

퍼지 평가함수를 사용한 PID제어기의 자동 동조

(An Auto-tuning of PID Controller using Fuzzy Criterion Function)

柳相旭* · 金鳳載** · 鄭琬照*** · 鄭源鎔* · 李壽欽**

(Sang-Wook Ryu · Bong-Jae Kim · Gwang-Jo Chung · Won-Yong Chong · Soo-Heum Lee)

요 약

본 연구에서는 공정제어에 널리 사용되는 PID제어기의 최적 자동 동조(Auto-tuning)에 관한 새로운 방법을 제안한다.

이 방법은 먼저 제어대상의 계단응답으로 부터 모델링된 1차 지연계를 파데근사화하고, Ziegler-Nichols의 방법으로 초기값을 정한 후, 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간, 정정시간을 포함하는 퍼지 평가함수를 최대로 하는 PID계수를 구함으로써 제어대상의 특성이나 부동작시간의 변화에도 적응성이 좋다는 장점이 있다.

Abstract

We propose a new method to deal with optimal auto-tuning of the PID controller which is used to process control in various fields.

First of all, in this method, 1st order system which was modeled from the unit step response of the system is Pade-approximated, then initial values are determined by the Ziegler-Nichols method. Finally, we can find the parameters of PID controller so as to maximize the fuzzy criterion function which includes the maximum overshoot, damping ratio, rising time and settling time.

The Proposed method also shows good adaptability for variations in characteristics and dead time of the system.

1. 서 론

PID제어기는 산업 공정 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 제어 알고리즘이다. 이는 PID제어

기가 공정의 여러 환경에 대해 강인한 특성을 나타내고 있으며 운전자들에게 가장 익숙한 제어방식이기 때문이다. 지난 50여년간 산업공정에서 운전자들은 제어대상에 따른 PID제어기 계수를

* 正會員: 영남전문대 전자과 교수

** 正會員: 경남대 대학원 전기공학과 석사과정

*** 正會員: 한국기계연구소 선임연구원 · 공박

☆ 正會員: 경남대 공대 전기공학과 부교수 · 공박

** 正會員: 경남대 공대 전기공학과 교수 · 공박

接受日字: 1994年 3月 16日

임의의 경험에 의해 수동으로 동조하였으나 마이크로 프로세서의 등장으로 PID제어기 계수를 이것에 의해 자동으로 동조(Auto Tuning)하는 연구가 활발히 진행되어 제어 시스템에 여러 방식으로 적용되고 있다.

자동 동조의 개념은 1942년 Ziegler-Nichols¹⁾에 의해 처음으로 도입되었다. 이 방법은 1/4감쇠 반응을 목표지수로 하였으나 최적값이 유일하지 않은 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 Coon 등은 응답특성으로부터 변형된 형태의 계수를 구하였다. 이후 Astrom²⁾은 주파수 응답법을 개선하여 Relay방식을 도입하였고 Nishikawa³⁾는 최소면적법을 이용하였으며, Karus⁴⁾등은 패턴인식을 통해 자동동조하도록 하였다. 그러나 이들의 대부분은 Off-Line상에서 조절해야하는 단점이 있다.

한편, 제어대상의 모델이 난이하고, 비 선형성이 높은 시스템의 제어기법으로써 퍼지제어기가 많이 제안되고 있으나, 숙련자의 경험을 바탕으로 하기 때문에 최적제어규칙의 발견이 어려울뿐 아니라, 실시간 처리에도 문제가 있다.^{5), 6)}

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 Kumpfmler⁷⁾의 방법으로 부동작 시간을 포함하는 1차 지연계로 모델링된 제어대상을 Pade 근사화 한후, Ziegler-Nichols의 한계감도법으로 초기 파라미터를 설정하여, 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간, 정정시간을 고려하여 제안된 퍼지 평가함수를 최대화 하는 PID계수를 구하는 새로운 자동 동조방법을 제시하고자 한다.

이 방법은 On-Line상에서도 자동 동조가 가능할뿐 아니라 퍼지 평가함수의 하중을 변화시킴으로써 제어대상의 특성에따른 제어기 설계가 가능하고 제어대상의 부동작시간 변화에도 능동적으로 대처할 수 있다는 이점이 있다. 또 퍼지 추론을 위한 룩업 테이블(Look-up table)이 제어 대상에 따라 달라지므로 항상 룩업 테이블을 만들어야 하는 이전의 방법과는 달리 단지 하중함수의 대소만을 이용함으로써 어떤 제어대상에도 신속히 이용할 수 있다.

