

퍼지추론을 이용한 자동동조 PID 제어기의 설계

박석준*, 홍형표*, 박종건**, 임영철**, 조경영**
 * 한국원자력연구소 ** 전남대학교 전기공학과

A Design of Auto-Tuning PID Controller using Fuzzy Reasoning

S. J. PARK*, H. P. HONG*, J. K. PARK**, Y. C. LIM**, K. Y. CHO**

* Korea Atomic Energy Research Institute, ** Dept. of Electrical Eng., Chonnam Nat. Univ.

Abstract

This paper describes a new auto-tuning method for the intelligent PID control system. This new method is based on the settling time of the process and has been introduced into auto-tuning PID controller using fuzzy logic. The performance of the controller is measured by computer simulation. Simulation shows good results that controller searches well the optimal values of PID parameters in any conditions and the response characteristic of the control system is improved.

1. 서론

오늘날 비록 몇몇 특수한 프로세스는 특별한 신제어 알고리즘을 필요로 하지만 대부분의 산업용 프로세스에서는 기존 PID제어기가 아직도 널리 사용되고 있다. 가장 큰 이유는 설계 및 파라미터 동조의 관점에서 PID제어기의 단순함 때문이다. 그결과 많은 응용에 있어서 PID제어기의 하드웨어 및 소프트웨어의 신뢰도는 매우 높고 제어 성능 또한 만족할 만한 것으로 평가되고 있다.

그러나 운전 및 경제적인 관점에서 볼 때 모든 프로세스의 제어루프는 프로세스의 동특성 및 운전조건에 맞게 항상 최적상태로 동조되어야 한다. 그러므로 프로세스의 동작조건이 변하게 되면 PID 제어기에 대한 새로운 최적동조가 필요하다. 그러나 운전원이 계속해서 프로세스 루프를 감시하고 재동조해 줄 수 없기 때문에 일반적으로 동작 범위 내에서 안정성을 확보하고 하위 프로세스에 대한 악영향을 피하기 위해 고의로 제어기의 동조를 최적에서 벗어나게 한다. 이것은 종종 제어성능과 프로세스의 경제성을 나쁘게 한다. 따라서 현장 작업자의 동조작업에 걸리는 시간을 절약하고 제어성능을 개선할 수 있는 신뢰할 만한 자동동조 PID제어기의 개발이 절실하다.

최근, 이러한 요구에 부응하여 PID 제어기의 자동동조 기술에 관한 실용화 개발이 활발히 진행되어 개발 시험 단계에서 실용화 단계로 이행되고 있다. 단일루프 제어기에 탑재된 기존 자동동조 기능의 원리를 크게 나누면, 수치 해석적 방법과 지식을 이용한 방법으로 분류할 수 있다. 수치 해석적 방법은 프로세스에 어떤 테스트 신호를 출력하고 그 응답 특성을 관측하여 프로세스를 수학적으로 모델화하여, 이것으로부터 최적의 PID 파라미터를 산출한다.^[1-4] 이에 반해 지식을 이용한 방법은 대부분의 프로세스에 존재하는 프로세스 동요를 이용하는 방법으로서, 동요로부터 특성을 관측하고, 그 결과를 패턴 인식하여 종래의 패턴 조정법 및 경험 규칙에 의해 적절한 PID 파라미터를 결정한다.^[5-7]

그러나 기존의 자동동조 방법은 다음과 같은 몇가지 문제점을 갖는다. 수치해석적 방법은 프로세스 동정을 위해 테스트 신호를 출력하는데 이것이 프로세스에 대한 외란이 될 수 있고, 실제로는 비선형인 프로세스를 선형으로 모델화하여 사용하기 때문에 이론적 배경이 약한 단점이 있다. 지식을 이용한 방법은 현장의 경험규칙에 따라 패턴인식을 해야 하기 때문에 범용성을 유지하기 위해서는 조합하는 패턴수를 증가시켜야 하고, 패턴수의 증가에 의해 기억 용량이 비례해 지는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 자동동조 방법의 문제점을 해소하고 동시에 범용성이 풍부한 자동동조 기능을 실현하고자 프로세스의 정정시간을 이용한 새로운 동조방법을 개발하고, 이를 퍼지추론과 결합하여 자동동조 PID 제어기를 설계하였다. 새로운 퍼지 자동동조 PID 제어기는 프로세스에 대한 모델링이 필요없기 때문에 테스트 신호를 출력할 필요가 없고, 제어부와 자동동조부가 독립적으로 구성되어 자동동조 기능이 정지하여도 제어부에 의해 제어를 계속할 수 있다.

