遺伝的アルゴリズムによる非線形ロバスト制御系の 実用的設計法*

井 前 讓^{*1}, 工 藤 修 一^{*2}
森 潔 史^{*3}, 鳥 巢 諒^{*4}

A Practical Design Method for Nonlinear Robust Control Systems using Genetic Algorithms

Joe IMAE^{*5}, Shuichi KUDO,
Kiyofumu MORI and Ryo TORISU

^{*5} Iwate University, Dept. of Welfare Engineering, Ueda 4-3-5, Morioka, Iwate, 020-8551 Japan

Based on genetic algorithms, we propose a practical design method for robust nonlinear controllers of uncertain nonlinear systems. First, we show how to combine the genetic algorithm with the control design. In the proposed design method, the techniques of genetic algorithms are used to circumvent the difficulties of calculation of minimax solutions. Next, we illustrate by simulation the reliability of the proposed method through a simple example. Finally, we demonstrate its applicability by tackling with the flight control problems of landing in a windshear.

Key Words: Robust Control Systems, Practical Design Method, Genetic Algorithm, Nonlinear Control Systems

1. 緒 言

制御系設計の分野において、外乱に対しロバストな制御系を設計しようとする場合、minimax 制御器は重要な役割を果たすことが多い。minimax 制御器に関しては古くから研究がなされ⁽¹⁾⁽²⁾、これまでに多くの研究が報告されている。それにもかかわらず、特に注目を集めるようになったのは、 H_∞ 制御が登場してからである。 H_∞ 制御は H_2 ノルムに基づく設計手法であり、Zames⁽³⁾ により提唱された。線形システムに関する H_∞ 制御においては、二つの Riccati 方程式を導出することにより比較的容易にロバストな制御器を得ることができ、微分ゲーム理論により H_∞ 制御器と minimax 制御器との関連が明らかにされている⁽⁴⁾。ところで、現実的な問題を考えるとき、対象システムは一般に非線形となる。最近、線形 H_∞ 制御で得られた成果を非線形に拡張する研究が試みられている⁽⁵⁾⁽⁶⁾が、対象システムをある種の形に制限するなど問題点

は多い。 H_∞ 制御に限らず、一般的に非線形システムに関する minimax 制御器の導出は極めて困難といわれている。現実的側面からは重要な課題であるにもかかわらず、いまだに強力な設計手法は提案されていない。

minimax 制御器導出を困難にさせている理由の一つとして、取扱う関数の中に、必ずしも微分可能とは限らない関数(以後、非可微分関数と呼ぶ)が含まれることが考えられる。したがって、厳密な minimax 解の導出に固執する限り非線形システムを対象としたロバストな制御系設計は容易ではないと考えられる。本論文では minimax 解にこだわることなく、実用的な観点からのロバスト制御系設計手法の提案を試みる。すなわち、非可微分関数の取扱いが比較的容易とされる遺伝的アルゴリズム(GA)⁽⁷⁾を用いて、非線形ロバスト制御系設計に関する実用的な手法を提案する。まず、対象となる状態空間(または出力空間)を適切な大きさの部分空間に分割する。そして、それらの部分空間を染色体(個体)の遺伝子座に対応させる。対立遺伝子としては制御器の出力信号を離散化したものを採用する。次に、個々の染色体(個体)に外乱を作用させ、環境に適応した個体のみを進化させて外乱にロバストな制御器の導出を試みる。なお最近、minimax 問題

* 原稿受付 1999 年 11 月 18 日。

^{*1} 正員, 岩手大学工学部(〒020-8551 盛岡市上田)。

^{*2} 岩手大学大学院。

^{*3} 岩手大学工学部。

^{*4} 正員, 岩手大学農学部。

E-mail: jimaie@iwate-u.ac.jp

に GA を適用した研究が報告されている。しかし、Poter ら⁽⁸⁾ は制御器の構造を PID 構造に限定し、また、河辺ら⁽⁹⁾ は、対象は非線形システムではあるものの、制御器は線形に限定している。本論文では制御器を線形構造に固定しておらず、本質的に異なる。ただし、本手法の制御器は観測量から操作量への静的な写像に限定されている点、また、観測空間・操作量ともに離散化されている点に注意する必要がある。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では、非線形ロバスト制御問題の一般的な定式化を行う。3 章では、GA に基づく実用的設計手法の提案を行い、簡単な例題を通して本設計手法の正当性を検証する。そして、4 章では、windshear(異常突風)下における航空機の着陸問題⁽¹⁰⁾ をとりあげ、航空機自動着陸のためにロバスト制御器設計を通して、高次元な非線形制御問題に対する本設計手法の実用性を確認する。

