

GA 調整型自動抽出制御の計算機シミュレーション

高田 等*・松本 剛**・八野 知博*・松山 幹男*

Computer Simulations on an Automatic Choosing Control Designed by GA

Hitoshi TAKATA, Go MATSUMOTO, Tomohiro HACHINO and Mikio MATSUYAMA

An automatic choosing controller seems to be one of the most useful controllers for nonlinear systems with high nonlinearity. This is a single nonlinear feedback control and is easy to implement in practical systems.

In this paper we consider a design procedure for this automatic choosing control using GA and then experiment with stabilizing a power system using the resulting controller.

Computer simulations indicate that it is certainly a greatly effective control for such systems.

1. まえがき

動揺の大きい非線形システムを制御する有効な手法の一つに自動抽出制御法がある。これはシステムの非線形性を考慮して領域分割し、各領域での線形制御則を自動抽出関数により滑らかに結合する手法である。本制御の良否は自動抽出関数に含まれるパラメータの選定に大いに左右される。そこで本稿ではこれらのパラメータを遺伝的アルゴリズム (GA) を用いてハミルトニアン関数最小の意味で最適に求める方法について考察した。電力システムの過渡安定度問題のシミュレーション実験を行い、その有効性を確かめた。

2. 自動抽出制御法

次の非線形システムを考える。

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad x \in R^n, \quad u \in R^r \quad (1)$$

ただし、 $\cdot = d/dt$, $x = [x[1], \dots, x[n]]^T$ は n 次元ベクトル, $u = [u[1], \dots, u[r]]^T$ は r 次元制御ベクトル, f は連続微分可能な非線形 n 次元ベクトル値関数で $f(0) = 0$, g は連続微分可能な非線形 $n \times r$ 行列値関数で $g(0) \neq 0$ 。非線形性を考慮して抽出関数 $C(x) \in R^l$ を定める。領域分割 $D = \cup_{i=0}^M D_i$ を行い、各小領域 D_i 毎に $x = \widehat{X}_i (\widehat{X}_0 = 0)$ 点近傍で一次テーラー展開

$$\dot{x} = A_i x + \omega_i + B_i u \quad \text{on } D_i \quad (2)$$

を行う。評価を

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q_i x + u^T R u) dt \quad \text{on } D_i \quad (3)$$

としたときの LQ 制御則は次式となる。

$$\hat{u}_i(x) = -R^{-1} B_i^T (P_i x - \xi_i) \quad (4)$$

ただし、(4)式に含まれる定数は以下のリカッチ方程式により求まる。

$$P_i A_i + A_i^T P_i + Q_i - P_i B_i R^{-1} B_i^T P_i = 0$$
$$\xi_i = [A_i^T - P_i B_i R^{-1} B_i^T]^{-1} P_i \omega_i$$

$\xi_i \neq 0$ に対しては原点補正関数の

$$\beta_i(x) = 1 - \exp(-x^T S_i x) \quad (S_i \geq 0) \quad (5)$$

を乗じる。

$$u_i(x) = \hat{u}_i(x) \beta_i(x). \quad (6)$$

小領域 $D_i = \Pi_{j=1}^l [a_{ij}, b_{ij}] (0 \leq i \leq M)$ を抽出するシグモイド型自動抽出関数として次式を定義する。

$$I_{iN}(x; j) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(2N(C_j(x) - a_{ij})/h_j)} \cdot \frac{1}{1 + \exp(-2N(C_i(x) - b_{ij})/h_i)} \quad (7)$$

ここで $h_j = (b_{ij} - a_{ij})/2, N > 0$ 。

(6)(7)式から次の非線形フィードバックの自動抽出制御則が得られる。

$$u(x) = \sum_{i=0}^M u_i(x) I_{iN}(x). \quad (8)$$

平成10年5月31日受理

*電気電子工学科

**博士前期課程電気電子工学専攻

3. ハミルトニアン関数評価

(1)式の駆動行列 $g(x)$ が最大階数をもち、 $g^\dagger(x)g(x)=I$ とする。ただし I は $r \times r$ 単位行列で、 \dagger は一般化逆行列記号である。このときハミルトニアンは

$$H(x, u, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M x^T Q_i x I_{iN}(x) + \frac{1}{2} u^T R u + \lambda^T (f(x) + g(x)u) \quad (9)$$