2. PID제어기의 구성

이 장에서는 퍼지제어기를 이용한 PID제어기의 구성을 서술한다. 우선 제어기를 구성하기 위하여 PID제어기의 전달함수($G_c(S)$)와 1차 지연계로 모델링된 제어대상의 정수(L, T, K)들을 이용하여 제어기의 페루프 전달함수를 정식화하고, 이로부터 제어대상의 계단응답을 역 라플라스⁸⁾ 변환에 의하여 계산할 수 있도록 하고, 퍼지 평가함수를 구성하기 위한 몇가지의 평가지수를 정의한다.

2.1 PID제어기의 구성

Fuzzy추론 부가 PID제어계의 블럭선도를 그림 2.1에 나타내었다.

이 블럭선도에서 나타낸 바와 같이 목표치로 계단입력을 가하면, 동정부에서 제어대상을 동정한후 계산된 K, T, L의 값은 초기 PID값을 설정하기 위하여 PID설정부로 입력된다. 이 때, Ziegler-Nichols의 한계 감도법으로 초기 PID계수가 설정된 후 PID제어기의 출력은 제어대상에 입력되고, 이것의 계단입력 응답을 feedback시켜서 퍼지 추론부의 파형인식부를 거쳐서 4가지의 평가지수 값을 계산하고, 또한 퍼지 평가함수를 구하며, 이것은 다시 퍼지 추론부를 통하여 조금 전의 퍼지 평가함수의 값과 비교하며, 대소에 따라 현재의 PID값의 저장 유무를 가리게 된다. 만일 지금의 값이 조금 전의 값보다 크게되면, 지금의 PID값과 평가함수의 값을 기억장치에 기억시키고, 다른 PID값을 설정하여 다시 앞의 과정을 반복한다. 이렇게 하여 퍼지 평가함수의 값이 최대가 되는 PID값을 얻을 수가 있다.

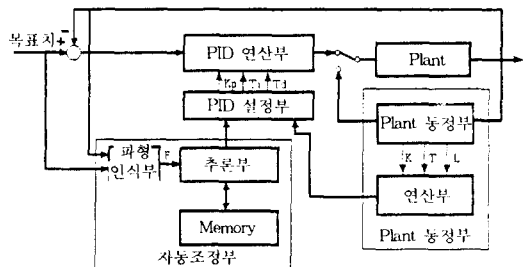


그림 2.1 Fuzzy추론 부가 PID제어계의 블럭선도

Fig. 2.1 Block diagram of PID control system using fuzzy inference

2.2 제어기 및 제어대상의 정식화

시물레이션에 사용한 PID제어기의 전달함수를 다음과 같이 정의한다.

$$G_C(S) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I} + T_D \right) \quad (2.1)$$

여기서 K_P 는 제어기의 비례 이득, T_I 는 적분시간, T_D 는 미분시간이다.

제어대상은 공정의 가장 일반적인 모델인, Küpfmüller의 방법을 사용한 1차 지연계를 채택하기로 한다. 이렇게하여 모델링된 제어대상의 전달함수는

$$G_P(S) = \frac{Ke^{-LS}}{1+TS} \quad (2.2)$$

와 같고, e^{-LS} 를 2차까지 Pade근사화한 식은 다음과 같다.

$$e^{-LS} = \frac{1 - \frac{L}{2}S + \frac{1}{12}L^2S^2}{1 + \frac{L}{2}S + \frac{1}{12}L^2S^2} \quad (2.3)$$

식(2.3)을 식(2.2)에 대입하여 얻은 제어대상의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_P(S) = K \frac{(L^2S^2 - 6LS + 12)}{TL^2S^3 + (6TL + L^2)S^2 + (12T + 6L)S + 12} \quad (2.4)$$

식(2.4)와 식(2.1)에 의해서 전방경로 전달함수 $G(s)$ 를 계산하면, 다음과 같다.

$$G(S) = K \frac{K_P T_I T_D L^2 S^4 + (K_P T_I L^2 - 6K_P T_I T_D L) S^3}{T_I L^2 S^4 + (6T_I L + T_I L^2) S^3} \frac{(12K_P T_I - 6K_P L) S + 12K_P}{(12T_I T_I + 6L T_I) S^2 + 12T_I S} \quad (2.5)$$

그리고 Ziegler-Nichols에 의한 한계감도법을 이용하여 초기 K_P , T_I , T_D 의 값들을 정의한다.

