

遺伝的アルゴリズムによる非線形制御系の設計

Design of Nonlinear Control System Using Genetic Algorithms

○伊藤 敏教*, 大久保 重範*, 及川 一美*, 高橋 達也*

○Toshinori Ito*, Shigenori Okubo*,
Kazumi Oikawa*, Tatyua Takahashi*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： 遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm), 非線形制御 (nonlinear control)

連絡先： 〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 大久保研究室
伊藤 敏教, Tel.: (0238)26-3245, Fax.: (0238)26-3245, E-mail: tr107@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

数学的解法が困難である問題に対して遺伝的アルゴリズムを使うことによって、高近似の解を求めることができる。テンソルの縮約形を用いることによって、非線形システムを線形システムのように表現できる。

本研究では、多項式非線形制御系の安定化制御について考察する。また、安定条件から考えられる探索範囲のヒントをGAに教えてやり効率の良い探索ができるようにした。

2. 遺伝的アルゴリズム

2.1 単純遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムは、生物の進化をモデルとして、問題（環境）に対する適合度の良い個体を計算機内に生成するアルゴリズムである。変数をコード化して遺伝子とし、遺伝子の集合から染色体を構成する。染色体が1個の個体を表す。個体

に対し選択（淘汰）、交叉、突然変異の遺伝子操作を繰り返し、適応度関数が最大又は最小になるように探索する。

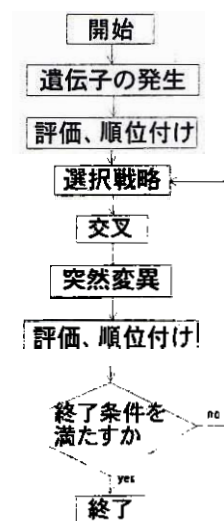


Fig.1 Flowchart

2.2 CHC

Eshelmanが提案したGAであるCHCとは次の略語である。

C(cross generational elitist selection):2世代エリート戦略

H(heterogeneous recombination):異種間交叉

C(cataclysmic mutation):大変動突然変異

CHCは単純性を犠牲にする代わりに各操作をより効果的に行い、得られた優良個体は確実に残すという意図を強く全面に出したアルゴリズムである¹⁾。

CHCのアルゴリズムは次のように示される。

ここで、Nは個体群サイズ、Lは個体長、kは世代、dは閾値、rは拡散率を表している。

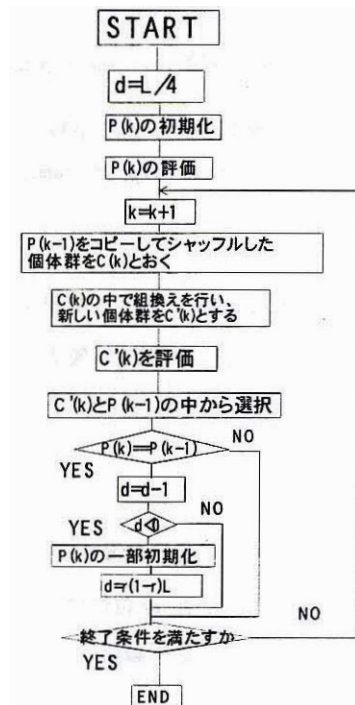


Fig.2 CHCにおけるFlowchart

今回はCHCを用いた。

3. 非線形レギュレータ

2変数3次系の状態方程式を次のように表す。

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_2^2 \\ &\quad + c_{11}x_1^3 + c_{12}x_1^2x_2 + c_{13}x_1x_2^2 + c_{14}x_2^3 + b_0u \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_{21}x_1^2 + b_{22}x_1x_2 + b_{23}x_2^2 \\ &\quad + c_{21}x_1^3 + c_{22}x_1^2x_2 + c_{23}x_1x_2^2 + c_{24}x_2^3 + b_1u\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}& - x_1^2 \\ & \quad x_1x_2 \\ & \quad x_2^2 \\ & \quad - x_1^3 \\ & + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^2x_2 \\ x_1x_2^2 \\ x_2^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} u \quad (2)\end{aligned}$$

