流体温度液面干渉系の非干渉化PID制御

正員 李 義 頡 (福岡工大) 正員 庄 司 文 啓 (福岡工大)
 正員 崔 元 奎 (BKテレコム) 正員 宋 正 永 (培材大学)
 正員 李 相 球 (韓南大学) 正員 秋 月 影 雄 (早稲田大)

Noninteracting PID Control of a Fluid Temperature and Liquid Level Interacting System

Hee-Hyol Lee, Fumihito Shoji, Member (Fukuoka Inst. of Tech.), Won-Kyu Choi,
 Member (BK Telecom), Jeong-Young Song, Member (PaiChai Univ.), Sang-Gu Lee,
 Member (Hannam Univ.), Kageo Akizuki, Member (Waseda Univ.)

In actual multivariable control systems, controlled variables interact each other. In this case one compensation for a control loop exerts harmful influence upon another control loop through the interaction. This paper presents a noninteracting PID control for a fluid temperature and liquid level interacting system. First, a precompensator is designed to remove the interaction of the multivariable control system using the inverse Nyquist array method. Further, the integrator decoupled system with state feedback is designed in the time domain. Then the design of the control system for the interacting system results in the individual compensation for the single loop PID control system. The experimental results showed the effectiveness of the precompensator designed by the inverse Nyquist array and the integrator decoupled system for removing the interaction.

キーワード：相互干渉、非干渉化、逆ナイキスト配列、積分型非干渉化制御器、PID制御

1. はじめに

液体混合物の各成分を分離する蒸留塔や蒸気を発生するボイラ、また溶液から結晶粒子を析出成長させる結晶缶などの化学プラントは、多変数システムであり、またむだ時間特性、非線形特性等を有する動特性が複雑な制御対象である。このような化学プラントにおける温度、液面、流量、圧力、濃度等の状態量はとりわけ相互に干渉し合う場合が多く、例えばボイラにおけるドラム水位・燃料供給量と温度・圧力、また蒸留塔における塔頂組成と塔底組成間など⁽¹⁾、強い相互干渉が存在する化学プロセスではこのような相互干渉を非干渉化する対策を必要とする。

従来の非干渉化の手法としては、制御対象の前にクロスコントローラを付加する方法⁽²⁾が取られてきたが、複雑で高次な系になる場合が多い。一方、状態空間法は多変数システムに対する制御法として確立されてきたが、強い相互干渉が存在する制御対象に対してそのことを考慮せず適用したとき十分な制御性能を得られない場合がある⁽³⁾。さらに、周波数領域と時間領域を併用した H_∞ 制御が最近注目され相互干渉をもつ制御対象にも応用⁽⁴⁾されているが、一般にその制御器は複雑で高次な系となる⁽⁵⁾。

そこで、これら強い相互干渉を積極的に打ち消す制御器として、INA(逆ナイキスト配列)を用いて周波数領域で

設計された非干渉化前置補償器^{(6)~(8)}や時間領域での状態フィードバックによる非干渉化制御器⁽⁹⁾が有効と思われる。

本論文は、流体温度液面干渉プラントを対象に非干渉化PID制御を行ったものである。この制御対象は、制御量が温度と液面、また操作量が冷水と温水で、それらに強い相互干渉をもつ化学プラントの一つのモデルプラントである。ここでは、このような熱流体プロセスの動特性を表す理論式を正確に記述することは一般に困難なことから、ステップ応答より線形動特性モデルを導き、疑似対角化とINAにより設計された非干渉化前置補償器、または状態フィードバックによる積分型非干渉化制御器により非干渉化を行った後に単一ループPID制御系を構成することによって、相互干渉が顕著な制御対象に対して比較的簡単に非干渉化PID制御系が設計でき良好な制御結果が得られたことを示す。

