータは、後述する動作実行機能から書き込みおよび参照が行われるものとした。長期記憶領域には、操作手順のタスクおよび、目的空港や着陸方式により定義される飛行計画のデータを格納するものとした。長期

記憶領域のデータは、現段階では動作実行機能及び操作手順遂行機能からは書き込みが出来ないものとし、参照のみを可能とした。なお、現時点の乗員モデルでは学習や忘却といった人間の記憶メカニズムの高次機能は模擬していない。

(b) 動作実行機能

脚レバーの上げ下げやスイッチを押すこと等のコックピット機器の操作や航空管制官および他の乗員モデルとの会話などの「動作」は命令文の形式を取る動作関数によって表した。表1に作成した動作関数の例を示す。この動作関数を駆動することにより、計算機内の乗員モデルが運航環境モデルや他の乗員モデルと相互に作用する。動作関数名には、その動作を表す英語の動詞を利用した。関数の引数としては、動作開始時刻、動作遂行者および動作対象などを指定するものとした。例えば、

push(0102, CAP, FCU, AP1SW, ON)

と記述すると、時刻01分02秒に、機長(CAPtain)がFCU (Flight Control Unit)上のオートパイロット-1(AP1)スイッチ(SW)をオン(ON)にする動作(push)を開始する。

乗員モデルの手は、開始点から対象物までの直線上を等速度で動くものとした。この速度は作業内容ごとの所要時間が記述されたコックピット・タスク分析データ¹²⁾(以下、動作所要時間)を利用して設定した。また、首の回転も等速度で行うものとした。会話速度については、コックピット・タスク分析結果³⁾を利用して166 words/minとした。

また、英単語の動詞の後ろに"ed"を付加し過去の作業を連想させる動作関数を用意した。このような動作関数は、動作開始時刻推定の機能をもつ。

表1 動作関数の例

関数	動作
touch(<i>time, actor, object</i>);	<i>actor</i> が対象物 <i>object</i> に触れる (時刻 <i>time</i> に動作開始)。
look(<i>time, actor, object</i>);	<i>actor</i> が対象物 <i>object</i> の方向に首を回転する (<i>time</i> に動作開始)。
say(<i>time, actor, words</i>);	<i>actor</i> が "words" と話す (<i>time</i> に発声開始)。
push(<i>time, actor, location, switch</i>);	<i>actor</i> が <i>location</i> 上のスイッチ <i>switch</i> を押す (時刻 <i>time</i> に動作開始)。
pushed(<i>time, actor, location, switch</i>);*	<i>actor</i> が時刻 <i>time</i> に <i>location</i> 上のスイッチ <i>switch</i> を押す。
call(<i>time, actor, words</i>);	<i>actor</i> がコール・ボタンを押して ATC に "words" と話す (<i>time</i> に動作開始)。
called(<i>time, actor, words</i>);*	<i>actor</i> がコール・ボタンを押して ATC に時刻 <i>time</i> に "words" と話す。
flapset(<i>time, actor, flap_angle</i>);	<i>actor</i> がフラップ・レバーを <i>flap_angle</i> 度に設定する (<i>time</i> に動作開始)。
flapset_ed(<i>time, actor, flap_angle</i>);*	<i>actor</i> がフラップ・レバーを時刻 <i>time</i> に <i>flap_angle</i> 度に設定する。
takeover(<i>time</i>);	PNF が操縦交代し PF になる。

*) 動作開始時刻推定機能を持つ動作関数

すなわち、通常の動作関数は、時刻を指定する引数によって動作の開始時刻を指定するのに対し、この種の動作関数では、動作の結果が生ずる時刻を指定する。例えば、スイッチの状態がオフからオンになる時刻を引数として指定する。動作関数は、乗員モデルが手を動かし始める時刻を推定し、その時刻に当該動作を開始する。このような機能は例えば、航空機事故やインシデントにおける乗員の行動を再構築するときに有用である。航空機事故・インシデントにおいてはデジタル飛行機録装置(DFDR: Digital Flight Data Recorder)およびボイス・レコーダ(CVR: Cockpit Voice Recorder)の解析をもとに乗員の行動を推定することができる。まず、CVR解析結果からは、乗員の会話内容を知り、操作に関わる発言から行動を推定することができる。また、DFDR解析結果からは、スイッチ状態の変化など機体システムの状態変化がわかり、乗員がコックピット機器を操作したことが推定される。動作開始時刻推定機能をもつ動作関数を用いれば、DFDR解析結果により得られたシステム状態の変化時刻を指定することにより、乗員の動作を記述することが可能になる。動作開始時刻は、乗員モデルの手の現在位置と操作対象との直線距離と動作速度データを用いて、シミュレーションの1フレームごとに推定した。