制御対象の非線形システム方程式(2変数3次系)を次のように表す事にする。

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_{<1,1>} \mathbf{x} + \mathbf{A}_{<1,2>} \mathbf{x}^{<2>} + \mathbf{A}_{<1,3>} \mathbf{x}^{<3>} + \mathbf{B}u \\ &= \sum_{i=1}^3 \mathbf{A}_{<1,i>} \mathbf{x}^{<i>} + \mathbf{B}u \\ &= \mathbf{A}_{G<1,3>} \mathbf{G}^{<3>}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}u\end{aligned}\quad (3)$$

ただし、

$$\mathbf{A}_{G<1,3>} = [\mathbf{A}_{<1,1>} \quad \mathbf{A}_{<1,2>} \quad \mathbf{A}_{<1,3>}] \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_{<1,1>} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{<1,2>} &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_{<1,3>} &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}^{<3>} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}^{<2>} \\ \mathbf{x}^{<3>} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}^{<2>} = \begin{bmatrix} x_1^2 \\ x_1x_2 \\ x_2^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x}^{<3>} = \begin{bmatrix} x_1^3 \\ x_1^2x_2 \\ x_1x_2^2 \\ x_2^3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

この系における評価関数を次式で与える。

$$V = \frac{1}{2} \int_t^\infty (G^{<3>T}(x) Q_{G<3,3>} G^{<3>}(x) + u^T R u) dt \quad (9)$$

$P_{G<1,3>} : 2 \times 9$ 正定行列

$Q_{G<3,3>} : 9 \times 9$ 正定対称行列

$R : 1 \times 1$ 対称正定値行列

$$Q_{G<3,3>} = \begin{matrix} & \begin{matrix} Q_{<1,1>} & Q_{<1,2>} & Q_{<1,3>} \\ Q_{<2,1>} & Q_{<2,2>} & Q_{<2,3>} \\ Q_{<3,1>} & Q_{<3,2>} & Q_{<3,3>} \end{matrix} \\ \begin{matrix} q_{00} & q_{01} \\ q_{01} & q_{11} \end{matrix} & \begin{matrix} q_{02} & q_{03} & q_{04} \\ q_{12} & q_{13} & q_{14} \end{matrix} & \begin{matrix} q_{05} & q_{06} & q_{07} & q_{08} \\ q_{15} & q_{16} & q_{17} & q_{18} \end{matrix} \\ & \begin{matrix} q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ q_{24} & q_{34} & q_{44} \end{matrix} & \begin{matrix} q_{25} & q_{26} & q_{27} & q_{28} \\ q_{35} & q_{36} & q_{37} & q_{38} \\ q_{45} & q_{46} & q_{47} & q_{48} \end{matrix} \\ & & \begin{matrix} q_{55} & q_{56} & q_{57} & q_{58} \\ q_{56} & q_{66} & q_{67} & q_{68} \\ q_{57} & q_{67} & q_{77} & q_{78} \\ q_{58} & q_{68} & q_{78} & q_{88} \end{matrix} \end{matrix} \quad (10)$$

$$P_{G<1,3>} = \begin{bmatrix} P_{<1,1>} & P_{<1,2>} & P_{<1,3>} \\ p_{00} & p_{01} & p_{02} & 2p_{03} & p_{04} & p_{05} & 3p_{06} & 3p_{07} & p_{08} \\ p_{01} & p_{11} & p_{03} & 2p_{04} & p_{14} & p_{06} & 3p_{07} & 3p_{08} & p_{18} \end{bmatrix} \quad (11)$$

