

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19206088

研究課題名（和文）航空安全向上のためのパイロット操縦ヒューマンウェアの統合化に関する研究

研究課題名（英文）Research on Integration of Pilot Operation Humanware for aviation safety improvement

研究代表者

鈴木 真二（SUZUKI SHINJI）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30196828

研究成果の概要（和文）：

着陸時の視覚情報から同じ操縦を再現できるコンピュータモデルを構築し、横風やウィンドシア時のベテランパイロットの操縦の特徴を抽出した。また、地震の発生により着陸空港の変更を行うなどの状況におけるフライトマネージメント能力の評価方法を開発し、ベテランパイロットの意思決定の特徴を抽出した。そして、パイロットのワークロードを軽減するために、実時間の最適経路生成手法を開発し、パイロットヒューマンウェアの統合的研究を実施した。

研究成果の概要（英文）：

The integrated study of the pilot humanware was carried out through the following researches. Firstly, by constructing the computer model which can reproduce the same pilot maneuver from the visual information at landing, characteristics of a veteran pilot operation can be extracted in wind shear or side wind condition. Secondly, an evaluating method of the pilot's flight management ability was developed, and the decision making characteristics can be revealed in the divert condition due to emergency cases. Thirdly, a real time optimal path generation method was developed to reduce the pilot work load.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,500,000	4,050,000	17,550,000
2008年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
総計	36,500,000	10,950,000	47,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学、認知科学、安全、操縦分析

1. 研究開始当初の背景

航空機操縦の自動化が進む中で、パイロットのヒューマンエラーに起因する事故が7割以上を占めるに至っていた。航空機輸送が増加する中、航空安全を向上させることは社会的な重要課題であり、そのためにはヒューマンエラーをなくす最大限の努力が必要となっていた。ヒューマンエラーの研究には、

機械的な故障を扱うハードウェア、計算や手続き上の過誤を扱うソフトウェア以外に、人間の判断、行動、操作を解析できるヒューマンウェアに関する研究が必須であった。

2. 研究の目的

パイロットの操縦に関するヒューマンウェアに焦点をあて、着陸操縦に関する人間の

情報処理と操縦技能の分析、および、着陸時の意思決定に関わるワークロード分析などにより、航空機パイロットの統合的な分析手法を開発し、航空安全への工学的な貢献を目的とする。

3. 研究の方法

(1) ニューラルネットワークによる人間の情報処理・操縦技能分析

パイロットの着陸操縦モデルを構築することにより、パイロットの着陸操縦に関する分析を行う。特に、接地に際して、パイロットが沈下速度を低減するために機首を引き起こすフレア操作を対象に解析を進めた。接地間際にはパイロットは計器情報を詳細に確認する余裕はなく、コックピットからの視覚情報 (Visual Cue) を頼りに操作を行うことに着目し、Visual Cue の時刻歴をパイロットへの入力、操作履歴をパイロットの出力とし、実際の操縦データをもとに、ニューラルネットワークによってパイロットモデルを学習する手法を開発した。

図1は、入力として採用した Visual Cue であり、例えば、水平線の高さはピッチ角、傾きはバンク角などに対応している。こうしたデータには反応の遅れや、過去の記憶も含めている。

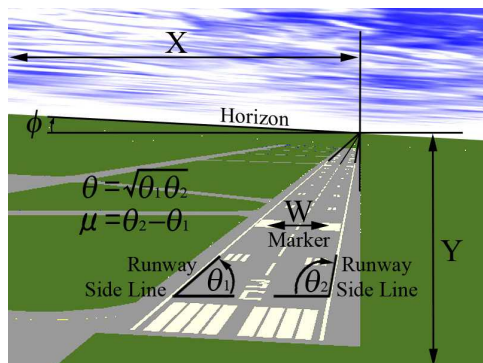


図1 パイロットの使用する Visual Cue のモデル化

データの取得には、PC ベースのフライトシミュレータのほか、エアラインの訓練用シミュレータを用い、Visual Cue は、機体の位置や姿勢の履歴から数値化した。また、実機での着陸操縦のモデル化を可能にするために、コックピットからのビデオ映像から Visual Cue と操縦履歴を画像処理により数値化する手法も開発した。