これらの動作関数を用いて時系列に乗員の動作を規定することによって、行動シミュレーションのシナリオを記述することができる。また、次節に示す操作手順遂行機能から動作関数を駆動する方法の行動シミュレーションも可能である。行動シミュレーションの方法については後述する。

(c) 操作手順遂行機能

一般に、航空機の操作手順は飛行フェーズ毎にマニュアルに記述されている。操作手順には、表2に示すように、PF (Pilot Flying)およびPNF (Pilot Not Flying)のタスクが指定され、乗員はこれらを逐次的に遂行する。この行動を模擬するために、操作手順シーケンサを作成した。以下に操作手順シーケンサの機能を記述する。

まず、PFおよびPNF用の操作手順のタスクを、長期記憶領域に格納した。それぞれのタスクは、(1)タスク番号、(2)タスク開始条件、(3)タスク完了条件、および(4)タスクを遂行するための動作内容によって定義した。操作手順シーケンサは、この操作手順タスクを参照しながら、図7に示すアルゴリズムに従ってタスクを遂行する。すなわち、

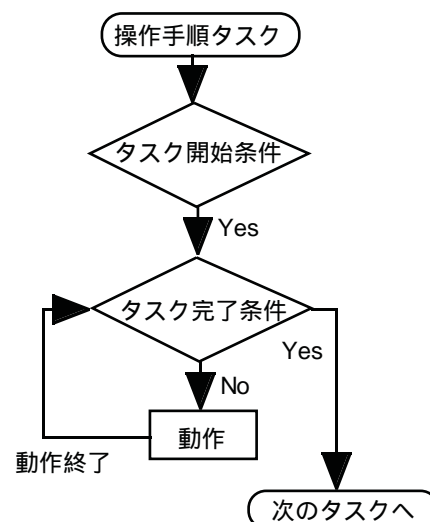


図7 操作手順シーケンサの流れ図

表2 操作手順の例
(最終進入手順)

PF		PNF	
1	ATS ARM		
2	ILS Frq. SET		
3	ILS Crs. SET		
4	NAV Selector ILS	1	NAV Selector ILS
5	ND Range 15	2	ND Range 15
6	FLAP 5 Speed SET		
7	"Flap 5" CALL	3	"Flap 5" READ BACK
		4	Flap Lever SET 5
		5	"Flap 5" CALL OUT
8	FLAP 15 Speed SET		
	⋮		⋮

当該タスク番号のタスク開始条件が満たされている場合、まず初めにタスク完了条件が満たされているかを調べる。条件が満たされていれば、当該タスクを完了し、次のタスクを開始する。満たされていない場合には、当該タスクを遂行するために、動作関数を駆動する。動作終了後、再度タスク完了条件が満たされたかどうかを確認したうえで、次のタスクを開始する。

表2の進入手順を例として、操作手順シーケンサの機能について説明する。表3は、PFの "ILS Frequency SET" (ILS: Instrument Landing System) のタスクの定義である。本タスクでは周波数設定パネルにより、目的空港のILS周波数を同調する。タスク開始条件が、"タスク番号が2であること"なので、タスク1を終了後直ちにこのタスクを開始する。次にタスク完了条件を調べるために、動作関数

表3 操作手順タスクの定義

タスク名	ILS frquency SET
タスク番号	2
開始条件	Current Task Number = 2
完了条件	ILS frq. (Panel) = ILS frq. (FPL)
動作	set ILS frquency on panel

註) FPL: Flight Plan

checkを起動して周波数設定パネル上に表示された現在のILS周波数を読みとるとともに短期記憶領域に書き込む。これを、PFの長期記憶領域に格納された飛行計画の目的空港ILS周波数と比較する。タスク完了条件が満たされていないければ、動作関数setを呼び出し、周波数パネルのノブ回転操作を行って、目的空港ILS周波数を設定する。目的空港のILS周波数と周波数パネルの値が等しいことを確認してこのタスクを完了し、次のタスク"NAV Selector ILS" (NAV: Navigation)に移行する。

2.4 行動シミュレーションの方法

図8は本解析ツールの機能ブロックである。本解析ツールを用いて行動シミュレーションを行う場合、シナリオの記述の仕方によって2つのタイプのシミュレーションが可能となる。1つめは「動作指定型」の行動シミュレーションである。この行動シミュレーションは、動作関数を用いて時間軸上に乗員モデルの動作を規定したシナリオによ