2. 流体温度液面干渉プラントとPID制御

本論文で対象とした流体温度液面干渉プラントの構成を図2.1に示す。このプラントは、温水槽(N-1,4,5)、冷水槽(N-3)、混合槽(N-2)より構成されており、インバータ1によりポンプ(P1)を駆動させ冷水槽から冷水を、またインバータ2によりポンプ(P2)を駆動させ温水槽から温水をそれぞれ混合槽へ給水することができる。混合槽では熱電対(T-2)

図2.1 流体温度液面干渉プラントの構成
Fig.2.1 Construction of the fluid temperature and liquid level interacting plant

により水温を、またフロート型液面計により液位を測定することができる。ここでの制御目的は、冷水供給量により混合槽の液面制御量を、また温水供給量により混合槽の温度制御量をそれぞれの目標値に保つことである。このプラントの特徴は、液面を制御するために冷水を供給すると混合槽の温度が下がり、またこの温度を上昇させるために温水を給水すると液面が上がる強い相互干渉を有するシステムである。例えば、動力用・加熱用・工場用など広範な用途をもつ蒸気発生ボイラでは、ドラム水位が低下した場合に給水量を増やして水位を戻そうとすると、ドラム内の温度が下がって圧力も低下してしまい、これを補うために燃料供給量を増やせば加熱温度や炉内圧に影響を及ぼす。従って本研究で対象とした実験プラントは、複数制御量間の干渉を考慮しなければならない実際の化学プラントの一つのモデルプラントである。

まず、温度・液面それぞれの制御量に対する制御ループにおいて、他方の制御量を外乱と見なしてループ毎にPID制御器を設計しPID制御を行った結果を図2.2に示す。これより2つの制御量でハンチングが生じており、何らかの非干渉化の対策が必要となることが分かる。このときの振動周期は2分である。

以後の制御に先立ち、制御対象のブロック線図を図2.3に、またステップ応答より求めた各伝達関数を以下に、単位ステップ応答を図2.4に示す。

$$\begin{aligned} G_f(s) &= \frac{796.875s^2 - 318.75s + 42.5}{1946.25s^3 + 797.25s^2 + 111.3s + 1} \\ G_{LT}(s) &= \frac{168s^2 - 84s + 14}{1008s^3 + 5162s^2 + 90s + 1} \\ G_{\pi}(s) &= \frac{739.26s^2 - 199.8s + 18}{4805.19s^3 + 1339.77s^2 + 128.1s + 1} \\ G_L(s) &= \frac{546.75s^2 - 202.5s + 25}{787.32s^3 + 313.47s^2 + 44.1s + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

図2.2 PID 制御結果
Fig.2.2 Result of PID control

図2.3 制御対象のブロック線図

Fig.2.3 Block diagram of the controlled system

図2.4 制御対象の単位ステップ応答

Fig.2.4 Unit step responses of the controlled system

3. 擬似対角化とINAによる非干渉化PID制御

<3.1> 擬似対角化による非干渉化前置補償器の設計と対角優勢判別

制御量間の相互干渉が顕著な制御対象 $Gp(s)$ に対して前置補償器 Gc を $Gp(s)$ の直前に直列結合したとき、一巡伝達関数行列 $G(s) = Gp(s)Gc$ におけるある周波数 $s = j\omega_0$ のまわりで相互干渉を減らす非干渉化前置補償器 Gc を擬似対角化により求める。