또한, 본 논문에서는 새로 개발한 퍼지 자동동조 PID 제어기에 대한 성능평가 및 검증에 위해 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 수행하였다.

2. 정정시간을 이용한 동조방법

PID 제어시스템에 대한 시간영역의 동작특성을 확인하기 위해 다음의 식(2-1)로 표현되는 일반적인 일차지연 불감시간 프로세스에 대해 PID 제어기를 사용하여 그림 1과 같이 폐환제어루프를 구성하고 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

$$\text{프로세스 } G_p(s) = \frac{e^{-2s}}{10s + 1} \quad (2-1)$$

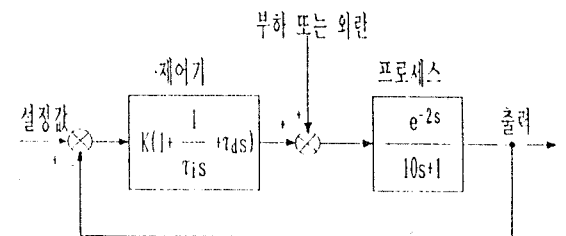


그림 1 일차지연 불감시간 시스템과 PID 제어기로 구성된 제어루프

시뮬레이션은 PID 제어기의 초기 파라미터를 $K_c=2.325$, $T_i=11s$, $T_d=1s$ 로 설정하고 단위 계단입력에 대한 동작특성을 관찰하였다. 이 PID 파라미터를 약간씩 변화시키면서 P-I-D 공간상에서의 동작특성의 변화를 기록하여, 표 1과 같은 결과를 얻었다.

표 1 파라미터의 변화에 따른 시스템 응답 (정정시간)

Kc=2.325 Ti=11s Td=1s	ATi								
	-80%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	+75%	+100%	
AKc	-80%	69.4	27.3	45.3	68.9	93	116	139	162
	-50%	56.1	31.3	17.9	26.5	38.7	51.3	63.6	75.6
	-25%	56.3	24.6	12.1	17.0	25.5	35.6	45.3	54.4
	0%	48.2	21.1	9.1	12.6	18.4	26.9	35.1	42.8
	+25%	42.6	17.8	7.4	9.5	13.9	21.0	28.2	35.0
	+50%	38.6	16.1	6.5	7.9	11.0	16.8	23.3	29.4
	+75%	35.4	14.2	9.7	7.6	8.3	13.3	19.1	24.7
	+100%	32.7	12.3	11.9	9.1	7.8	14.5	13.7	21.1

시뮬레이션 결과중에서 가장 주목할 만한 사항은 PID 파라미터의 변화에 따른 정정시간의 변화이다. 즉, P-I 평면상에서 시스템의 정정시간을 비교해 보면 정정시간이 최소가 되는 지점을 발견할 수 있고, 이 지점으로부터 멀어질 수록 그에 비례하여 정정시간이 증가함을 알 수 있다. 또한, P-I 평면상에서 정정시간이 최소가 되도록 비례이득 Kc와 적분시간 Ti를 조정할 후 미분시간 Td를 변화시키면 정정시간이 최소가 되는 지점을 발견할 수 있다. 이 후 본 논문에서는 P-I-D 공간상에서 정정시간이 최소가 되는 지점을 최적점이라고 한다. 이 최적점에서 PID 제어시스템의 응답특성을 살펴보면 초과량은 영에 가까우면서 정정시간은 매우 짧다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 앞에서 확인한 PID 제어시스템의 동작특성을 이용하여 PID 파라미터를 온라인으로 동조하는 새로운 방법을 제안한다. 새로운 동조방법은 다음의 절차에 따라 수행한다.

- 1) 현재 수행중인 제어를 계속하면서 미분시간 Td를 고정시키고 비례이득 Kc와 적분시간 Ti를 변화시키면서 정정시간이 최소가 되는 지점을 찾는다.
- 2) P-I 평면상의 최소점에서 프로세스 응답의 초과량이 (+)이면 미분시간 Td가 너무 짧으므로 미분시간 Td를 증가시키고, 초과량이 (-)이면 미분시간 Td를 감소시킨다.
- 3) 초과량이 영이고 정정시간이 최소가 되는 지점에서 작업을 중지한다.

