[ワークショップ 3]

航空機のパイロット・モデリングと知的インターフェース

正 ○鈴木真二、柄沢研治、松永大一郎（東大）

Pilot Modeling and Intelligent Interface for Aeronautical Engineering

Shinji SUZUKI, Kenji KARASAWA and Daiichirou MATSUNAGA

This paper considers the technical review and the recent topics in the man-machine interface and the pilot modeling for Aeronautical Engineering. The pilot modeling for aircraft operation has been widely investigated to analyze and increase flying quality of aircrafts. Those models include linear and nonlinear, parametric and non-parametric mathematical forms. Recent researches try to utilize the mathematical pilot model for an intelligent man-machine interface which adds adaptive characteristics to a stability augmentation controller..

Key Words: Man-Machine System, Aeronautical Engineering, Control System

1. はじめに

三次元空間を運動する航空機を操縦することは、二次元空間を移動する人間にとって容易なことではない。操縦技術の困難さは、飛行性(Flying Quality)と呼ばれる人間・機械系の特性を問題とする研究分野を生んだ。初期の課題は、安全な操縦特性を飛行機に持たせる機体の設計技術にあったが、その後、人間の操縦特性を科学的に分析し、操縦の容易さや安全性を定量的に評価することに研究の重点は移った。その背景には、開発者がテストパイロットを兼ねることが困難であるという事情があり、テストパイロットの評価を客観的に数値化する指標が必要であったためである。また、計画段階で飛行性を予測することも要求され、パイロットの数学モデル構築に関する研究も進められた^①。

本稿ではこうしたパイロットのモデリングの状況を概観するとともに、パイロットモデルを利用して、マン・マシン系をインテリジェント化する試みについても紹介したい。近年、航空機の操縦の自動化が急速に進められ、離陸から着陸まで完全な自動操縦も技術的には可能になったが、それは理想的な環境に対してであり、現実には手動操縦の必要性はいまだに高く、今後も存続すると思われる。

2. パイロット・モデリング

2. 1 伝達関数モデル

人間の機械的動作のモデル化は、1947年にTustin が人間オペレータの操作を、無駄時間を含む微分・比例制御として表現したことに始まった^②。その後、多くの実験的解析によって、図1のような補償動作を表現する以下のような伝達関数モデルが定着している。

$$Y_p(j\omega) = K_p \frac{1 + T_L j\omega}{1 + T_I j\omega} \frac{e^{-j\omega \tau}}{1 + T_N j\omega} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、右辺の第1, 2項はパイロットが調整可能なリードラグ制御系で、無駄時間 τ と、神経筋肉系の遅れ T_N はパイロットが調整できない項である。

図1 パイロットの補償動作

原稿受付 2002年2月 日。

^①東京大学大学院工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: tshinji@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

人間の動作の特徴は、式(1)のリードラグ項を制御対象によって適応的に調整することである。クロスオーバーモデルは適応的特性を簡潔に表現し、人間を含めたシステムの一巡伝達関数が

$$Y_{OL}(j\omega) = Y_p(j\omega)Y_c(j\omega) = \omega_c \frac{e^{-j\omega\tau}}{j\omega} \cdots \cdots (2)$$

となるように人間は制御則を調整するというものである^①。ここで $Y_c(j\omega)$ は制御対象の周波数応答であり、 ω_c はクロスオーバー周波数（ゲインが1となる周波数）である。式(2)は、周波数に対して右下がりのゲイン特性を持つことを意味し、人間はクロスオーバー周波数以下の周波数では、偏差を0に抑えるように制御し、それ以上の周波数の偏差は遮断して制御しないように無視しているといえる。航空機の場合、クロスオーバー周波数は3から5 rad/s である。

2. 2 ARX モデル

ARX モデルは人間の操作を離散系で表現することで、伝達特性をシステムチックに求めることができる。

1 入力 1 出力系における状態方程式を

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \cdots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \cdots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \quad (3)$$