제어대상의 폐루프 전달함수를 계산하면,

$$M(S) = \frac{G(S)}{1+G(S)} = \frac{KK_P T_I T_D L^2 S^4 + KK_P T_I (L^2 - 6T_D L) S^3}{T_I L^2 (KK_P T_D + T) S^4 + T_I L (6T + L + KK_P L - 6KK_P T_D) S^3} \frac{K_P (12T_I T_D - 6T_I L + K_P L^2) S^2}{(12T_I T_I + 6L T_I + 12K_P T_I T_D - 6K_P T_I L + K_P L^2) S^2} \frac{6K_P (2T_I - L) S + 12K_P}{(12T_I + 12K_P T_I - 6K_P L) S + 12K_P} \quad (2.6)$$

가 되고, 제어대상의 계단응답을 얻기 위해

$$C(S) = \frac{KK_P T_I T_D L^2 S^4 + KK_P T_I (L^2 - 6T_D L) S^3}{T_I L^2 (KK_P T_D + T) S^4 + T_I L (6T + L + KK_P L - 6KK_P T_D) S^3} \frac{K_P (12T_I T_D - 6T_I L + K_P L^2) S^2}{(12T_I T_I + 6L T_I + 12K_P T_I T_D - 6K_P T_I L + K_P L^2) S^2} \frac{6K_P (2T_I - L) S + 12K_P}{(12T_I + 12K_P T_I - 6K_P L) S^2 + 12K_P S} \quad (2.7)$$

를 구한다.

이제 제어대상만 결정되면 (L , T , K 값의 결정), Ziegler-Nichols의 한계감도법으로 K_P , T_I , T_D 를 결정한 후, 식(2.7)의 역 라플라스 변환으로 계단 응답을 얻을 수 있다.

2.3 퍼지 평가함수

제어대상에 대한 계단 응답의 패턴을 분석하기 위한 평가 지수로서 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간, 정정시간을 채택하였다. 이는 초기 응답특성을 나타내는 것으로 응답의 변화에 대한 평가

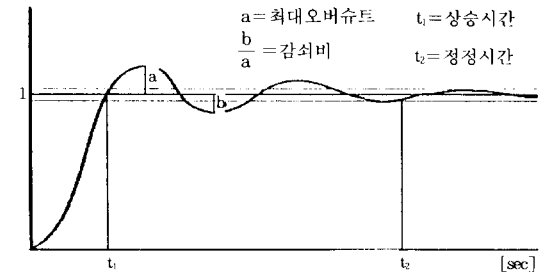


그림 2.2 계단응답의 평가지수

Fig. 2.2 An criterion index of step response

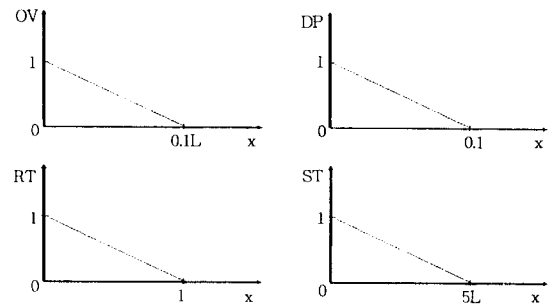


그림 2.3 퍼지 소속함수

Fig. 2.3 Fuzzy membership function

지수가 될 수 있다. 이것들은 그림 2.2에서 다음과 같이 정의한다.

위에서 정의한 평가지수들의 퍼지 소속함수를 그림 2.3과 같이 정의하였다.

실험에 의한 결과 오버슈트와 상승시간은 제어 대상의 시간지연(L)값에 따라 변화가 심하여 때로는 소속 함수의 값이 1과 0사이의 값이 아니라 항상 0이 되어 퍼지 평가지수가 제대로 구실을 하지 못하는 경우가 있었기 때문에 L값에 따라 소속함수의 폭을 가변할 수 있도록 퍼지 소속함수를 정의하였다. 그리고 각각의 소속함수의 최대치를 제어대상의 특징에 따라 특정한 지수에 비중에 더 줄 수 있도록 하였다. 만일 오버슈트에 큰 영향을 받는 제어대상이 있다고 하면, 제어를 동조할때 오버슈트에 최대치를 크게하여 오버슈트가 좀더 작은 응답을 최적의 응답으로 택할 수가 있다. 따라서 본 장에서 제안한 퍼지 평가함수를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F = W_{OV} \times OV \times W_{DP} \times DP + W_{RT} \times RT \times W_{ST} \times ST \quad (2.8)$$