で定義される。ここで補助変数ベクトル λ として

$$\lambda = \sum_{i=0}^M \{ (g^\dagger(x))^T B_i^T + E \} (P_i x - \xi_i) \beta_i(x) I_{iN}(x) \quad (10)$$

ただし $E = \text{diag}(1, \dots, 1, 0, \dots, 0)$ は $n \times n$ の対角行列と仮定する。変分法によると最適制御である条件として $\partial H / \partial u = 0$, すなわち

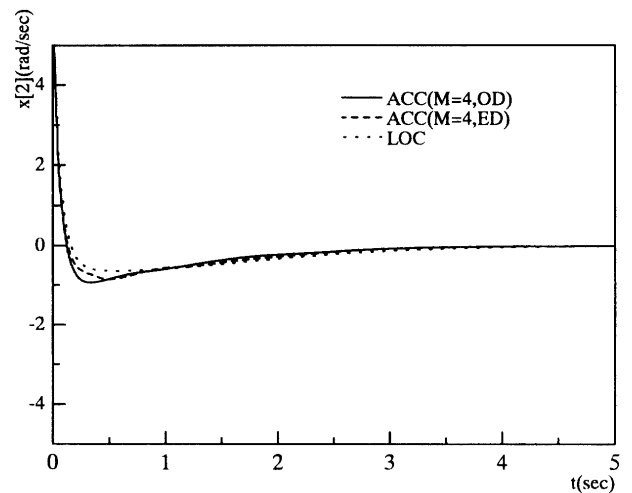
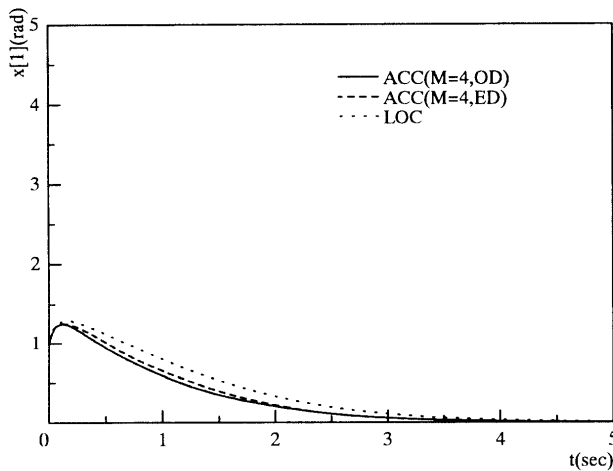
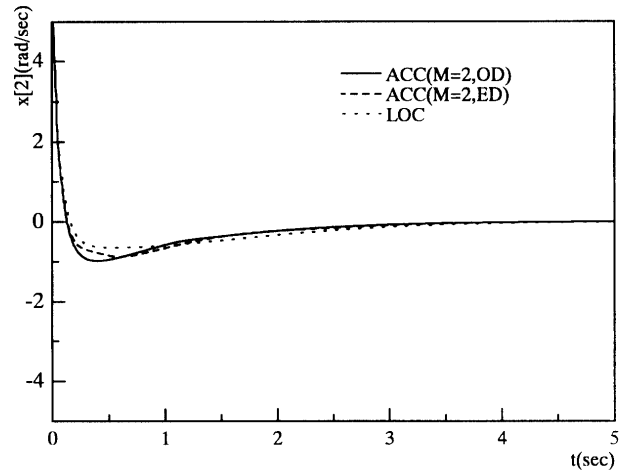
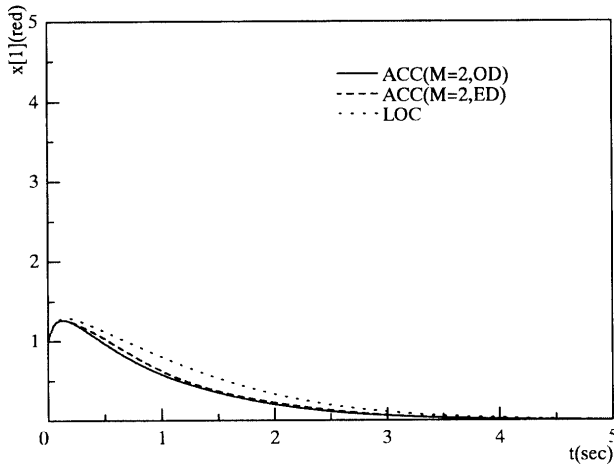
$$u = -R^{-1} g(x)^T \lambda \quad (11)$$