とおく。ここで $u(t)$ は入力、 $y(t)$ は出力、 $e(t)$ は外乱である。ここでシステムの特徴は未知であり、

$$\theta = [a_1 \cdots a_{na} \quad b_1 \cdots b_{nb}] \quad (4)$$

が推定すべき変数となる。時間遅れ素子 q^{-1} を用い

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \cdots + a_{na} q^{-na}, \quad B(q) = b_1 + \cdots + b_{nb} q^{-nb+1}$$

を導入して、式(1)を以下の様に表現する。

$$y(t) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)} u(t) + \frac{1}{A(q)} e(t) = G(q, \theta) u(t) + H(q, \theta) e(t) \quad (5)$$

式(3)はシステムの ARX モデルと呼ばれ、未知係数は最小二乗法によって決定できる。

2. 3 構造モデル

習熟したパイロットは最適制御に近い操作を行うとする考えに基づき、状態量推定をカルマンフィルタで、制御則を最適制御則で求めてモデル化する手法 (structural model) も提案されている^②。全体の入出力特性はクロスオーバーモデルに近い特性が得られる。

2. 4 ニューラルネットワークモデル

2. 1 ~ 2. 3 は無駄時間は持つものの、基本的には線形モデルである。非線形特性を含んだ人間

操作に対しては確立されたモデルは無く、今後の研究課題といえる。

生命の脳神経網をモデル化したニューラルネットワークを用いたモデル化は非線形モデルの一例である。図2は後の例で使用されるニューラルネットワークである^③。ここでは遅れ素子 D を通した入力によって出力を生成する回路が使用され、非線形性を表現するために中間層を用いている。また、出力も入力に含める ARMA モデルとしてモデル化している。ニューラルネットワークモデルの未知パラメータは回路の重み係数と素子に入るバイアスであり、教師信号との誤差を最小にするように学習によって決定される。

図2 ニューラルネットワーク

2. 5 GPモデル

GP (遺伝的プログラミング) は木構造からなるプログラムを遺伝的アルゴリズムによって自動生成する手法であり、人間の操作モデルの構築に関する研究が行われている^④。

図3 GPが扱う木構造の例

図3の右は $(x/4.71 - 2.53) \times (-0.29 + x)$ という数式

を表現する木構造である。木構造のノードの種類や演算子を適切に用意し、数値や構造自体を遺伝的に生成することで、非線形な操作を学習させる。

3. パイロット・モデリングを用いた操縦分析

ここでは、ニューラルネットワークモデルを用いた着陸時のパイロットの操縦分析を行った例を紹介する^⑤。

航空機を操縦する場合、着陸間際には計器を確認する時間的余裕は無く、パイロットは視界から機体の状況を把握しなくてはならない。こうした状況を模擬するために、図4のような視界から得た情報

(水平線高さ、滑走路後縁高さ、滑走路角度)と操縦桿の動きによって図2のようなニューラルネットワークを構成する。この場合の学習はベテランパイロットのシミュレータによる飛行履歴データから行った。

図4 パイロットのしている視界情報

得られたニューラルネットワークモデルにより飛行シミュレーションを実施し、中間層を適切に設計すれば航空機を正しく着陸できるモデルを作れることを確認した。図5はニューラルネットワーク(NN)モデルと人間パイロットの飛行状況を示している。わずかな差は認められるが NN モデルにおいても正常な着陸が可能となっていることが分かる。

図5 ニューラルネットワークによる着陸操縦

構築されたニューラルネットワークモデルを用いて人間パイロットの操作状況の分析を試みるために、各入力が出力にどの程度寄与しているかを示す影響度を算出した。図6、7は風の無い状態での着陸操作と、風のある場合の着陸操作に関してそれぞれ、ニューラルネットワークモデルを構築し、出力である操縦桿操作量に対する入力別の影響の大きさを要因分析によって調査した。横軸は接地直前の時間軸で、Iはアプローチ、IIは引き起こし、IIIは接地の操作である。図6は無風状態、図7は風のある状態

での影響度の計算結果である。風のある場合の操作は、時間的な変動が大きく、影響度も特定の情報に偏ることなく広く分散していることが読み取れる。風があるほうが操縦は当然ながら難しく、注意を分散し、状況に適応させていることが伺える。現在、複数の現役パイロットの評価試験を実施中であり、操縦訓練評価方法としての可能性を検討している。

