

最適化アルゴリズムを用いた拡大次元自動抽出制御とその種子島電力系統への適用

高田 等* 園畑 直人** 八野 知博*

An Augmented Automatic Choosing Control by Using Optimization Algorithm and its Application to Tanegashima Power System

Hitoshi TAKATA*, Naoto SONOHATA** and Tomohiro HACHINO*

In this paper we consider a nonlinear feedback control which is called an augmented automatic choosing control (AACC) for nonlinear systems. The domain of a given nonlinear system is divided into some subdomains in which Taylor expansion points are suboptimally selected by GA. The LQ control is applied to sectionwise linear systems. This AACC is applied to improve the transient stability of multimachine power system in Tanegashima.

Keywords: Nonlinear control, Augmented automatic choosing control, GA, Tanegashima power system

1. まえがき

我々の周りに実在するシステムは線形システムと非線形システムに大別されるが、そのほとんどは非線形システムである。線形システムに対しては既存の線形制御理論を用いた制御系設計が比較的容易である。一方、非線形システムを直接解析、制御することは一般に容易でない。そのため、これまで多くの非線形システム制御に関する研究が行われてきた。非線形システムに対し安定化コントローラを設計する手法の一つとして、何らかの方法で非線形システムを線形化し、線形制御則を適用する手法がある。線形化の例として代表的且つ実用的なものの一つとしては、テイラー展開一次近似があげられる^{1)~3)}。しかしこれはシステムが

単一の線形システムで、十分に近似できる範囲においては極めて有効なものであるが、非線形性の強いシステムに対しては有効とはいえない。

そこで本研究では非線形システムに対し、領域毎の拡大次元線形化とLQ制御理論を利用した準最適な拡大次元自動抽出制御則を合成する手法^{4),5)}の改良型について考察した。これはまず、システムの非線形性を考慮して複数の領域に分割し、各領域ごとにテイラー展開一次近似を行う。その際テイラー展開点をGAにより準最適に求める。各一次近似により求められた直線群の交点を、領域の分割点に機械的に選ぶものである。これを基に、区分的線形制御則群を構成する。それらに自動抽出関数を乗じ総和することで、全領域で一つの非線形準最適制御則を合成した。本制御則を種子島多機電力系統安定度改善問題に適用し、数値シミュレーションによりその有効性を確認した。

2010年8月31日受理

* 電気電子工学専攻

** 電気電子工学科

2. 拡大次元自動抽出制御

2.1 概要

自動抽出制御法は、まず対象とするシステムの非線形性を考慮して分離関数を選び、領域を分割する。各小領域ごとにテイラー展開一次近似を行い LQ 制御則を構成した後、シグモイド型自動抽出関数により各領域で有効な近似関数を抽出し、滑らかに結合して単一フィードバック制御則を合成する手法である。しかし、この手法ではテイラー展開により定数項が生じる。この定数項の無限時間での影響に対処するため、定常状態にある原点で零となる制御を行うための非線形原点補正関数による補正が必要である。そこで本章では安定なゼロダイナミクス変数を導入した拡大次元システムに対し、自動抽出制御法を適用した、いわゆる拡大次元自動抽出制御法を合成する。本手法は自動抽出関数合成時における、テイラー展開定数項に上述のゼロダイナミクス変数を乗じ、拡大次元変数とみなす。これにより定数項のない拡大次元システムを構成し、自動抽出制御理論を適用して制御則を合成する手法である。

2.2 領域毎線形近似の拡大次元化

システムが次の非線形微分方程式:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad x \in \mathbf{D} \quad (1)$$

で与えられる制御問題について考える。ただし、

$$\begin{aligned} \cdot &= d/dt \\ x &= [x[1] \ \dots \ x[n]]^T : n \text{次元状態ベクトル} \\ u &= [u[1] \ \dots \ u[r]]^T : r \text{次元制御ベクトル} \\ f &: \text{連続微分可能な非線形 } n \text{次元ベクトル値関数} \\ g &: \text{連続微分可能な非線形 } n \times r \text{行列値関数} \\ f(0) &= 0, \quad g(0) \neq 0 \end{aligned}$$