って行う。この場合乗員モデルは、操作手順遂行機能を利用せずに、シナリオに記述したとおりの動作を強制的に実行する。もう1つは「自律型」の行動シミュレーションであり、操作手順遂行機能に基づいて乗員モデルが行動する。この場合、シナリオは遂行すべき操作手順名で記述する。乗員モデルは、航空機モデルの操作などを行いながら飛行状況に応じたタイミングで動作する。どちらのシミュレーションを行う場合でも、(1) 初期条件、(2) データベースおよび(3) シナリオを用意する。これらに基づいて、(4) シミュレーション駆動部が種々の関数を呼び出して計算を行う。行動シミュレーションの結果として、コックピット内の乗員モデルの動作および計器表示が、音声会話とともにグラフィック・ディスプレイ上にアニメーションで示される。以下に、2つのタイプ毎のシミュレーション実行方法を記述する。

2.4.1 「動作指定型」のシミュレーション

(1)初期条件

初期条件として、航空機の形態（脚上げ下げ、フラップ開度）、飛行状態（高度、対気速度等）、飛行フェーズ（巡航、降下、進入等）および左右乗員モデルの役割(PFあるいはPNF)を指定する。本ツールでは、PF乗員モデルおよびPNF乗員モデルの標準姿勢を飛行フェーズ毎に設定した。ここでいう標準姿勢とは、動作関数によりコックピット機器を操作していないときの姿勢である。離着

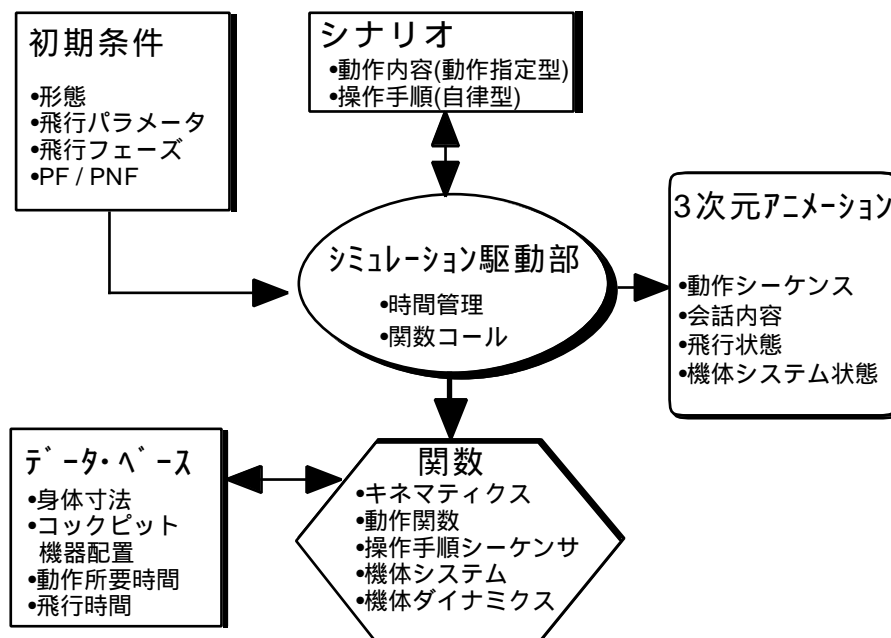


図8 乗員行動解析ツール機能ブロック

陸及び進入フェーズにおいてはPFはコラム・ホイール及びブスロトル・レバーに手をそえているものとし、その他の飛行フェーズでは両手をコラム・ホイールに添えているものとした。PNFについてはすべての飛行フェーズにおいて手を膝の上に置くものとした。PFについては、自動操縦装置の使用・不使用に関わらず、操縦装置に手を添えた姿勢を標準姿勢とした。

(2) データベース

コックピット形状、乗員モデルの身体寸法、可動範囲（関節回転角制限）および動作所要時間のデータをそれぞれ規定する。

(3) シナリオ

動作関数を用いて、乗員の動作を時間軸上に記述する。また、飛行データを動作と同時に表示する場合には、時間軸上の飛行データを用意する。

(4) 動作指定型行動シミュレーション

シミュレーション駆動部は、時間管理を行うとともに乗員モデルおよび運航環境モデルを呼び出す。このとき、乗員モデルでは動作関数、および姿勢計算部が実行される。ただし、操作手順遂行機能は実行されない。また、運航環境モデルでは、コックピット機器配置および計器表示部が呼び出される。シナリオに記述された動作が時刻ごとに強制的に実行され、乗員の動作シーケンスおよび飛行状態がアニメーションとして表示される。

2.4.2 「自律型」の行動シミュレーション

(1) 初期条件

初期条件として用意するデータは「動作指定型」と同じである。ここでは、指定したPFおよびPNFの役割分担に従って左右のパイロットが操作手順を実行することになる。

(2) データベース

「動作指定型」と同様にコックピット形状、乗員モデルの身体寸法、可動範囲（関節回転角制限）および動作所要時間のデータを用意する。また、長期記憶領域に、操作手順のタスク及び飛行計画を設定する。

