一般化最小分散制御に基づいた PID 制御系の設計*

山本 透**・石原 弘一***・大松 繁****

Construction of PID Control System Based on Generalized Minimum Variance Control*

Toru YAMAMOTO**, Hirokazu ISHIHARA*** and Sigeru OMATU****

PID control algorithms have been used extensively for several process control systems up to now. On the other hand, Clarke has proposed a generalized minimum variance adaptive control system with linear quadratic cost function as self-tuning control method for nonminimum-phase systems.

In this paper, we consider the relationship between the PID control system and the generalized minimum variance adaptive control system. Then, it is shown that the PID control system is equivalent to a control strategy of minimizing a cost function in the generalized minimum variance control system. Furthermore, it is shown that PID control system can be regarded as a feedback control system with a pre-compensator. Next, we consider a design method of PID controller based on the generalized minimum variance control theory. Thus, PID gains are determined so as to construct a desired pre-compensator which suppresses an overshoot and shortens settling time or raise time. Finally, we show a numerical simulation result by the present method and apply the method to a pressure control system to show the effectiveness.

1. 緒 言

古くから、プロセス制御系などに対して、PID 制御¹⁻³が有効な手法とされ、近年のデジタル計算機の進展に伴って、多くの制御対象がマイクロコンピュータなどと結びつくことで、実装化されてきた。さらに、PID 制御系における各ゲインの調整則として、これまで種々の手法⁴⁻⁶が提案されている。しかし、この PID 制御系は、PID の各々の動作が個々に有している特性を、単に結合したものであり、これらを結合した形での必然性に関する考察は、あまりなされていない。一方、Clarke らは、不安定零点をもつシステムすなわち非最小位相系に

対する適応制御手法として、2 次評価規範の最小化に基づく一般化最小分散制御^{7,8}を提案した。この一般化最小分散制御は、システムの出力を、前置補償器出力に追従させる制御系となっている⁹。そして、前置補償器の伝達関数は、評価規範における重み多項式から構成されている。

本論文では、まず、離散時間速度型 PID 制御系と一般化最小分散制御系の関連について考察し、PID 制御系の構造が、ある 2 次評価規範の最小化になっていることを示す。PID ゲインでは定常状態の特性しか分からなかったが、これより、PID 制御系の過渡特性を評価関数として明確にすることができる。つぎに、PID 制御系において、しばしば問題としてあげられる PID ゲインの決定および調整方法について考察する。通常、PID ゲインは、高橋らの方法⁴によって決定されている。この方法は、連続時間系において、制御誤差面積の最小化に基づいてゲインを決定するジューグラー・ニコルスの方法⁵を、離散時間系に拡張したものである。そして、制御対象のステップ応答特性から、最大勾配とむだ時間を計測し、これらのパラメータから各ゲインが計算される。このとき、これらの最大勾配やむだ時間を、正確に計測することは難しく、実際に最適なゲインを決定するまでには、試行錯誤的な実験が繰り返し必要とされている。

* 原稿受付 1989. 7. 31

** 高松工業高等専門学校 機械工学科 Dept. of Mechanical Engineering, Takamatsu National College of Technology ; 355 Chokushi-cho, Takamatsu 761, JAPAN

*** 高松工業高等専門学校 制御情報工学科 Dept. of Electro-Mechanical System Engineering ; Takamatsu National College of Technology ; 355 Chokushi-cho, Takamatsu 761, JAPAN

**** 徳島大学 工学部 Dept. of Information Science and Intelligent Systems, Faculty of Engineering, University of Tokushima ; 2-1 Minamijosanjima-cho, Tokushima 770, JAPAN

Key Words : PID control, generalized minimum variance control, cost function, pre-compensator, pressure control.