2. 問題の定式化

[非線形ロバスト制御問題]

制御対象システムが次のように非線形微分方程式で表されるとする。

$$\dot{x} = f(x, w, u), x(0) = x_0 \in R^n \cdots \cdots (1 \cdot a)$$

$$y = h(x, w, u) \cdots \cdots (1 \cdot b)$$

ここに $x \in R^n$ (状態量ベクトル), $y \in R^q$ (出力信号), $w \in R^m$ (外乱信号), $u \in R^p$ (操作量信号)。このときフィードバック制御器を $u = K(y)$ とし、与えられた終端時刻 $\tilde{T}$ のもと

$$\min_{K(y)} \max_{w \in L_\infty} \int_0^{\tilde{T}} g(y(t), w(t)) dt \cdots \cdots (2)$$

を求める問題を考える。ただし、 $g: R^n \times R^m \rightarrow R^1$ は C^∞ 級であり、かつあらかじめ与えられるものとする。

(注意 1) 本論文は、一般的な非線形微分方程式を対象とする。非線形 H_∞ 制御では線形系の結果を非線形系に拡張することに主眼が置かれているため、制御対象には u および w に関してのある種の線形性が必要とされる。

(注意 2) 評価関数の式(2)は、 L_2 ゲイン表現はもちろんのこと、非可微分関数または不連続関数を含む広いクラスの関数を対象とすることが可能である。

(注意 3) 取扱いを簡単にするため有限時間を考えている。したがって一般的には閉ループの安定性の問題は生じない。

3. 実用的設計手法

3.1 設計手順 以下に、GA⁽⁷⁾ を用いた本設計手法の具体的手順について述べる。本設計手法は実用的

な観点からロバスト制御を考えており、式(2)の minimax 解の厳密な算出を回避している点に注意されたい。

〈ステップ 1(出力空間の分割)〉

出力変数から構成される出力空間を有限個に分割する。その際、全出力空間を取扱うことは物理的に不可能なので、適切な有界領域を選定する必要がある。

〈ステップ 2(個体構造の決定)〉

個体は有限個の遺伝子で構成された染色体からなる。そこで、分割された出力空間の各領域と染色体の遺伝子座との対応を決定する。

〈ステップ 3(操作量の離散化と遺伝子への記述)〉

GA を制御器の構成に利用するため、対立遺伝子として操作量を採用する。この場合、操作量を連続値として扱うと情報量が増大し、取扱いが困難となるため、操作量を離散化する。離散化された操作量は適当な記号化を行った後に、対立遺伝子として各遺伝子に記述される。これにより、各個体が、制御対象の出力に応じて、与えるべき操作量を決定する制御器となる。

〈ステップ 4(評価関数から適応度関数への変換)〉

GA では、適応度の大きい個体の子を次世代に多く残し、適応度の小さい個体がとうたされることによって探索が進行し、適応度関数の最大化が図られる。よって GA を用いる場合、評価関数(2)を GA の適応度関数へ適切に変換しなければならない。本報告で取扱うロバスト制御問題は max 関数を最小化する問題である。そのため、適当な方法を利用し(例えば逆数をとるなど)、これを最大化問題へ変換する。また、今回使用する GA の選択のルール(ルーレット選択)は適応度に比例して行われるため、適応度関数が非負であることが要求される。そのため、問題によっては適当な定数を加えるなどして適応度関数の値域を調整する必要がある。さらに、ステップ 1 において出力空間内の有界領域におさまらない個体に対しては適応度を小さくする工夫が必要である。

以上のことより、2 章で定式化されたロバスト制御問題に対し、次のような適応度関数を考えることができる。

$$f = \left(\int_0^{\tilde{T}_1} g(y, w) dt + P(\tilde{T} - \tilde{T}_1) \right)^{-1} \cdots \cdots (3)$$