(3) シナリオ

シナリオには、遂行すべき操作手順を記述する。例えば進入手順の行動シミュレーションを行う場合には、「進入手順」と記述する。

(4) 自律型行動シミュレーション

シミュレーション駆動部は、時間管理を行うとともに、乗員モデル及び運航環境モデルを呼び出

す。乗員モデルでは、操作手順遂行機能、動作関数および姿勢計算部が実行される。また、運航環境モデルでは、コックピット機器配置、機体特性、および計器表示部が実行される。操作手順遂行機能は、長期記憶および短期記憶領域のデータを参照しながら動作関数を駆動して、飛行状況に従って操作手順のタスクを実行する。シミュレーション結果は「動作指定型」と同様に3次元アニメーションで表示される。

3. ツールの適用

この章では、乗員行動解析ツールの適用例について述べる。適用にあたっては、この乗員行動解析ツールのヒューマンファクタ課題への利用可能性を調べるため、(1) 航空機事故の解析および(2) 最終進入手順の解析の2例を試みた。前者は、「動作指定型」の行動シミュレーション例であり、後者は「自律型」の行動シミュレーション例である。

3.1 航空機事故解析への適用

1994年4月26日に名古屋空港付近で発生したエアバスA300-600R中華航空機の事故¹⁹⁾における乗員行動の再構築を行った。事故調査報告書による本事故の概要は、以下の通りである。この事故は、副操縦士が手動操縦による進入中に誤ってゴー・レバーを作動させたことから始まった。2人の乗員は直ちにこれに気づき、進入を続行すべく着陸復行(GA: Go Around)モードの解除を試みたが、所期のように解除することができなかった。乗員と自動操縦装置が相反する操縦をした結果、水平安定板は機首上げ最大位置に至った。そして、航空機は釣り合いを失い最終的に失速に至って墜落した。乗員が何らかの形で自動操縦装置のモード混乱に陥ったことが事故の主要因の一つと考えられている。

3.1.1 シナリオ

行動シミュレーションは、副操縦士がゴー・レバーを作動する直前から開始するものとし、事故調査報告書のCVR記録およびDFDR記録をもとに、動作関数を用いてシナリオを作成した。CVR記録に見られるすべての会話内容をシナリオに変換するとともに、「I have control.」など、会話内容から乗員の操作が推定できるものを利用して動作を記述した。また、DFDR記録から得られる、スイッチのオン・オフやフラップ・レバーの展開などの

操作を、動作開始時刻推定機能をもつ動作関数で記述した。ここで、CVR記録から推定した動作は会話が始まった時刻にその動作を開始するものとし、DFDR記録から推定した動作はDFDR記録から読みとった時刻にシステムの状態が変わるものとした。これらに加え、DFDR記録のエレベータやエルロン、スロットル・レバーの角度などを、飛行データとして利用した。シナリオの一部及び初期条件を表4および5に示す。

3.1.2 データベース

ここで行う行動シミュレーションは、事故の原因究明を目的としたものではなく、乗員行動解析ツールのヒューマンファクタ課題に対する利用可能性を検討するためのものである。したがって、コックピットの形状は必ずしも事故機と同様にする必要がないため、コックピット機器配置データのうち、コラム・ホイール等のパイロット操縦装置およびFCU等のパネル類の寸法には、詳細データの得られる航技研汎用飛行シミュレータのものを利用した。オートパイロット・スイッチやゴー・レバー等のスイッチ及びダイヤル類については、事故機の機器配置に対応してこれらのパイロット操縦装置およびパネル上に配置した。また、人体寸法データには、航空自衛隊員の平均身体寸法値をもとに、この平均身長と事故機の機長および副操縦士の身長との比を乗じたものを利用した。動作所要時間データには文献12を利用した。

3.1.3 乗員行動の解析

まずはじめに、事故に至るまでの乗員行動の再構築を試みた。シミュレーション結果である事故に至るまでの乗員の行動は、グラフィック・ディスプレイ上に3次元アニメーションとして音声会話とあわせて表示された。図9はアニメーション

のスナップである。機長モデルおよび副操縦士モデルは、シナリオに記述したすべての操作を時間通りに完遂することができた。この結果は、事故調査報告書の内容と矛盾するものではなかった。

次に、飛行中の特定の操作に関する解析を行っ

表5 初期条件

時刻 (sec)	819 (13'39")
PF	副操縦士
PNF	機長
飛行フェーズ	進入
フラップ角	40.0°
脚	下げ
AP1	Disconnect
AP2	Disconnect
Automatic Thrust	Engaged