また、調整にあたっては、ゲインの自由度が比較的大きく、それ程容易ではない。そこで、本論文では、前置補償器の伝達関数の設計から、各ゲインを計算する一設計方法を構成し、前置補償器の設計により、出力の目標値応答を改善する。このとき、設計する前置補償器の伝達関数の分母多項式は、2次多項式となっており、これに含まれる各係数は、望ましい減衰係数と固有振動数から計算される。この設計方法においては、各ゲインが減衰係数と固有振動数を操作することによって計算されるため、調整が幾分容易となっている。最後に、本論文で考察したPID制御系の設計方法の有効性を検証するために、この設計方法を数値計算および実際の圧力制御系¹⁰に適用し、その制御結果について、定量的考察を行なう。

2. PID 制御系と一般化最小分散制御系

2.1 速度型 PID 制御則

連続時間 PID 制御則は、次式に示す伝達関数により、定義される³。

$$G_c(s) = k_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (1)$$

ここで、 k_c はゲイン、 T_i は積分動作時間、 T_d は微分動作時間を示す。(1) 式を、離散時間速度型 PID 制御則として書き換え、次式を得る³。

$$\begin{aligned} u(k) = & u(k-1) + K_P(y(k-1) - y(k)) \\ & + K_I(w(k) - y(k)) \\ & + K_D(2y(k+1) - y(k) - y(k-2)) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $K_P = k_c - \frac{1}{2} K_I$ 、 $K_I = k_c \frac{T}{T_i}$ 、および $K_D = \frac{T_d}{T}$ であり、それぞれ、比例ゲイン、積分ゲインおよび微分ゲインである。さらに、 $u(k)$ 、 $y(k)$ および $w(k)$ は、それぞれ、制御入力、システムの出力、規準入力を示す。通常、これらの各ゲインは、高橋らの調整則³により、制御対象のステップ応答特性から決定される。

つぎに、(2) 式を次式として書き換える。

$$\begin{aligned} (K_P + K_I + K_D)y(k) - (K_P + 2K_D)y(k-1) \\ + K_D y(k-2) + (1 - z^{-1})u(k) - K_I w(k) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

さらに、

$$\left. \begin{aligned} L(z^{-1}) &\triangleq (K_P + K_I + K_D) \\ &\quad - (K_P + 2K_D)z^{-1} + K_D z^{-2} \\ M(z^{-1}) &\triangleq 1 - z^{-1} \\ N(z^{-1}) &\triangleq K_I \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

と定義すると、(3) 式は次式となる。

$$L(z^{-1})y(k) + M(z^{-1})u(k) - N(z^{-1})w(k) = 0 \quad (5)$$

2.2 一般化最小分散制御^{7,8}

Clarke らは、セルフチューニングコントロール手法に基づいて、次式に示す2次評価規範の最小化を目的とする一般化最小分散制御則を提案した^{7,8}。

$$J = E[\|P(z^{-1})y(k+d) - R(z^{-1})w(k)\|^2 + \|Q'(z^{-1})u(k)\|^2] \quad (6)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} P(z^{-1}) &= p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{n_p} z^{-n_p} \\ Q'(z^{-1}) &= q'_0 + q'_1 z^{-1} + q'_2 z^{-2} + \dots + q'_{n_q} z^{-n_q} \\ R(z^{-1}) &= r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots + r_{n_r} z^{-n_r} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

である。また、(6) 式において d は、システムのむだ時間を示す。

いま、対象とするシステムは、次式のような ARMAX モデルとする。

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + \xi(k) \quad (8)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

である。 $\xi(k)$ は外乱を示し、 $E[\xi(k)] = 0$ 、 $E[\xi^2(k)] = \sigma^2$ とする。

このとき、(6) 式に示した2次評価規範を最小にする制御入力は、次式を満足する $u(k)$ として与えられる。

$$\begin{aligned} P(z^{-1})F(z^{-1})y(k) \\ + (Q(z^{-1}) + P(z^{-1})E(z^{-1})B(z^{-1}))u(k) \\ - R(z^{-1})w(k) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} Q(z^{-1}) &\triangleq \frac{q'_0}{b_0 \cdot p_0} Q'(z^{-1}) \\ &= q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} + \dots + q_{n_q} z^{-n_q} \end{aligned} \quad (11)$$

であり、 $E(z^{-1})$ および $F(z^{-1})$ は、恒等式

$$1 = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}) \quad (12)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} E(z^{-1}) &= 1 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2} + \dots + e_{d-1} z^{-(d-1)} \\ F(z^{-1}) &= f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{n-1} z^{-(n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