여기서 W_{OV} , W_{DP} , W_{RT} 및 W_{ST} 는 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간 및 정정시간의 하중이며, OV , DP , RT 및 ST 는 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간 및 정정시간에 대한 하중으로서 그림 2.3에서 다음과 같이 주어진다.

$$OV = \begin{cases} -10 \frac{t}{L} + 1 & , t \leq 0.1L \\ 0 & , t > 0.1L \end{cases} \quad (2.9)$$

$$DP = \begin{cases} -10t + 1 & , t \leq 0.1 \\ 0 & , t > 0.1 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$RT = \begin{cases} -t + 1 & , t \leq 1 \\ 0 & , t > 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

$$ST = \begin{cases} -0.2t + 1 & , t \leq 5L \\ 0 & , t > 5L \end{cases} \quad (2.12)$$

3. 제어 알고리즘

이 장에서는 퍼지 제어기의 최적 자동 동조 알

고리즘을 서술한다. 종래의 알고리즘으로는 퍼지 제어를 하기 위하여 PID 파라미터의 변화에 따른 제어기의 응답을 분석하여 퍼지 제어기의 파라미터를 동조하기 위한 추론규칙을 룩업 테이블로 정의하여야 하는 불편함이 있었으나, 본 연구에서는 이 PID제어기에 퍼지 추론과 하중 함수가 포함된 퍼지 평가함수를 이용함으로써, 제어 대상의 변화에 따른 퍼지 추론 규칙을 룩업 테이블로 만들 필요없이 제어대상의 변화에 따른 각각의 지수들에 하중만을 변화시키면, 퍼지 평가함수의 대소에 의해서 퍼지 추론된다. 이로서 제

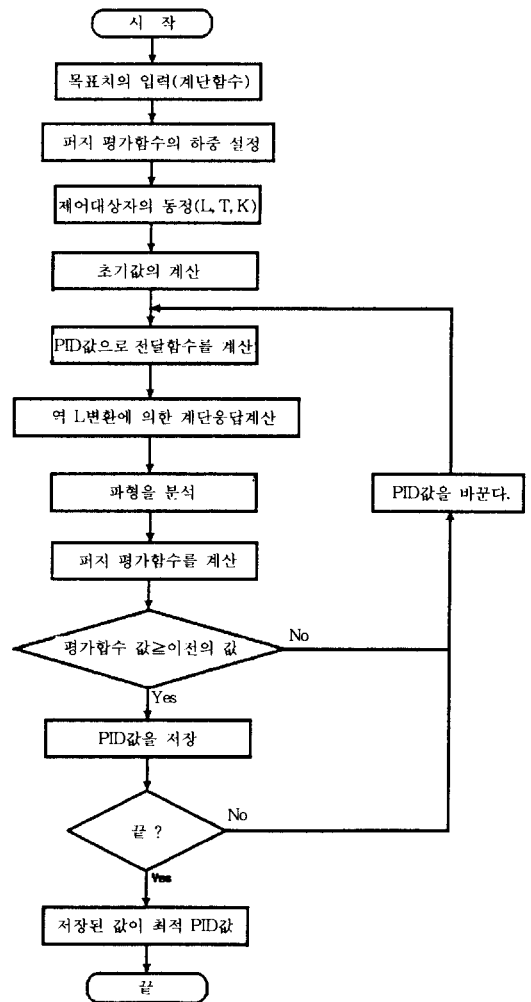


그림 3.1 Fuzzy 제어계의 순서도

Fig. 3.1 Flow Chart of fuzzy control system

어시스템의 구성이 보다 쉽고, On-Line 상에서도 빠른 최적 동조를 할 수가 있다.

2.3절에서 정의된 퍼지 평가함수(F)를 이용한 PID제어기의 자동 동조 과정을 살펴보면 다음과 같이 요약될 수 있다.

