

# 컴퓨터의 제어시스템에의 이용

洪 錫 教 · 李 光 遠  
(亞州大 工大 教授)

## ■ 차례 ■

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 서 론                                  | 3.1 CASD의 개요       |
| 2. Direct Digital Control               | 3.2 제어시스템 설계 알고리즘  |
| 2.1 DDC의 개요                             | 3.3 CAD Package의 예 |
| 2.2 DDC용 컴퓨터 알고리즘                       | 4. 결 론             |
| 3. Computer Aided Control System Design | 참고문헌               |

### I 서 론

제어시스템의 해석, 설계 및 시뮬레이션을 위한 도구로써 1960년대까지는 애널로그계산기가 사용되었고 제어공학을 전공하는 기술자들도 애널로그 계산을 공부하여야만 했다. 기계, 화학공정 및 전기, 전자 등 모든 분야에서 애널로그계산기가 시스템을 제어하는데 사용되었다. 이러한 현상은 1970년대 이후 반도체 기술 및 디지털 전자계산기의 급속한 발달로 인하여 변하기 시작하여, 처음에는 전자계산기가 복잡한 공정제어시스템의 한 부품으로 사용되었으나 계속적인 저가격화 및 소형화로 전자계산기를 작은 제어루프의 한 소자로 사용하게끔 되었다. 또한 전자계산기는 제어시스템의 해석 및 설계의 도구로서도 사용빈도가 점점 증가되고 있다. 이와같이 제어공학자들은 이제 과거에 비하여 훨씬 강력한 도구를 갖게된 것이다. 여러부문에서 디지털 전자계산기는 애널로그계산기에 비해 성능이 훨씬 뛰어나고 가격 또한 저렴하게 되었다. 전자계산기는 지금도 VLSI기술의 진보와 더불어 빠른 속도로 발전해 나가고 있으

며 미래에는 막대한 기술의 진보가 예측되고 있다.

이러한 전자계산기의 발달은 제어시스템의 해석, 설계 및 실현 방법들도 빠른 속도로 변화하게 하고 있다. 처음에는 기존의 애널로그 방법을 새로운 방법으로서의 번역정도였다. 그러나 현대적인 제어기술을 전자계산기에 적용함에 따라 얻어지는 것이 상당히 많음을 알게 되었다. 처음 얼마동안은 이러한 현대적 이론을 도입한 제어기들은 항공기 혹은 발달된 공정제어 이외에는 사용될 수 없었다. 그러나 전자공학의 혁신적인 발달은 이런 고급제어기들을 기본적인 응용에까지 실현시키게끔 하였다. 이런 설계기술들의 이용은 적당한 가격과 우수한 성능때문에 그 사용이 점점 증가되고 있다.

이 글에서는 이러한 전자계산기를 실제 산업공정을 제어하는데 사용하는 Direct Digital Control (DDC), 그리고 전자계산기를 이용하여 제어시스템을 설계하는 Computer Aided Control System Design (CACSD)를 살펴봄으로써 컴퓨터의 제어시스템에의 이용현황을 알아보고자 한다.

## 2 Direct Digital Control

### 2.1 DDC의 개요

컴퓨터가 어떤 제어 루우프의 제어용입력(manipulated variable)을 제어 루우프의 각 변수들의 값으로부터 직접 계산하여 줌으로써 제어 루우프의 보상(compensation)까지 담당하는 것을 direct digital control (DDC) 이라고 한다. 계산기의 계산속도가 빨라지고 평균고장간격(mean time between failure)이 길어짐에 따라 애널로그 회로가 담당하던 제어 루우프의 보상을 컴퓨터가 직접 할 수 있게 되었으며 시분할 방법에 의하여 한 대의 계산기가 여러 개의 루우프를 제어할 수 있게도 되었다. 이러한 DDC 시스템을 그림으로 나타내면 그림 1 과 같다.