から計算される多項式である。さらに、(6) 式に示す2次評価規範の最小化は、

$$\begin{aligned} \phi(k+d) &\triangleq P(z^{-1})y(k+d) + Q(z^{-1})u(k) \\ &\quad - R(z^{-1})w(k) \end{aligned} \quad (14)$$

によって定義された一般化出力 $\phi(k+d)$ の最小分散制御を意味している。

ここで、(8) 式と (10) 式から構成されるブロック線

図をFig. 1に示す。

Fig. 1 から分かるように、一般化最小分散制御系は、システムの出力を以下に示す前置補償器 $G_m(z^{-1})$ の出力

$$y_m(k) = \frac{R(z^{-1})}{P(z^{-1})F(z^{-1})} w(k) \triangleq G_m(z^{-1})w(k) \quad (15)$$

に、追従させる制御系となっていることが分かる。

Fig. 1 Block diagram of the closed loop system for the generalized minimum variance control system

3. 二つの制御系の関連について

(10) 式で示される一般化最小分散制御則を $F(z^{-1})$ で割り、(5) 式に示されるPID制御則とから、

$$L(z^{-1}) = P(z^{-1}) \quad (16)$$

$$M(z^{-1}) = \frac{Q(z^{-1}) + P(z^{-1})E(z^{-1})B(z^{-1})}{F(z^{-1})} \quad (17)$$

$$N(z^{-1}) = \frac{R(z^{-1})}{F(z^{-1})} \quad (18)$$

が成立したとき、この二つの制御系が等価となる。つまり、PID制御則が、ある2次評価規範の最小化になっていると解釈することができる。

(16) 式～(18) 式を書き換えると、

$$P(z^{-1}) = L(z^{-1}) \quad (19)$$

$$Q(z^{-1}) = M(z^{-1})F(z^{-1}) - P(z^{-1})E(z^{-1})B(z^{-1}) \quad (20)$$

$$R(z^{-1}) = N(z^{-1})F(z^{-1}) \quad (21)$$

となる。しかし、ここで(19)式～(21)式が成立するためには、 $P(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ および $R(z^{-1})$ の次数に、次のような条件を満足しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} \deg P(z^{-1}) &= 2 \\ \deg Q(z^{-1}) &\leq \max(n, d+m+1) \\ \deg R(z^{-1}) &= n-1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

以上により、PID制御系は、(19)～(21)式の関係が満足されるとき、一般化最小分散制御の一つとなっている。ここで、一般化最小分散制御系においては、設計多項式 $P(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ および $R(z^{-1})$ を自由に設計する

ことができるが、PID制御系においては、(20)式から分かるように、 $P(z^{-1})$ を設計すると、一意に $Q(z^{-1})$ が決定される。このため、PID制御系と一般化最小分散制御系との関連から、評価規範を自由に構成し、この評価規範によるPIDゲインを決定するということは不可能である。これが、PID制御の限界である。そこで、この制約の中で、できるだけ良質な制約系が構成できるような設計法について、次章で考察する。

4. PID制御系の設計

一般化最小分散制御系との関連を考慮して、PID制御系のブロック線図をFig. 2に示す。先に述べたように、PID制御系においては、 $P(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ および $R(z^{-1})$ を自由に設計することはできないが、Fig. 2 から分かるように、設計多項式 $L(z^{-1}) (= P(z^{-1}))$ は、制御系の設計において、重要な役割をもち、前置補償器出力を左右している。なお、PID制御系の設計であるから、(16)式および(19)式より、以下において $P(z^{-1})$ を $L(z^{-1})$ と書き換えて考察する。したがって、望ましい目標値応答を実現するように、この $L(z^{-1})$ を設計し、(4)式および(17)式の関係から、PIDゲインを決定する設計法について以下に考察する。

$L(z^{-1})$ を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} L(z^{-1}) &= (K_P + K_I + K_D) - (2K_D + K_P)z^{-1} \\ &\quad + K_D z^{-2} \\ &\triangleq G_0(1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}) \\ &\triangleq G_0 D(z^{-1}) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $D(z^{-1})$ の設計は、過渡特性を非常に左右する。したがって、連続時間2次系

$$D(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (24)$$

において、希望する前置補償器出力の過渡特性を、減衰係数 ζ 、固有振動数 ω_n により設計する。さらに、これをサンプリング間隔 T で離散化し、 $D(z^{-1})$ を得る。これにより、過渡特性の設計が可能となる。