ここに、

$\tilde{T}_1$: 終端時刻 $\tilde{T}$ までに至らずにステップ 1 で設

定された有界領域からはずれた場合の時刻

P : 重み係数

であり、 $P(\tilde{T} - \tilde{T}_1)$ の項は有界領域におさまらない個体に対する工夫である。

したがって、個体の適応度は、ランダムに生成された外乱を用いて式(3)により計算される。

〈ステップ5(GAに用いるパラメータの決定)〉

問題に応じて、GAに用いるパラメータを決定する。決定すべきパラメータとしては、個体数 M 、計算終了までの世代数 T 、交差率 P_c 、突然変異率 P_m がある。これらのパラメータにどのような値が好ましいかは、適用する問題や、遺伝演算子などに依存するため、最終的には試行錯誤的に決定せざるを得ない。なお、交差法としては基本的な一点交差を採用している。また、突然変異に関しては突然変異率 P_m のもとで染色体の遺伝子を順次チェックし、突然変異が生起する場合にはランダムに選ばれた対立遺伝子を組込んでいく。

〈ステップ6(制御器の決定)〉

以上の操作を行ったのち、最終世代の集団の中で最も適応度の高い個体を制御器として採用する。

ところで、本設計手法の適応度の算出においては、1個体に与えられるランダムな外乱は1種類である点に注意されたい。これは、遺伝的アルゴリズムの特徴を積極的に利用するために工夫された独自の方法である。遺伝的アルゴリズムでは、一連の遺伝操作(生殖、交差、突然変異)と世代交代を通して個体が進化する。この進化は各個体が過去に経験した情報に基づき行われるため、進化の結果得られる個体は、過去の世代における各個体の経験した情報を何らかの形で受け継いでいると考えられる。したがって、1個体に与えられる(ランダムな)外乱は1種類ではあるものの、何世代もの繰返しの後に得られる進化した個体は、数多くの種類の(ランダムな)外乱の経験が受け継がれていると期待される。

なお、本設計手法に関し、その正当性の理論的証明は極めて困難との判断から、次節において簡単な例題を通して数値的な観点からその正当性を検証する。

3・2 数値実験 I 簡単な例題を取上げ、本設計手法の正当性を検証する。ところで、正当性の検証のためには厳密な minimax 解が与えられた例題が好ましいが、無限次元関数空間上でそのような例題を探すのは困難なため、本節では求めるロバスト制御器が容易に推定可能な例題を取上げる。すなわち、平面上を質点が、一定速度 V で外乱を受けながら移動する場合を考える。外乱を考慮した質点の運動方程式は、式(4)で与えられるものとする。

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= V \cos u(t) + w_1(t), x_1(0) = 0 \\ \dot{x}_2(t) &= V \sin u(t) + w_2(t), x_2(0) = 0 \end{aligned} \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、状態変数 x_1, x_2 、操作量 u 、外乱 w_1, w_2 は

x_1, x_2 : x_1 軸, x_2 軸方向, それぞれの座標値

u : 質点の移動方向角度

V : 質点の移動速度

w_1, w_2 : x_1 軸, x_2 軸方向の、質点に加わる外乱

とし、出力変数は状態変数と同じとする。このとき、与えられた終端時刻 $\tilde{T}$ (固定)のもと

$$J = \max_{(w_1, w_2)} \int_0^{\tilde{T}} (x_2 - 0.45x_1)^2 dt \cdots \cdots (5)$$

を最小にするフィードバック制御器 $u = K(x_1, x_2)$ を求める問題を考える。ただし、追従すべき基準となる軌道は、簡単な一次関数で与えられるものとした。

この問題の場合、厳密な minimax 解は得られていない。しかし、本問題は、どのような外乱にも影響されることなく、与えられた直線上をできる限り完全に追従するロバスト制御器を見いだすことと等価である。したがって、本設計手法によりそのようなロバストな制御器を求めることができるならばその正当性が検証されたことになる。

以下、本例題に対する具体的設計手順について示す。

〈状態空間の分割〉

本問題では、状態変数 x_1, x_2 が出力空間を構成する。対象となる有界領域として、 x_1 軸方向において0~500、 x_2 軸方向において0~500の範囲を採用(以下、移動領域と呼ぶ)した。 x_1, x_2 軸方向とも10等分し、移動領域内に100個の部分領域を構成した。