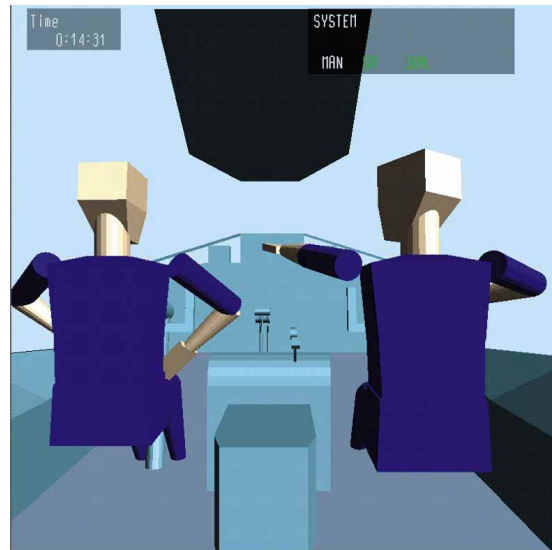


図9 シミュレーション・スナップ
pushed((1431, FO, FCU, LAND_Switch);
FCU上LANDモード・スイッチ押し。
(14分31秒副操縦士LANDモード・エンゲージ。)

表4 シナリオ (抜粋)

⋮

pushed(1405, FO, THRUST2, GO_LEVER); -14'05" 副操縦士ゴー・レバを作動。 -
look(1406, CAP, THRUST2); -14'06" 機長GAモードに気付く。 -
say(1406, CAP, "Eh, eh, ah. ");
look(1407, CAP, OUTSIDE);
say(1410, CAP, " You, you triggered the go lever. ");
say(1411, FO, "Yes, yes, yes. I touched a little.");
say(1412, CAP, " Disengage it.");
say(1412, FO, "Ay. ");
pushed(1412, FO, THRUST2, AT_DSC_SW); -14'12" 副操縦士GAモード解除操作。 -

⋮

註) CAP: 機長, FO: 副操縦士

た。DFDRには、副操縦士がゴー・レバーを作動させた後、一度オートパイロット1および2がエンゲージされていることが記録されていた。オートパイロットをエンゲージするにはFCU上のスイッチを押すのみしか方法が存在せず、機長あるいは副操縦士どちらかのパイロットがこの操作を行ったことになる。しかしながら、この操作に関する会話がCVR記録にはまったく見られず、どちらのパイロットがどのような意図を持ってこの操作を行ったのかが不明であった。ここでは、乗員行動解析ツールを用いて、この操作をどちらのパイロットが遂行したのかを検討した。機長が遂行した場合および副操縦士の場合2つのシナリオを用意して行動シミュレーションを行った。そして、それぞれのシナリオにおいて、その操作が前後の操作と明らかな矛盾があるかどうか、あるいは前後の操作と干渉があり操作が完遂できないことがあるかどうかを調査した。

シミュレーションの結果、どちらのシナリオにおいてもオートパイロット・エンゲージ操作は完遂できることがわかった。また前後の操作に対して特段の矛盾も見られなかったため、どちらのパイロットについても操作を行った可能性を否定することはできないことがわかった。本結果は、事故調査報告書の記述と同様である。

3.1.4 検討

上記の応用例では、動作関数を用いた「動作指定型」のシミュレーションをおこなった。この方法によって、特に人間の物理特性データに基づい

た解析が可能であることを確認した。本モデルでは人間の物理的な身体を簡単な骨格・関節機構でモデル化している。このモデルによって提示された結果は、動作所要時間などの物理特性データに基づいたコックピット内の乗員の動作シーケンスである。運航時のコックピット内の状況を直感的な形で計算機上に提示できるため、事故調査における行動解析が飛行シミュレータを用いた試験を中心として行われていることを考慮すると、本方法がこの事前解析として有用であると考えられる。

一方、乗員の物理特性データに基づいた本解析ではオートパイロット・スイッチ操作の遂行者を特定することはできなかった。この課題は自動操縦システムと人間との関わりに根ざしたものであると考えられるため、これを解決するには乗員の自動操縦システムの理解や非通常のイベント発生に対処する行動など、より高度な認知特性の機能を開発する必要があると考えられる。

3.2 最終進入手順の検討

本節では、大型旅客機最終進入手順を乗員モデルに組み込み、操作手順設計への応用の可能性を検討した結果をまとめる。

3.2.1 シナリオ

乗員モデルは自動操縦装置を用いて、ILS進入方式により進入飛行を行うものとした。図10にこのシミュレーションに用いた滑走路及びアプローチチャートを示す。シミュレーションは滑走路から28.7 km (15.5nm)北に離れた地点、高度 914 m