m 入出力前置補償器 Gc を

$$G_c = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

とすると、一巡伝達関数行列 $G(s) = Gp(s)Gc$ の ij 要素は $s = j\omega_0$ で

$$\ell_{ij}(j\omega_0) = \sum_{k=1}^m g_{ik}(j\omega_0)h_{kj} \quad (3)$$

と表される。 $g_{ik}(s)$ は $Gp(s)$ の ik 要素である。ここで Gc の

第 p 列 $h_p = [h_{1p}, h_{2p}, \dots, h_{mp}]^T$ の要素を制限条件

$$h_{1p}^2 + h_{2p}^2 + \cdots + h_{mp}^2 = 1 \quad (4)$$

のもとで $G(j\omega_0)$ の第 p 列の非対角要素の絶対二乗和

$$\sum_{i=1, i \neq p}^m |\ell_{ip}(j\omega_0)|^2 \quad (5)$$

が最小になるように選ぶ。それには $g_k(j\omega_0) = \alpha_k + j\beta_k$ において、極値の条件より

$$\sum_{i=1, i \neq p}^m \left[2 \left(\sum_{k=1}^m \alpha_{ik} h_{kp} \right) \alpha_{ij} + 2 \left(\sum_{k=1}^m \beta_{ik} h_{kp} \right) \beta_{ij} \right] - 2\lambda h_{jp} = 0 \quad (6)$$

を満たす $h_{1p}, h_{2p}, \dots, h_{mp}$ を求めればよい。但し λ はラグランジュ乗数である。

ここで次のような行列を定義する。

$$\Gamma_p \equiv (\gamma_{kj}^p), \quad \gamma_{kj}^p \equiv \sum_{i=1, i \neq p}^m (\alpha_{ik} \alpha_{ij} + \beta_{ik} \beta_{ij}) \quad (7)$$

これにより、求めたいベクトル h_p との間に

$$\Gamma_p h_p = \lambda h_p \quad (8)$$

の関係が、また

$$\begin{aligned} h_p^T \Gamma_p h_p &= \sum_{k,j=1, k,j \neq p}^m (\alpha_{ik} \alpha_{ij} + \beta_{ik} \beta_{ij}) h_{kp} h_{jp} \\ &= \sum_{i=1, i \neq p}^m \left[\left(\sum_{k=1}^m \alpha_{ik} h_{kp} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^m \beta_{ik} h_{kp} \right)^2 \right] \\ &= \sum_{i=1, i \neq p}^m |\ell_{ip}(j\omega_0)|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

が成り立つので、(8)式より

$$\sum_{i=1, i \neq p}^m |\ell_{ip}(j\omega_0)|^2 = h_p^T \Gamma_p h_p = \lambda h_p^T h_p = \lambda \quad (10)$$

が成立する。従って、(8)式と(10)式より求めたい h_p が行列 Γ_p の固有ベクトル、また相互干渉の大きさを示す $\sum_{i=1, i \neq p}^m |\ell_{ip}(j\omega_0)|^2$ が Γ_p の h_p に対応する固有値となっているので、 λ は最小固有値を選択すればよいことが分かる。結局、非干渉化前置補償 Gc の設計は m 個の行列 $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_m$ の固有値問題に帰着される。

このように設計された Gc を用いて、一巡伝達関数行列 $Gp(s)Gc$ の相互干渉の度合いを表す対角行(列)優勢、すなわち非対角行(列)要素の絶対値の総和より対角要素の絶対値が大きいかな否かを、INA(逆ナイキスト配列)により検証することができる。

INAは、伝達関数行列の逆行列における各要素のベクトル軌跡の集合で、一巡伝達関数行列 $G(s) = Gp(s)Gc$ の逆行列 $Q(s) = (Gp(s)Gc)^{-1}$ の各要素 $q_{ij}(s)$ が虚軸上で対角優勢とは、その要素に関して

$$\begin{aligned} |q_{ii}(j\omega)| &> d_i(j\omega) \equiv \sum_{j=1, j \neq i}^m |q_{ij}(j\omega)|, \quad i=1, \dots, m \\ |q_{ii}(j\omega)| &> d_i'(j\omega) \equiv \sum_{j=1, j \neq i}^m |q_{ji}(j\omega)|, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (11)$$

なるいずれかの不等式が各 ω について成立することである。この条件は、 $q_{ii}(j\omega)$ を中心とし半径 $d_i(j\omega)$ の円(グリシュゴリン帯)が原点を含まないことと等価である。

