パイロットを支援する表示方式について*1

田中敬司*2・松本甲太郎*2

Key Words: Human Engineering, Display, Automation, Expert System, Workload

1. はじめに

航空機の制御や航法の大幅な自動化によるいわゆるコックピット・オートメーションが進み、パイロット・ワークロードの軽減と運航の安全に寄与している。それに伴い、操縦室内では、手動操縦や航法計算などの手作業に代わり、計器類の監視、緊急事態処理、フライト計画策定といった種類の作業の比率が増大している。「航空機操縦におけるパイロットの積極的役割が減るに伴い、状況把握 (Situation Awareness) の喪失と称されるインシデントが増加している」との指摘がある¹⁾。操縦室の電子化が進展し、情報取得が計器に一層依存することになるなかで、パイロットの状況把握レベルを高く維持するための情報呈示方式がますます重要になっている。本稿では、航空機におけるマン・マシン・インタフェースの検討の具体例として、パ

イロットを支援する表示方式について航技研における研究を中心にその経緯と状況及び展望について要約する。

2. パイロット作業の支援表示

航空機の運航において、手動操縦の場合、機体の姿勢の制御は電気機械式あるいはCRT型の計器に表示された情報により、操縦輪あるいはサイド・スティック・コントローラ、ペダル、スロットルを直接操作することで行われる。自機位置の変化は航法計器に表示されるが、この航法に関わる作業は、従来から自動化が進められ、長時間飛行が実現されている。自動操縦の場合、最適飛行コースはFMS (Flight Management System) によってオートパイロットに指示され、巡航時のパイロットの作業は機器や計器の監視が中心となる。一方、空港近辺では、一層精密な操縦が要求されると共に、通信関係の設定変更、電気系統の確認、制御システムのセット、計器類の動作確認、チェックリストによる操作確認、地上との交信、更には他機や地物の監視などパイロットが直接実施する作業が多い。このような作業を逐次あるいは同時に実施するためにパイロットが意識していなければならない事項も、航空機の地理的位置、機体性能状態、高度、推力設定値、形態、他機との関係、管制官との交信や管制官からの指示、環境、気象状況の監視と変化の予測等多種多様である¹⁾。

航空機における様々な計器は、パイロットの航法を含む操縦作業を支援するために装備されてきた²⁾。ADI (Attitude Director Indicator) の中央に表示されるFD (Flight Director) は、操縦を支援する表示の典型であり、パイロットに操作のキューを与えることで、旋回率や風を考慮した複雑なフィードバック制御を行うことに伴う作業負担の軽減を図ったものである。パイロットに呈示される計器情報については、大型CRTを用いて計器の数を減らし、コンピュータ・グラフィック技術を活用して統合化を進める試みが続

著者紹介

田中 敬司 (正会員)

昭和23年生。兵庫県出身。昭和46年東京大学工学部航空学科卒業。同年、航空宇宙技術研究所入所。現在、制御部人間工学研究室長。航空機の運航に関する人間工学的研究、パワードリフト技術の研究に従事。工学博士。日本人間工学会、航空運航システム研究会会員。

松本甲太郎 (正会員)

昭和23年生。神奈川県出身。昭和53年東京大学工学系大学院計数工学博士課程単位取得。同年、航空宇宙技術研究所入所。現在、宇宙開発事業団宇宙実験グループ招聘開発部員。航空宇宙システムの知能化の研究に従事。計測自動制御学会、情報処理学会、AIAA各会員。

*1 平成2年11月9日、第28回飛行機シンポジウムにて講演。平成3年7月31日原稿受理 Design of a Display System for Human Pilot's Supervisory Tasks

*2 航空宇宙技術研究所 Keiji TANAKA and Kohtaro MATSUMOTO

けられてきた。NASAの実験機QSRA (Quiet Short-Haul Research Aircraft) では、HUD (Head-Up Display) とHDD (Head-Down Display) に追跡型表示を採用し、これを先進型飛行制御システムと組み合わせることによってパワード・リフト機の良好な操縦性を実現した³⁾ 航技研の「飛鳥」においても、実角に対応した表示を行うHUDを活用して精密な飛行試験を遂行することができた⁴⁾ ボーイング747-400やエアバスA320等最新型の航空機の主要操縦計器は、PFD (Primary Flight Display) と称されるCRT型統合計器に統一されている⁵⁾ 従来ADIの下方に置かれていたHSI (Horizontal Situation Indicator) に対応するCRT計器はND (Navigation Display) としてPFDの側方に位置している。しかし、現在の操縦室内で中心となっている作業を支援する表示方式は、操縦を支援するFD等とは異なった機能を有するものである。それらは、エンジン計器、注意警告灯に代わって発達してきており、EICAS (Engine Indication and Crew Alerting System) あるいはECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitor, 第1図) と称され、PFD、NDに次いで第3の主要計器となりつつある。