を満たさなければならない。(11)式に(10)式を代入すると

$$u = \sum_{i=0}^M \{ -R^{-1} B_i^T (P_i x - \xi_i) \} \beta_i(x) I_{iN}(x) \quad (12)$$

表1 評価

| $x^T[0]$ | LOC | (M=2, ED) | (M=2, OD) | (M=4, ED) | (M=4, OD) |
|------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| [1.0, 6.0] | 2.314 | 2.222 | 2.207 | 2.210 | 2.197 |
| [1.5, 6.0] | 334 | 6.251 | 6.249 | 5.332 | 5.298 |
| [1.6, 4.0] | 331 | 4.313 | 4.290 | 4.313 | 3.907 |
| [1.8, 2.1] | 332 | 7.562 | 7.539 | 3.924 | 3.910 |



1-(a) x[1]

1-(b) x[2]

図1 時間応答 ($x[0] = [1.0, 6.0]^T$ の場合)

となり、これは(8)式の自動抽出制御そのものである。以上より制御則 $u(x)$ すなわち自動抽出関数等に含まれるパラメータ集合

$$\Omega_0 = \{M, N, a_{ij}, b_{ij}, h_p, \widehat{X}_i, S_i\}$$

の部分集合 $\Omega \subset \Omega_0$ を、次の評価関数が最小になるように選ぶ。

$$PI = \int_D \omega_1(x) |H(x, u, \lambda)| dx + \omega_2(x) \Gamma(\Omega_0). \quad (13)$$

ただし $\Gamma(\Omega_0)$ はパラメータ集合 Ω_0 を評価する関数で、 $\omega_1(x)$ と $\omega_2(x)$ は非負の重み関数である。なお、積分は平均有限和で近似する。