制御入力 u は V を最小にするように設計する。
リカッチ方程式の解は、システムが線形の時と同様にハミルトニアンを用いて求める。ハミルトニアン H は最大原理より次のようになる。

$$H = -\frac{1}{2} (G^{<3>T}(x) Q_{G<3,3>} G^{<3>}(x) + u^T R u) + s^T (A_{G<1,3>} G^{<3>} + B u) \quad (12)$$

s : 随伴ベクトル

となる。

ここで、次式より u は次のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$u = R^{-1} B^T s$$

s については次式が成り立つ。

$$\partial V(t) \quad (15)$$

ここで、 s を次式のようにおくことによって、

$$s = - \sum_{k=1}^3 P_{<1,k>} x^{<k>} = -P_{G<1,3>} G^{<3>}(x) \quad (16)$$

V は次式となる。

$$V = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{k+1} x^T P_{<1,k>} x^{<k>} \quad (17)$$

s を消去して u を表現すると、

$$u = -R^{-1} B^T P_{G<1,3>} G^{<3>}(x) \quad (18)$$

ハミルトニアン H に s および u を代入すると

次式が成り立つ

$$H + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

前式より次式が得られる

$$G^{<3>T}(x) \{ Q_{G<3,3>} + A_{G<1,3>}^T P_{G<1,3>} + P_{G<1,3>}^T A_{G<1,3>} - P_{G<1,3>}^T B R^{-1} B^T P_{G<1,3>} \} G^{<3>}(x) = 0 \quad (20)$$

これより $P_{G<1,3>}$ についての代数方程式として次式を得る。

$$Q_{G<3,3>} + A_{G<1,3>}^T P_{G<1,3>} + P_{G<1,3>}^T A_{G<1,3>} - P_{G<1,3>}^T B R^{-1} B^T P_{G<1,3>} = 0 \quad (21)$$

ここで、 P_G, Q_G が正定対称行列であるなら、 $V > 0, \dot{V} < 0$ となり安定なレギュレータが設計できる。しかし、(21) 式は任意の x について (20) 式を満たすための十分条件であるが、必要条件ではない。(21) 式は x についての最低次数が 2 次で最高次数が 6 次の多項式であるから独立の項の総数は

$$N_{eq} = \sum_{k=2}^{4N-2} n H_k = n + 4N - 2 C_{4N-2} - (n+1) |_{n=2, N=2} = 25 \quad (22)$$

$V(t)$ は x についての 4 次多項式であるから、正交加重行列 $\tilde{P}_{G<2,2>}$ を用いて次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_{k=1}^4 \frac{1}{k+1} \mathbf{x}^T \mathbf{P}_{<1,k>} \mathbf{x}^{<k>} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{G}^{<2>T}(\mathbf{x}) \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \mathbf{G}^{<2>}(\mathbf{x}) \quad (23) \end{aligned}$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{P}}_{<1,1>}^{(1,1)} & \tilde{\mathbf{P}}_{<1,2>}^{(1,2)} \\ \tilde{\mathbf{P}}_{<2,1>}^{(2,1)} & \tilde{\mathbf{P}}_{<2,2>}^{(2,2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_{00} & \tilde{p}_{01} & \tilde{p}_{02} & \tilde{p}_{03} & \tilde{p}_{04} \\ \tilde{p}_{01} & \tilde{p}_{11} & \tilde{p}_{12} & \tilde{p}_{13} & \tilde{p}_{14} \\ \tilde{p}_{02} & \tilde{p}_{12} & \tilde{p}_{22} & \tilde{p}_{23} & \tilde{p}_{24} \\ \tilde{p}_{03} & \tilde{p}_{13} & \tilde{p}_{23} & \tilde{p}_{33} & \tilde{p}_{34} \\ \tilde{p}_{04} & \tilde{p}_{14} & \tilde{p}_{24} & \tilde{p}_{34} & \tilde{p}_{44} \end{bmatrix} \quad (24)$$

ただし、 $\tilde{\mathbf{P}}_{<2,2>}^{(i,j)} (n^i \times n^j) : \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>}$ の (i,j) ブロックに位置する (i,j) 型完全対称テンソル