つぎに、 G_0 の決定方法であるが、これはコントローラのゲインであり、重要な役割をもつ。ここで、 G_0 は(23)式から明らかなように、PIDゲインの和として与

Fig. 2 Block diagram of the closed loop system for PID control system

えられる。したがって、高橋らの調整則³により得られるPIDゲインの和を、 G_0 として用いる。

この手法によると、前置補償器を設計することで、閉ループ系の極の移動が生じ、望ましい出力特性を与えるものとなっており、一種の極配置制御手法^{11,12}とみなすこともできる。すなわち、極配置制御を、一般化最小分散制御に基づいて、前置補償器の設計により実現しようとした制御手法である。しかしながら、本手法は、閉ループ系の特性根の位置を指定する極配置法に比べ、前置補償器の設計のみを行なうため、取り扱う方程式の次数が小さく、ゲイン決定のアルゴリズムが簡単であるという特性を有している。

5. 数値計算による検討

前章で考察したPID制御系の設計アルゴリズムの有効性を検証するために、数値計算を行なう。

伝達関数が、次式として示される連続時間系を考える。

$$G(s) = \frac{10}{10s+1} e^{-0.2s} \quad (25)$$

これを、サンプリング間隔 $T = 0.5$ で離散化すると、パルス伝達関数 $G^*(z^{-1})$ は、次式となる。

$$G^*(z^{-1}) = \frac{z^{-1}(0.030+0.019z^{-1})}{1-0.951z^{-1}} \quad (26)$$

これにより、ここで考察する離散時間確率モデルは、次式として与えられる。

$$y(k) = 0.951y(k-1) + 0.030u(k-1) + 0.019u(k-2) + \xi(k) \quad (27)$$

ここで、 $\xi(k)$ は外乱を示し、 $E[\xi(k)] = 0$ 、 $E[\xi^2(k)] = 0.001$ とする。(27)式に示すシステムに対し、PID制御を行なった結果をFig. 3に示す。ここで、PIDゲインは高橋らの方法により、それぞれ、

$$K_p = 8.11, K_I = 12.35, K_D = 6.67 \quad (28)$$

とした。Fig. 3から分かるように、定常特性は良いもの

Fig. 3 Simulation result of PID control algorithm with $K_p = 8.11$, $K_I = 12.35$ and $K_D = 6.67$

の、過渡状態においてオーバーシュートがみられる。

ここで、このPID制御系に対し、3.で考察した一般化最小分散制御系との関連について、数値例により考察する。(28)式で示されるPIDゲインの場合、(4)式から、

$$\left. \begin{aligned} L(z^{-1}) &= 27.13 - 21.45z^{-1} + 6.67z^{-2} \\ M(z^{-1}) &= 1 - z^{-1} \\ N(z^{-1}) &= 12.35 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

となる。ここで、(19)~(21)式より、

$$\left. \begin{aligned} P(z^{-1}) &= 27.13 - 21.45z^{-1} + 6.67z^{-2} \\ Q(z^{-1}) &= 0.14 - 0.82z^{-1} + 0.21z^{-2} - 0.13z^{-3} \\ R(z^{-1}) &= 11.74 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

と計算される。したがって、このPID制御系は、

$$\begin{aligned} \phi(k+1) &\triangleq 27.13y(k+1) - 21.45y(k) + 6.67y(k-1) \\ &\quad + 0.14u(k) - 0.82u(k-1) + 0.21u(k-2) \\ &\quad - 0.13u(k-3) - 11.74w(k) \end{aligned} \quad (31)$$

で与えられる一般化出力 $\phi(k+1)$ の最小分散制御を意味する。また、(11)式から

$$\begin{aligned} Q'(z^{-1}) &= \frac{b_0 \cdot p_0}{q_0} Q(z^{-1}) \\ &= 0.33 - 2.03z^{-1} + 0.51z^{-2} - 0.31z^{-3} \end{aligned} \quad (32)$$

と計算され、2次評価規範

$$\begin{aligned} J &= E[\|27.13y(k+1) - 21.45y(k) + 6.67y(k-1) \\ &\quad - 11.74w(k)\|^2 + \|0.33u(k) - 2.03u(k-1) \\ &\quad + 0.51u(k-2) - 0.31u(k-3)\|^2] \end{aligned} \quad (33)$$