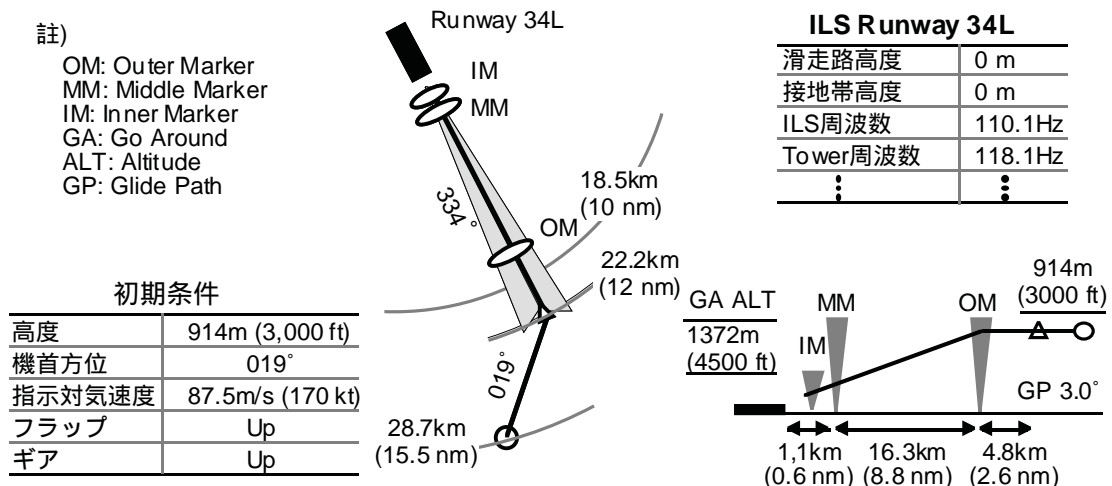


図10 進入飛行行動シミュレーション概要
(初期条件、滑走路及びアプローチ・チャート抜粋)

(3,000 ft)より，脚上げ，フラップ上げの状態を開始するものとした。乗員モデルは，飛行開始後直ちに最終進入手順を遂行するものとした。シミュレーションのためのシナリオは，遂行すべき操作手順である「最終進入手順」とした。通常操作手順の遂行を前提とし，飛行中に故障発生や航空管制の指示等特別のイベントは発生しないものとした。

3.2.2 データベース

コックピット形状，身体寸法及び動作所要時間については，3.1節の応用例と同じものを用いた。機体特性には大型旅客機の数学モデルを利用した。この大型旅客機はカテゴリIIIの能力を持つオートパイロット・オートスラストおよび飛行管理装置

をもつグラスコックピット機である。この機体により自動操縦装置を用いてILS進入を行うための操作手順には，表2のものを利用した。乗員モデルの長期記憶領域には，この操作手順を組み込むとともに，表6に示した飛行計画を定義した。

3.2.3 進入飛行のシミュレーション結果

シミュレーション飛行を開始すると同時に，両乗員モデルが最終進入手順のタスクを開始した。飛行中乗員モデルは，自動飛行装置への減速の指示やフラップの展開など，飛行機の状態を確認しながら順次タスクを遂行した。巡航形態から着陸形態に変更，ILSによる自動着陸を行い操作手順のタスクをすべて完遂するとともに，機体を滑走路34Lに着陸させた。

3.2.4 検討

上記の応用例により，手順シーケンサにより通常操作手順の模擬が可能であることが確認された。また，進入飛行のシミュレーション結果から，設定した操作手順は通常状態において2名の乗員で十分に遂行でき，航空機を安全に着陸させられることが確認された。本応用例のように手順シーケンサの機能を用いれば，ある特定の航空機の操作手順設計あるいは改良時に，操作手順のタスクがミッションを完遂するのに十分規定されているか，あるいはタスクがそれぞれのパイロットに十分な

表6 飛行計画（抜粋）

滑走路方位	334 deg
滑走路高度	0 ft
着陸復行高度	1372 m (4500 ft)
ILS 周波数	110.1 Hz
フラップ速度	
スケジュール 5 deg	82.3 m/s (160 kt)
15 deg	77.2 m/s (150 kt)
25 deg	72.0 m/s (140 kt)
(V _{ref}) 40 deg	64.3 m/s (125 kt)
●	●
●	●
●	●



図11 シミュレーション・スナップ
 (飛行開始後48秒，滑走路北西24km(13nm)，
 高度457m(1,500ft)，対気速度77.7m/s(150kt)

余裕を持って分配されているか等，モデル化された機体の特性および人間の特性データにもとづいて検討することができる。すなわち，手順開始のタイミングや機体の初期状態等をパラメータとして複数回シミュレーションを行うなどして計算機上で手順の検討が可能になると考える。また，このツールはマニュアルに記述された操作手順タスクの遂行を平均的な人間の物理特性データに基づいた形で提供することができるため，操作手順記憶等のための地上用訓練教材としても利用可能と考える。

