計測時動制御学会東北支部 第177回 研究集会(1998.10.30~31)
資料番号 177-10

制御系設計への遺伝的アルゴリズムの応用

Application of Genetic Algorithms to Control Systems Design

○小松 健一郎*, 石原 正*, 猪岡 光*
○Ken-ichirou Komatsu, Tadashi Ishihara, Hikaru Inooka

*東北大学
*Tohoku University

キーワード：制御系設計(control systems design), 遺伝的アルゴリズム(genetic algorithm), ラマルク主義(Lamarckism), 適合原理(principle of matching).

連絡先： 〒981-8579 宮城県 仙台市 青葉区 荒巻 字 青葉 01
東北大学 大学院 情報科学研究科 知能制御システム学講座 (猪岡研究室)
小松 健一郎, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019,
E-mail: komatsu@control.is.tohoku.ac.jp

1.緒言

遺伝的アルゴリズムは，環境へ適応し進化する系としての生物に着想を得，生物が有する遺伝・自然淘汰・突然変異といった機序を模擬した，問題解決の一手法である．工学的には，遺伝的アルゴリズムは最適化手法の一種と看做す事が出来る．例えば，設計問題に於ける，既定の設計モデルを具体化し，且つ，設計目的に最適化された設計パラメータの探索等に用いられる．

制御系設計も遺伝的アルゴリズムの応用対象の一つであり，制御系設計解の探索手段に用いる事を試みたという報告が幾つかある．

然し，系の設計問題を最適化問題として解決する事には，特有な問題が内在している．設計目的を与え，設計モデルを規定すれば，最適化手法で設計モデルを最適に具体化する設計パラメータを探索する事は出来る．だが，最適化手法を用いて設計モデルに最適な設計パラメータを与えたとして，其れが，設計仕様を満たし，設計者を満足させられる設計解であるか否かに就いては，保証されていないのである．遺伝的アルゴリズムも最適化手法の一つである為に，そうした問題からは逃れられない．

其処で，本発表では，制御系設計に於いて遺伝的アルゴリズムを部分要素から制御系を

再構成して得る手法として利用出来する事に就いて述べる．必要に応じて設計モデルに相当する構造を可変させる事は，より広範な設計解探索領域を確保する手段となる．

2.遺伝的アルゴリズムを応用した制御系設計

従来の遺伝的アルゴリズムは，予め設計モデルを規定し，設計モデルを具体化するパラメータを探索する事を行っていた．

今回，制御系の伝達関数形式での記述を，伝達要素の組合せで構成する．其為，以下の様な作用素 $f_{k,i}$ を与える．但し，作用素 $f_{k,i}$ は，先ず，

$$f_{k,i}(o) = f_{k,i}(1) \times o \tag{2.1}$$

$$f_{k,i} \circ f_{l,j}(o) = f_{k,i}(f_{l,j}(o)) = f_{k,i}(1) \times f_{l,j}(1) \times o \tag{2.2}$$

の性質を有するとする．但し，o は適当な形式の伝達関数とする．次いで，

$$f_{1,i_1}(1) = K_{i_1} \tag{2.3}$$

$$f_{2,i_2}(1) = 1/s \tag{2.4}$$

$$f_{3,i_3}(1) = 1/(s - \alpha_{i_3}) \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned} f_{4,i_4}(1) &= 1/(s - \mathrm{Re}\,\beta_{i_4} - \mathrm{Im}\,\beta_{i_4} j)(s - \mathrm{Re}\,\beta_{i_4} + \mathrm{Im}\,\beta_{i_4} j) \\ &= 1/\left\{s^2 - 2\,\mathrm{Re}\,\beta_{i_4} s + (\mathrm{Re}\,\beta_{i_4})^2 + (\mathrm{Im}\,\beta_{i_4})^2\right\} \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$f_{5,i_5}(1) = s - \gamma_{i_5} \tag{2.7}$$

$$\begin{aligned} f_{6,i_6}(1) &= (s - \mathrm{Re}\,\delta_{i_6} - \mathrm{Im}\,\delta_{i_6} j)(s - \mathrm{Re}\,\delta_{i_6} + \mathrm{Im}\,\delta_{i_6} j) \\ &= \left\{s^2 - 2\,\mathrm{Re}\,\delta_{i_6} s + (\mathrm{Re}\,\delta_{i_6})^2 + (\mathrm{Im}\,\delta_{i_6})^2\right\} \end{aligned} \tag{2.8}$$