非干渉化前置補償器 Gc により一巡伝達関数行列 $Gp(s)Gc$ の対角優勢が達成されれば、対角行列とする主制御器 $K(s)$ を用いて各制御ループ単独に単一ループ制御系を設計できる。

<3.2> 非干渉化前置補償器を用いた非干渉化PID制御
対象とする流体温度液面干渉プラントの伝達関数(1)式に

対して、前置補償器 G_c を

$$G_c = G_p(0)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0308 & -0.0222 \\ -0.0173 & 0.0524 \end{bmatrix} \quad (12)$$

とすると、

$$G(0) = G_p(0) G_c = I \quad (13)$$

より $s=0$ では相互干渉は存在しないことになる。この前置補償器 G_c を用いたときの一巡伝達関数行列 $G(s) = G_p(s) G_c$ の逆ナイキスト線図とグリシュゴリン帯を示したのが図3.1である。この図よりグリシュゴリン帯が原点を含んでおり、対角行優勢が達成されていないことが分かる。また、相互干渉を考慮せずにPID制御を行ったとき生じたハンチングの振動周波数が含まれている。

図3.1 $G_c = G_p(0)^{-1}$ のときの逆ナイキスト配列とグリシュゴリン帯

Fig.3.1 Inverse Nyquist diagram and Gershgorin bands when $G_c = G_p(0)^{-1}$

そこで、すべての周波数帯域にわたって対角優勢を達成する前置補償器の設計は困難なので、このハンチングの振動周波数 $\omega_o = 0.0523$ に着目し、そのまわりで非干渉化するための前置補償器 G_c を設計することにする。

$$G_c = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

とおき、伝達関数(1)式に対して Γ_1, Γ_2 を求めると

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 9.6664 & 32.4997 \\ 32.4997 & 136.123 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 59.6355 & 18.4209 \\ 18.4209 & 8.6472 \end{bmatrix}$$

となる。またそれらの最小固有値は

$$\lambda_1 = 1.8, \quad \lambda_2 = 2.69 \quad (16)$$

となるから、制限条件

$$h_{11}^2 + h_{21}^2 = 1, \quad h_{12}^2 + h_{22}^2 = 1 \quad (17)$$

のもとでの G_c は

$$G_c = \begin{bmatrix} 0.9724 & -0.3079 \\ -0.2334 & 0.9514 \end{bmatrix} \quad (18)$$

のように得られる。

このときの逆ナイキスト線図とグリシュゴリン帯は図3.2のようになる。いずれの周波数もグリシュゴリン帯が原点を含んでいないことから一巡伝達関数行列 $G(s) = G_p(s) G_c$ の対角優勢が達成されていることが分かる。

図3.2 $\omega_o = 0.0523$ のときの逆ナイキスト配列とグリシュゴリン帯

Fig.3.2 Inverse Nyquist diagram and Gershgorin bands at $\omega_o = 0.0523$

このように設計された非干渉化補償器を用いて、温度・液面それぞれの制御量に対する単一ループPID制御系を図3.3のように構成し、限界感度法で設計し制御を行った結果が図3.4である。目標値温度 40[deg], 目標値液面 50[cm] に対する制御の結果、ハンチングを生じることもなく、目標値 $\pm 5\%$ に対する整定時間は10分10秒である。

本章で用いた周波数領域における非干渉化前置補償器の設計においては、相互干渉により生じたハンチングの振動周波数と制御対象のステップ応答から得られた線形化モデルのみを用いており、モデリング作業に多くの時間を費やしている⁽¹⁰⁾状態空間法に基づく制御系設計法と比較して簡易であるといえる。