本モデルは実験・解析などにより得られた人間特性データを含んだものであるが，本ツールによるシミュレーション結果を実際の人間パイロットの操作データと比較して有意性を検証することが不可欠である。

今回作成した操作手順シーケンサの機能は，特段の事象が発生しない通常の運航環境下における通常操作手順遂行の模擬に限られている。巡航フェーズから降下フェーズなど複数のフェーズにわたって複数の操作手順を検討する場合や，故障発生時の対処を検討する場合など，より広範囲な操作手順の検討を可能にするためには，状況に応じて適切な操作手順を選択する機能や一連のフェーズで定義されるミッションを遂行する機能などの機能を追加する必要がある。

4. おわりに

乗員行動解析ツールの開発を行った。乗員モデルのうち，ここでは，開発の完了した物理特性および動作実行，操作手順遂行の機能について報告した。そして，このツールの航空機事故解析および操作手順検討への応用を試み，その実用性について検討した結果をまとめた。本解析ツールの特長は以下のように要約される。

- (1)乗員行動解析ツールにより，ヒューマンファクタ課題を計算機上で検討することができる。
- (2)乗員モデルの行動シーケンス及び航空機の運動を，3次元アニメーションとして直感的な形で提供できる。
- (3)乗員の動作実行および操作手順の遂行を模擬することができる。

乗員行動解析ツールの応用先として，航空機事故・インシデント解析，操作手順の設計，訓練教材等を考えている。例えば，航空機事故・インシデントの解析においては，「動作指定型」の行動シ

ミュレーション乗員の行動を再構築するとともに，「自律型」の行動シミュレーションによって通常操作手順からの逸脱状況などを検討することが可能と考えられる。操作手順設計時には，乗員の平均的な物理特性データにもとづいて操作手順タスクの適切な分配を検討することができる。また，本ツールによって通常操作手順の遂行をアニメーションとして提供し，地上訓練における教材として用いることも可能と考えられる。

今後は，乗員行動解析ツールを用いたより詳細な解析を可能にするために，非通常操作手順の実行や適切な操作手順の選択，航空管制との交話法（プロトコル）等の認知特性機能を追加し，応用範囲を拡大していく予定である。

参考文献

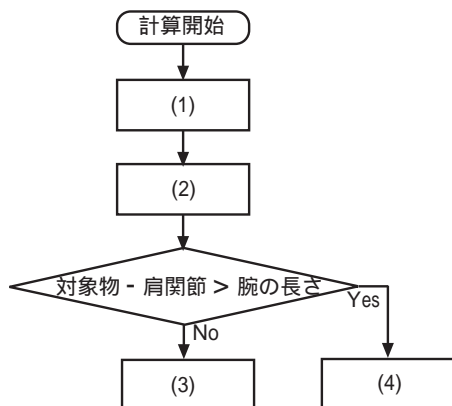
- 1) The Interfaces Between Flightcrews and Modern Flight Deck Systems, FAA (1996).
- 2) 田中敬司，船引浩平 他: 航空ヒューマンファクタ研究の現状，平成10年度次世代超音速機技術及び航空安全・環境適合技術に関する-研究成果報告書-，pp.26-29 (1998).
- 3) 航空安全におけるヒューマン・ファクターの調査研究報告書，航空振興財団 (1994).
- 4) Tanaka, K. and Matsumoto K.: A Hierarchical Model of Pilot's Procedural Behavior for Cockpit Workload Analysis, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 28, No.82 (1986).
- 5) Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, No.3, pp.257-266 (1983).
- 6) Arbak C.J., Derenski, P.A. and Walrath L.C.; Simulation considers the human factors, Aerospace America, pp.38-41 (1993).
- 7) Corker, K. M. and Pisanich., G. M.; An Architecture and Model for Cognitive Engineering Simulation Analysis: Application to Advanced Aviation Automation, AIAA Conference on Computing in Aerospace, AIAA 93-4660 (1993).
- 8) Corker, K. M. and Pisanich., G. M.; A predictive model of flight crew performance in automated air traffic control and flight management operations, Proceedings of the 8th International Symposium on

- aviation psychology (1995).
- 9) 川原弘靖, 岡部正典 他: 飛行シミュレーション試験設備, 模擬操縦席装置の構成及び機能, 性能, 航技研資料TM-667 (1994).
 - 10) 坂東俊夫, 渡辺顕: 汎用飛行シミュレーション・プログラム(FSPK-I) 第1部:プログラムの内容, 航技研報告 TR-702 (1982).
 - 11) 航空医学実験隊: 航空自衛隊員の身体計測値 (1998).
 - 12) James L. Sundstrom: NASA TLA Workload Analysis Support , Volume 1 - Detailed Task Scenarios for General Aviation and Metering and Spacing Studies, NASA CR 3199 (1980).
 - 13) 運輸省航空事故調査委員会: 航空事故調査報告書 中華航空公司所属エアバス・インダストリー式A300B4-622R型B1816 名古屋空港平成6年4月26日 (1997).
 - 14) Muraoka, K.: Computational Modeling of Crew Behaviors, Proc. of 34 th Aircraft Symposium, pp.104-107 (1996).
 - 15) Muraoka, K.: Crew Behavioral Model for Timeline Analysis, CEAS Symposium "Free Flight", HF-13 (1997).