の様な性質も有するとする．以上を作用素 $f_{k,i}$ の定義とする．但し，此処で α と γ は正の実数であるとし，β と δ は複素数であり複素平面上第Ⅱ象限の数であるとする．

今度は，作用素 $f_{k,i}$ を遺伝子 $g_{k,i}$ でコードする方法を与える．コードの方法は，$f_{2,i}$ に就いては遺伝子が存在している事のみをコードし，$f_{1,i}$ と $f_{3,i}$ と $f_{5,i}$ に就いては夫々 K_i と α_i

とγ_iとを正の実数1つでコードし，$f_{4,i}$と$f_{6,i}$に就いては夫々β_iとδ_iとを動径・偏角を表現する正の実数2つでコードするものとする．そして，遺伝子$g_{k,i}$を，其れがコードする作用素$f_{k,i}$の種類毎に次式の様にまとめ，

$$c_k = (g_{k,1}, g_{k,2}, \cdots, g_{k,i_k}, \cdots g_{k,m_k}) \tag{2.9}$$

此を染色体c_kとする．

染色体c_kのから系の伝達関数を再構成するに当たっては，先ず，染色体c_kに含まれるi_k番目の遺伝子g_{k,i_k}が発現するか否かを決定し，発現した遺伝子g_{k,i_k}を作用素f_{k,i_k}へとデコードし，得られたf_{k,i_k}を適当に組み合わせる．

但し，遺伝子g_{k,i_k}が発現し，得られる作用素f_{k,i_k}に依り系を再構成する際には，系がプロパーとなる事を前提とする為，染色体c_kから発現する遺伝子g_{k,i_k}の数をn_kとして，

$$n_2 + n_3 + 2n_4 < n_5 + 2n_6 \tag{2.10}$$

の関係が満たされているものとする．

次いで，(2.10)式の制約の下，遺伝子g_{k,i_k}の発現調節因子に従って発現する遺伝子g_{k,i_k}を決定する．$n = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6$個の遺伝子が発現するとし，$j$番目に発現する遺伝子を$g_{k,i_k}$とし，其れにより得られる作用素を$f_{k,i_k}$とする．その時，遺伝子$g_{k,i_k}$や作用素$f_{k,i_k}$を特定する為に$p_j = (k, i_k)$を与え，$p_j$で遺伝子や作用素を夫々$g_{p_j}$や$f_{p_j}$の様に記述する．そして，発現遺伝子全ての組合せ，若しくは，発現遺伝子により得られている作用素全ての組合せは，p_jの組合せで表現出来，

$$p = (p_1, p_2, \cdots, p_{j-1}, p_j, \cdots, p_{n-1}, p_n) \tag{2.11}$$

で与えるとする．但し，実際には，先に組み合わせpを定め，其れに従って発現遺伝子や作用素を決定する．

そして，組合せpに拠り，染色体c上のから遺伝子g_{p_j}が発現し，遺伝子g_{p_j}から得ら

れる作用素f_{p_j}に依り，系$G(s,p)$の記述が以下の様に構成されるとする．

$$G(s,p)=f_{p_1}\circ f_{p_2}\circ f_{p_3}\circ\cdots\circ f_{p_{i-1}}\circ f_{p_i}\circ f_{p_{i+1}}\circ\cdots\circ f_{p_{n-2}}\circ f_{p_{n-1}}\circ f_{p_n}(1) \tag{2.12}$$

そして，(2.1)～(2.8)式に示される作用素f_{p_j}の性質から，(2.12)は，

$$\begin{aligned}
G(s,p) &= f_{p_1}\circ f_{p_2}\circ f_{p_3}\circ\cdots\circ f_{p_{i-1}}\circ f_{p_i}\circ f_{p_{i+1}}\circ\cdots\circ f_{p_{n-2}}\circ f_{p_{n-1}}\circ f_{p_n}(1)\\
&= f_{p_1}(1)\times f_{p_2}(1)\times\cdots\times f_{p_i}(1)\times f_{p_{i+1}}(1)\times\cdots\times f_{p_{n-1}}(1)\times f_{p_n}(1)\\
&= \prod K_{p_1}\frac{\prod(s-\gamma_{p_5})\prod\left\{s^2-2\operatorname{Re}\delta_{p_6}s+(\operatorname{Re}\delta_{p_6})^2+(\operatorname{Im}\delta_{p_6})^2\right\}}{s^l\prod(s-\alpha_{p_3})\prod\left\{s^2-2\operatorname{Re}\beta_{p_4}s+(\operatorname{Re}\beta_{p_4})^2+(\operatorname{Im}\beta_{p_4})^2\right\}}\\
&= \prod K_{p_1}\frac{\prod(s-\gamma_{p_5})\prod\left\{(s-\operatorname{Re}\delta_{p_6}-\operatorname{Im}\delta_{p_6}j)(s-\operatorname{Re}\delta_{p_6}+\operatorname{Im}\delta_{p_6}j)\right\}}{s^l\prod(s-\alpha_{p_3})\prod\left\{(s-\operatorname{Re}\beta_{p_4}-\operatorname{Im}\beta_{p_4}j)(s-\operatorname{Re}\beta_{p_4}+\operatorname{Im}\beta_{p_4}j)\right\}}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