パイロット操縦の分析には、操縦に対する入力の寄与の大きさを分離する因子解析と、入力の変化に対する操縦の感度を示す感度解析を用い、ベテランパイロットの操縦を新

人パイロットの操縦と比較検討した。

(2) 操縦時のワークロード分析

主な研究対象のエアラインのパイロットは、機体の操縦だけではなく、オペレーション全体をマネジメントしている。すなわち、飛行中の安全性の確保に加え、定時性・経済性・快適性という合計4つの要素をバランスよく考慮しながら独力で意思決定する能力、「フライト・マネジメント能力」が必要とされている。この能力を身につけることによりワークロード全体の低下に繋がると考えられる。このフライト・マネジメント能力は長年の飛行経験によってはじめて獲得されるものとされてきた。しかしながら経験の少ないパイロットは今後増加していくことが予想され、そのようなパイロットにも出来るだけ早く当能力を身につけさせたいという要望がエアライン側から出ている。

このような事を背景として、フライト・マネジメント能力を評価する方法を確立するとともに、PC を活用して容易に操縦動作等を記録しフライトマネジメント能力を可視化するツールについて検討すること、そしてフライトマネジメント能力以外の要素でもワークロード低減に繋がる操縦について調べることを目的として研究を行った。

具体的な研究方法としては、まずエアラインパイロットのフライト・マネジメント能力を評価する方法を確立するためのデータ取得を行った。具体的には、フライトシミュレータを活用し、かつ実際のフライト環境を可能な限り模擬した上でフライトを行い、フライト中の各種判断や操縦動作・発話について記録を行い、パイロットの決断能力に関する評価方法について解析を行った。また、これに関連して有視界飛行時に視覚情報を活用して的確な操縦動作とワークロード低減へ繋げていくことを目的とする模擬視界発生装置を用いた飛行試験も行い、結果の解析を行った。

更に、PC を活用して操縦動作等を記録し、フライトマネジメント能力を可視化するためのツール開発を行うとともに、実際にパイロットに使用してもらい、得られたフライトマネジメント能力について評価する試験を行った。

(3) ローリスクな最適操縦技術

飛行中の航空機を最適に操縦する方法を求めるため最適制御理論を使用する。しかし、その求解には多くの計算時間が必要となるため、時々刻々変化する飛行状況に応じて、それを正確に求めることは不可能に等しい。そこで、最適解が自明な状況をまず考え、そこから状況変化に応じて最適操縦方法を逐次変化させていく Neighboring Extremal

最適制御法に関する研究を行った。

最適な操縦は、数学的には最適制御問題として定式化できるが、非線形な問題に関しては解を求めるために計算負荷が大きく、実際の飛行中に厳密な最適化を求めることは難しい。そこで、本研究では、飛行する機体上で、状況変化に合わせた最適な操縦方法を実時間で計算するため、現時点で得られている最適解 $x(t)$, $u(t)$ ($0 \leq t \leq t_f$) から、時々刻々、最適解を修正することで状況に応じた近似最適解を求める方法を開発した。

4. 研究成果

(1) ニューラルネットワークによる人間の情報処理・操縦技能分析

従来実施してきたエレベータ（昇降舵）による縦の操縦分析に加え、エルロン（補助翼）とラダー（方向舵）による横の操縦分析も可能とし（雑誌論文③）、また、フライトシミュレータによるデータ取得のみならず、実飛行データによる操縦分析も可能とした（雑誌論文②）点は、手法の開発における特記すべき研究成果である。

横方向の操縦分析が可能になったことにより、パイロットにとっては横風時のフleaー操作とデクラブ操作（横滑りなしで降下しタッチダウン寸前に機種方向を滑走路に向ける操作）という困難の操縦の分析が初めて可能になった（雑誌論文③）。