제어 루우프의 해석과 제어목표로부터의 계산을 통하여 DDC를 위한 컴퓨터 알고리즘을 만들었을 때 이것을 제어 현장에 적용하자면 몇가지 문제를 충분히 검토하여야 한다. 우선 알고리즘에 있어서는 적당한 샘플링 주기의 선정이 중요하며 컴퓨터 내부에서의 수치의 표현방법에 따른 양자화 오차와 계산 순서에 따른 오차를 생각하여야 한다. 센서부에서는 필터링과 이에 따른 계통특성(dynamics)의 변화를 생각하여야 하며, actuator부에서는 actuator의 비선형성을 고려하여야 한다. 운전조작상의 문제로는 어떤 운전방식들을 갖게 할 것인가의 문제와 운전

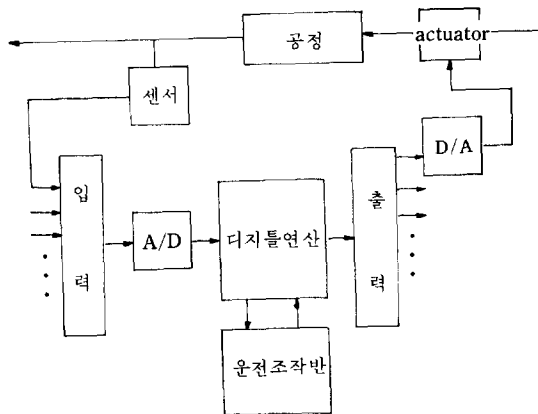


그림 1. DDC시스템의 구성

방식이 바뀌는 순간 충격이 없도록 하는 것 등을 들 수 있다. 여기에서는 몇가지 알고리즘만을 소개하고자 한다.

### 2.2 DDC용 컴퓨터 알고리즘

DDC 알고리즘은 분류방법에 따라 여러가지로 나눌 수 있겠으나 deterministic control system에 적용되는 알고리즘은 PID 알고리즘, 무진동 알고리즘, Dahlin-Higham<sup>3)</sup> 알고리즘을 들 수 있다.

#### 1) PID 알고리즘

Ziegler-Nichols 이래 애널로그 제어에서 널리 사용되던 비례-적분-미분 제어를 디지털화한 것으로 공정의 수식적 모형이 없어도 되며 공정 매개변수 변화에 둔감한 특징이 있다. 샘플링 주기가 짧아질수록 애널로그 제어와 같은 특성을 갖는다. 이산시간 PID를 제어 위한 알고리즘을 증분형으로 나타내면 제어입력  $U(k)$  는

$$u(k) - u(k-1) = K \left[ -y(k) + y(k-1) + \frac{T_0}{T_i} e(k) + \frac{T_D}{T_0} \{-y(k) + 2y(k-1) - y(k-2)\} \right]$$

$$e(k) = w(k) - y(k)$$

$w(k)$  : 기준입력  $y(k)$  : 공정출력

$T_0$  : 샘플링 주기

이다. 이 때의 이득 조정은 그림 2의 공정 계단

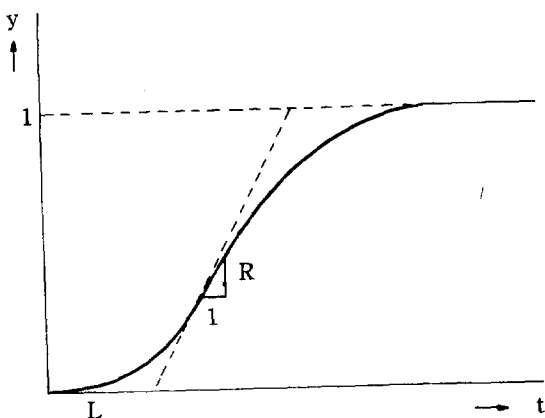


그림 2. 공정의 계단응답

표 1. PID제어의 이득 조정

	K		$T_0/T_I$	$T_0/T_D$
P	$\frac{1}{R(L+T_0)}$			
PI	$\frac{0.9}{R(L+0.5T_0)}$	$\frac{0.135T_0}{R(L+0.5T_0)^2}$	$\frac{0.27T_0}{KR(L+0.5T_0)^2}$	
PID	$\frac{1.2}{R(L+T_0)}$	$\frac{0.3T_0}{R(L+0.5T_0)^2}$	$\frac{0.6T_0}{KR(L+0.5T_0)^2}$	$\frac{0.5}{KR T_0}$

응답으로부터 표 1 과 같이 하면 된다.