と記述出来る．此の(2.13)式の$G(s,p)$は，伝達関数形式に依る系の一般的な記述を構成している．

表現形として，以上の様な作用素に依り構成される伝達関数で制御器を発現する遺伝的アルゴリズムを構成する事で，特定の設計モデルに縛られる事の少ない制御系設計解探索が行われる可能性がある．次の第3節以降に，実際に制御系設計解探索に用いた例を述べる．

此処迄で，遺伝子と作用素という考え中心に話を進めたが，実際には，(2.11)式に挙げた作用素へとデコードして利用する遺伝子の組合せpを決定する事も重要である．染色体上の遺伝子には冗長性が与えられていて，一部の発現した遺伝子のみを作用素へとデコードし表現形を決定している様に遺伝子形と表現形とが1体1対応しない．その為，遺伝子形から表現形を得るには，遺伝子形と表現形との対応関係の情報の不足を遺伝子の組合せpで埋める必要がある．此の発現する遺伝子の組合せpの決定では，遺伝子に其の発現を調節する因子を仮定し，其の制御の下に遺伝子発現の有無が定まり，遺伝子の組合せpも決定されるものとする．

そして，遺伝子の発現を制御する調節因子に就いては，個体の有する遺伝子が発現した際に表現形にもたらす影響を評価した結果を反映したもので，発現する遺伝子の組合せに就いて色々と試行錯誤する過程に得られるものとする．或る遺伝子の組合せを試行した際，其れが表現形への評価を下げるなら其の遺伝子の組合せの発現頻度を押さえ，評価を高めるなら発現頻度を高める様，遺伝子の発現を制御する調節因子を操作する．

染色体上の遺伝子には，遺伝子の発現を制御する調節因子として，表現形に対して設計目的に合致した作用素を与えるか否かが記録されているとも云える．其処で，新たな世代の個体を発生させる際，此の遺伝子の発現を制御する調節因子を利用して，遺伝子に対す

る突然変異の発生確率を調整する．突然変異を利用して，表現形に対して設計目的に合致した作用素を与える遺伝子は出来るだけ染色体上に温存しつつ，そうでない遺伝子は早々に染色体上から排除するのである．そうした操作は，新たな世代の個体が無駄な試行錯誤を繰り返す事を減じると共に，それ迄に試行した事の無い作用素をコードした遺伝子を導入し新たな遺伝子の組合せを試行出来る事になる．

尚，上記の様な表現形上の望ましい形質を継承しつつ，望ましくない形質を排除していき，子には望ましいとして残っている形質を継承させていく機序は，用不用の法則や獲得形質の遺伝といった，ラマルク主義的な生物進化に類似した効果をもたらす機序であると云える．

3.制御系設計例 1

制御系設計問題の例として，図 1 に示す，ハードディスクドライブの磁気ヘッド位置決め制御系を適合制御系として設計する問題を採り上げる．

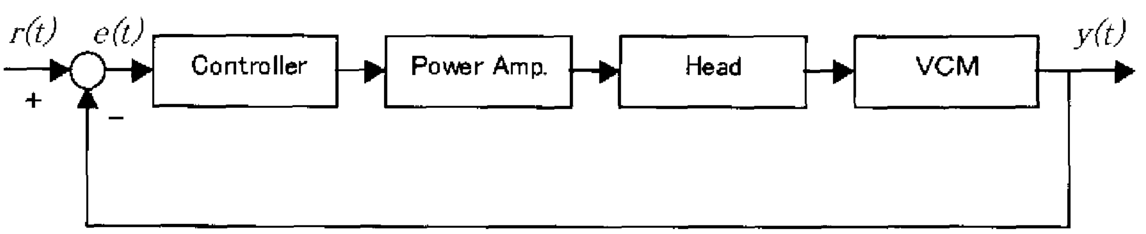

図 1　ハードディスクドライブのブロック線図

ハードディスクドライブに正確な情報が記録・再生されるには，磁気ヘッドのトラッキングエラーが許容値以下に押さえられている必要がある．然し，実際に其れを使用する際には，温度変化に因る構成部材の伸縮，回路へのノイズの混入，磁気ヘッドを支持する梁の振動等がある．其処で，実際の使用時に必要な性能が保証される事を目的に，磁気ヘッドの位置決め制御系を適合制御系として設計される必要がある．