4. 遺伝的アルゴリズムによる Ω の決定

領域分割数 M を固定した条件で未知パラメータ Ω の準最適値を GA により決定する。以下にそのアルゴリズムを示す。

Step 1: 初期候補集団発生

q 個の二進文字列（個体）から構成される Ω の初期候補集団をランダムに発生させる。

Step 2: デコード化

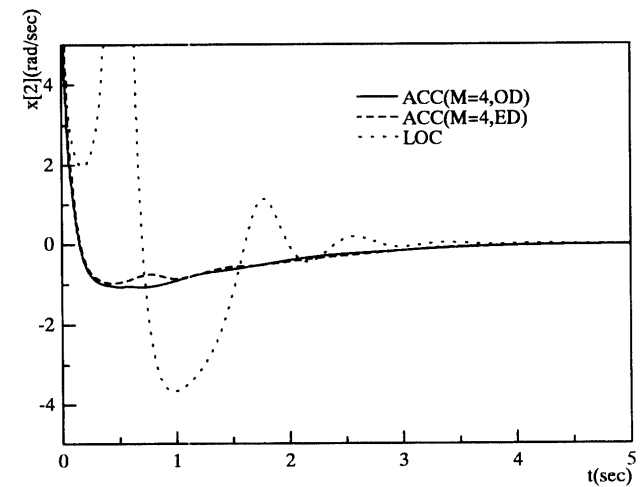
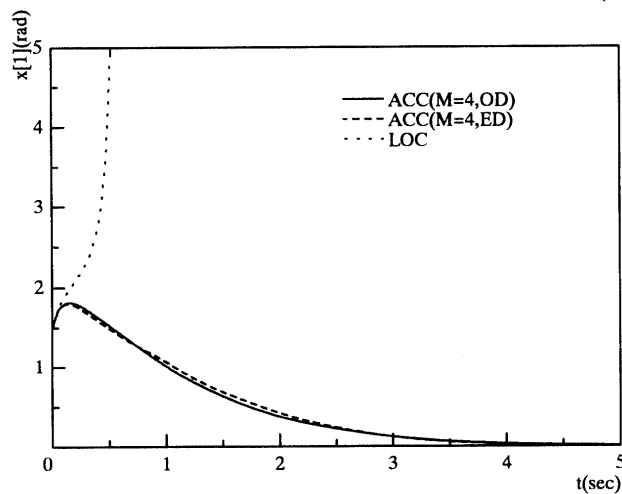
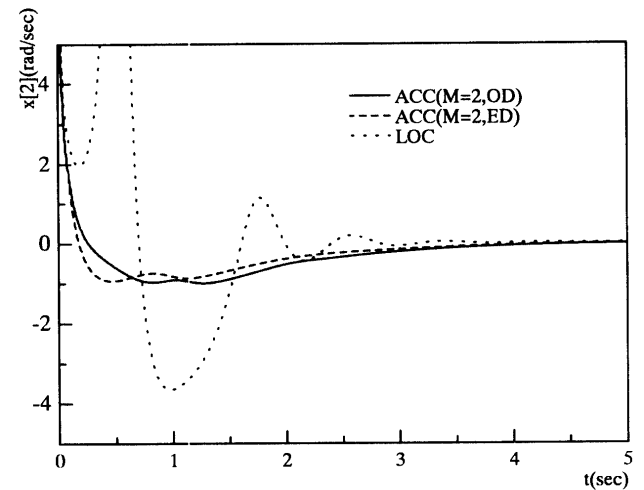
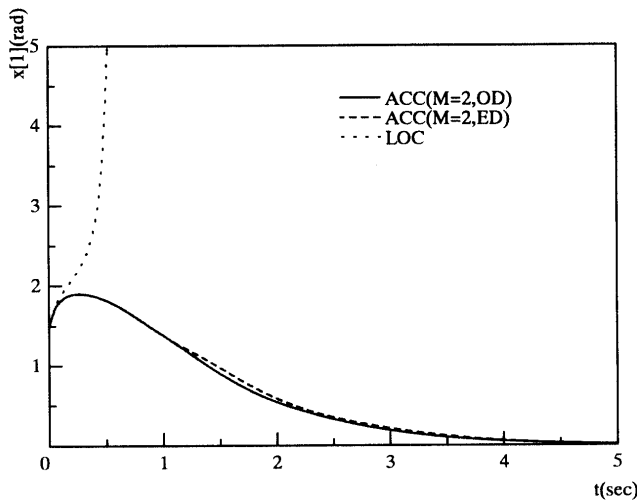
$\Omega_p (p = 1, 2, \dots, q)$ の各要素 α_k を次でデコード化する。

$$\alpha_k = \frac{\alpha_{k,max} - \alpha_{k,min}}{2^{L_k} - 1} A_k + \alpha_{k,min} \quad (14)$$

ただし、 $\alpha_{k,max}$: α_k の最大値、 $\alpha_{k,min}$: α_k の最小値、 A_k : α_k に対応する二進文字列を十進数に変換した値、 L_k : α_k に対応する二進文字列のビット数。

Step 3: 適応度計算

デコード化された $\Omega_p (p = 1, 2, \dots, q)$ を用いて(13)式より $PI_p (p = 1, 2, \dots, q)$ を求め、適応度 $F_p = 1/PI_p$ を計算する。



2-(a) $x[1]$

2-(b) $x[2]$

図2 時間応答 ($x[0] = [1.5, 6.0]^T$ の場合)