また、接地直前に風向風速が急変するウィンドシアに対する操縦分析も行った。ウィンドシアは大気速度が急変するため、特に操縦が困難となるもので、今回、図2に示すウィンドシアに対して複数のパイロットの操縦を分析した（講演論文28, 29）。

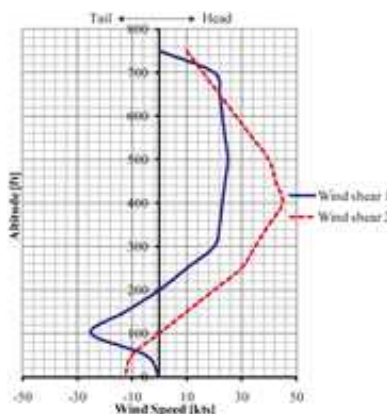


図2 分析に用いたウィンドシアモデル（高度方向の速度分布）

横風操縦、ウィンドシアの操縦を分析の結果、ベテランと、新人パイロットの注意力の配分の差、感度の差が明確になった。こうした成果は、東京大学において開催した「ウィンドシアに関する、運航、気象、計測、操縦の研究講演会」（2009年5月20日）において関連する航空研究者、気象学者、エアラインパイロットとの間で共有できたことは大きな成果であった（講演論文27）。また、第5回航空気象研究会（2011年2月10日）において特別講演を行い、気象研究者との意見交換を行った（講演論文35）。

(2) 操縦時のワークロード分析

エアラインパイロットのフライト・マネージメント能力評価試験については、ノーマルな状況でのフライト・マネージメント能力が経験によってどのように異なるのかを着陸時にウィンドシアが発生したことを想定したシナリオのもとで解析した（文献30他）。図に飛行経路と高度を解析した実験結果の一例を示す。フライトマネージメント能力を評価することで得られた知見は以下の通りである。1）飛行時間の比較的短い被験者と長い被験者の間で飛行中に意思決定をする際に外部の情報を中心に判断するのか、自機の状態を中心に判断するのかという違いがあり、総飛行時間の長いパイロットの意思決定には後者のような傾向がある。2）意思決定の結果は、得られる情報に対して意思決定者がどのような評価を下すかによって異なり、総飛行時間が長いパイロットは、限られた情報からリスクを予測し、必要な行動を早めに取りようとする傾向がある。3）飛行経験が長い被験者は、意思決定のための選択肢が多く、さらにどの情報を収集すべきか事前に判断することが可能である。

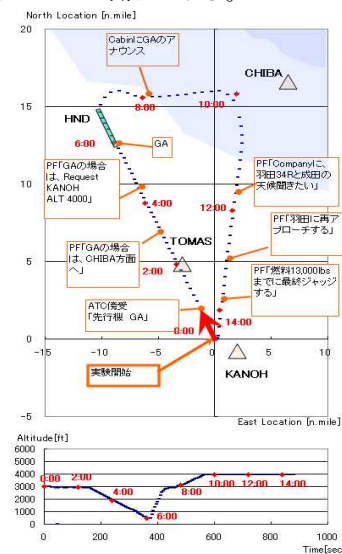


図3 フライトマネージメント能力評価試験

視覚情報を活用して的確な操縦動作とワークロード低減に繋げる試験については、着陸時に滑走路に正対するための旋回飛行中のパイロットの操縦動作を解析した。その結果、経験の長いパイロットは、滑走路と機体のなす角度を機体位置に応じて増大と減少させ、その後微調整を行うことで滑走路へ正対させることを明らかにした。この操縦動作は安定した飛行と低ワークロードに繋がる最小限の操作を可能にしている。(学会発表 32)。

この研究ではさらに、PC を活用して操縦動作等を記録し、フライトマネジメント能力を可視化するためのツール開発をおこない、運航に関わる操作と運航に必要な情報提供を簡易的に再現するツール(図 4)と、操作履歴を時系列データとして表示する可視化ツールを作成した。