付録1 乗員モデルの姿勢計算アルゴリズム

ここでは、乗員モデルが機器に手を触れる場合の姿勢計算アルゴリズムを示す(付図1)。ただし、ここでは人間の関節の可動範囲を越える場合のエラー出力等については省略する。

- 1) 対象物を左右どちらの手で触れるかを決定する。左右の肩からの対象物までの距離を計算し、より近い側の手で触れるものとする。
- 2) 肩から対象物への方向をもとに、肩関節のヨーおよびピッチ回転角を算出し、回転する。
- 3) 手のひらの接触点を対象物の接触点と一致させる、すなわち手のひら接触点から肩までの距離が対象物から肩までの距離と一致するように肘のピッチ角及び肩のロール角を算出する。
- 4) なお、肩から対象物への距離が、腕の長さ(=上腕骨格長さ+下腕骨格長さ+手のひら長さ)よりも長い場合には、腕を伸ばしたままの状態(肘関節の回転角=0)で腰関節を回転し、対象物に触れるものとした(付録2)。



付図1 乗員姿勢計算アルゴリズム
(括弧内数字は付録1の項目作業に相当する。)

付録2 腰関節角度の算出

付図2のように、腰関節を原点とする座標系において、対象物の接触点座標を (x_0, y_0, z_0) とし、乗員モデルは右手で対象物に触れるものとする。腰関節のy軸まわりの回転角を θ 、胴体の長さを l_b 、幅を w_b とすると、右肩関節の座標 (x_s, y_s, z_s) は、

$$(x_s, y_s, z_s) = (l_b \sin \theta, w_b, l_b \cos \theta) \quad (1)$$

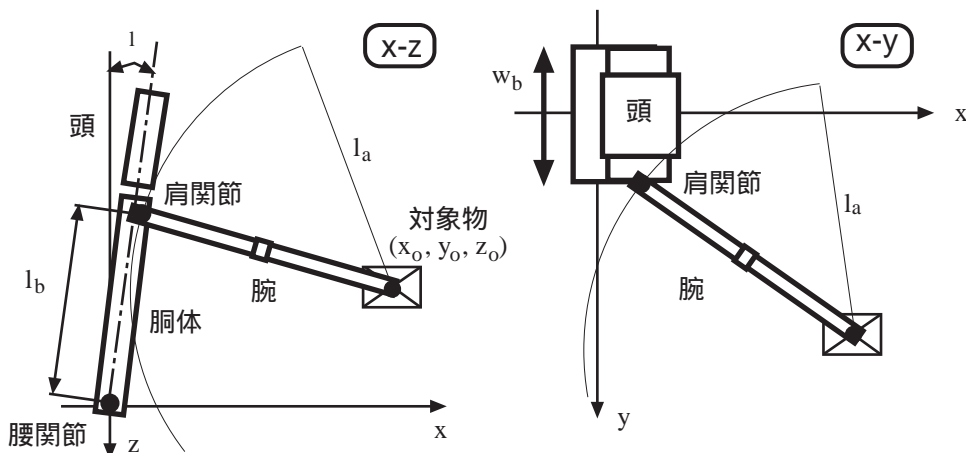
となる。乗員モデルは腕を伸ばした状態で対象物に触れるので、腕の長さを l_a とすれば、右肩関節は球面 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = l_a^2$ (2)

上にある。(1)式を(2)式に代入すると、
 $x_0 \sin \theta + z_0 \cos \theta = -(l_a^2 - l_b^2 - x_0^2 - (w_b^2 - y_0^2) - z_0^2) / 2l_b$ (3)

がえられる。したがって、腰関節のピッチ角は、

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{-z_0 (l_a^2 - l_b^2 - x_0^2 - (w_b^2 - y_0^2) - z_0^2) / 2l_b}{\sqrt{x_0^2 + z_0^2}} \right] - \sin^{-1} \left[\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + z_0^2}} \right] \quad (4)$$

となる。



付図2 腰関節角度の算出

航空宇宙技術研究所報告 1386 号

平成 11 年 6 月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)40-3075 〒182-8522
印刷所 廣濟堂印刷株式会社
東京都港区芝2-23-13

© 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写,転載を希望される場合は,管理部
研究支援課資料係にご連絡ください。

Printed in Japan