2) 무진동 알고리즘

디지털 제어만이 갖는 특징을 살린 알고리즘으로 일정시간 지난 후의 잔류 오차가 조금도 없게 한 것이다. 상태제환을 이용한 Takahashi<sup>4)</sup>의 방법은 공정의 계단응답을 샘플하여 공정의 수식 모형을 만들고 페루우프 전달함수 H(z)의 극이 모두 원점에 오도록 제어 알고리즘을 만든 것이다. 공정의 계단응답이 그림 3 과 같으면 이산시간 모형은

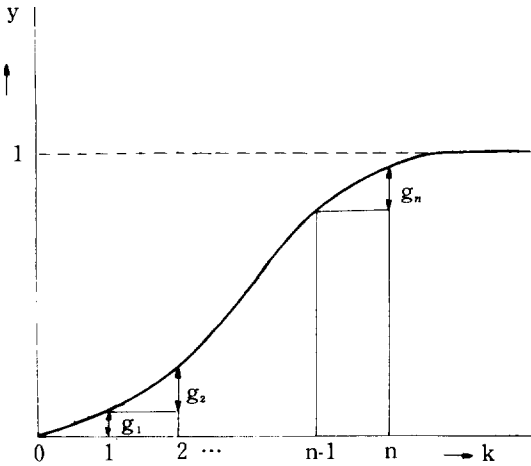


그림 3. 계단응답의 샘플링

$$x(k+1) = Px(k) + qu(k)$$

$$y(k) = cx(k)$$

단  $P = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots \\ \vdots & & & \ddots & \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P \end{bmatrix}$   $g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}$

$$c = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

$$P = \frac{1 - (g_1 + g_2 + \dots + g_n)}{1 - (g_1 + g_2 + \dots + g_{n-1})}$$

로 잡을 수 있고 제어입력  $u(k)$  는

$$u(k) - u(k-1) = k_1 \left[ e(k) - \sum_{j=2}^{n-1} \{x_j(k) - x_j(k-1)\} - k_2 \{x_n(k) - x_n(k-1)\} \right] \quad (2.4)$$

로 주어진다. 이득 조정은

$$k_1 = \frac{1}{1-P}, \quad k_2 = k_1(k_1 - \frac{P^2}{g_n}) \quad (2.5)$$

으로 된다. 이 알고리즘은 형태가 간단하고 제어성능도 좋은데 샘플링 주기가 짧아지면 공정의 차수가 올라가서 알고리즘 수행시간이 길어지는 문제가 있다. 또 상태제환을 이용한 것이기 때문에 상태관측자가 있어야 한다.

3) Dahlin-Higham 알고리즘

제어기의 전달함수로서 우선 공정의 극과 영점을 모두 소거한 다음 페루우프 전달함수에 조정가능한 극이 한 개만 있도록 한 알고리즘으로서 공정의 전달함수만 주어져 있으면 적용이 간단하고 현장조정도 간단하다. 공정의 전달함수  $Gp(z)$  를, 다항식  $A(z)$  와  $B(z)$  의 차수를 똑같이 하여

$$G_p(z) = \frac{B(z)}{z^d A(z)} \quad (2.6)$$

로 나타낸 다음 페루우프 전달함수  $H(z)$  가

$$H(z) = \frac{1-\lambda}{z^{d-1}(z-\lambda)} \quad (2.7)$$

가 되도록 제어기 전달함수  $G_c(z)$  를 구하면

$$G_c(z) = \frac{(1-\lambda) z^d A(z)}{\{z^d - \lambda z^{d-1} - (1-\lambda)\} B(z)} \quad (2.8)$$

를 얻는다.  $\lambda$ 는 현장에서 응답특성을 보면서 조정할 수 있다.

이상의 알고리즘 이외에도 Takahashi의 알고리즘과 Dahlin-Higham 알고리즘을 절충하여 필자<sup>5)</sup>가 제안한 알고리즘도 있는데, PID 알고리즘을 제외하면 모두 페루우프 전달함수의 극을 원하는 위치에 오게 하는 방법이다. 극을 원하는 위치에 잡는 것은 수학적으로는 다항식으로 표현된 Diophantine 방정식<sup>6)</sup>을 푸는 문제로 귀착된다.

공정이 긴 불감시간을 갖고 있는 경우에는 Smith predictor 또는 그밖의 적당한 예측방법<sup>7)</sup>을 필요로 하며, 잡음이 있는 확률 제어계통에서는 분산의 기대치를 최소로 하는 최소분산 알고리즘을 사용할 수 있다.

### 3 Computer Aided Control System Design

#### 3.1 CASD의 개요

일반적인 제어시스템의 설계는 그림 4와 같이 제어대상의 파악과 모델링, 제어시스템의 해석 및 설계, 시뮬레이션, 컴퓨터실현의 순으로 이루어진다.