4. GA による解の探索

$p_{00}, p_{01}, p_{11}, p_{02}, p_{03}, p_{04}, p_{14}, p_{05}, p_{06}, p_{07}, p_{08}, p_{18}$ を遺伝子 (12 個) として扱い、(23) 式から $\tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>}$ を、(21) 式の拡張リカッチ方程式から $\mathbf{Q}_{G<3,3>}$ を求め、さらにそれらの最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ 、 $\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ をシルベスターの定理より、正定であるかどうかを評価する。 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ 、 $\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ が正定であれば、 $\dot{\mathbf{V}} < 0$ となり安定なレギュレータを設計できる。

最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ を求めると

$$\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & \frac{1}{3}p_{02} & 0 & 0 \\ p_{01} & p_{11} & p_{03} & p_{04} & \frac{1}{3}p_{14} \\ \frac{1}{3}p_{02} & p_{03} & \frac{1}{3}p_{05} & p_{06} & 0 \\ 0 & p_{04} & p_{06} & 3p_{07} & p_{08} \\ 0 & \frac{1}{3}p_{14} & 0 & p_{08} & \frac{1}{2}p_{18} \end{bmatrix} \quad (25)$$

最簡形式 $\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ を求めると

$$\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle = \begin{bmatrix} q_{00} & q_{01} & q_{02} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_{01} & q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & q_{22} & q_{23} & 0 & q_{25} & 0 & 0 & 0 \\ & & & q_{33} & q_{34} & q_{35} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & q_{44} & q_{45} & q_{46} & q_{47} & q_{48} \\ & & & & & q_{55} & q_{56} & 0 & 0 \\ & & & & & & q_{66} & q_{67} & 0 \\ & & & & & & & q_{77} & q_{78} \\ & & & & & & & & q_{88} \end{bmatrix} \quad (26)$$

ここで、 $q_{00}, q_{01}, q_{11}, q_{02}, q_{12}, q_{13}, q_{14}, q_{22}, q_{23}, q_{33}, q_{34}, q_{44}, q_{25}, q_{35}, q_{45}, q_{46}, q_{47}, q_{48}, q_{55}, q_{56}, q_{66}, q_{67}, q_{77}, q_{78}, q_{88}$ の 25 個の q は拡張リカッチ方程式から算出されるものであり、 $p_{00}, p_{01}, p_{11}, p_{02}, p_{03},$

$p_{04}, p_{14}, p_{05}, p_{06}, p_{07}, p_{08}, p_{18}$ の変数と考える事ができる。

5. 評価関数

シルベスターの判定条件より最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ $\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ が正定であるための必要十分条件は、すべての主座小行列式が正となることである。

$\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ の主座小行列式を $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_8, \mathbf{D}_9$ とし、 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ の主座小行列式を $\tilde{\mathbf{D}}_1, \tilde{\mathbf{D}}_2, \tilde{\mathbf{D}}_3, \tilde{\mathbf{D}}_4, \tilde{\mathbf{D}}_5$ とする。

たとえば、

$$\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & \frac{1}{3}p_{02} & 0 & 0 \\ p_{01} & p_{11} & p_{03} & p_{04} & \frac{1}{3}p_{14} \\ \frac{1}{3}p_{02} & p_{03} & \frac{1}{2}p_{05} & 3p_{06} & 0 \\ 0 & p_{04} & p_{06} & p_{07} & p_{08} \\ 0 & \frac{1}{3}p_{14} & 0 & p_{08} & \frac{1}{2}p_{18} \end{bmatrix}$$