制御対象を円盤径5.25 $inch$，トラック密度1200 $tracks/inch$のハードディスクドライブ磁気ヘッドとする．其の伝達関数$P(s)$は，次式の様になる．

$$P(s) = \frac{-8329.7}{s^2(s+10000)} \tag{3.1}$$

そして，トラッキングエラーの許容値を$\pm 45\,\mu inch$，ボイスコイルモーターへの電流指令値の絶対値の最大を$2.0\,A$とすれば，許容入力集合T_2が次の様に定義出来る．

$$T_2 \equiv \left\{ f \in F : \left\| e_i(f) \right\|_\infty \le \varepsilon_i, \quad i = 1,2 \right\} \tag{3.2}$$

但し，

$$\left.\begin{aligned} e_1(t,f) &= -\,y(t) \\ e_2(t,f) &= \ \ u(t) \end{aligned}\right\} \tag{3.3}$$

であり，

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_1 &= 4.5\times 10^{-5} \quad inch \\ \varepsilon_2 &= \quad 2.0 \qquad\quad A \end{aligned}\right\} \tag{3.4}$$

である．

生起可能入力集合 $F(D)$ に就いては，特に，外乱要因として大きい，構成部材の熱膨張・熱収縮，及び，磁気ヘッドを支える梁の振動を補償する為の入力を考慮する．温度変化の時々刻々と変化していく性質から，構成部材の熱膨張・熱収縮を補償する入力に就いては，持続的な入力と看做す．磁気ヘッドを支える梁の振動を補償する入力に就いては，振動が２次形式の減衰振動である事から，過渡的な入力と看做す．そして，$F(D)$ を，以下に定義される，入力の変化率のみに制限のある入力集合として扱う．

$$F(D) \equiv \left\{ f : f = f_1 + f_2,\ f_1 \in \tilde{F}_\infty(D_1),\ f_2 \in \tilde{F}_2(D_2) \right\} \tag{3.5}$$

此処で，D は非負の実数の対 $D \equiv (D_1, D_2)$ を表し，

$$\tilde{F}_\infty(D_1) \equiv \left\{ f : \left\| f^{(1)} \right\|_\infty \le D_1,\ f(0) = 0 \right\} \tag{3.6}$$

$$\tilde{F}_2(D_2) \equiv \left\{ f : \left\| f^{(1)} \right\|_2 \le D_2,\ f(0) = 0 \right\} \tag{3.7}$$

である．

ハードディスクドライブの温度の最大変化率を $8\,°C/h$，構成部材の熱膨張に因る変形率を $5\,\mu\,inch/inch \cdot °C$ と仮定し，

$$\left\| f_1^{(1)} \right\|_\infty \le D_1 = 5.78\times 10^{-8} \quad inch/s \tag{3.8}$$

とする．梁の振動に就いては，固有振動数を $40\,Hz$，減衰率を 0.1 と仮定し，

$$\left\| f_2^{(1)} \right\|_2 \le D_2 = 4.61\times 10^{-4} \quad inch/s^{1/2} \tag{3.9}$$

とする．

系の応答 $\hat{e}_i(F(D), p)\ (i = 1,2)$ を

$$\hat{e}_i(F(D), p) \equiv D_1 \left\| e_i(h, p) \right\|_\infty + D_2 \left\| e_i(h, p) \right\|_2, \quad i = 1,2 \tag{3.10}$$

とすれば，許容入力集合 T_2 と入力集合 $F(D)$ とで，適合条件 $F(D) \subseteq T_2$ は，

$$P \subseteq T_2 \Leftrightarrow \hat{e}_i(P) \le \varepsilon_i, \quad i = 1,2 \tag{3.11}$$

に依り等価に表現される.

第2節に概説した手順を其儘に採り入れた遺伝的アルゴリズムに依り，(3.11) 式の適合条件を満たすハードディスクドライブ磁気ヘッドの位置決め制御系の設計解を探索する.