Step 4: 複製

各個体を適応度に比例した確率 $F_p / \sum_{j=1}^q F_j$ で複製する。

Step 5: 交叉

ランダムに個体のペアを $q/2$ 個作成し、交叉確率 P_c で交叉を行う。すなわち、ランダムに交叉点を選び、交叉点の前後で文字列を入れ換える。

Step 6: 突然変異

突然変異確率 P_m で個体の各遺伝子 (0 あるいは 1) を反転させる。

Step 7: 繰り返し

以後 Step 2~Step 6 をあらかじめ決められた G 世代に達するまで繰り返し、集団全体の適応度を高めていく。

最終的には、全世代において最も高い適応度を有する個体から準最適な Ω が決定され、 u が構成される。

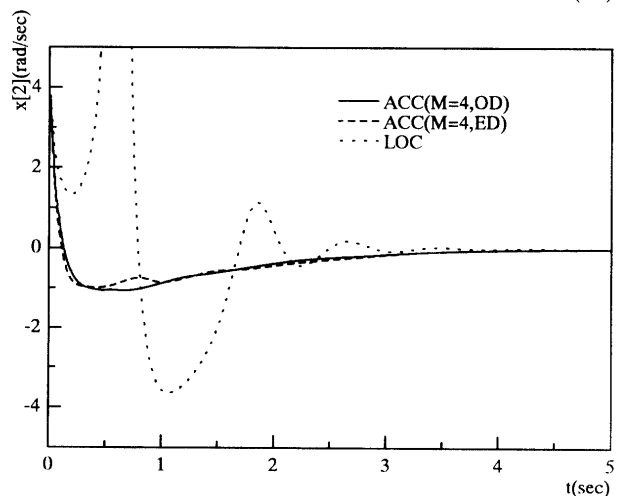
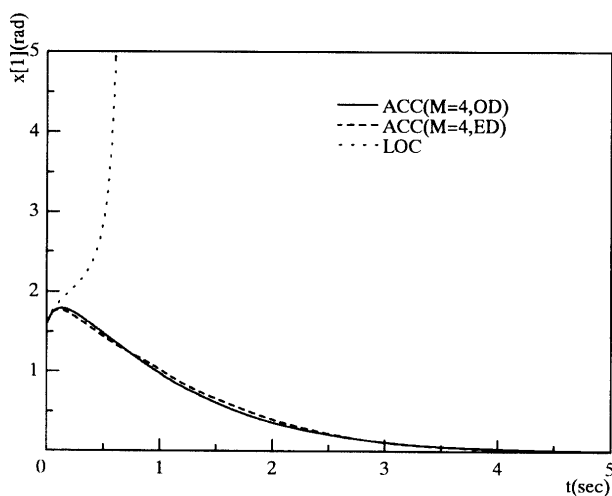
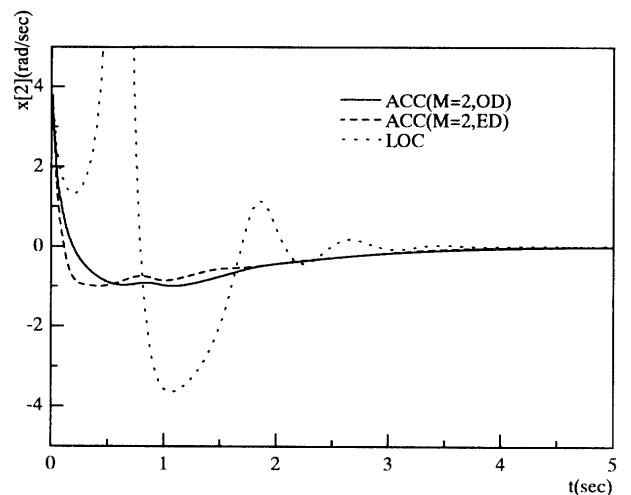
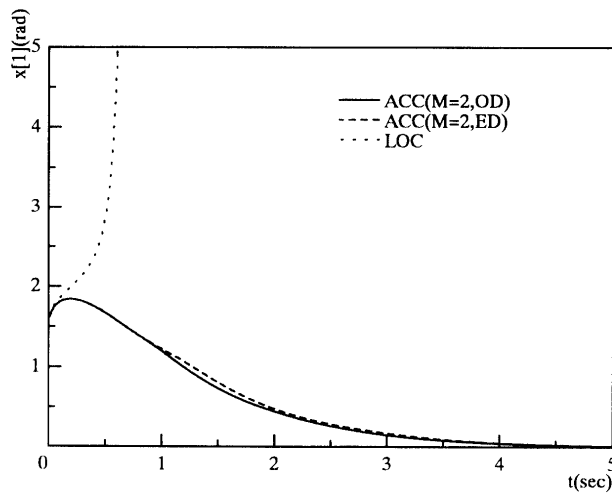
5. 数値実験