3. 퍼지자동동조 PID제어기의 설계

앞절에서 제안한 동조방법을 PID 제어기에 적용한 자동동조 제어기의 기능구성도를 그림 2에 나타내었다. [5][6] 그림 2의 실현에 있어서 동조작업은 운전원이 맨 처음 프로세스 설치시에 행하는 초기동조와 초기설정 후 페루프상태에서 변경을 행하는 온라인 동조의 2 종류로 분리된다. 퍼지추론은 온라인 동조에 사용된다.

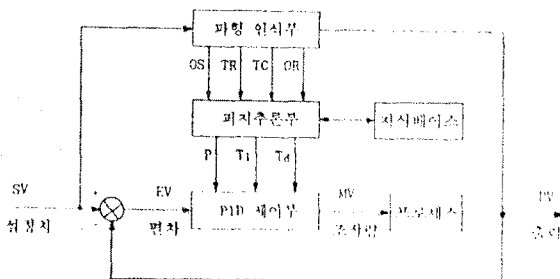
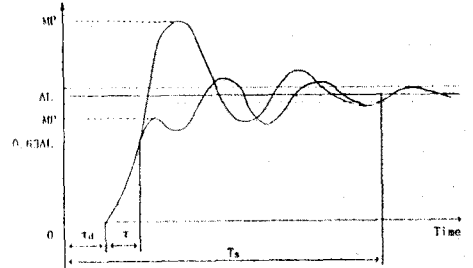


그림 2 퍼지 자동동조 PID 제어기의 기능 구성도 -346-

초기동조는 프로세스의 동정을 행하여 그 결과인 프로세스 특성으로부터 한계감도법이나 모델근사법을 사용하여 PID 파라미터(Kc, Ti, Td)를 설정한다. [11-14] 온라인 동조는 파형인식부에서 제어응답파형의 인식을 행하고, 이 결과와 PID 파라미터의 조정규칙이 있는 지식베이스를 사용하여 퍼지추론을 이용하여 PID정수를 설정한다. 퍼지추론을 위해 사용한 평가지표는 그림 3과 같다.



- (a) 초과량 : $OS = \frac{\text{첫번째 첨두값(MP)} - \text{입력값(AL)}}{\text{입력값(AL)}} \times 100(\%)$
- (b) 정정시간 : $TR = \frac{\text{규칙의 정정시간}}{\text{현위의 정정시간}}$
- (c) 서정수비 : $TC = \frac{\text{정정시간}(T_s) - \text{불잡시간}(t_d)}{\text{서정수}(t)}$
- (d) 초과량의 변화율 : $OR = \frac{\text{규칙의 초과량}}{\text{현위의 초과량}}$

그림 3 평가지표의 정의

평가지표인 초과량, 정정시간비 등은 비퍼지값으로서 "Positive Big"과 같은 퍼지집합 형태로 해석하기 위해서는 이들 퍼지집합의 멤버십 함수를 정의할 필요가 있다. 본 논문에서는 그림 4와 같이 삼각형의 멤버십 함수를 사용하였다. [15-18]

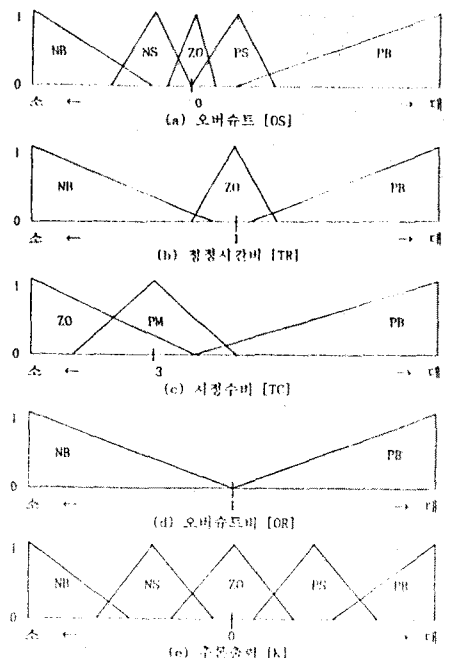


그림 4 퍼지집합의 멤버십함수 정의

P-I-D 공간상에서 정정시간이 최소가 되는 지점, 즉 최적점을 찾아가기 위한 조정규칙은 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 분석하여 구한 그림 5와 같은 시스템 응답 특성을 이용하여 작성하였다.