羽田空港が地震により閉鎖となったシナリオに対して、PC ツールを用いたエアライン・パイロットを被験者とした実験を行った(学会発表 31 他)。総飛行時間の短い被験者は、早めに Divert する傾向が見られるのに対し、総飛行時間の長い被験者は、空港の状況が明らかになるまで Holding を続ける傾向が見られ、被験者の経験により判断が分かれる結果となった。この傾向は、フルフライト・シミュレータを用いて行った実験結果と一致している。また、質問紙調査も並行して行った。意志決定を行うにあたり、過去の同様の経験がどのように影響したか、の質問に対する回答では、Copilot の方が Captain よりも、過去の経験の影響を強めに受ける結果となった。この結果は、飛行時間の長いパイロットの方が様々な事態に遭遇していると考えられ、過去の経験が一般化されているため、個々の経験は大きく影響しないという、Naturalistic Decision Making の意志決定モデルの議論に沿うものである。

着陸時にウィンドシアが発生したことを想定したシナリオに対しても PC ツールの開発を行った。地震シナリオとの違いとして、悪天候が予想される ECHO を回避しながら運航する意思決定が必要であることが挙げられる。そこで、PC ツールに針路を変更し Holding パターンに自動的に入る機能などを加えた(学会発表 34)。また、一般的なノートパソコンで対応可能な範囲にて、より実運航に近い状態を模擬することを目的として、プロジェクトに投影させる機能を用いた視界表示機能の開発を行った。



図 4. PC ツール操作画面

(3) ローリスクな最適操縦技術

飛行を避けるべき領域として突風領域を想定する。機体にはレーザーライダー (JAXA 開発中) が備え付けられており、飛行中、前方最大 5.0km までに存在する突風領域が捕らえられる。図 5 に結果を示す。原点より (図の左側より) 突風領域に向かって航空機は進入してくる。レーザーライダーの補足範囲で捕らえられた前方状況に応じて、これから生じるであろう機体の擾乱を抑えるような適切な最適操縦方法が時々刻々と得られることがシミュレーションで確認できた。最適経路を飛行中に算出し表示することでパイロットへの負荷を低減できることが期待できる。

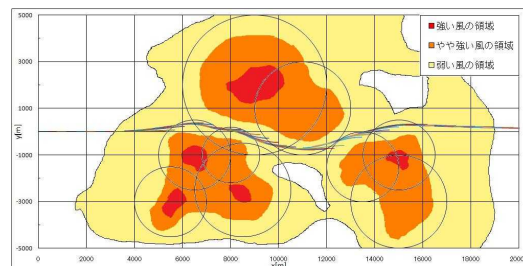


図 5 突風領域と最適回避飛行

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

- ① R. Mori, S. Suzuki, Y. Sakamoto, and H. Takahara, Analysis of Visual Cues During Landing Phase by Using Neural Network Modeling, Journal of Aircraft, 44(6), 2007, 2006-2011
- ② R. MORI, S. SUZUKI, K. MASUI and H. TOMITA, Neural Network Analysis of Pilot Landing Control in Real Flight, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 1(1),

- 2008, 14-21
- ③ R. Mori, S. Suzuki, Neural Network Modeling of Lateral Pilot Landing Control, J of Aircraft, 46(5), 2009, 1721-1726
 - ④ J. O. Entzinger, S. Suzuki, Modeling of the visual approach to landing using neural networks and fuzzy supervisory control, Aerospace Science and Technology, 14(2), 2010, 118-125
 - ⑤ R. Mori, S. Suzuki, Modeling of Pilot Landing Approach Control Using Stochastic Switched Linear Regression Model, J of Aircraft, 47(5), 2010, 1554-1558

〔学会発表〕(計 35 件)