図6 無風状態での要因分析結果

図7 風がある状態での要因分析結果

4. 自己チューニング PID 制御への応用

大型の航空機は手動で操縦する場合も、油圧等の介在によって安定性を増大させるなどの自動制御のアシストを得ている。この場合の、自動制御系は平均的なパイロットを想定して設計される。パイロットの操作特性に応じて自動制御系を適応的に調整することが可能となれば、同一の操縦者でも疲労などの状況に応じて制御則が調整され、操縦者の習熟度によっても自動的に調整され、つねに最適な操縦特性が提供されることになる。ここでは、人間の操縦特性を ARX モデルによりオンライン推定し、PID 制御器の調整を適応的に行う試みに関して紹介する。

人間パイロットはコントローラの支援の下で制御対象 $Y_A(s)$ の出力 $m(t)$ を入力 $i(t)$ に一致させるように操作するものとする(図8)。

人間パイロットのモデル化には無駄時間とリードラグ補償からなるモデルを採用し、次のような ARX モデルを仮定する。

$$Y_P(q) = \frac{(b_1 + b_2 q^{-1})}{q^{nk} (1 + a_1 q^{-1})} \quad (6)$$

ここで nk, a_1, b_1, b_2 が同定されるパラメータであり、逐次最小二乗法を用いてオンラインで同定する。

コントローラの設計にはPID制御則を採用する。人間パイロットモデルと制御対象の結合伝達関数を $G(s)$ と表現すると、システムの一巡伝達関数は

$$(K_p + K_d s + \frac{K_i}{s})G(s) \quad (7)$$

である。 K_p , K_d , K_i の値は、ステップ応答の定常誤差 e_{ss} の値と、式(10)のゲインが1となるクロスオーバー周波数 ω_c における位相余裕を指定して決定する。

図9、10は、人の操縦特性をリアルタイムで同定し、その結果によってPID制御ゲインを自動調整するシステム構成である。

図8. Man-Machine Model with Controller

図9 自己調整PID制御の構成

図10 実験状況

図11は結果の一例で、10秒後から同定結果によってゲインを調整したものである。図の上は操作量、下は制御誤差であり、操縦者の特性に応じて適正な制御が達成されていることがわかる。さらに実験では、操縦者の特性の変動や、被験者の習熟度の違いも検出でき、PID制御系がその変動を有効に調整可能であることを確認している。

5. あとがき

人間の操作特性を同定する研究と、その結果をもとに、操縦特性の評価分析を行う試みと、自動制御ゲインを自己調整する検討結果を紹介した。自動化と人間操作の調和は大きな課題であり⁽⁶⁾⁽⁸⁾、今後の研究が望まれている。

図11 制御効果（上、操作量：下、制御誤差）

引用文献

- [1] 鈴木真二、航空機における人間・機械系の変遷と最近の話題、機械学会第9回交通・物流部門大会講演論文集 2001.12.13-15,13-18(基調講演OS5)
- [2] 栗城康弘、鈴木真二、上村常治、パイロットの着陸時の状態量推定解析に関する研究、日本航空宇宙学会誌、49-571、(2001)、246-254
- [3] 林幸平、鈴木真二、上村常治、ニューラルネットワークを用いたパイロットの着陸操縦の解析、日本航空宇宙学会誌、49-564、(2001)、21-26.
- [4] 幸末洋介、鈴木真二、遺伝的プログラミングを用いたパイロットの制御特性解析、第39回飛行機シンポジウム講演集、2001,pp.211-215.
- [5] 張 継成、鈴木真二、自己チューニングPID制御による手動制御の支援、機械学会第9回交通・物流部門大会講演論文集 2001.12.13-15,153-156
- [6] D.T. McRuer, Pilot Modeling in Advances in Flying Qualities, AGRD LS-157, 1988.
- [7] W.H. Phillips, Flying Qualities from Early Airplanes to the Space Shuttle, J. Guidance and Control, 12-4, 1989, pp.449-459.