次の発電機動揺方程式を考える。

$$\widehat{M}\ddot{\delta} + \widehat{D}\dot{\delta} + P_{em}(1 + \Delta E_{fd})\sin \delta = P_{in}$$

ただし、 $\widehat{M} = 0.06$, $\widehat{D} = 0.06$, $P_{em} = 1.0$, $P_{in} = 0.8$ とする。状態ベクトルとして相角 δ と角速度 $\dot{\delta}$ の $x = [x[1], x[2]]^T = [\delta - \widehat{\delta}_0, \dot{\delta}]^T \in \mathbb{R}^2$ および制御変数として界磁電圧の増分の $u = \Delta E_{fd}$ を設定する。ここで $\widehat{\delta}_0 = 53.1^\circ$ である。

シミュレーションの条件は次の通りである。 $Q_i = \text{diag}(1, 1)$, $R_i = 1$, $S_i = \text{diag}(10, 10)$, $\omega_1(x) = x^T x$, $\omega_2(x) = 0$ とした。 Ω として N および分割領域に関するパラメータ $a_i (i = 1, 2, \dots, M)$ を選んだ。 $G A$ のパラメータは個体数 $q = 40$, 世代数 $G = 50$, $P_c = 0.8$, $P_m = 0.03$ と設定した。これらの条件の下、 $G A$ 調整型自動抽出制御法 (ACC, OD) と通常の自動抽出制御法

3-(a) $x[1]$ 3-(b) $x[2]$ 図3 時間応答 ($x[0] = [1.6, 4.0]^T$ の場合)