線で区切られている正方行列の行列式がそれぞれの主座小行列式 $\tilde{\mathbf{D}}_1, \tilde{\mathbf{D}}_2, \tilde{\mathbf{D}}_3, \tilde{\mathbf{D}}_4, \tilde{\mathbf{D}}_5$ である。

$$\mathbf{D}_{min} = \min\{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_8, \mathbf{D}_9\}$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_{min} = \min\{\tilde{\mathbf{D}}_1, \tilde{\mathbf{D}}_2, \tilde{\mathbf{D}}_3, \tilde{\mathbf{D}}_4, \tilde{\mathbf{D}}_5\} \quad (27)$$

$$\mathbf{f} = \min\{\mathbf{D}_{min}, \tilde{\mathbf{D}}_{min}\} \quad (28)$$

とおく。

ここで、 $\mathbf{f} > 0$ ならば、 $\mathbf{Q}$ 及び $\mathbf{P}$ が正定となり、その系は安定になる。

このように、 $\mathbf{f}$ は最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ $\langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ の中で最小主座小行列式の値であり、今までは、これだけの評価しこれを正にするように、GA をおこない 12 個の p を決めていた。

ここで、最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle$ の主座小行列式をすべて正にする時に少なくとも p_{00}, p_{11} は正でなければいけない。

また、 $\tilde{\mathbf{D}}_3$ において次のようにおくものとし、また、 $\tilde{\mathbf{D}}_2$ は正であるものとする。つまり、 $\mathbf{M}$ の行列式は正であるものとする。

$$\begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{01} & p_{11} \\ \frac{1}{3}p_{02} & p_{03} \end{bmatrix}$$

↑
N^Tとする

↑
cとする

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{N} \\ \mathbf{N}^T & c \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \mathbf{M} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{N} \\ \mathbf{N}^T & c \end{vmatrix} \\ &= |\mathbf{M}| \cdot \begin{vmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{N} \\ \mathbf{N}^T & c \end{vmatrix} \\ &= |\mathbf{M}| \cdot \begin{vmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{N} \\ 0 & c - \mathbf{N}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} \end{vmatrix} \\ &= |\mathbf{M}| \cdot (c - \mathbf{N}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}) > 0 \quad (29) \end{aligned}$$

ここで、 $|\mathbf{M}| > 0$ であるから、上の式を満たすためには $(c - \mathbf{N}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}) > 0$ であれば良い。つまり、 $c > \mathbf{N}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}$ であれば良い。ここで、 $\mathbf{N}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N}$ は正であるから、 $c > \mathbf{N}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} > 0$ 。よって、 c は正でなければいけない。同様に p_{07}, p_{18} が正でなければいけないことも示される。

$$P_{G<1,3>} = \begin{bmatrix} \textcircled{p_{00}} & p_{01} & p_{02} & 2p_{03} & p_{04} & \textcircled{p_{05}} & 3p_{06} & 3\textcircled{p_{07}} & p_{08} \\ p_{01} & \textcircled{p_{11}} & p_{03} & 2p_{04} & p_{14} & p_{06} & 3\textcircled{p_{07}} & 3p_{08} & \textcircled{p_{19}} \end{bmatrix}$$

丸をつけた所は、正でなければいけないので、GAで解を探索する時、丸をつけた所は正の範囲で探索させ、大変動突然変異が起きる時もこのことを考慮して突然変異させている。

また以前は最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle \langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$ の中での最小主座小行列式の値だけを評価していたが、これでは何個の主座小行列式が正になっているのかが評価されていないので、正方行列の大きさが小さい主座小行列式から大きい主座小行列式の順に（例えば $\tilde{\mathbf{D}}_1$ から $\tilde{\mathbf{D}}_5$ の順）何個正になっているかを $\mathbf{D}$ と $\tilde{\mathbf{D}}$ について評価し、次々評価していった際に正になっていなかった $\mathbf{D}$ と $\tilde{\mathbf{D}}$ の主座小行列式の小さい方を最簡形式 $\langle \tilde{\mathbf{P}}_{G<2,2>} \rangle \langle \mathbf{Q}_{G<3,3>} \rangle$