である。

評価関数として二次形式の

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (2)$$

を選ぶ。ただし、

$Q : n \times n$ 準正定値対称行列

$R : r \times r$ 正定値対称行列

右肩 T は転置記号、右肩-1 は逆行列記号である。

連続微分可能な L 次元分離ベクトル値関数 $C : x \rightarrow R^L$ を導入し、その値域を D とする。次に領域 D を $M+1$ 個の小領域に分割 ($D = \cup_{i=0}^M D_i$) する。(1) 式に対し、各小領域 D_i ごとに、 $\hat{X}_0 = 0$ および $\hat{X}_i \in$

$C^{-1}(D_i)$ 点近傍でのテイラー展開線形化は、

$$\dot{x} = A_i x + w_i + B_i u \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A_i &= \partial f(\hat{X}_i) / \partial \hat{X}_i^T, w_i = f(\hat{X}_i) - A_i \hat{X}_i, \\ B_i &= g(\hat{X}_i) \end{aligned}$$

である。ここで、安定なゼロダイナミクス変数 x_{n+1} を導入し、定数項 w_i に乗じて、(3) 式を次のように次元拡大する。

$$\begin{cases} \dot{x} = A_i x + w_i x_{n+1} + B_i u \\ \dot{x}_{n+1} = -\sigma_i x_{n+1} \end{cases} \quad (4)$$

$$(x_{n+1}(0) \simeq 1, \quad 0 < \sigma_i \ll 1)$$

すなわち (4) 式は、

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \begin{bmatrix} A_i & w_i \\ 0 & -\sigma_i \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} \\ &= \mathbf{A}_i \mathbf{X} + \mathbf{B}_i u \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} x_1 & \dots & x_n & x_{n+1} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} A_i & w_i \\ 0 & -\sigma_i \end{bmatrix}, \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である。これを拡大次元システムと呼ぶ。

本論文では GA によりテイラー展開点を準最適に求め、各小領域 D_i を自動的に求める。詳細は、3.2 節の展開点の決定を参照されたい。

2.3 領域毎最適制御則

各領域ごとに線形近似した場合、それぞれの制御則 $u(X)$ は完全観測の場合、次の (6) 式により求められる。

$$u(\mathbf{X}) = -F_i \mathbf{X} \quad (6)$$

ただし、

$$F_i = R^{-1} B_i^T P_i$$

である。また、 P_i はリカッチ方程式:

$$P_i \mathbf{A}_i + \mathbf{A}_i^T P_i + Q - P_i \mathbf{B}_i R^{-1} \mathbf{B}_i^T P_i = 0 \quad (7)$$

の $(n+1) \times (n+1)$ 対称行列の解である。これを、全領域で連続した一つの制御則に合成するため、次の自動抽出関数を導入する。

2.4 自動抽出関数

前節では各領域 D_i ごとに最適制御則 u_i を求めた。隣り合った領域同士の制御則 u_i を抽出し、つなぎ合わ

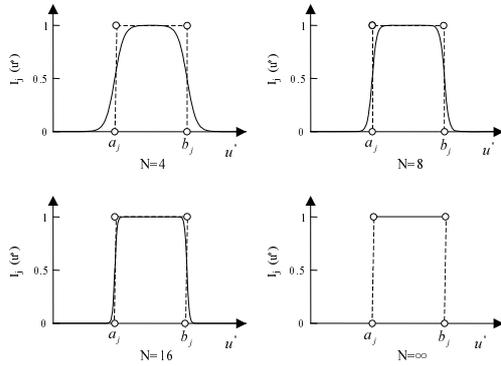


図 - 1 シグモイド型関数の概略図

せることで、全領域の連続した制御則 $u(X)$ として扱う。このとき、領域が変わると同時に制御則を切り替えねばならない。そのためには、領域 $D_i = \prod_{j=1}^L [a_{ij}, b_{ij}]$ を抽出する関数が必要である。これは、抽出したい領域でほぼ 1、それ以外では 0 となるような関数である。

$$I_{iN}(x) = \begin{cases} 1 & \text{on } D_i \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (8)$$