探索の結果として得られた制御器は,

$$C(s)=\frac{-9.39426\times10^{7}(s+8387.59)(s+93.0562)}{(s+3043.06)(s+1549.89\pm j799.324)} \tag{3.12}$$

の様なものであった．此の制御器の評価関数に依る評価値は,

$$\left.\begin{array}{l}\hat{e}_1(F(D))=4.4482\times10^{-5}\leq4.5\times10^{-5}\\ \hat{e}_2(F(D))=0.328785\leq2.0\end{array}\right\} \tag{3.13}$$

であり，(3.11)式の適合条件を満たしている.

前節で提案した遺伝的アルゴリズムでも，一応の探索は行える事が実証された.

但し，此処で得られている利得が非常に高く，余り良い制御器とは云えない．しかも，計算に要された資源は，設計解の探索としては非常に大きいものであった．本節の制御系設計解探索に於いて，設計解到達迄に要する時間は，概ね 16 時間程度である．利用した計算機は，概略として，cpu MMX Pentium 200MHz, memory 64Mbytes, os WindowsNT, language MATLAB を其の構成に含んでいる.

又，(3.12)式の解を得る迄の過程に於いて，適合条件を満足せず，解とはならない答ではあるが，以下の(3.14)～(3.19)式の様な答を表現形として返す個体も発生した.

$$C(s)=\frac{-1.51902\times10^{7}}{s+7631.06} \tag{3.14}$$

$$C(s)=\frac{-8.83239\times10^{7}(s+7244.9)}{(s+6622\pm j3.4954)} \tag{3.15}$$

$$C(s)=\frac{-9.4214\times10^{7}(s+93.0562)}{(s+9079.9)(s+4758.8)(s+2137.3)} \tag{3.16}$$

$$C(s)=\frac{-8.16561\times10^{7}(s+9158.9)(s+852.48)}{(s+7543.8)(s+462.53\pm j239.37)} \tag{3.17}$$

$$C(s)=\frac{-7.85681\times10^{7}(s+9196.37)(s+852.48)}{s(s+9033.6)(s+8171.6)} \tag{3.18}$$

此等の伝達関数を見れば判る様に，従来の遺伝的アルゴリズムでのパラメータ探索では決して得られない，極・零点の数や組合せに多様性が生じている.

斯うした遺伝的アルゴリズムをパラメータ探索から作用素の探索へと変更する事に依り，探索可能な制御器の形式が格段に広範になっている．その為，パラメータ探索を行った場合に較べ，設計者の要求する仕様に合致した性能の制御系が得られない事態は減る事が期待される.

4.制御系設計例 2

第3節に，制御系設計解の探索に対して単純に遺伝的アルゴリズムを適用し，適合条件を満たす制御器を得た例を示した．然し，此の探索で得られた制御器は利得が非常に大きく，問題のある制御器であると云わざるを得ない．しかも，探索に投入すべき計算機の資源には非常なものがある．

其処で，極零相殺を考慮して制御系設計を行える，極零配置法を加味して制御系設計解を探索する事を試みる．制御系設計に於いて，極零相殺は一般に設計問題を単純化するとされる事から，先程行った遺伝的アルゴリズムを応用した制御系設計解の探索に較べ，制御系設計解の探索を容易にし，使用する計算の為の資源を圧縮する可能性がある．

極零配置法では，図1に示すハードディスクドライブ磁気ヘッドの位置決め制御系の様な，1入力1出力の直結フィードバック系に対し，特定の極零相殺を達成・回避した制御器設計を行う手法を与えている．制御対象$P(s)$の伝達関数は厳密にプロパーな実有理関数であり，

$$P(s)=\frac{b_+(s)b_-(s)}{a_+(s)a_-(s)} \tag{4.1}$$

の形式で記述されるものと仮定する．$a_+(s)$及び$b_+(s)$は制御器の零点及び極に因り相殺される制御対象の多項式であり，$a_-(s)$及び$b_-(s)$は制御器の零点及び極に因っては相殺されない制御対象の多項式であるとする．但し，$b_+(s)$と$a_+(s)a_-(s)$は互いに素であり，$b_-(s)$と$a_+(s)a_-(s)$も互いに素であると仮定する．又，$b_+(s)$・$b_-(s)$いずれも$s=0$の根を持たない事も仮定する．

制御器の伝達関数$C(s)$は，プロパーであり，設計者により指定されたl個の積分器を含み，$P(s)$の$a_+(s)$及び$b_+(s)$を相殺しつつ$a_-(s)$及び$b_-(s)$は相殺しない事を仮定する．