우선, 제어대상을 결정하기 위한 정수(L, T, K)를 입력받아 제어대상을 결정하고, 이 입력받은 정수를 이용하여 Ziegler-Nichols의 한계감도법에 의한 PID제어기의 초기값을 설정하고, 이 값들을 적절한 범위내에서 변화시켜 제어대상에 입력한 후, 제어대상의 계단응답을 분석하여 퍼지 평가함수를 식(2.8)에 의해서 계산한다. 이러한 과정을 계속 되풀이하여 평가함수의 값이 가장 크다고 판단 되었을 때의 PID값을 결정한다. 이 과정을 순서도로 좀더 자세하게 나타낸 것이 그림 3.1이다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 위와 같이 구성된 제어기의 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서 터보 파스칼 6.0을 이용하여 자동 동조 프로그램을 제작 사용하였다. 시뮬레이션에서 사용된 제어대상으로는 다음의 두가지 모델을 선정하였다. 모델 1은 $L=1, T=5, K=1$ 인 일반적인 단위 시간 지연을 갖는 모델이고, 모델 2는 $L=2, T=10, K=1$ 인 비교적 큰 시간 지연을 갖는 모델이다. 그리고 안정 한계값을 이용한 검색 범위는 안정 한계값의 $\pm 20\%$ 범위내에서 5%씩, 각각 9단계로 파라미터를 변화시켰다.

그림 4.1은 제어대상을 모델 1로 정의하고 하

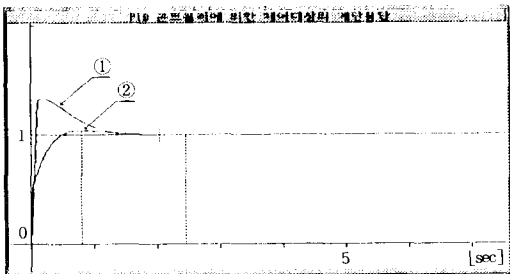


그림 4.1 모델 1의 제어결과 ($W_{ov}=1$)
Fig. 4.1 Controlled results of model 1 ($W_{ov}=1$)

중을 전부 1로 하였을때의 시뮬레이션 결과이다. 그리고 이 결과 그림에는 Ziegler-Nichols의 한계 감도법에 의한 초기값의 응답(①)과 본 알고리즘에 의한 응답(②)을 함께 나타내었다.

모델 1에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 응답에서는 오버슈트가 약 4.2%로 비교적 큰편이다. 이것을 줄이기 위하여 제어대상은 같은 오버슈트에 하중을 5로 하고서 실행한 결과를 나타낸 것이 그림 4.2이다. 이 응답의 파형을 보면 오버슈트가 약 2.4%로 상당히 줄어 들었고, 반면에 상승시간 및 감쇠비는 약간 증가되었으며 이것은 예상되는 결과로 볼 수 있다. 그리고 표 4.1은 두가지 시뮬레이션의 결과를 수치로 나타내었다.

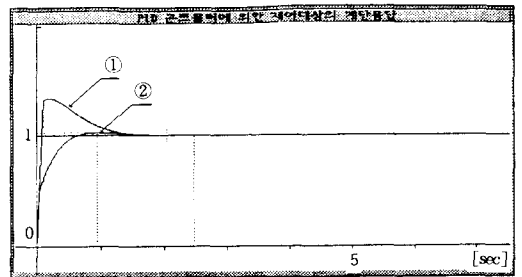


그림 4.2 모델 1의 제어결과 ($W_{ov}=5$)
Fig. 4.2 Controlled results of model 1 ($W_{ov}=5$)

표 4.1 모델 1에 대한 제어결과

Table 4.1 Controlled results of model 1

Wov	Kp	Ti	Td	오버슈트	제동비	상승시간	정정시간
1	268.27	0.801	0.256	0.042	0.006	0.48	2.04
5	281.69	0.726	0.256	0.024	0.015	0.65	2.04

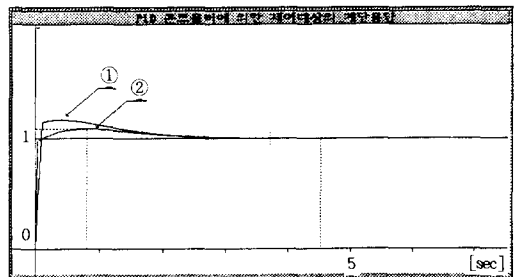


그림 4.3 모델 2의 제어결과 ($W_{ov}=1$)
Fig. 4.3 Controlled results of model 2 ($W_{ov}=1$)

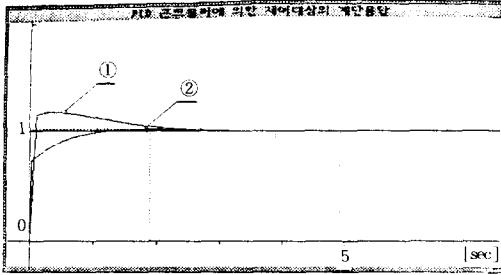


그림 4.4 모델 2의 제어결과 ($W_{ov}=5$)

Fig. 4.4 Controlled results of model 2 ($W_{ov}=5$)