の最小化を考えた一般化最小分散制御系と等価になる。

さらに、このPID制御系は、システムの出力を前置補償器出力

$$y_m(k) = \frac{11.74}{27.13 - 21.45z^{-1} + 6.67z^{-2}} w(k) \quad (34)$$

に追従させる制御系となっている。このとき、 $t \rightarrow \infty$ において、 $y(\infty) \rightarrow w(\infty)$ である。(33)、(34)式により、PID制御による過渡特性が明確になる。

つぎに、4.で考察したPID制御系の設計法による制御結果について考察する。

まず、(24)式において減衰係数と固有振動数を、それぞれ $\zeta = 1.0$ 、 $\omega_n = 1.0$ とし、 $G_0 = 27.13$ としたときの前置補償器出力をFig. 4に示す。これは、先のPID制御結果におけるオーバーシュートを抑えるという目的から設計を行なった。このときの各ゲインは、 $K_p = 12.95$ 、 $K_I = 4.20$ 、 $K_D = 9.98$ である。これによる制御結果をFig. 5に示す。Fig. 5から、設計した前置補償器出力に

Fig. 4 The output result of a pre-compensator with $\zeta = 1.0$ and $\omega_n = 1.0$

Fig. 5 Simulation result of the proposed control algorithm based on PID control with $\zeta = 1.0$, $\omega_n = 1.0$ and $G_0 = 27.13$

Fig. 6 The output result of a pre-compensator with $\zeta = 1.0$ and $\omega_n = 1.5$

Fig. 7 Simulation result of the proposed control algorithm based on PID control with $\zeta = 1.0$, $\omega_n = 1.5$ and $G_0 = 27.13$

追従する制御結果が得られ、オーバーシュートもほとんど抑えられていることが分かる。さらに、立ち上がり時間を早くし、速応性を改善するために、 $\zeta = 1.0$, $\omega_n = 1.5$ とした前置補償器出力を Fig. 6 に示す。ここでも、 $G_0 = 27.13$ であり、このとき各ゲインは、 $K_P = 13.52$, $K_I = 7.55$, $K_D = 6.05$ となる。このPIDゲインによる制御結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 において、先の Fig. 6 と比較してオーバーシュートが少し生じたものの、速応性の良い制御結果が得られていることが分かる。

6. 圧力制御実験

ここでは、本論文で考察したPID制御系の設計アルゴリズムを、実際にプロセス制御系の一つである圧力制御系の圧力制御問題に適用し、本手法の有効性を実験的に検証する。

対象とする実験システムの構成図を、Fig. 8 に示す。ここでは、操作弁 (valve) の開閉度 u を操作することにより、圧力タンク (tank) 内の圧力 y を、目標圧力 w に追従させる制御系を考える。さらに、Fig. 9 に定常状態での u と y の定常値 $\bar{y}$ との相互関係を示す。Fig. 9 から、制御対象の線形性を考慮して、操作弁 u に

$$4.7 \leq u(k) \leq 10 [\text{V}]$$

の振幅制限を用いる。ただし、操作弁の開閉度および圧力タンク内の圧力は、いずれも電圧レベルに変換された値で示している。

Fig. 8 The schematic diagram of pressure control system

Fig. 9 Steady state property between u and $\bar{y}$

まず、高橋らの調整則に従って決定したゲインによるPID制御結果を、Fig. 10 に示す。ここで、各ゲインは、 $K_P = 24.7$, $K_I = 19.2$ および $K_D = 20.0$ とした。また、サンプリング間隔は $T = 2.0$ (秒) とした。Fig. 10 から分かるように、制御結果に少し振動が見られる。したがって、この場合の決定は、あまり良くないことが分かる。

つぎに、本論文で提案した制御アルゴリズムによる制御結果を、Fig. 11 に示す。ここで、(24) 式における減衰係数と固有振動数は、それぞれ、 $\zeta = 1.5$, $\omega_n = 0.2$ と決定した。これは、対象とするシステムが、一次遅れ要素をもち、時定数も大きく、制御結果において、あまり振動させたくないという目的から、これらのパラメータを決定した。さらに、 $G_0 = 63.9$ として、PID ゲインを $K_P = 38.8$, $K_I = 5.9$ および $K_D = 19.2$ と決定した。Fig. 11 から分かるように、Fig. 10 のPID制御結果と