以上の仮定の下，制御系を，目標値$r(t)$から出力$y(t)$迄の閉ループ伝達関数$T(s)$が，

$$T(s)=\frac{g(s)b_-(s)}{f(s)} \tag{4.2}$$

となる様に設計する．但し，$f(s)$と$g(s)$は設計者が任意に定められる多項式である．制御器は$C(s)$，(4.2)式と制御器に関する仮定とから

$$\begin{aligned} C(s) &= \frac{g(s)a_+(s)a_-(s)}{\{f(s)-g(s)b_-(s)\}b_+(s)} \\ &= \frac{g(s)a_+(s)}{s^l d(s)b_+(s)} \end{aligned} \tag{4.3}$$

の様に与えられる．そして，此の(4.3)式が成立している為の条件として，次式の

$$f(s)=g(s)b_-(s)+s^l a_-(s)d(s) \tag{4.4}$$

Diophantine 方程式と呼ばれる式が満足されていなければならない．但し，(4.3)式の制御

器がプロパーである為の条件等から，実質的には，

$$f_p(s) \equiv f(s) - g_p(s)b_-(s) \tag{4.5}$$

となる様，$f_p(s)$ と $g_p(s)$ を任意に与え，

$$f_p(s) = s^l a_-(s)d(s) + g_r(s)b_-(s) \tag{4.6}$$

の方程式を満足する $\{g_r(s), d(s)\}$ を得る必要がある．そして，$g(s)$ に就いては，

$$g(s) = g_p(s) + g_r(s) \tag{4.7}$$

である．

制御系設計に以上の極零配置法を用いての制御系設計解探索を遺伝的アルゴリズムで行う．例題は，第３節と同様，ハードディスクドライブ磁気ヘッドの位置決め制御系を適合制御系として設計する設計問題である．

其の設計問題では，(3.1)式の制御対象における $s=-10000$ の極を相殺する零点を有し，(3.11)式の適合条件を満たす系を与える制御器を設計する事を試みる．

上述した極零配置法に於いては，設計者は(4.5)式の $f_p(s)$ と $g_p(s)$ とを任意に設定出来る．然し，今回の例題に対する設計解の探索では，諸事情から $f_p(s)$ を２次，$g_p(s)$ を０次で固定するとし，$f_p(s)$ のみを遺伝的アルゴリズムに依る探索対象とする．

今回の探索に於いて，条件から，$f_p(s,p)$ のみを再構成出来ればよい．$f_p(s,p)$ の一般的な形式を１次や２次の伝達要素を用いて記述すれば，次の様になる．

$$\begin{aligned} f_p(s,p) &= \prod(s-\alpha_{p_1})\prod\{(s-\mathrm{Re}\,\beta_{p_2}-\mathrm{Im}\,\beta_{p_2}j)(s-\mathrm{Re}\,\beta_{p_2}+\mathrm{Im}\,\beta_{p_2}j)\} \\ &= \prod(s-\alpha_{p_1})\prod\{s^2-2\,\mathrm{Re}\,\beta_{p_2}s+(\mathrm{Re}\,\beta_{p_2})^2+(\mathrm{Im}\,\beta_{p_2})^2\} \end{aligned} \tag{4.8}$$

但し，α は正の実数であり，β は複素数であり複素平面上第Ⅱ象限の数である．そして，$f_p(s,p)$ を再構成するには，(2.7)式，及び(2.8)式と同様の作用素のみを用いればよい．

以上の様に遺伝子・染色体から制御器を再構成する方法を定め，(3.11)式の適合条件を満たし，且つ，ハードディスクドライブ磁気ヘッドに於ける $s=-10000$ の極を相殺する様，其の位置決め制御系の設計解を遺伝的アルゴリズムに依り探索したところ，

$$C(s) = \frac{-11967.9(s+10000)(s+25.2766)}{(s+1021.04 \pm j195.62)} \tag{4.9}$$

の様な制御器を得た．此の制御器の評価関数に依る評価値は，

$$\left.\begin{aligned} \hat{e}_1(F(D)) &= 3.91025\times10^{5} \le 4.5\times10^{-5} \\ \hat{e}_2(F(D)) &= 0.504728 \le 2.0 \end{aligned}\right\} \tag{4.10}$$