표 4.2 모델 2에 대한 제어결과

Table 4.2 Controlled results of model 2

Wov	Kp	Ti	Td	오버 슈트	제동비	상승 시간	정정 시간
1	255.5	1.602	0.4	0.089	0.003	0.1	3.79
5	281.69	1.453	0.511	0.012	0.015	1.26	3.9

다음은 L값의 변화에도 퍼지 소속함수들이 제대로 동작한다는 것을 보이기 위하여 모델 2를 제어대상으로 시물레이션하였다. 그 결과를 그림 4.3과 그림 4.4에 나타내었다. 그리고 여기서도 그림 4.4는 최대 오버슈트에 하중을 5로 하였을 때의 결과이다.

한편, 이 알고리즘은 제어대상에 대한 제어를 계속하면서, 최적 파라미터를 발견할 수 있으므로 on-line으로 제어가 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 새로운 퍼지 평가함수를 도입한 PID제어기의 자동 동조 알고리즘을 제안하고, 시물레이션을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

이 방법의 특징은 다음과 같다.

1) 제어대상의 부동작 시간 변화에도 적응성이 좋다.

2) 퍼지평가함수의 하중 변화에 의해 응답특성을 바꿀 수 있다.

3) 다양한 제어대상(1차 지연계가 아닌)에도 적용할 수 있다.

4) On-Line상에서도 자동동조가 가능하다.

5) 퍼지 추론에 의한 제어척이 불필요하므로 자동동조시간이 짧다.

그러나 제어대상의 부동작 시간(L) 및 시정수(T)변화에 따른 최적 퍼지평가함수의 검토와 외란에 대한 강인성 검토가 앞으로의 과제로 남는다.

참 고 문 헌

- 1) J.G Ziegler, N.B Nichols, "Optimum settings for automatic controllers." Trans. ASME, Vol.65, pp.433-444, 1942.
- 2) K.J. Astrom, T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins." Automatica. Vol.20, No.5, pp.645-651, 1984.
- 3) Y. Nishikawa, etc., "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters." Automatica, Vol.20, No.3, pp.321-332. 1984.
- 4) T.W. Kraus, T.J. Myron, "Self tuning PID controller uses pattern recognition approach." Control engineering, pp.106-111. June. 1984.
- 5) K.J. Astrom, C.C. Hang, and W.K. Ho, "Towards intelligent PID Control." Automatica, Vol.28, No.1, pp.1-9. 1992.
- 6) Jonathan Litt, "An expert system to perform on-line controller tuning." IEEE Control Systems, pp.18-23. April. 1991.
- 7) "System & control encyclopedia." Pergamon press, Vol.4, pp.2320-2325.
- 8) Charles L. Phillips, Royce D. Harbor, "Feedback control system." Prentice hall, 2nd ed. pp.639-653. 1991.

◇ 著者紹介 ◇



유 상 옥 (柳相旭)

1945年 11月 12日生. 1971年 嶺南大 工大 電氣工學科 卒. 1971~1975年 MBC-TV 勤務. 1978年 嶺南大 大學院 電子工學科 卒(碩士). 現在 嶺南大 大學院 電氣工學科 博士課程, 嶺南專門大學 電子科 教授.



김 봉 재 (金鳳載)

1972年 5月 3日生. 1994年 嶺南大 電氣工學科 卒. 現在 嶺南大 大學院 電氣工學科 碩士課程.



정 광 조 (鄭光照)

1955年 1月 12日生. 1977年 延世大 電氣工學科 卒. 1983年 延世大 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1994年 慶南大 大學院 電氣工學科 卒(博士). 現在 韓國機械研究所 自動制御室 室長.



정 원 용 (鄭源溶)

1949年 7月 22日生. 1975年 釜山大 電氣工學科 卒. 1977年 釜山大 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1978年 聖地工專 專任講師. 1983年 Florida Inst. of Tech. 電氣工學科 卒(碩士). 1988年 Georgia Inst. of Tech. 電氣工學科 博士課程 修了. 1991年 嶺南大 大學院 電氣工學科 卒(博士). 現在 嶺南大 電氣工學科 副教授.



이 수 흠 (李壽欽)

1946年 5月 1日生. 1969年 嶺南大 工大 電氣工學科 卒. 1975年 嶺南大 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1987年 慶南大 大學院 電子工學科 卒(博士). 1988~1989年 日本 東京大 工學部 計數工學科 研究 教授. 現在 慶南大 工大 電氣工學科 教授.