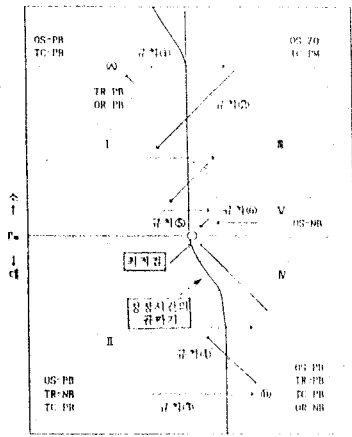


그림 5 P-I 평면상의 시스템 응답 특성

미분시간 T_d 를 일정하게 놓은 상태에서 작성된 P-I 평면상에서 제어기의 비례이득 K_c 를 일정하게 놓고 적분시간 T_i 를 변화시키면서 정정시간을 측정하면 그림 5와 같은 정정시간의 골짜기를 발견할 수 있다. 이 골짜기를 이용하여 P-I 평면을 좌우로 나누고 비례이득의 최적값 P_m 를 이용하여 P-I 평면을 상하로 나누면 I, II, III, IV 네개의 평면을 얻을 수 있다. 여기에 초과량이 (-)인 부분을 따로 떼어서 또 다른 평면으로 놓으면 모두 다섯개의 평면을 얻을 수 있다. I과 II 평면에서는 T_i 에 관한 정보만 얻을 수 있으므로 T_i 를 증가시켜 우반면의 III, IV, V 평면으로 현재의 PID 파라미터를 이동시킨다. III, IV, V 평면은 초과량에 따라 구분할 수 있으므로 각각의 평면에 설정된 조정규칙을 사용하여 PID 파라미터를 수정한다. 자동동조에 사용된 기본적인 조정규칙은 다음과 같다.

- 조정규칙 ①: IF OS=PB AND TR=PB AND TC=PB AND OR=PB
THEN $K_p=Z_0, K_i=PB, K_d=Z_0$
- ②: IF OS=Z_0 AND TC=PB
THEN $K_p=PB, K_i=NB, K_d=Z_0$
- ③: IF OS=PB AND TR=NB AND TC=PB
THEN $K_p=Z_0, K_i=PB, K_d=Z_0$
- ④: IF OS=PB AND TR=PB AND TC=PB AND OR=NB
THEN $K_p=NB, K_i=NB, K_d=PB$
- ⑤: IF OS=Z_0 AND TC=Z_0
THEN $K_p=Z_0, K_i=Z_0, K_d=Z_0$
- ⑥: IF OS=NB AND TC=PB
THEN $K_p=Z_0, K_i=NB, K_d=NB$

IF-THEN 형식으로 표현되는 조정규칙을 이용하여 퍼지추론을 하기 위해서는 퍼지추론함수가 필요하다. 본 논문에서는 퍼지추론함수로 직접법에 속하는 Mamdani의 최소연산법을 사용하였다. [15-17] 추론결과는 무게중심법을 이용하여 비퍼지값으로 변환하였다.

4. 시뮬레이션 및 결과

앞에서 설계한 퍼지 자동동조 PID 제어기의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터를 사용하여 디지털 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 IBM-PC/AT를 사용하여 수행하였으며, 제어시스템에 대한 프로세스 응답은 제어시스템 설계용 소프트웨어인 Program CC를 이용하여 구했다. 퍼지추론부는 Turbo C

를 사용하여 직접 작성하였다. [17]

시뮬레이션은 식(4-1)로 표현되는 일차지연 불감시간 프로세스에 대해 PID 파라미터를 최적점에서 고의로 벗어나게 한 다음 자동동조 제어기의 동작을 관찰하였다.

$$\text{프로세스 : } G(s) = \frac{e^{-2s}}{10s + 1} \quad (4-1)$$

상기 프로세스에 대하여 모델근사법을 이용하여 PID 파라미터를 구하면 $K_c = 7.02, T_i = 4.64, T_d = 0.71$ 를 얻는다. 이 PID 파라미터를 사용하여 제어기를 동조한 경우, 단위 계단입력에 대한 프로세스 응답은 그림 6과 같다. 그림 6에서 시스템의 초과량은 78.2%, 정정시간은 14.6초, 진폭감쇄비는 0.24이다.