〈個体構造の設定〉

先に移動領域を100個の部分領域に分割したので、各部分領域に対応した遺伝子座を有する個体を設定する。よって、この個体の染色体は100個の遺伝子の列をもつ。

〈操作量の離散化〉

本問題においては、操作量のとりうる値を九つの離散値、すなわち $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 10^\circ, 0^\circ, -10^\circ, -30^\circ, -45^\circ, -60^\circ$ (計算に際してはラジアンに変換している)に代表させることとし、それぞれに“A”から“I”までのアルファベットを対応させ記号化をおこなった。この情報が個体の対立遺伝子となる。

〈評価関数から適応度関数への変換〉

本問題は追従すべき軌道との偏差を外乱に無関係に最小化する問題である。式(3)の具体的な適応度関数 f として次式を用いた。

$$f = \left(\int_0^{\tilde{T}} (x_2 - 0.45x_1)^2 dt + PL \right)^{-1} \cdots \cdots (6)$$

ここに、

$\tilde{T}$: 質点が状態空間内の移動領域から離脱したと

きの時刻

P : 重み係数

であり, L としては, 式(7)で与えられる外乱に限定することにより, $(\bar{T} - \bar{T}_1)$ の代わりに, 直感的に理解しやすい次のような L を選択した.

L : 質点が状態空間内の移動領域から離脱したときの, 個体の x_1 軸座標値から $x_1=500$ までの距離

この評価関数においては提案手法で論議された適応度関数が非負でなければならないという点も満たされている.

〈パラメータ決定〉

GA で使用される具体的なパラメータとして, $T=50$, $M=35$, $P_c=60\%$, $P_m=2\%$ を採用した.

ところで, 質点の移動速度としては, $V=50$ m/s を用いた. また, 外乱は, 簡単のため x_2 軸方向のみを考え,

$$w_1(t)=0$$

$$w_2=\begin{cases} A(\cos 0.44t-1), & t \in [0, 14.3] \\ 0, & t \in [14.3, \infty) \end{cases} \quad \dots\dots (7)$$

とした. さらに予測できない外乱を実現するために A は $A \in [0, 1, 2, \dots, 20]$ とし, 乱数により決定した. 数値実験の結果は次のとおりである.

図1は, 0世代めにおける35個の質点の軌跡を表したものである. この段階ではすべての質点が迷走し, 外乱の影響を強く受けて基準軌道から逸脱するものが多く見られる. また, 原点から出発しているため, 初期の段階から移動領域を離脱し, 図1中には軌跡が現れないものも多く見られた. 各質点の, 基準軌道への追従性を明確に表現するため, 以後は立体的に軌跡を描いた図を並記する. 50世代めの, 質点の軌跡を図2, 3に示す. ここでは, 移動領域から離脱する質点もいくつか見られるが, 0世代めの軌跡と比較すると, 多くの質点が外乱の影響を受けながらも, 基準軌道に追従するよう制御されている. これより, 探索が進んで集団全体の適応度が向上しているようすがわかる. なお, 0世代めの集団を乱数によって再初期化し, 同様の実験をさらに3回繰返した. その結果, 1回目の実験とほとんど同じ傾向を示すことを確認した. ここでは, 0世代めの初期化状態が異なる4種類の実験結果が同じ傾向を示したことから, GAによって大域解が得られたと判断した.

さらに, 制御器として, 最終世代の集団の中で最も

Fig. 1 Initial genetic trajectories

Fig. 2 Genetic trajectories after 50 generations

Fig. 4 Genetic trajectories with the best individual

Fig. 3 3-dimensional graph for Fig. 2

Fig. 5 3-dimensional graph for Fig. 4

適応度の高い個体を採用した結果について検討した。前述した1回めの実験結果をもとに、制御器として採用した個体によって制御される質点を、ランダムな外乱を受ける中、35回数値実験を繰り返した結果を図4、5に示す。ほとんどの場合、質点は基準軌道に沿って移動しており、良好な制御性能を示している。前述した2回めから4回めの実験結果に対しても、最終世代の集団の中から最高の適応度をもつ個体を制御器として選び、数値実験を繰り返したが、同様に良好な制御性能を示した。