3. パイロット行動の階層的モデル

前述の如く、パイロット作業の中では監視、計画等の比率が増えている。これらはいわゆるスーパーバイザリ⁶⁾型の作業と称されるが、このスーパーバイザリ型作業を中心とするパイロット行動を表現する方法に階層型の行動モデルがある⁷⁾ そこでは、行動をスキ

ル規範行動 (計器類の読み取り、操縦桿操作、無線交信等)、ルール規範行動 (手順書、法規に基づいた操作、モニタリング、チェック等の手順実施)、及びナレッジ規範行動 (知識、経験に基づいた総合判断、意思決定) といった3階層に分類することを試みている。この階層的行動モデルに対応する支援を考えると、計器読み取り、操縦桿操作等連続的操作など習熟した操作を行うスキル規範行動については、FD、PFD、ND等の統合表示が対応することになる。これらは、状況把握能力の維持、操縦に関わる作業負担の軽減を目標として装備されている。一方、形態変更、無線交信、チェックリストによる確認操作、運用規定や法規等に沿った手順的操作の指示等のルール規範行動に対しては、機器作動状況と作業手順やアドバイスの表示等が適当となる。ECAMのアドバイザリモード、電子式チェックリスト、警報、注意指示、初期操作アドバイス等はこれを指向したものと考えられる。さらに、エキスパートシステムを用いれば状況に応じた情報の協調/取捨選択も可能となる⁸⁾ EICASやECAMと同様に、第5節で報告するコックピット・アドバイザリ・システムは第2図に示すようにこのルール階層でのパイロット行動の支援を目指す表示システムと位置づけられる。

4. パイロット支援エキスパートシステム

パイロットなど人間の経験に基づく知識を統合整理する有力な手段に知識工学がある。近来これを航空機に適用しようとする試みが盛んになってきている。

米空軍のパイロット支援エキスパート (Pilot's Associate) 計画⁹⁾は、パイロットの意思決定支援と補佐操作を行わせるための種々のエキスパートシステムの開発を目指したものである。また、いずれも同様に、戦闘機への応用を主たる目的とした研究であるが、地形図上での低空飛行のルート計画のエキスパート群を用いた自動作成システム (Knowledge Based Route Planning; KBRP)¹⁰⁾や、計画の詳細説明や戦術の示唆、機体の運動の矛盾の警告等パイロットの認知プロセスの制限を補完するような支援を行う自動化 (intent-driven automation)¹¹⁾が提案されている。また、パイロット支援エキスパートへの適用を目標として、種々の選択肢群とゴール群のネットワークとして表現された知識ベースを基に、現在の動作状況を自ら判断できる自律型操縦システム (Tactical Manager) の研究も進められている¹²⁾ 知識に基づく地形情報や緊急事態への対応策などの支援があると全体性能が向上するとのシミュレータ結果も報告されている¹³⁾ これらの研究成果は、今後の民間機の安全性向上のため

第1図 ECAMの表示例 (電源系統) (全日空提供)

第2図 パイロット行動の階層に対応した支援システム

の強力な手段として活用されてゆくものと思われる。

5. コックピット・アドバイザリ・システム¹⁴⁾

航技研においては、将来の知能型コックピットにおける、運航上必要な情報を統合表示したりパイロットの判断に有効な支援情報を呈示することの可能性を明らかにし、その具体化に関わる問題点を調べるため、コックピットにおけるパイロットの手順的作業を支援するコックピット・アドバイザリ・システム (CAS) の製作を試みてきた。CASは「飛鳥」をモデルとし、その運航マニュアルに基づいて作成されたユーティリティシステムの論理モデルを有したインテリジェント表示装置とも言える実時間エキスパート・システムである。このシステムは、第3図に示すように機体の各種センサーからの情報をコンピュータによってモニターし、それらに基づいて電源系統、油圧系統、抽気系統、燃料系統といったユーティリティの作動状況を推定し、各系統ごとの作動状況の統合表示(第4図)、警報及び