- 1) R. Mori and S. Suzuki, Optimization of Neural Network Modeling for Human Landing Control Analysis, AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit, 2007/5/7, Rohnert Park, California, USA
- 2) M.Nichapoke ,R.Mori, and S. Suzuki, Contribution Analysis for Neural Network Model of PD Controller, 2007 JSASS-KSAS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, 2007/10/10, 北九州
- 3) 森亮太,ニッジャポークマノート,鈴木真二,高原博, 実機におけるパイロットの操縦解析, 第 4 5 回飛行機シンポジウム, 2007/10/12, 北九州
- 4) 森亮太, 鈴木真二, パイロットの着陸操縦解析の横方向への拡張, 第 1 6 回交通・物流部門大会, 2007/12/13, 川崎
- 5) R. Mori and S. Suzuki, Neural Network Analysis of Pilot Landing Control under Real Flight Condition, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008/1/8, Reno, NV USA
- 6) 手塚亜聖, 畑毛博樹, 李家賢一, 旅客機パイロットのフライト・マネージメント能力調査ソフトウェア開発について, 日本航空宇宙学会第 45 回飛行機シンポジウム, 2007/10/12, 北九州
- 7) 手塚亜聖, 畑毛博樹, 李家賢一, 旅客機パイロットのフライト・マネージメント能力育成ソフトウェアの開発, 日本機械学会第 16 回交通・物流部門大会, 2007/12/13, 川崎
- 8) R. Mori, S. Suzuki, Analysis of Pilot Maneuver under Crosswind Condition Using Neural Network, ICNPAA2008: Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, 2008/6/25-27, Genoa, Italy
- 9) 森亮太, 鈴木真二, ニューラルネットワ
- ークを用いた横風時のパイロット操縦のモデリング, 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008/10/22-24, 大田区
- 10) R. Mori, S. Suzuki, Analysis of Pilot Landing Control in Crosswind Using Neural Networks, 2009 IEEE Aerospace Conference, 2009/3/7-14, Big Sky, MT, USA
- 11) J.O. Entzinger and S. Suzuki, Visual Cues in Manual Landing of Airplanes, 2008 KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, 2008/11/20, Korea
- 12) 手塚亜聖, 畑毛博樹, 李家賢一, PC ソフトによる旅客機パイロットのフライト・マネージメント能力の研究, 第 45 回飛行機シンポジウム, 2008/10/22, 大田区
- 13) 手塚亜聖, 畑毛博樹, 李家賢一, 旅客機パイロットのフライト・マネージメント能力育成ソフトウェアの開発: 第 2 報, 日本機械学会第 17 回交通・物流部門大会, 2008/12/11, 川崎
- 14) 佐藤耕喜, 土屋武司, 目的関数の逆推定によるパイロット操縦特性の解析, 第 46 回飛行機シンポジウム, 2008/10/23, 北九州
- 15) Sato, K. and Tsuchiya, T., Analysis of Pilot's Maneuverings by Inverse Estimation of Objective Function using Genetic Programming, 2008 KSAS-JSASS Joint International Symposium on Aerospace Engineering, 2008/11/20, Korea
- 16) 手塚亜聖, 畑毛博樹, 李家賢一, PC ソフトによる旅客機パイロットのフライト・マネージメント能力の研究: 第 2 報, 日本航空宇宙学会第 40 期年会講演会, 2009/4/9, 東京
- 17) 李家賢一, 旅客機パイロットのフライト・マネージメントについて (ウィンドシア発生時), ウィンドシアに関する、運航、気象、計測、操縦の研究講演会, 2009/5/20, 東京
- 18) 河野綾子, 畑毛博樹, 李家賢一, 手塚亜聖, Wind Shear 発生時の旅客機パイロットの意思決定に関する実験的研究, 第 47 回飛行機シンポジウム, 2009/11/6, 岐阜市
- 19) 手塚亜聖, 畑毛博樹, 李家賢一, 地震による空港閉鎖時のフライトを模擬する PC ツールの開発について, 第 47 回飛行機シンポジウム, 2009/11/6, 岐阜
- 20) 河野綾子, 畑毛博樹, 李家賢一, 手塚亜聖, Wind Shear 遭遇時のエアライン・パイロットの意思決定に関する研究, 日本機械学会第 18 回交通・物流部門大会, 2009/12/3, 東京都