しかし、(8) 式を満たすような解析関数は存在しないため、次のシグモイド型自動抽出関数で近似する。

$$I_{iN}(x) = \prod_{j=1}^L I_{iN}(x; j) \quad (9)$$

$$I_{iN}(x; j) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(2N(C_j(\hat{x}) - a_{ij})/h_j)} - \frac{1}{1 + \exp(-2N(C_j(x) - b_{ij})/h_j)} \quad (10)$$

ただし、 N は自然数、 $h_i = (b_{ij} - a_{ij})/2$ である。

自動抽出関数は、 $N \rightarrow \infty$ で理想的なものに近づくが、実際の制御分野への適用では以前の実験報告で $N = 8$ 以下でも有効であることが検証されている。

図 - 1 にシグモイド型関数の概略図を示す。

2.5 準最適制御則合成

各領域の最適制御則と自動抽出関数を乗じることで、次のフィードバック制御則が得られる。

$$u(x) = \sum_{i=0}^M u_i(x) I_{iN}(x) \quad (11)$$

これを全領域の完全観測時制御則と定義する。これは、領域毎に切り替えのない単一フィードバック制御則である。



図 - 2 種子島発電所概要

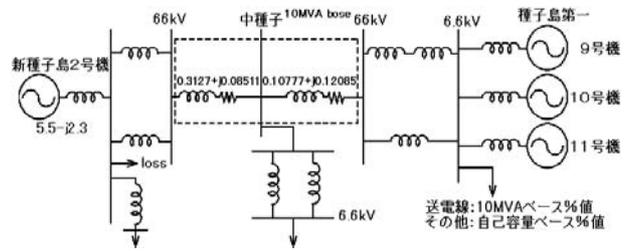


図 - 3 種子島電力系統図

3. 種子島多機電力系統数値シミュレーション

3.1 問題設定

種子島における発電所概要図を図 - 2、および電力系統図を図 - 3 に示す。

図 - 3 の電力系統における発電機動揺方程式を (12) 式に示す。その際、9号機、10号機、11号機、新2号機をそれぞれ添字 1, 2, 3, 4 で表記する。

$$\begin{cases} M_1 \ddot{\delta}_1 + D_1 \dot{\delta}_1 + P_{e1} = P_{in1}(1 + u) \\ M_2 \ddot{\delta}_2 + D_2 \dot{\delta}_2 + P_{e2} = P_{in2} \\ M_3 \ddot{\delta}_3 + D_3 \dot{\delta}_3 + P_{e3} = P_{in3} \\ M_4 \ddot{\delta}_4 + D_4 \dot{\delta}_4 + P_{e4} = P_{in4} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^4 Y_{ij} V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

ここで、 δ_i : 発電機の位相角、 M_i : 発電機回転子の慣性定数、 $D_i = \gamma_i M_i$: 制動係数、 P_{ini} : 機械的入力、 P_{ei} : 電氣的出力、 u : コントロールである。 $n = 8$, $r = 1$ で拡大次元状態ベクトルを $X = [x_1, \dots, x_n, x_{n+r}]^T$ とする。系統係数と定常状態の各値は以下の通りである。