지금까지는 계단응답이나 주파수응답에 의한 제어시스템의 identification, Nichols 선도나 Bode 선도를 이용한 페루우프 시스템의 해석 및

매개변수 결정, 그리고 애널로그 시뮬레이션에 의한 과도응답 해석으로 제어시스템의 설계가 이루어졌다. 특히 외란이나 플랜트의 매개변수 변화에 대해서는 페루우프의 시뮬레이션을 행하여 고찰하였다.

최근들어 반도체 및 컴퓨터의 발달로 인하여 마이크로프로세서가 나오고 부터는 과거의 간단한 PID제어기뿐만 아니라 복잡한 다변수제어 알고리즘까지의 구현이 가능해졌고 시뮬레이션도 전자계산기를 사용한 디지털 시뮬레이션이 시작되었다. 특히 다변수시스템의 경우, identification이나 설계는 상당히 복잡한 계산과 graph적 표현 그리고 막대한 데이터 관리를 필요로 하기 때문에 계산기의 도움없이 이루어질 수 없다.

제어 시스템 설계 방법을 크게 나누면 상태공간, 전달함수 그리고 주파수특성을 이용한 방법들로 나눌 수 있다. 상태공간을 이용한 제어시스템의 CAD 알고리즘은 디지털제어이론이 발달되면서부터 개발되기 시작하였고<sup>8)9)</sup> 주파수특성을 이용할 방법도 컴퓨터의 graphic 기능이 확장되면서 개발되기 시작하였다.<sup>10)</sup> 그 후 주파수특성을 상태공간해석을 이용하여 구하는 설계법등 여러가지 CAD 알고리즘이 연구, 개발되고 있다.<sup>12)-15)</sup>

이러한 제어시스템용 CAD는

- 1) 제어시스템 설계, 해석 알고리즘의 계산

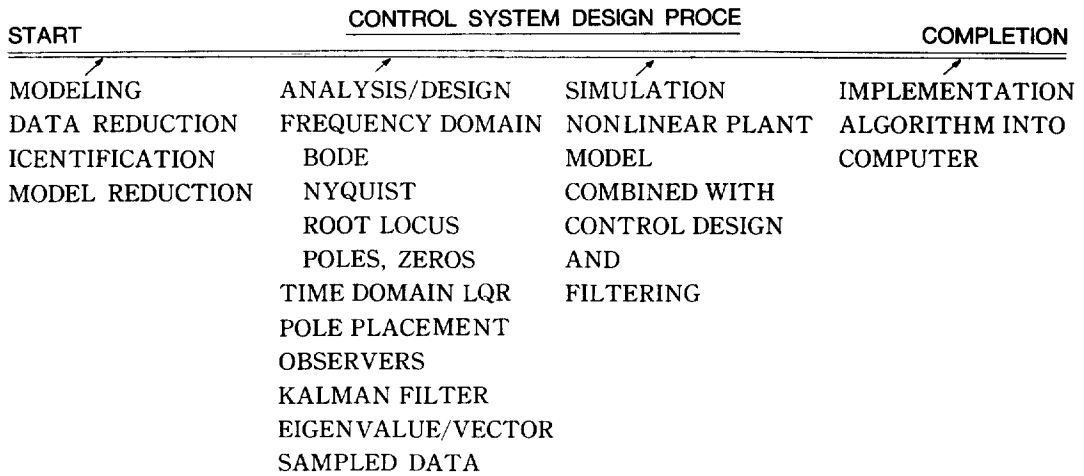


그림 4. 제어시스템 설계 수순

실행

2) 설계자의 능력에 따라 컴퓨터를 사용하고 graphic 표현능력을 포함하는 man-machine interface

3) 시스템의 데이터나 설계데이터를 관리하는 data base관리기능 등을 포함하게 된다.

### 3.2 제어시스템 설계 알고리즘

1) 상태공간을 이용한 제어시스템 설계 일반적으로 시스템은 상태공간에서

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.1)$$

$$y = Cx$$

로 표시할 수 있다. 여기서  $u \in R^m$ 은 입력,  $y \in R^p$ 은 출력,  $x \in R^n$ 은 상태변수이고 A, B, C는 행렬을 나타낸다. 이 시스템에 상태변수제환 즉

$$u = Kx \quad (3.2)$$

을 하면 폐루우프 시스템은

$$\dot{x} = (A+BK)x \quad (3.3)$$

으로 표시되어 제어시스템설계는 식(3.3)을 원하는 형태로 하는 K를 구하는 문제, 즉 극배치 문제가 된다. 주어진 계수  $a_i$ 에 대해서

$$\det(sI - A - BK) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 \quad (3.4)$$