- 21) 手塚亜聖、畑毛博樹、李家賢一、PC ツールを用いた地震による空港閉鎖時におけるフライト・マネージメント能力の研究、日本機械学会第18回交通・物流部門大会、2009/12/5、東京都
- 22) 中村俊彦、手塚亜聖、小林朗、河野 綾子、李家 賢一、Wind Shear 発生時のフライトマネジメントを模擬する PC ツールの開発について、日本機械学会関東学生会第49回学生員卒業研究発表講演会、2010/3/10、東京都
- 23) J. O. Entzinger and S. Suzuki, Apparent Rotation of Runway Sidelines as a Cue to Flare Timing, 2009 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2009/11/4, Gifu
- 24) 鈴木真二、ウインドシアに関する研究動向、ウインドシアに関する、運航、気象、計測、操縦の研究講演会、2009/5/20、東京都
- 25) Shinji Suzuki, Neural Network Analysis and Control for Improving Air Safety, The 2nd Aerospace Innovation Workshop, 2010/2/1, Tokyo
- 26) Sawashima, F. and Tsuchiya, T., Real-time Trajectory Optimization for Area Avoidance, 2009 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2009/11/4, Gifu
- 27) 鈴木真二、パイロットの操縦分析、ウインドシアに関する、運航、気象、計測、操縦の研究講演会、2009/5/20、東京都
- 28) 山口幸男、森亮太、鈴木真二、厳しい飛行条件下における航空機パイロットの着陸操縦解析、第48回飛行機シンポジウム、2010/11/30、静岡
- 29) R. Mori, Y. Yamaguchi, S. Suzuki, PILOT LANDING CONTROL ANALYSIS USING NEURAL NETWORKS UNDER SEVERE FLIGHT CONDITIONS, 27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 2011/9/19, Nice
- 30) A.Kono, H.Hatake, K.Rinoie, A. Tezuka and R.Kobayashi, Experimental Study on Decision Making of Jet Airliner Pilots -A Case of Wind Shear, 27th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, 2010/9/22, Nice
- 31) A. Tezuka, H.Hatake and K. Rinoie, PC Tool Development for Simulating Flight Management Process of Jet Airliner Pilots, 27th Congress of International Council of Aeronautical Sciences, 2010/9/22, Nice
- 32) Y. Tanaka and K. Rinoie, Optic Flow and Visual Analysis of the Base-to-Final Turn about the Reciprocating Single-engine Plane, The 3rd Aerospace Innovation Workshop , 2011/2/1, Tokyo
- 33) 河野綾子、小林朗、李家賢一、手塚亜聖、飛行経験の異なる旅客機パイロットの意思決定に関する実験的研究、第48回飛行機シンポジウム、2010/12/2、静岡
- 34) 中村俊彦、小林朗、手塚亜聖、李家賢一、Wind Shear 遭遇時のフライトマネジメント PC ツールにおける針路設定機能について、第48回飛行機シンポジウム、2010/12/2、静岡
- 35) 鈴木真二、ウインドシアにおける航空機の運動解析と、操縦分析に関する話題(特別講演)、第5回航空気象研究会、2011/2/10、東京

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

1) 「ウインドシアに関する、運航、気象、計測、操縦の研究講演会」を2009年5月20日、東京大学において開催

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 真二(SUZUKI SHINJI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30196828

(2) 研究分担者

李家 賢一(RINOIE KENICHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：20175037

土屋 武司(TSHUCHIYA TAKESHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：50358462

柄沢 研治(KARASAWA KENJI)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：60134491

手塚 亜聖(TEZUKA ASEI)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：50361506

(3) 連携研究者

無し