であり，(3.11)式の適合条件を満たしている事が判る．

尚，本節の制御系設計解探索に於いて，前節の制御系設計解探索に利用した機体での設計解到達迄に要する時間は，概ね9時間程度である．

此の探索で得た(4.9)式の制御系を有するハードディスクドライブ磁気ヘッドの位置決め制御系の特性に就いて，生起可能入力集合 $F(D)$ に属する入力 f を与え，f に対する系の応答の様子を以下に示す．図2に示した f_1 は(3.6)式の持続的な入力の集合 $\tilde{F}_\infty(D_1)$ に属する入力の一例であり，図3・図4は入力 f_1 に対する系の応答 $e_1(t,f_1)$・$e_2(t,f_1)$ である．図5に示した f_2 は(3.7)式の過渡的な入力の集合 $\tilde{F}_2(D_2)$ に属する入力の一例であり，図6・図7は f_2 に対する系の応答 $e_1(t,f_2)$・$e_2(t,f_2)$ である．

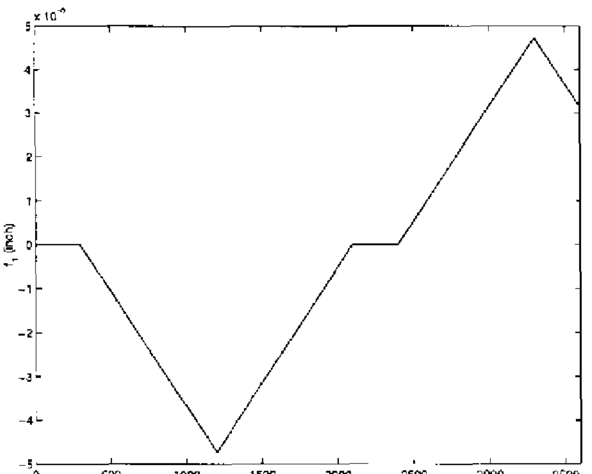

図2　持続的な入力の例　f_1

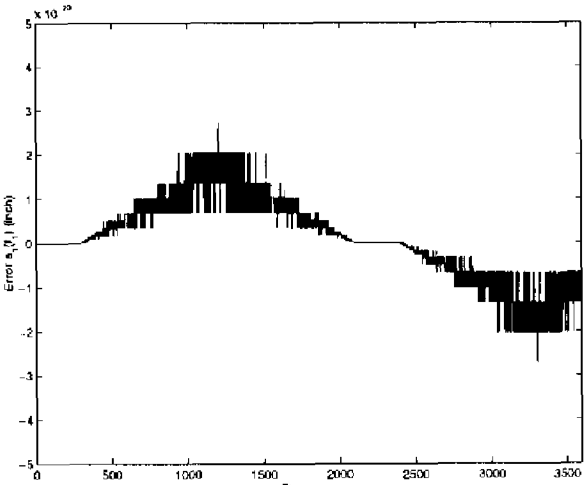

図3　f_1 に対する応答 $e_1(t,f_1)$

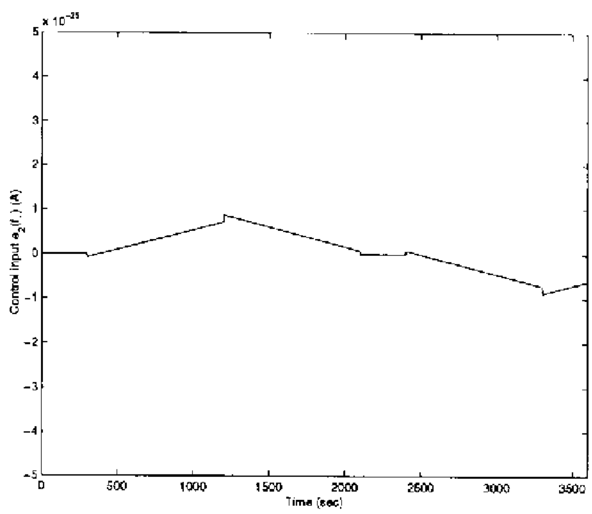

図4 f_1 に対する応答 $e_2(t,f_1)$

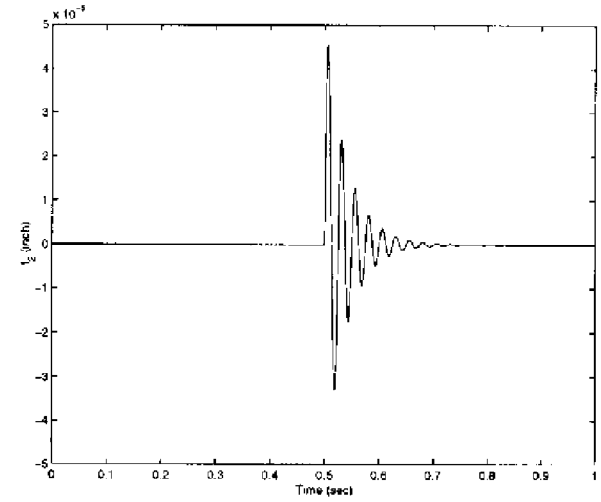

図5 過渡的な入力の例 f_2

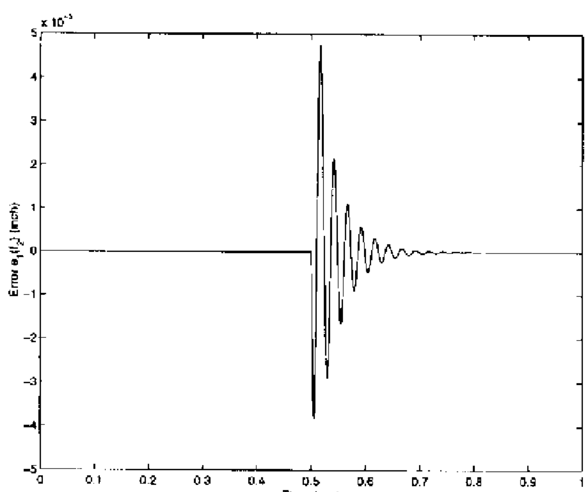

図6 f_2 に対する応答 $e_1(t,f_2)$

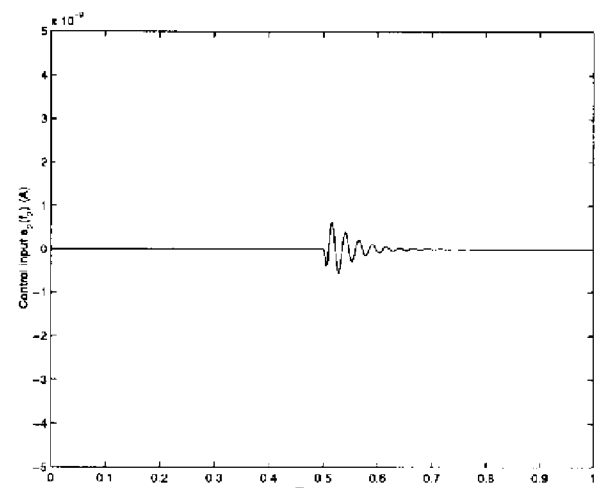