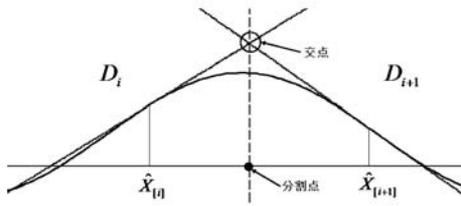


図 - 4 領域の分割点

$$\begin{aligned}
 M_1 &= 0.0031, M_2 = 0.0022, M_3 = 0.0022, M_4 = 0.0087 \\
 \gamma_1 &= \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0 \\
 P_{in1} &= 0.17, P_{in2} = 0.30, P_{in3} = 0.33, P_{in4} = 0.55 \\
 V_1 &= 1.0961, V_2 = 1.1218, V_3 = 1.1397, V_4 = 1.0589 \\
 Y_{11} &= 0.272, Y_{12} = Y_{21} = 0.0764, Y_{13} = Y_{31} = 0.0796 \\
 Y_{14} &= Y_{41} = 0.0814, Y_{22} = 0.4055, Y_{23} = Y_{32} = 0.1288 \\
 Y_{24} &= Y_{42} = 0.1318, Y_{33} = 0.4186, Y_{34} = Y_{43} = 0.8367 \\
 Y_{44} &= 0.4859 \\
 \theta_{11} &= -1.4701, \theta_{12} = \theta_{21} = 0.9544, \theta_{13} = \theta_{31} = 0.9544 \\
 \theta_{14} &= \theta_{41} = 0.8366, \theta_{22} = -1.3936, \theta_{23} = \theta_{32} = 0.9544 \\
 \theta_{24} &= \theta_{42} = 0.8367, \theta_{33} = -1.3845, \theta_{34} = \theta_{43} = 0.8367 \\
 \theta_{44} &= -1.2244 \\
 \delta_{1\infty} &= 0.556, \delta_{2\infty} = 0.594, \delta_{3\infty} = 0.619, \delta_{4\infty} = 0.929
 \end{aligned}$$

3.2 展開点の決定

(9) 式の $L = 1$ で領域の分割数を 5 とし、各領域の 5 つの展開点 $[\hat{X}_{[0]}, \hat{X}_{[1]}, \sim, \hat{X}_{[4]}]$ を GA で準最適に求めた。また各領域 D_i の分割点は $b_{i1} = a_{i+1,1}$ とし、図 - 4 に示すように各領域の展開点で線形近似した直線の交点を導出して、それを分割点とした。ただし、 $a_{01} = -\infty$ で $b_{41} = +\infty$ である。以下これを、本手法 (GA) と記す。

〈 GA の操作 〉

- step:1 (初期候補集団の生成)
ランダムに Q 個の個体から成る初期候補集団を生成する。
- step:2 (デコーディング)
遺伝子型から表現型へ変換する。
- step:3 (制御則合成)
 Q 個の展開点の候補に対応する Q 個の制御則を 2.3 ~ 2.5 節に従って合成する。
- step:4 (評価)
初期値 $X(0) = [x_1(0), x_2(0), \sim, x_9(0)]^T$ のうち、

$x_2(0) \sim x_9(0)$ は固定値とし、 $x_1(0)$ のみ $x_1(0) = i[\text{rad}]$ ($i = 0, 1, \sim, 50$) と変化させる。計 51 点の初期値に基づいて、 Q 個の制御則の候補により 10 秒間の出力の時間応答を求める。この時間応答が安定であった初期値の個数 S を適応度とする ($F = S$)。

- step:5 (淘汰)
個体集団に淘汰操作を施す。トーナメント方式とし、トーナメントサイズは 2 とした。
- step:6 (交叉)
個体集団に交叉確率 P_c で一様交叉操作を施す。
- step:7 (突然変異)
個体集団に突然変異率 P_m で突然変異操作を施す。
- step:8 (繰り返し)
終了条件を満たさなければ step2 へ戻る。

[A] 本手法 (GA) との比較として、定常点近傍のみで線形近似を行い線形制御理論を適用した [B] 従来法 (LOC 制御) と本手法 (GA) における 5 つの展開点を、GA を用いずに試行錯誤により決定したものを [C] 旧手法 (試行錯誤) とし、3 手法 [A,B,C] のシミュレーション実験を行った。各手法の展開点の各値は以下のように決定された。

- [A] 本手法 (GA)
 $[\hat{X}_{[4]}, \hat{X}_{[0]}, \hat{X}_{[1]}, \hat{X}_{[2]}, \hat{X}_{[3]}] =$
 $[-2.4762, 0, 1.1890, 2.1489, 2.4107]\text{rad}$
- [B] 従来法 (LOC 制御)
 $\hat{X}_{[0]} = 0\text{rad}$
- [C] 旧手法 (試行錯誤)
 $[\hat{X}_{[0]}, \hat{X}_{[1]}, \hat{X}_{[2]}, \hat{X}_{[3]}, \hat{X}_{[4]}] =$
 $[0, 0.6140, 1.3072, 2.1849, 2.3763]\text{rad}$