図3.3 非干渉化PID制御系のブロック線図

Fig.3.3 Block diagram of the noninteracting PID control system

図3.4 非干渉化前置補償器を用いたPID制御

Fig.3.4 PID control using the noninteracting precompensator

4. 積分型非干渉化 PID 制御

次に、状態フィードバックによる時間領域での積分型非干渉化制御器を求める。流体温度液面干渉プラントの伝達関数 (1) 式に対して、バランス変換により最小実現を求めると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{x} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0.0053 & 0.0026 & -0.003 & 0.0226 \\ -0.0014 & -0.0065 & -0.0543 & -0.0049 \\ 0.0113 & 0.0524 & -0.2092 & 0.0496 \\ -0.0215 & 0.0113 & -0.0319 & -0.1338 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.5086 & 0.1321 \\ 0.1365 & 0.4606 \\ 0.1729 & -1.4566 \\ -0.9727 & -0.1062 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -0.5225 & 0.0293 & -0.1982 & 0.9778 \\ -0.0565 & 0.4795 & 1.4534 & 0.0364 \end{bmatrix}$$

となる。このシステムに対して制御則を

$$\mathbf{u} = \Phi \mathbf{x} + \Psi \mathbf{v} \quad (20)$$

として、 $\mathbf{v}$ を入力、 $\mathbf{y}$ を出力とするシステム (19) 式を非干渉化する Φ と Ψ を求めることにする。

(19) 式に (20) を用いたときの伝達関数行列 $W_{\Phi\Psi}$ は

$$\begin{aligned} W_{\Phi\Psi}(s) &= \mathbf{C} (s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{B} \Phi)^{-1} \mathbf{B} \Psi \\ &= \mathbf{P}(s) [\mathbf{I} + \Phi (s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{B} \Phi)^{-1} \mathbf{B}] \Psi \end{aligned} \quad (21)$$

と変形することができる。ただし $\mathbf{P}(s)$ は (19) 式の伝達関数行列であり、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(s) &= \mathbf{C} (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \\ &= \text{diag}(s^{-\sigma_1}, \dots, s^{-\sigma_m}) [\mathbf{B}^* + \mathbf{C}^* (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}] \end{aligned} \quad (22)$$

ここで $\mathbf{B}^*$ は

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^T \mathbf{A}^{\sigma_1 - 1} \mathbf{B} \\ \mathbf{c}_2^T \mathbf{A}^{\sigma_2 - 1} \mathbf{B} \\ \vdots \\ \mathbf{c}_m^T \mathbf{A}^{\sigma_m - 1} \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (23)$$

なる正則行列、 $\mathbf{C}^*$ 、 σ_i は

$$\mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^T \mathbf{A}^{\sigma_1} \\ \mathbf{c}_2^T \mathbf{A}^{\sigma_2} \\ \vdots \\ \mathbf{c}_m^T \mathbf{A}^{\sigma_m} \end{bmatrix}, \quad \sigma_i = \min \left(j \mid \mathbf{c}_i^T \mathbf{A}^{j-1} \mathbf{B} \neq \mathbf{0}^T \right) \quad (24)$$

であり、また $\mathbf{c}_i$ は観測行列 $\mathbf{C}$ の i 番目の行ベクトルである。

ここで制御則 (20) 式における Φ と Ψ を次のように選ぶ。

$$\begin{aligned} \Psi &= \mathbf{B}^{*-1} \\ \Phi &= -\mathbf{B}^{*-1} \mathbf{C}^* \end{aligned} \quad (25)$$

このとき伝達関数行列 (21) 式は、(22)、(25) 式を用いると次のような積分型非干渉系

$$\begin{aligned} W_{\Phi\Psi}(s) &= \text{diag}(s^{-\sigma_1}, \dots, s^{-\sigma_m}) [\mathbf{B}^* + \mathbf{C}^* (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}] \\ &\quad \times [\mathbf{I} + \Phi (s\mathbf{I} - \mathbf{A} - \mathbf{B} \Phi)^{-1} \mathbf{B}] \Psi \\ &= \text{diag}(s^{-\sigma_1}, \dots, s^{-\sigma_m}) [\mathbf{B}^* + \mathbf{C}^* (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}] \\ &\quad \times [\Psi^{-1} - \Psi^{-1} \Phi (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}]^{-1} \\ &= \text{diag}(s^{-\sigma_1}, \dots, s^{-\sigma_m}) [\mathbf{B}^* + \mathbf{C}^* (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}] \\ &\quad \times [\mathbf{B}^* + \mathbf{C}^* (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}]^{-1} \\ &= \text{diag}(s^{-\sigma_1}, s^{-\sigma_2}, \dots, s^{-\sigma_m}) \end{aligned} \quad (26)$$