の中での最小主座小行列式の値として評価する。評価することを増やした事によって効率良く探索できる。

6. シミュレーション

ここでは A_G, B, R について、以下のように設定した。

$$A_{G<1,3>} = \begin{bmatrix} -1.8 & 1.7 & 0.5 & 0.2 \\ 1.2 & 1.4 & 0.4 & 0.3 \\ 0.1 & -2.1 & 1.5 & 1.2 & 2.5 \\ 0.8 & 0.9 & 1.5 & 1.1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}, R = 1 \quad (31)$$

探索にヒントを与えたCHCによって $P_{G<1,3>}$ は以下のように求められた。

$$P_{G<1,3>} = \begin{bmatrix} 6.887615 & -1.79643 & 8.800239 & -5.63723 \\ -1.79643 & 8.467038 & -2.81861 & 3.1299 \\ 1.56495 & 8.536923 & 8.804972 & 19.36278 & -3.46437 \\ 3.02474 & 2.934991 & 19.36278 & -10.3931 & 6.712405 \end{bmatrix} \quad (32)$$

個体数20個体。

各個体の遺伝子12個(p_{00} から p_{18} までの12個)

各遺伝子あたりのビット数32ビット

個体の遺伝子の長さは 12×32

拡散率は0.35%

値の探索範囲は-10から10まで。

初期値をそれぞれ $x_1(0) = 0.06, x_2(0) = -0.1$

として応答を調べた。

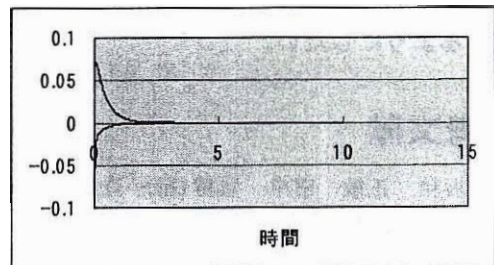


Fig.3 非線形レギュレータの応答特性

以前の評価の仕方での世代数と適応度を次に示す。世代数2626で $\langle \bar{P}_{G<2,2} \rangle$ 、 $\langle Q_{G<3,3} \rangle$ ともに正定である。

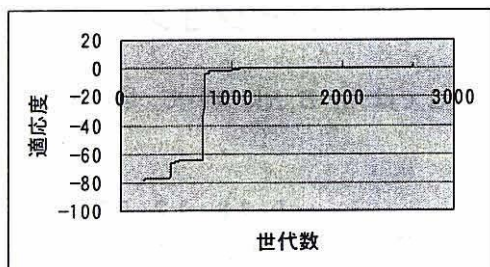


Fig.4 世代数と適応度

今回提案した評価の仕方での世代数と主座小行列式が正である数を次に示す。世代数71で $\langle \bar{P}_{G<2,2} \rangle$ 、 $\langle Q_{G<3,3} \rangle$ ともに正定である。

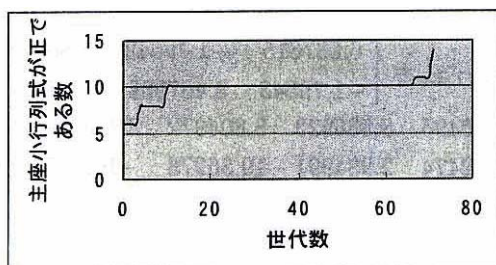


Fig.5 世代数と主座小行列式が正である数

7. おわりに

多項式非線形制御系をテンソルの縮約形を用いる事によって線形システムのように表現でき、これを安定化制御できることを確認した。また、以前の評価の仕方に改良を加えて効率の良い探索ができることも確認した。今後は、任意の変数で扱えるようにしたい。

参考文献

- 1) 坂和 正敏、田中 雅博(編): 遺伝的アルゴリズム, 61/64, 朝倉出版(1995)
- 2) 大久保 重範: 非線形レギュレータの遺伝的アルゴリズムによる設計, 計測自動制御学会論文集, 33-11, 1072/1080(1997)