初期操作の表示及び通常時あるいは緊急時のチェックリスト(第5図)といったパイロットの判断に有効な支援情報を呈示する。

CASについては、昭和62年度に試作システムの開発に着手し、平成元年度にシステムの機能確認とデバッグを完了した。その後、飛行シミュレータによる評価に向け、リアルタイム性確保のためのソフトウェア構成の改良、GPIBによる飛行シミュレータとの結合といった機能拡張を行い、平成2年度に飛行シミュレーション実験を実施した。実験システム図(第6図)に示すように、評価の対象としたCASは、ワークステーション上で動作し、天井パネル及びディスプレイ・コントロール・パネル(DCP)を入力装置とし、表示用計算機の画面を出力装置とする。ソフトウェアは、入力操作盤インタフェース、約3500のルールからなる推論部、表示部インタフェース及び表示用ソフトウェアの4つに大別される。これらのうち、推論部はLISP及びESHELLで記述されているが、その他

第3図 CASの機能ブロック図

--○: 論理の抽出, ==>: 情報の流れ

第4図 CASの電源系統表示例

第5図 緊急時チェックリスト表示例

の部分にはC言語を使用し、各プロセス間の通信に黑板機構を用いている。

飛行シミュレーション実験では、CASがパイロットの情報処理過程に与える影響を評価することを主目的とした。「飛鳥」は実験機であること等の理由により3名で運用されたが、実験では、航空機関士の操作機器類を天井パネルに移設し、二人乗務を想定した「飛鳥」の操縦室環境を模擬した（第7図）。システム及びチェックリスト情報を表示するCRTを中央計器盤に、共通画面を表示するプラズマディスプレイをその下方に、また、DCPをその右側に設置した。DCP上の押しボタンにより、4種類の系統表示や通常及び緊急チェックリストの呼び出しと、チェックリストの

ページの更新と戻しを制御できる。この実験には「飛鳥」のパイロット2名が参画し、通常のSTOL離着陸やCTOL離着陸のほかに、エンジン火災、2エンジン故障、油圧故障等の合計9種類のシナリオに対応して操縦室作業を実施した。CASのチェックリスト表示では、実施済みのタスクは白色、未実施タスクは黄色で表示されるため識別が容易になっている。CASを用いる場合はこれを利用してチェック作業を実施し、従前の紙のチェックリスト表を読み上げる方法と比較した。

実験のVTR記録から各シナリオごとの作業に要した時間を測定した結果、CASの使用により作業時間がほぼ30～50%短縮できることが確認された¹⁵⁾ ま

第6図 CAS 実験システム図

第7図 CAS 実験風景

た、手順実施効率、状況把握、ワークロード軽減に関するパイロットコメントから、表示機能が全般的に有効であることが確認された。さらに、状況に応じて優先度の高いものから呈示するようなメタ・レベルの論理の必要性や、チェックリストと初期操作アドバイスとの間の不整合の解消等の今後の検討課題が明らかになっている。

6. 今後のパイロット支援表示

現代の航空機の運航においては、長距離飛行時のワークロードが一層軽減される反面、空港周辺でのワークロードが一層増大することや、空港周辺で飛行経路が複雑になるとオートパイロットを切り離して飛行する傾向があること、キーボード入力作業の外部見張り

業務への影響などの従来型の自動化システム特有の問題の存在が指摘されている。これらの問題を解決するため、航空ヒューマンファクターに関する研究が現在大規模に実施されている¹⁶⁾。そこでは、意思決定者である人間を機械が支援するという自動化の原則に基づき、自動化システムの作動状況を容易に理解できる (Transparency) ようにする一方、人間をモニターして手順エラーを防止する支援システムを開発することなどを課題としている。

航空機運航におけるパイロットの今後の役割は、状況を総合的に判断し、必要ならば飛行計画の変更等の決心を行うことが中心になると考えられており、それにふさわしいヒューマン・インタフェースが出現しつつある。そこでは、パイロットの判断に必要な基本的要件の呈示や変更の際に取り得る選択肢の呈示等が行われる必要がある。このような機能をもつシステムは、今後の操縦室での作業手順を大幅に改良できる強力な手段となり、非正常状態での状況把握やチェック作業に伴うパイロット・ワークロードを大幅に改善できるものとなる。文献 1) では未刊行の文献を引用して重要事故の原因を表にまとめているが、それによると、基本的操作手順からの逸脱 (33%) と 2 番目の乗員によるクロスチェックの不適切 (26%) とで約 60% を占めることが読み取れる。このような単純なエラーを支援表示システムで防止できれば、かかる事故を大幅に減少させることも可能ではないかと考える。