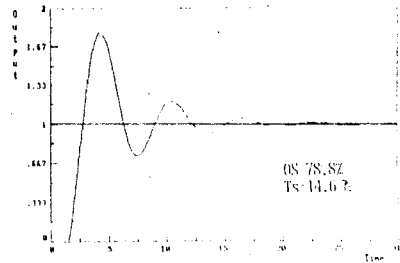
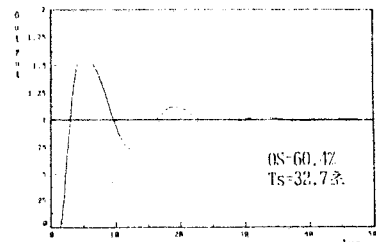


그림 6 모델근사법에 의한 파라미터 동조시의 시스템 응답

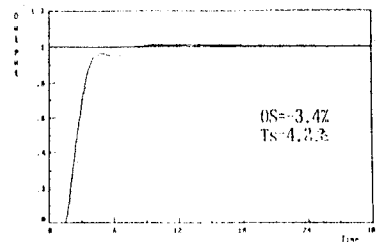
첫번째 시뮬레이션은 제어기의 파라미터중에서 비례이득 K_c , 적분시간 T_i 를 최적점으로부터 각각 +100%와 -80%만큼 변화시킨 상태에서 자동동조과정을 기록하여, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 두번째 시뮬레이션은 제어기의 파라미터중에서 비례이득 K_c , 적분시간 T_i , 미분시간 T_d 를 최적점으로부터 각각 -80%, +100%, +100% 만큼 변화시킨 상태에서 시작하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 자동동조 제어기의 동조과정을 관찰하기 위해 그림 9와 같이 P-I 평면상에 PI 파라미터의 이동경로를 나타내었다.

자동동조 제어기에 대한 시뮬레이션의 결과를 분석해 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 1) 초기조건이 다른 두 경우에 있어서 두 경우 모두 목적인 최적점에 도달하였고 최적점에서 Lock되는 것을 확인할 수 있다.

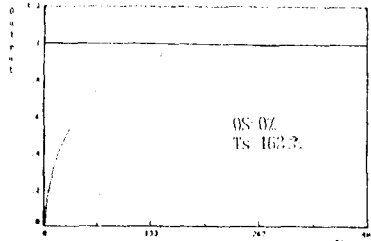


(a) 초기상태 ($K_c=4.65, T_i=2.2, T_d=1$)

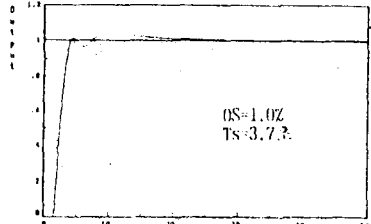


(b) 최종동조결과 ($K_c=3.72, T_i=9.9, T_d=0.88$)

그림 7 자동동조 시뮬레이션 [1]



(a) 초기상태 ($K_c=0.465, T_i=22, T_d=2$)



(b) 최종동조결과 ($K_c=3.9, T_i=8.62, T_d=0.94$)

그림 8 자동동조 시뮬레이션 [2]

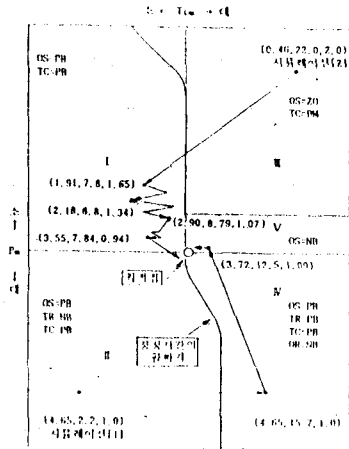


그림 9 P-1평면상에서 퍼지 자동동조 PID 제어기의 동조 경로

- 2) 또한 동조가 완료된 최적점에서 초과량은 영에 가까우면서 정정시간은 매우 짧은 기존의 동조방법으로 동조한 경우(그림 6)보다 훨씬 양호한 응답을 얻을 수 있었다.
- 3) 자동동조 제어기는 그림 9와 같이 P-1-D 공간상에서 미리 설정된 동조경로를 따라 동조해감을 알 수 있다. 그림 9에서 정정시간의 골짜기와 동조경로가 정확히 일치하지 않은것은 미분시간 $T_d=1$ 인 P-1평면상에서 동조경로를 나타냈기 때문이다. 정정시간의 골짜기는 미분시간 T_d 에 따라 위치와 모양이 변한다.
- 4) 초기조건에서 제어기의 비레이득이 최적값보다 큰 경우에는 15회의 동조과정을 거쳐 최적점에 도달하였고, 제어기의 비레이득이 최적값보다 적은 경우에는 33회의 동조과정을 거쳐 최적점에 도달하였다.
- 4)의 결과는 예기치 못한 결과가 아니라 실제과정에서 고려되었던 사항이다. 제어시스템이 과제동된 경우로서 초과량이 영인 경우에 현재의 PID 파라미터가 최적점으로부터 어느 정도 벗어나 있는지를 판단할 수 없기 때문에 초과량이 영인 경우, 즉 제어기의 비레이득이 최적값보다 적은 경우에는 조정량을 가능한 적게 설정하였다. 동조시간을 짧게 하기 위해 PID 파라미터의 조정량을 크게하면 현재의 상태가 매우 나쁜 경우에는 유용하나 최적점에 가까이 접근하였을 때 수렴하지