Fig. 10 Control result of PID control algorithm with $K_P = 24.7$, $K_I = 19.2$ and $K_D = 20.0$

Fig. 11 Control result of the proposed control algorithm based on PID control with $\zeta = 1.5$, $\omega_n = 0.2$ and $G_0 = 63.9$

比較して、オーバーシュートもほとんどなく、また定常状態における振動もなく、良好な結果が得られている。

以上により、 $L(z^{-1})$ の設計つまり規範モデルの伝達関数の設計から、PID ゲインを決定するPID制御系の設計方法を考察し、数値計算および実際の圧力制御実験結果から、その有効性を検証した。なお、Fig. 3 および Fig. 10 に示したPID制御結果において、もう少し試行錯誤的な実験を繰り返すことにより、さらに良い制御結果を得ることも期待される。しかし、このとき調整するゲインは3個あり、自由度が比較的大きいため、ゲインの調整は、それ程容易なものではない。また、このときのゲイン調整の目安は、あまりはっきりしていない。しかし、本論文で提案した制御アルゴリズムによる場合、制御目的を反映した前置補償器を構成することにより、各ゲインを決定することができる。したがって、ゲイン調整を行なう際、減衰係数 ζ と固有振動数 ω_n の設定が、一つの目安となり、比較的容易に行なえる。

7. 結 言

本論文では、PID制御系とClarkeらによる一般化最小分散制御系との関連を考察し、PID制御系が、ある2次評価規範の最小化になっていることを示した。さらに、PID制御系におけるPIDゲインの決定および調整方法について考察を行ない、一般化最小分散制御に基づいたPID制御系の設計法を提案した。この方法は、前置補償器の伝達関数の分母多項式を、制御目的に従って設計し、この分母多項式から各ゲインを計算するアルゴリズムである。これにより、制御目的がある程度反映されるPID制御系を設計することが可能となった。最後に、提案した設計手法による数値計算および実際の圧力制御系に適用し、その有効性を定量的に検証した。

参 考 文 献

- 1) 添田, 榎木: わかる自動制御, 日新出版 (1966)
- 2) 得丸, 他: 自動制御, 森北出版 (1981)
- 3) 高橋: デジタル制御, 岩波出版 (1985)
- 4) Y. Takahashi, et al.: Parameter Einstellung bei linearen DDC-Algorithmen; Regelungstechnik und Prozeß-Datenverarbeitung, Heft 6, pp. 237~244 (1971)
- 5) J. G. Ziegler & N. B. Nichols: Optimum Settings for Automatic Controllers; Trans. ASME, Vol. 64, No. 8, pp. 759~768 (1942)
- 6) 北森: 制御対象の部分的知識に基づく制御系の設計法; 計測自動制御学会論文集, 15巻, 4号, pp. 549~555 (1979)
- 7) D. W. Clarke & P. J. Gawthrop: Self-Tuning Controller; Proc. IEE, Vol. 123, No. 9, pp. 929~934 (1975)
- 8) D. W. Clarke: Self-Tuning Control of Nonminimum-Phase Systems; Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 501~517 (1984)
- 9) 山本, 石原, 大松: 前置補償器をもつ一般化最小分散制御に対する適応系の一構成; 計測自動制御学会論文集, 26

- 卷, 6 号, pp. 656~661 (1990)
- 10) 山本, 大松, 石原: 一般化最小分散適応制御による圧力タ
ンクの圧力制御; 日本機械学会論文誌 C 編, 56 卷, 523
号, pp. 731~737 (1990)
 - 11) K. J. Åström & B. Wittenmark: Self-Tuning Controller
Based on Pole-Zero Placement; Proc. IEE, Vol. 127,
No. 3, pp. 120~130 (1980).
 - 12) B. Wittenmark & K. J. Åström: Simple Self-Tuning
Controllers; In 'Method and Applications in Adaptive
Control', Proc. Symposium, in Bochum, Springer Lecture
Note 24, Berlin, pp. 21~29 (1980)
-