를 만족하는 K는 입력의 갯수 m이 2이상이면 일의적으로 결정되지 않으며 성능지수

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.5)$$

$$(R > 0, Q \geq 0)$$

를 최소로 하는 최적제어

$$u = -R^{-1}B^T P x \quad (3.6)$$

를 이용하여 폐루우프시스템을 제어하는 경우가 많이 있다. 여기서 P는 다음의 Riccati 방정식의 해가 된다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (3.7)$$

상태  $x$ 의 값을 직접 얻을 수 없는 경우에는 다음과 같은 관측자(observer)를 이용한다.

$$\dot{z} = \hat{A}z + \hat{B}y + \hat{G}u \quad (3.8)$$

$$u = \hat{C}z + \hat{D}y$$

식(3.1)의 시스템이 목표치를 추종하는 경우에는 그 목표치를  $y_d$ 라 할때

$$e = y - y_d \quad (3.9)$$

이 되어

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3.10)$$

와 같은 확장시스템을 안정화시키는 문제가 된다.

2) 전달함수를 이용하는 방법

다항식 유리함수로 전달함수가 표시되는 시스템에 대해서는 Wolovich의 model matching<sup>11)</sup>, Astrom의 minimum variance control<sup>12)</sup>, 또는 Self-tuning control등이 이용된다.<sup>16)</sup> 그런데 model matching 방법은 다항식의 처리가 요구되며 다항식의 차수가 높은경우 그 수식처리를 직접하는 알고리즘은 상당히 복잡하므로 다항식처리를 행렬계산을 통하여 하지 않으면 안된다. 따라서 전달함수를 이용하는 방법에서는 주로 Self-tuning control 방법이 사용되고 있다.

3) 주파수특성을 이용하는 방법

고전제어라 불리우는 단일입력 단일출력 제어 시스템설계는 Nyquist 선도의 주파수 특성에 근거를 두고 있으며 이를 다변수시스템으로의 확장에 대한 연구가 Rosenbrock, Mac Farlane, 그리고 D. Q. Mayne 등에 의해 행해지고 있다.<sup>10)</sup> 이 중 Rosenbrock의 Inverse Nyquist Array법이 가장 잘 알려져 있다.

### 3.3 CAD Package의 예

현재까지 개발 사용되고 있는 것 중 몇개의 CAD Package를 살펴보면 표 2와 같다.

1) CLADP

Cambridge linear analysis and design package는 고전적 주파수설계방법을 단일입출력 및

표 2. CAD Packages

Source	Name	Author	Function of Program
Cambridge University, England	Cambridge Linear Analysis and Design Program(CLADP)	Prof. A.G.J. Mac Farlane J.M. Edmunds	Multivariable control system design by frequency domain methods
Lund University, Sweden	IDPAC	Prof. K.J. Astrom J. Wieslander	System identification
Lund University, Sweden	SIMNON	Pf. K. J. Astrom H. Elmquist	Nonlinear simulation
General Electric	State Space Design Package(SSDP)	H. A. Spang, III	Multivariable control system design by statespace and time-domain methods

다변수시스템까지 확장시킨 것이다. 여기에는 Bode, Nyquist, Nichols 선도 그리고 근계적법과 설계된 시스템의 시간영역 시뮬레이션까지를 포함한다. 다변수시스템 해석기법으로 특성제적과 Nypust Array 방법이 포함되어 있다. 다변수시스템의 robustness가 singular value plot에 의해 결정되고 Laplace 평면과 상태공간의 변환이 변환명령에 의해 행해진다. 또 이 package는 연속 및 이산 시스템 둘다 적용이 가능하다.

2) IDPAC

IDPAC는 선형시스템의 데이터 해석과 identification을 위한 것이다. 여기에는 ARMA와 ARIMA 모델의 시계열해석이 포함된다. 강점으로는 데이터의 처리 및 plotting, 상관계수해석, spectral Analysis, 그리고 파라메타 identification의 능력이 있다는 것이다. identification의 least square 그리고 maximum likelihood method도 가능하게 되어있다.

3) SIMNON

SIMNON은 연속 혹은 이산시스템의 비선형 시뮬레이션을 행한다. 시스템은 subsystem들의 상호연결된 집합으로 표시된다. 이 방법은 주로 디지털 제어 시스템의 시뮬레이션에 적합하다.