못하고 최적점 주변을 계속해서 맴돌게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 오늘날 산업계에서 널리 사용되고 있는 PID 제어기의 파라미터 동조작업을 자동화하기 위해 프로세스의 정정시간을 이용한 새로운 자동동조 방법을 개발하고, 여기에 퍼지추론을 응용하여 자동동조 PID 제어기를 구현하였다. 또한, 개발한 자동동조 제어기에 대한 성능평가 및 검증을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션의 결과는 퍼지 자동동조 PID 제어기가 어떤 초기조건하에서도 PID 파라미터의 최적값을 잘 찾아감을 보여 주며, 최적점에서의 응답특성도 매우 양호하다. 퍼지 자동동조 PID 제어기는 자동동조에 퍼지추론을 적용하였기 때문에 프로세스에 대한 모델링이 필요없고, 자동동조부가 PID 제어부와 독립된 형태로 구성되어 자동동조부가 고장이 나더라도 프로세스 제어에는 아무런 영향을 주지 않고 제어를 계속할 수 있다. 또한, 연속형 및 이산형의 기존 PID 제어기를 조금만 수정하면 손쉽게 자동동조기능을 부가할 수 있어 기존 PID 제어기를 완전히 교체하지 않고도 시스템의 자동화가 가능하다. 따라서 이러한 자동동조 PID 제어기를 프로세스 제어에 이용한다면 시스템의 효율 및 경제성을 향상시키고 제어기동조에 소요되는 인력과 시간을 크게 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. L. S. Cheung, "A New Automated Optimal Tuning Strategy for a PID Controller", ISA Transactions, Vol. 27, No. 1, pp. 69-75.
2. F. Radke, "Microprocessor-based Adaptive PID Controllers", ISA Transactions, Vol. 27, No. 2, pp. 43-50.
3. A. Y. Allidina, B. Khosrowshahi, F. M. Hughes, "Implicit pole-assignment self-tuning algorithm", Int. J. Control, Vol. 51, No. 1, 1990, pp. 51-70.
4. Takashi Shigemasa, Yutaka Iino, Mase Kanda, "Two Degrees of Freedom PID Auto-tuning Controller", ISA, 1987, pp. 703-711.
5. 森俊吾, "ファジィ推論による PID 汎用形 ワソルフ ユソトロラ", 計装, Vol. 31, No. 5, 1988, pp. 21-25.
6. 立花幸裕, 齊藤忠良, "PID 定數設定に ファジィ推論을 應用した オトチューニソク ワソルフ ユソトロラ", 計装, Vol. 31, No. 5, 1988, pp. 11-15.
7. Spyros Tzafestas, Nikolaos P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Trans. Industrial Elec., Vol. 37, NO. 5, 1990, pp. 365-371.
8. F. G. Shinskey, "Process-Control Systems", McGraw-Hill, Inc., 1967.
9. Curtis D. Johnson, "Process Control Instrumentation Technology", John Wiley & Sons, 1982.
10. Kuo, B. C., "Automatic Control Systems", 4rd ed., Prentice Hall, 1975.
11. 태평양화학(주) S.E. 사업부, "Process 제어의 기초와 설계", 제어계측기술, 1989, 11-1990, 11.
12. Pradeep B. Deshpande, Rymond H. Ash, "Elements of Computer Process Control", ISA, 1981, pp. 1-32.
13. Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, "Feedback control of dynamic systems", Addison-Wesley Publishing Company, 1986, pp. 1-128.
14. Gregory K. McMillan, "Tuning and Control Loop Performance", ISA, 1983.
15. 菅野道夫, "ファジィ制御", 日刊工業新聞社, 1989.
16. Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I, II", IEEE Trans. Sys. and Cyber., Vol. 20, No. 2, 1990, pp. 405-435.
17. 三矢直城, 田中一男, "C言語による 實用ファジィソフト", ラッセル社, 1989.