以上により、本設計手法の正当性が確認された。

4. 航空機システムへの適用

航空機が離着陸する際、windshear(異常突風)⁽¹⁰⁾の発生が重大な事故を引き起こすことはよく知られている(図6)。例えば1975年のJFK空港の事故、1982年に153人の死者を出したニューオリンズでの事故、1985年に137人の死者を出したダラスでの事故などがwindshear関連の航空機事故として報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。本章では、windshearはランダムに発生するものとし、予測困難なwindshear下における航空機の自動着陸のための制御器設計を、制御器の構造を指定することなく試みる。この設計例を通して本設計手法の実システムへの適用可能性を検証する。なお、混乱を避けるため、記号は新たに定義し直すとする。

まず初めに航空機の数学的モデルを導出する。航空機を質量 m の質点と考え、取扱いを簡単にするため、垂直面内の二次元運動のみを考える。windshearを考慮にいたれた航空機の動きは式(8)の非線形微分方程式⁽¹⁰⁾で表される(図7)。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos \gamma + W_x \\ \dot{h} &= V \sin \gamma + W_h \\ \dot{V} &= (T/m) \cos(\alpha + \delta) - D/m - g \sin \gamma \\ &\quad - (\dot{W}_x \cos \gamma + \dot{W}_h \sin \gamma) \cdots \cdots (8) \\ \dot{\gamma} &= (T/mV) \sin(\alpha + \delta) + L/mV - (g/V) \cos \gamma \\ &\quad + (1/V)(\dot{W}_x \sin \gamma - \dot{W}_h \cos \gamma)\end{aligned}$$

Fig. 6 Schematic of aircraft landing

ただし、抗力 D は

$$D = (1/2) C_D \rho S V^2 \cdots \cdots (9)$$

抗力係数 C_D は

$$C_D(\alpha) = B_0 + B_1 \alpha + B_2 \alpha^2 \cdots \cdots (10)$$

揚力 L は

$$L = (1/2) C_L \rho S V^2 \cdots \cdots (11)$$

揚力係数 C_L は

$$C_L(\alpha) = \begin{cases} C_0 + C_1 \alpha, & \alpha \leq \alpha_* \\ C_0 + C_1 \alpha + C_2 (\alpha - \alpha_*)^2, & \alpha_* \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \end{cases} \cdots \cdots (12)$$

で表されるとする。ここに、各変数の意味は

x m: 水平方向の座標値(水平距離)

h m: 垂直方向の座標値(高度)

V m/s: Windshearに対する相対速度

γ rad: Windshearに対する相対経路角

α rad: Windshearに対する相対迎角(操作量)

δ rad: 推力角

L N: 揚力

D N: 抗力

T N: 推力

W_x m/s: 水平方向のwindshearによる外乱

W_h m/s: 垂直方向のwindshearによる外乱

g m/s²: 重力加速度

S m²: 主翼面積

ρ kg/m³: 空気密度

本章で使用される航空機の各パラメータは、Boeing B-727のものを参考にして、次のように決定した。具体的な数値は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}S &= 144.930 \text{ m}^2, & m &= 68\,038.9 \text{ kg} \\ \alpha_* &= 12 \text{ deg}, & \alpha_{\max} &= 16 \text{ deg} \\ B_0 &= 0.1552, & C_0 &= 0.7125 \\ B_1 &= 0.12369 \text{ rad}^{-1}, & C_1 &= 6.0877 \text{ rad}^{-1} \\ B_2 &= 2.4203 \text{ rad}^{-2}, & C_2 &= -9.0277 \text{ rad}^{-2}\end{aligned}$$

さらに、初期経路角 γ_0 は $\gamma_0 = -3.92525 \times 10^{-2}$ rad, 初期速度 V_0 は $V_0 = 73.0606$ m/s, 推力 T は一定に保たれているものとして $T = 1.7981 \times 10^4$ Nとした。

Fig. 7 Coordinate system and variables

また、推力角 δ は計算を簡略化するため $\delta=0$ rad とした。

このような航空機を着陸時の windshear にもかかわらず、基準着陸軌道に沿って着陸飛行することのできる制御器を見いだす問題を考える。基準着陸軌道としては、文献(10)、(12)を参考に $h=-0.0352x+225.0$ を設定した。これは、着陸のために角度 0.0352 rad で滑走路に進入することを意味する。また、外乱としての windshear のモデルは文献(12)を参考に、風速の水平方向成分 W_x を正弦関数でモデル化し、垂直成分に関しては省略した。具体的には、

$$W_x = \begin{cases} -A \sin\left(\frac{\pi}{R}x\right), & x \in [0, 2R] \\ 0, & x \in [2R, \infty) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$W_h=0$