となり、制御則(20)式によりシステム(19)式の非干渉化が達成されることが分かる。

そこで、プラントの最小実現(19)式に対して B^* と C^* を求める。

$$c_1^T B = [-0.7157 \quad 0.1293] \neq 0 \quad (27)$$

より $\sigma_i = 1$ であるから

$$c_1^T A = \begin{bmatrix} -0.0205 & -0.0009 & 0.0103 & -0.1526 \end{bmatrix} \quad (28)$$

同様に

$$c_2^T A = \begin{bmatrix} 0.0153 & 0.0733 & -0.3311 & 0.0635 \end{bmatrix} \quad (29)$$

となるので、

$$B^* = \begin{bmatrix} -0.7157 & 0.1293 \\ 0.31 & -1.9075 \end{bmatrix}$$

$$C^* = \begin{bmatrix} -0.0205 & -0.0009 & 0.0103 & -0.1526 \\ 0.0153 & 0.0733 & -0.3311 & 0.0635 \end{bmatrix} \quad (30)$$

となる。 B^* は正則となるので、流体温度液面干渉プラントを非干渉化する Φ と Ψ として

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0.0281 & 0.0058 & -0.0175 & -0.2134 \\ 0.0035 & 0.0394 & -0.1764 & -0.0014 \end{bmatrix}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} -1.4396 & -0.0976 \\ -0.2339 & -0.5401 \end{bmatrix} \quad (31)$$

が得られる。

この制御則を実現するためには状態フィードバックが必要となるが、ここでは最小次元オブザーバを用いた。

システム(19)式を非干渉化する状態フィードバックと最小次元オブザーバを用いて、それぞれの制御量単独に単一ループ PID 制御器を設計し制御を行った結果図4.1 が得られた。この時の整定時間は9分55秒である。

図4.1 積分型非干渉化システムを用いた PID 制御

Fig.4.1 PID control using the integrator decoupling system

また、多変数システムを対象とする状態空間法の代表的制御器である積分型制御系⁽¹¹⁾を用いて、ここで対象とした干渉プラントに対して制御実験を行ったが、この実験プラントの制約による温水供給可能な実験時間内では整定するに至らなかった。しかしながら、制御ループ間の干渉を考慮し、その干渉を取り除く制御則を用いた積分型非干渉システムでは十分な制御性能が得られた。

5. むすび

複数の制御量の間に顕著な相互干渉を有するプロセス系に対して所望の制御性能を得るためには、それら相互干渉を取り除く対策を必要とする。

本論文では、化学プラントの一つのモデルプラントである流体温度液面干渉系を対象に、擬似対角化と INA により周波数領域で設計された非干渉化前置補償器、または時間領域で設計された積分型非干渉システムにより相互干渉を取り除いた後、単一ループ PID 制御系を構成し非干渉化制御を行った。

積分型非干渉化システム、もしくは非干渉化前置補償器により得られた整定時間では両制御法ともほぼ同等の制御性能となったが、最小実現、オブザーバを必要とする前者と比べて周波数領域における非干渉化の方が設計に要する労力が少なく済む利点がある。

(平成10年10月30日受付、平成11年3月31日再受付)