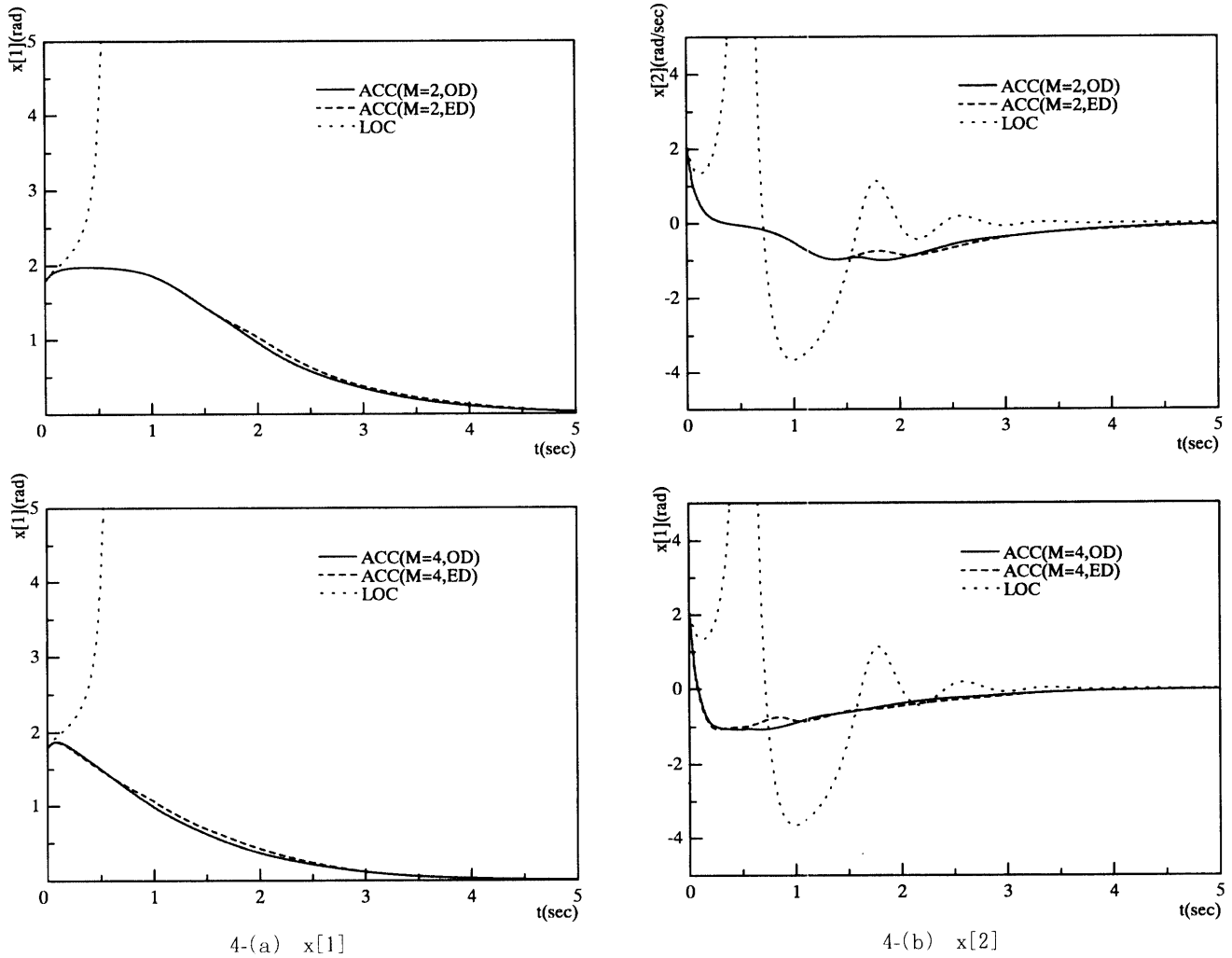


図4 時間応答 ($x[0]=[1.8, 2.1]^T$ の場合)

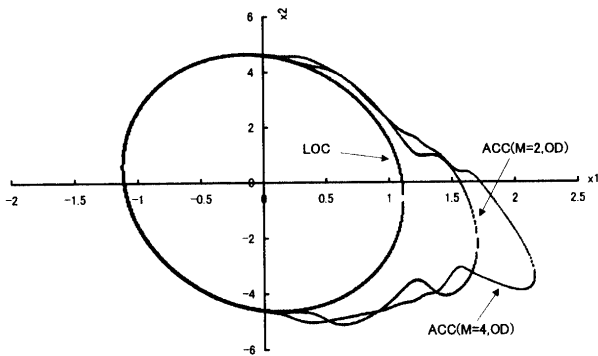


図5 リアプノフの安定領域

(ACC, ED) および従来の線形制御法 (LOC) との比較を行った。

i) $M=2$ で等分割 $\langle ACC(M=2, ED) \rangle$

$N=4.0, a_1=60^\circ, a_2=120^\circ$

ii) $M=2$ で最適分割 $\langle ACC(M=2, OD) \rangle$

準最適値は $N=4.2, a_1=80^\circ, a_2=130^\circ$ であった。

iii) $M=4$ で等分割 $\langle ACC(M=4, ED) \rangle$

$N=4.0,$

$a_1=60^\circ, a_2=90^\circ, a_3=120^\circ, a_4=150^\circ$

iv) $M=4$ で最適分割 $\langle ACC(M=4, OD) \rangle$

準最適値は $N=4.6,$

$a_1=65^\circ, a_2=100^\circ, a_3=140^\circ, a_4=155^\circ$ であった。

図1 ~ 図4に初期値をそれぞれ $x[0]=[1.0, 6.0]^T, x[0]=[1.5, 6.0]^T, x[0]=[1.6, 4.0]^T, x[0]=[1.8, 2.1]^T$ とした場合の $x[1]$ および $x[2]$ の時間応答を示す。図5にはリアプノフ関数による安定領域を示す。また、表1には各初期値に対する $J = \frac{1}{2} \int_0^5 (x^T x + u^T u) dt$ の比較を示す。

これらのシミュレーション結果により、本手法 (ACC, OD) が通常の自動抽出制御 (ACC, ED) や LOC に比

べ、動揺をかなり抑制することが確かめられる。

6. まとめ

G A 調整型の自動抽出制御設計法を提案し、電力系統安定化の計算機シミュレーションによりその有効性を確認した。テラー展開点や領域分割数の準最適決定法や、その場合のシミュレーション実験が今後の課題である。

参考文献

- 1) 高田：自動抽出制御法における自動抽出関数の設計について，第15回 SICE 九州支部学術講演会，p.67-p.68, (1996)
- 2) 高田，松本，八野，松山：G Aによる自動抽出関数に対する分割領域幅の最適設計，第16回 SICE 九州支部学術講演会，p.317-p.318, (1997)