図7 f_2 に対する応答 $e_2(t,f_2)$

5.結言

今回の発表では，先ず，従来からの遺伝的アルゴリズムを応用した最適な制御系設計解の探索の短所を挙げ，対策の一つとして遺伝的アルゴリズムをパラメータ探索から作用素の探索へと変更する事を提案した．次いで，遺伝的アルゴリズム変更の提案に基づいた制御系設計解の探索を試み，設計目的に添った制御系設計解を得る事で，遺伝的アルゴリズムに依る作用素の探索という考え方でも制御系設計解の探索は可能である事を示した．そして，設計効率向上を目的に極零配置法を加味した場合でも，提案した遺伝的アルゴリズムでの設計解探索は可能である事を示した．

尚，今後の課題として，先ず，極零配置法を制御系設計に組み込んだ場合の，探索出来る制御器の次数に関して，其の自由度を確保する方策の検討が必要な事が挙げられる．次

いで，作成したプログラムに依る制御系設計解探索に際して屡々観察された，個体の表現形の多様性が急速に失われ極少数の種類に収束してしまう現象を解決する必要がある．此の現象の解決は，遺伝的アルゴリズムを用いて多目的問題を扱う際に重要な，パレート解の探索を考えた場合，非常に重要な課題である．

参考文献

1) 三宮 信夫，喜多 一，玉置 久，岩本 貴司：遺伝的アルゴリズムと最適化，朝倉書店(1998)

2) 市川 惇信 編：多目的の理論と方法，計測自動制御学会(1980)

3) 中村 弘隆，谷野 哲三：多目的計画法の理論と応用，計測自動制御学会(1994)

4) 木村 資生：生物進化を考える，岩波書店(1988)

5) 四方 哲也：眠れる遺伝子進化論，講談社(1997)

5) 佐藤 俊之：適合の原理に基づく制御系設計に関する研究，東北大学学位論文(1996)

6) 劉 東宦：多目的遺伝的アルゴリズムを用いた制御系設計に関する研究，東北大学学位論文(1997)