なお、自動抽出関数のパラメータを $N = 8$ 、ゼロダイナミクス係数を $\sigma = 0.1$ と設定した。

3.3 安定領域の比較

図 - 5 に [A] 本手法 (GA)、[B] 従来法 (LOC 制御) [C] 旧手法 (試行錯誤) の安定領域の $x_1 - x_2$ 断面図の比較を示す。ただし状態ベクトルの初期値を、 $X(0) = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^T =$
 $[x_1, x_2, 0.70068, 0, 0.76138, 0, 0.92906, 0, 1]^T$ とした。

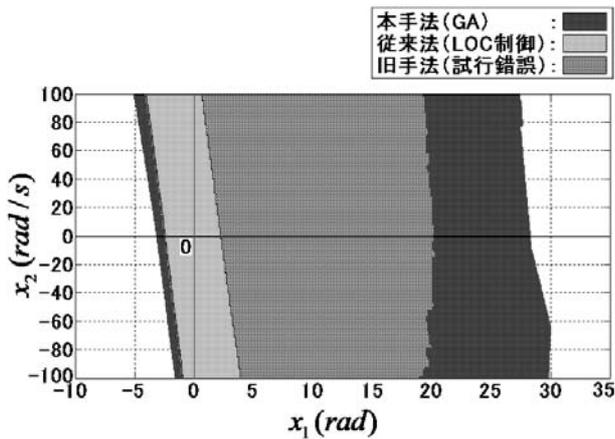


図 - 5 安定領域の比較

3.4 時間応答の比較

状態変数の初期値を $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9]^T = [25, 0, 0.70068, 0, 0.76138, 0, 0.92906, 0, 1]^T$ とした。[A] 本手法 (GA) と [B] 従来法 (LOC) の $[x_1, x_2]$ 、 $[x_3, x_4]$ 、 $[x_5, x_6]$ 、 $[x_7, x_8]$ に関する時間応答をそれぞれ図 - 6 ~ 図 - 9 に示す。図中 [A] と [B] をそれぞれ AACC (本手法) 及び LOC (従来法) と記す。さらに本手法 (GA) における入力 u と自動抽出関数の時間応答をそれぞれ図 - 10 と図 - 11 に示す。

4. まとめ

本論文では、拡大次元自動抽出制御において各パラメータを最適化アルゴリズム GA を用いて準最適に決定する手法を提案した。これを種子島多機電力システムに適用した。数値シミュレーション実験結果より、本制御法は従来法の線形制御法 (LOC) や旧手法の試行錯誤によりパラメータを決める手法よりも、安定領域が拡大することが確認できた。これより、本手法の有効性が実証された。今後の課題として、安定領域のさらなる拡大、領域の分割数も含めたパラメータの最適化、システム評価の高速化などがある。