R m : windshear の半径

A m/s : windshear の最大風速

ただし $A=15$ m/s とし、 R は $R \in [100, 2000]$ の範囲でランダムに与えられるものとした。

この問題は、次のように関数空間上の非線形ロバスト制御問題として定式化できる。

4・1 Windshear 問題 航空機のシステム方程式が式(8)で表されるとする。また、 $g(x, h)=(h+0.0352x-225.0)^2$ とおくと、与えられた終端時刻 $\tilde{T}$ のもと

$$J = \max_{(w_x, w_h)} \int_0^{\tilde{T}} g(x(t), h(t)) dt \quad \dots\dots\dots (14)$$

を最小にするフィードバック制御器 $\alpha=K(x, h)$ を求めよ。

(注意1) 式(14)を最小にする制御器を求めることは、外乱に影響されことなく航空機の位置と基準着陸軌道との偏差が最小となるようなロバスト制御が行われることを要求している。

(注意2) 現実的には状態量すべてが利用可能とは限らない。本問題では x, h のみが利用可能、すなわち、出力変数は x, h であると仮定し、出力フィードバック形式の制御問題として定式化している。

4・2 設計手順

<ステップ1(出力空間の分割)>

出力変数 x, h からなる空間を考え、対象となる有界領域として x 方向(水平距離) $0 \sim 2500$ m, h 方向(垂直距離) $0 \sim 350$ m の範囲の領域を設定した。これを、 x 方向に 100 m ずつ 25 等分、 h 方向に 50 m ずつ 7 等分し、 175 個の部分領域を構成した。

<ステップ2(個体構造の決定)>

175 個の部分領域を、それぞれの遺伝子座に対応さ

せた個体を設定する。よって、この個体の染色体は 175 個の遺伝子をもつ。

<ステップ3(操作量の離散化と遺伝子への記述)>

操作量 α の取りうる範囲を文献(1)、(3)を参考にして、 $0 \sim 16$ deg の範囲に決定した。次に、この操作量を 1 deg ずつ 17 の離散値に代表させることとし、それぞれに“ A ”から“ Q ”までのアルファベットを対応させ、対立遺伝子とした。

<ステップ4(適応度関数の設定)>

適応度関数 f として次式を用いた。

$$f = \left(\int_0^{\tilde{T}} g(x(t), h(t)) dt + PL \right)^{-1}$$

ここに、

$\tilde{T}$: 機体が出力空間内の移動領域から離脱したときの時刻

P : 重み係数

L : 機体が出力空間内の移動領域から離脱したときの、 x 方向座標値から $x=2500$ m までの距離

とする。重み係数 P の値として $P=1000$ を用いた。

<ステップ5(パラメータの決定)>

本問題においては $M=50$, $T=400$, $P_c=60\%$, $P_m=2\%$ を採用した。また、ランダムに発生する windshear を表現するため、その半径 R としては、一様乱数によって発生させた値を用いた。その際、 $R \in [100, 200, \dots, 2000]$ とした。

4・3 数値実験Ⅱ 航空機の制御器(個体)は前述

Fig. 8 Initial flight trajectories

Fig. 9 3-dimensional graph for Fig. 8

のように 175 個の遺伝子座を有し、それぞれに飛行制御則が記述される。航空機は自身の位置座標に基づき、対応する遺伝子座に記述された操作量を用いて飛行を行う。

[進化の過程]

図 8, 9 は、0 世代めの制御の結果である。多くの機体が上昇し、移動領域から離脱している。これは 0 世代めの個体、すなわち制御器の制御性能が低く、windshear の影響を大きく受けていることを示している。このことは、航空機が windshear に遭遇すると向かい風を受けて上昇を始める実際の現象に対応する。なお、図 9 は図 8 を立体的に表現したものである。これにより、各機体の基準軌道への追従性をより明確にあらわすことができる。400 世代め(図 10)では、世代交代によって進化が進み、機体の軌跡が基準軌道の周辺に収束する傾向を示している。以上のことから、世代交代を繰り返すことによって、集団全体の制御性能が向上していることがわかる。