4) SSDP

State space design package는 시간영역 상태공간 설계기법에 관한 것으로 그 구조는 CLADP와 매우 유사하다. 선형시불변 quadratic regulator와 Kalman-Bucy filter의 설계를 포함하고 가제어성과 가관측성을 판별할 수 있고 성능지수도 쉽게 수정할 수 있도록 되어 있다.

5) Federated CACDS

Federated Computer aided control design system은 그림 5와 같이 앞에서 설명한 4개의 독립적으로 개발된 package를 하나의 database를 통하여 연결시켜 사용하는 시스템으로 General Electric에서 개발하여 현재 사용하고 있다.<sup>14)</sup>

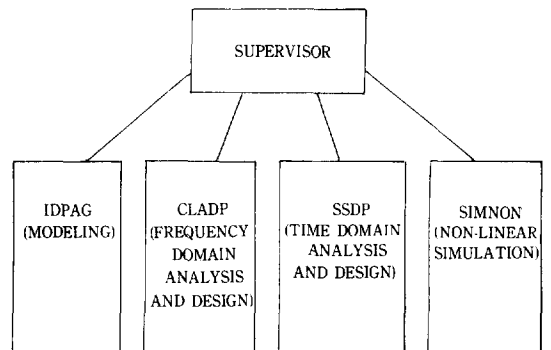


그림 5. Federated System

④ 결 론

최근의 첨단기술의 발달은 컴퓨터를 제어시스템의 한 소자로 사용하기도 하고 또 컴퓨터를 이용하여 제어시스템을 설계할 수도 있게 만들었다.

컴퓨터가 공정제어에서 제어기 구실을 할 때에 사용되는 DDC의 개요 및 몇가지 알고리즘을 알아보았고 제어시스템용 CAD 및 그 알고리즘 그리고 현존하는 몇개의 CAD Package를 살펴보았다. 최근에는 CAD에 의해 설계된 알고리즘이 즉시 마이크로컴퓨터로 실현시켜 실시간제어를 행하는 즉 CAD와 DDC를 연결시키는 이른바 CAC (computer-aided control)에 관한 연구가 진행되고 있다.

앞으로는 거의 모든 시스템 혹은 기기들의 설계, 해석 및 시뮬레이션이 컴퓨터에 의해 이루어지고 생산까지도 컴퓨터를 이용하게 될 것이다. 그리고 이들 시스템 혹은 기기의 대부분에 마이크로컴퓨터를 사용하는 부분적인 자동제어 시스템이 이루어지리라 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) Astrom, K. J., Wittenmark, B., Computer Controlled Systems, Prentice-Hall, 1984.
- 2) Isermann, R., Digital Control Systems, Springer-Verlag, 1981
- 3) Dahlin, E. B., "Designing and Tuning Digital Controllers", Instruments and Control Systems, 41(6), pp.77-83, 1968
- 4) Auslander, D.M., Takahashi, Y., Tomijuka,

- M., "Direct Digital Process Control", proceeding IEEE, 66(2), pp.199-208, 1978
- 5) 이광원, 고영길, 원중남, "불감시간이 있는 공정의 저차 이산시간 모형과 제어", 아주대학교 논문집 제 8 집, pp. 41~46, 1986
- 6) McClellan, J. H., Radar, C. M., Number Theory in Digital Signal Processing, Prentice-Hall, 1979
- 7) Furukawa, T., Shimemura, E., "Predictive Control for Systems with Time Delay", Int. J. Control, 37(2), pp.399-412, 1983
- 8) Melsa, J. L., Jones, S. K., Computer Program for Computational Assistance in the Study of Linear Control Theory, McGraw-Hill, 1970
- 9) 高橋, 自動制御計算法, オーム社
- 10) Rosenbrock, H. H., Computer Aided Control System Design, Academic Press, 1974
- 11) Wolovich, Linear Multivariable Systems, Springer-Verlag, 19847
- 12) Furuta K., "Recent Development of CAD for Control Systems", Journal of JIEE, 106(2), Feb. 1986
- 13) Denham, M. J., "Design Issues for CACSD Systems", Proc. IEEE, 72(12), Dec. 1984
- 14) Spang III, H. A., "The Federated Computer-Aided Control Design System", Proc. IEEE, 72(12), Dec. 1984
- 15) Åstrom, K. J., "Computer Aided Modeling; Analysis and Design of Control Systems - a Perspective", IEEE Control Sys. magazine, vol. 3, No. 2, 1983
- 16) Narendra, K. S., Monopoli, R. V., Applications of Adaptive Control, Academic Press, 1980