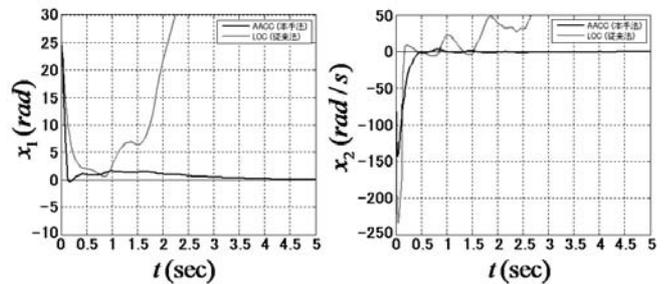


図 - 6 x_1, x_2 (種子島第一: 9号機) の時間応答

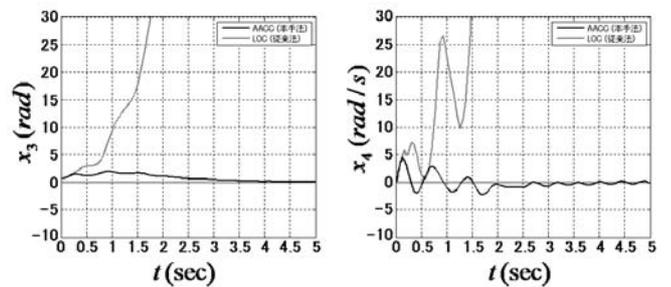


図 - 7 x_3, x_4 (種子島第一: 10号機) の時間応答

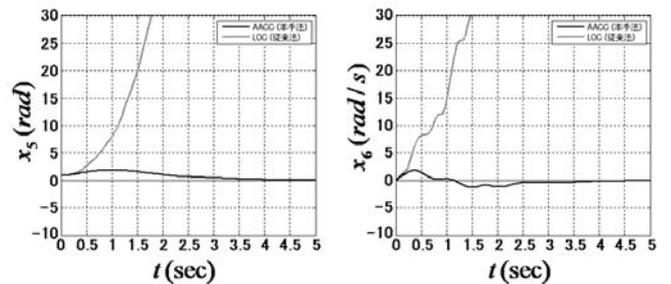


図 - 8 x_5, x_6 (種子島第一: 11号機) の時間応答

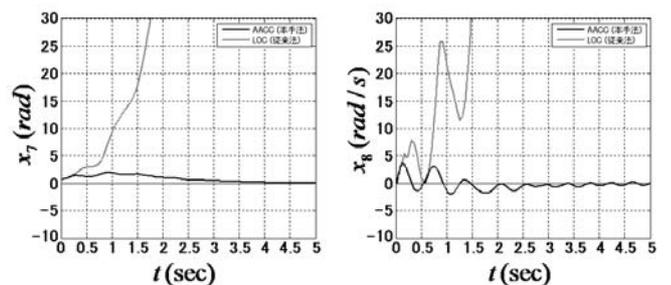


図 - 9 x_7, x_8 (新種子島: 2号機) の時間応答

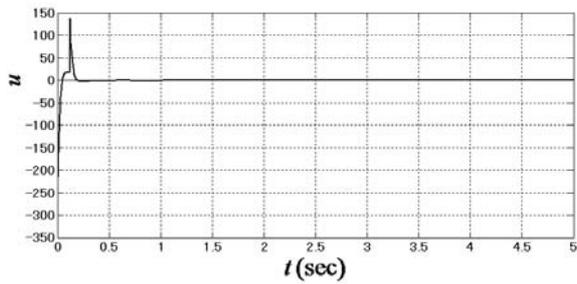


図 - 10 入力 u の時間応答

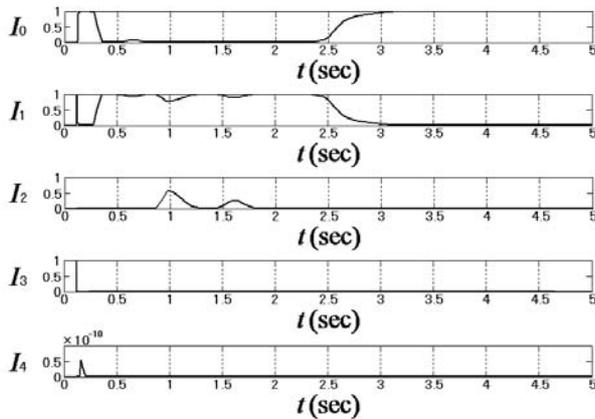


図 - 11 自動抽出関数 $I_0 \sim I_4$ の時間応答

参考文献

- 1) Y. N. Yu, K. Vongsuriya and L. N. Wedman : Application of an Optimal Control Theory to a Power System, IEEE Trans Power Apparatus and System, Vol.PAS-89, No.1, pp.55-62 (1970).
- 2) P. Kundur : Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., (1993).
- 3) 野波 健蔵、西村 秀和 : MATLAB による制御理論の基礎、東京電機大学出版局、pp.182-189 (1998).
- 4) 縄田 俊則、高田 等 : GA による入力制限付き非線形システムに対する拡大次元自動抽出制御の設計、システム制御情報学会論文誌、Vol.16、No.5、pp.202-208 (2003).
- 5) H. Takata, T. Hachino, K. Kohama, T. Nawata : Augmented Automatic Choosing Control of Nonlinear Observer Type for Nonlinear Systems with Linear Measurement and Its Application, Proc. of NOLTA2008, B3L-F2, pp.297-300 (2008).