[ロバスト性の検証]

本設計手法によって構成された制御器(最も適応度の高い個体)の、外乱に対するロバスト性を検証する。windshear の式(13)において $A=0$ 、すなわち外乱がない状態で基準着陸軌道に沿って飛ぶことを目的とした制御器を構成する。この際、windshear のある場合と同様、50 個体からなる集団を生成し、400 世代めにおいて最高の適応度を有する個体を制御器とした。なお、交差率、突然変異率も windshear のある場合と同

じものを用いた。

二つの制御器、すなわち windshear の影響を考慮したもの(以下タイプ A と呼ぶ)と、windshear の影響を考慮に入れなかったもの(以下タイプ B と呼ぶ)の制御性能を比較する。windshear を全く受けない状況下では、タイプ B による制御結果(図 11)のほうが、タイプ A による制御結果(図 12)よりも良好な性能を示している。しかし、windshear を受ける中で二つの制御器を比較すると、タイプ B を搭載した機体は大きく基準着陸軌道から離れ、移動領域から逸脱している(図 13)。それに対し、タイプ A を搭載した機体は、windshear による影響を受けながらも、基準着陸軌道に沿って飛行することに成功しているといえる(図 14)。以上のことから、本手法で構成された制御器は、windshear に対してロバスト性を有するといえる。

Fig. 12 Flight trajectories without windshear (Type A)

Fig. 10 Flight trajectories after 400 generations

Fig. 13 Flight trajectories with windshear (Type B)

Fig. 11 Flight trajectories without windshear (Type B)

Fig. 14 Flight trajectories with windshear (Type A)

5. 終 わ り に

非線形ロバスト制御問題を取上げ、非可微分関数を比較的容易に扱うことができる遺伝的アルゴリズムを用いて、外乱に対しロバストな非線形制御器導出のための実用的設計手法を提案した。具体的には、まず対象となる状態空間(または出力空間)を適切な大きさの部分空間に分割し、それらの部分空間を染色体(個体)の遺伝子座に対応させることにより、環境に適応した個体の進化を通して外乱にロバストな制御器を導出しようとする考え方である。そして本設計手法を、予測困難な windshear 下における航空機のロバスト自動着陸制御装置の設計に適用しその実用性を明らかにした。

文 献

- (1) Witsenhausen, H. S., Minimax control problem for sampled linear systems, *IEEE Trans. Autom. control*, AC-13 (1968), 5-21.
- (2) Salmon, D. M., Minimax controller design, *IEEE Trans. Autom. control*, AC-13 (1968), 369-376.
- (3) Zames, G., Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms and approximate inverse, *IEEE Trans. Autom. control*, AC-26 (1981), 301-320.
- (4) Baser, T. and Bernhard, P., *H_∞ optimal control and related minimax design problems—A dynamic game approach—*, Birkhauser, (1991), 第1章.
- (5) Van der Schaft, A. J., *L_∞-gain analysis of nonlinear systems and nonlinear stable feedback H_∞ control*, *IEEE Trans. Autom. control*, AC-37 (1992), 770-784.
- (6) Ishidori, A. and Astolfi, A., Disturbance attenuation and *H_∞*-control via measurement feedback in nonlinear systems, *IEEE Trans. Autom. control*, AC-37 (1992), 1283-1293.
- (7) 安居院猛・長尾智晴, ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂(1993).
- (8) Porter, B., Genetic design of control systems, *J. SICE*, **34**-5 (1995), 393-401.
- (9) 河辺徹・片山徹, Minimax 最適化による4輪操舵システムの設計, 計測自動制御学会論文集, 32-11 (1996), 1518-1525.
- (10) Bulirsch, R. and Pech, H. J., Abort Landing in the presence of Windshear as a Minimax Optimal Control Problem, Part 1 Necessary Conditions, *JOTA*, **70**-1 (1991), 1-23.
- (11) Kang, K., De, P. K. and Ishidori, A., Flight control in a Windshear via Nonlinear *H_∞* Methods, *Proc. 31st Conf. Decision Control*, (1992), 1135-1142, Tucson, Arizona.
- (12) 蒲原信治・鈴木真二, ミニマックス計画法による不確定なパラメータを含むシステムの最適化, 機論, **61**-587, C (1995), 2741-2745.