文 献

- (1) 高松武一郎、橋本伊織、橋本芳宏、戸苅吉孝：蒸留塔の両端製品組成制御における干渉と塔の特性の関係、化学工学論文集、Vol.12, No.5, 525-533 (1986)
- (2) 安部可治、渡辺一、小林和夫、森高常之：ホストリッブミル仕上圧延機ループ高性能制御、電学論C、Vol.107, No.9, 857-863 (1987)
- (3) 森山武志：福岡工業大学大学院修士論文(1998)
- (4) 内田健康、中本政志、千田有一、江連久、今成弘幸、渡辺亮、木田隆、平田都史彰： H_∞ 制御の実プラントへの応用、計測自動制御学会 (1996)
- (5) Lee Hee-Hyol, Shoji Fumihito, Moriyama Takeshi : The mixed sensitivity H_∞ control of a fluid temperature and liquid level interacting system, Proceedings of the eighth AU-FIT-NUST joint seminar, 79-86 (1998)
- (6) D.J.Hawkins : Pseudodiagonalization and Inverse Nyquist Array method, IEE Proc., Vol.119, 337-342 (1972)
- (7) H.H.Rosenbrock : Computer Aided Control System design, Academic Press (1974)
- (8) 木村英紀：多変数制御系の CAD、計測と制御、Vol.15, No.12, 17-26 (1976)
- (9) 古田勝久、佐野昭：基礎システム理論、コロナ社 (1978)

(10)飯野穰、富田弘司：モデル予測制御のエチレン蒸留塔への適用、システム制御情報学会誌、Vol.38, No.10, 36-38(1994)

(11)武田常広、北森俊行：線形多入出力最適追従制御系の設計法、計測自動制御学会論文集、Vol.14, No.4, 359-364(1978)

李 義 頡（正員）1953年7月10日生。1986年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。早稲田大学、東海大学の講師を経て、1991年4月福岡工業大学助教授、1997年4月同大学教授となり、現在に至る。ストカスティックシステムの解析・制御、音声・文字認識の研究に従事。1986年システム制御情報学会榎木記念奨励賞受賞。電気学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、IEEE等の会員。

宋 正 永（正員）1960年4月13日生。1995年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。韓国青雲大学専任講師を経て、1997年韓国培材大学工科大学コンピュータ工学科専任講師となり、現在同大学助教授。主に文字認識・音声認識の研究に従事。電気学会、大韓電子工学会、韓国情報科学会、韓国情報処理学会、日本ファジィ学会、システム制御情報学会会員。

庄 司 文 啓（正員）1940年1月1日生。1968年3月東北大学大学院修士課程修了。同年武蔵工業大学助手、1972年カルフォルニア大学大学院（デイビス校）、オレゴン州立大学大学院を経て、1983年上武大学助教授。現在、福岡工業大学教授。工学博士。大規模系の低次元化、双線形系の最適化、生体系のカオス応答に関する研究に従事。電気学会、計測自動制御学会、電子情報通信学会、IEEEの会員。

李 相 球（正員）1955年9月22日生。1981年3月韓国科学技術院（KAIST）電算学科修士課程修了。1983年4月韓国韓南大学コンピュータ工学科専任講師を経て、現在、同大学教授。工学博士（早稲田大学）。ファジィ制御、並列処理の研究に従事。電気学会、IEEE、IATED等の会員。

崔 元 奎（正員）1963年1月16日生。1989年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。同年4月、同大学理工学研究所特別研究員、奨励研究員を経て、1993年韓国科学技術院(KAIST)情報システム研究所研究員、講師。1996年SMAT情報通信(株)技術研究所研究開発第1室長、1997年SKM情報通信事業部次長、現在、(株)BKテレコム情報通信研究所長。主に、音声・文字情報処理、大学情報化の研究に従事。電気学会、韓国音響学会等の会員。

秋月 影 雄（正員）1934年4月23日生。1963年3月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。1960年5月同大学助手、専任講師、助教授を経て、1972年4月同教授となり、現在に至る。ストカスティックシステム理論、信号処理の研究に従事。1990年電気学会論文賞、1992年電気学会業績賞を受賞。1999年度電気学会会長。計測自動制御学会、IEEE等の会員。