但し、将来のパイロット支援型表示システムでは、前述の“Transparency”の確保、即ちシステムの作動状況を容易に理解できるようにするため、パイロットの要求によって表示するものは、木構造等により、できるだけ詳細に呈示することが可能なようにし、いっぽう、緊急処置のためのアドバイスあるいは警報については飛行安全に必須な最小限にしてパイロットの総合判断能力の発揮を阻害しないように具体化することが適当と思われる。

また、自動化航空機では、緊急時のワークロードが急激に高まると予想される。危機に際してのパイロットのプレッシャーを軽減し、またパイロットの能力低下を補うための地上の管制官等からの積極的な支援、協力活動のあり方について指摘がある¹⁷⁾が、機上システムの支援と協働するため、航空機と地上の間のデータリンクを通じた地上からの適切な支援情報表示があれば一層効果的な支援が可能になると思われる。

7. おわりに

以上、航技研で実施している CAS に関する研究状況を中心に、今後のコックピットにおけるスーパーバ

イザリ型作業を支援する表示システムのあり方について述べた。本稿を終えるにあたり、CAS の設計に関して川崎重工(株)から協力を得たこと、また、製作は富士通(株)との共同研究の一環として進めたことを付記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Nagel, D.C.: Human Error in Aviation Operations, in Wiener, E. L. and Nagel, D.C. editors, Human Factors in Aviation, chapter 9, Academic Press, 1988.
- 2) Corley, R. A.: Seventy Years of Flight Instruments and Displays, Aeronautical J., 80-788 (1976), pp. 323-342.
- 3) Hynes, C. S., Franklin, J. A., Hardy, G. H., Martin, J. L. and Innis, R. C.: Flight Evaluation of Pursuit Displays for Precision Approach of Powered-Lift Aircraft, J. Guidance, Control and Dynamics, 12-4 (1989), pp. 521-529.
- 4) STOL プロジェクト推進本部: 低騒音 STOL 実験機 (飛鳥) 用 HUD (ヘッド・アップ・ディスプレイ) の第 1 次シミュレーション評価試験, 航技研資料, TM-554 (1986).
- 5) 平山武俊, 羽石秀樹, 上田雅士: A 320-200 に見るコンピュータ技術, 日本航空宇宙学会誌, 38 (1990), pp. 290-300.
- 6) Sheridan, T. B.: Supervisory Control: Problems, Theory and Experiment for Application to Human-Computer Interaction in Undersea Remote Systems, Technical Report of Man-Machine Systems Lab., M. I. T., 1982.
- 7) Tanaka, K. and Matsumoto, K.: A Hierarchical Model of Pilot's Procedural Behavior for Cockpit Workload Analysis, Trans. Japan Soc. Aeronaut. Space Sci., 28-82 (1986), pp. 230-239.
- 8) Stenerson, R., Kaiser, K. and Baum, L.: Problem Focus Mechanisms for Cockpit Automation, AIAA-89-3096 (1989).
- 9) Rouse, D. M. and Hummel, T. C.: The Pilot's Associate: Enhancing Situational Awareness through Cooperating Expert Systems, SAE TP 871896 (1987).
- 10) MacMillan, T. R., Gerber, C. E., Sackett, J. M. and Holden, P. D.: Knowledge Based Route Planning, NAECON 90 (1990), pp. 1001-1007.
- 11) Secarea, V. V., Jr.: Beyond Knobs and Dials: Toward an Intentional Model of Man-Machine Interaction, NAECON 90 (1990), pp. 763-769.
- 12) Swangwanna, S. and Zytow, J. M.: Real-Time Decision Making for Autonomous Flight Control, SAE TP 891053 (1989).
- 13) Lind, J. H., Hutchins, C. W., Jr. and Neil, D. E.: The Effect of Knowledge-Based System Assistance on Piloting Performance, Workload, and Satisfaction, NAECON 90 (1990), pp. 775-781.
- 14) 田中敬司, 松本甲太郎: コックピット・アドバイザリ・システムについて, 日本人間工学会航空人間工学部会第 57 回例会 (1990).
- 15) 田中敬司, 川原弘靖, 他: コックピット・アドバイザリ・システムのシミュレータ実験, 第 29 回飛行機シンポジウム (1991).
- 16) Anon.: National Plan to Enhance Aviation Safety through Human Factors Improvements, Air Transportation Association of America, 1989.
- 17) 武田 峻: 航空安全について, 航空技術, 424 (1990), pp. 3-8.