

Fuzzy 자동동조에 의한 불확실성 공정의 건실제어

류영국*, 최정내, 김진권, 모영승, 황형수
 원광대학교 제어계측공학과

Robust Control of Uncertainty Systems by Fuzzy Auto-Tuning

Y. G. Ryu, J. N. Choi, J. K. Kim, Y. S. Mo, H. S. Hwang
 Department of Control and Instrumentation, Wonkwang University

Abstract - In this paper, we propose a method which control parametric uncertainty systems using PID controller by fuzzy auto tuning. We get the error and the error change rate of plant output correspond to the initial value of parameter using the Ziegler-Nichols tuning and determine the new proportional gain(K_p) and the integral time (T_i) from fuzzy tuner by the error and error change rate of plant output as a membership function of fuzzy theory. The Fuzzy Auto-tuning algorithm for PID controller operate to adapt variable parameter of plant in parametric uncertainty systems. It is shown this method considerably improve the transient response at computer simulation.

1. 서 론

현대 제어이론들이 연구되었음에도 불구하고 산업현장에서는 PID제어기가 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 공정을 모델링 했을 때, 공정의 일부 파라미터가 일정범위 내에서 변화하는 불확실성 공정을 PID제어기를 이용하여 제어하는 방법에 대하여 연구하였다. 지금까지 연구된 동조방법들은 공정의 파라미터가 공칭치(Nominal value)에서는 비교적 제어성능이 우수하지만 공정의 파라미터가 일정한 범위를 벗어나면 제어성능이 떨어지거나 불안정한 결과를 보인다. 따라서 본 논문에서는 먼저 Ziegler-Nichols 동조법을 이용하여 제어기 파라미터를 구하고, 이 값을 초기 값으로 적용한 PID제어기에 의한 공정의 출력을 구한다. 그리고 이 공정출력의 overshoot와 지연 시간 등의 기준 입력에 대한 공정 출력의 오차 및 오차의 변화율을 구하고, 이 값들이 Fuzzy 집합의 소속함수의 값이 되도록 퍼지 제어 이론을 적용하는 동조방법을 제안하였다. 이 방법은 Fuzzy 제어 이론을 Ziegler-Nichols 동조방법에 응용하는 방법으로, 공정출력의 오차 및 오차변화에 따라 제어기의 파라미터의 값들이 적용하여 동조되기 때문에 공정의 파라미터들이 변화하는 파라미터 불확실성 공정에는 매우 우수한 특성을 보인다. 예를 통하여 본 논문에서 제시한 방법과 지금까지 제시된 몇 가지 동조방법들의 결과들을 비교하여 제시된 방법의 우수성을 확인하였다.

2. 퍼지 자동동조기

본 논문에서 제안한 방법은 Aström과 Hägglund가

제안한 동조실험을 통하여 임제이득과 발진주기를 구하고, 이 두 가지의 값을 이용한 Z-N 동조법에 의해 구해진 파라미터를 초기 값으로 하여, 공정의 출력을 구한다. 이 공정출력과 기준 입력을 비교하여 공정 출력의 오차와 오차의 변화율을 계산하고, 이 오차와 오차의 변화율을 입력으로 하는 본 논문에서 제시한 퍼지 동조기를 통하여 비례이득과 적분시간을 구한다. 퍼지 동조기는 비례이득의 변화량 $\Delta K_c(k)$ 와 적분시간의 변화량 $\Delta \tau_i(k)$ 를 추론하여 이전의 값과 더하여 새로운 $K_c(k)$ 와 $\tau_i(k)$ 를 구한다. 공정 출력의 오차에 의한 오차의 변화율은 식(1)과 같이 계산된다.

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (1)$$

본 논문에서 제시한 이득 파라미터 ($K_c(k)$)와 적분시간 파라미터($\tau_i(k)$)는 식(2)와 같으며 퍼지동조기는 그림 1과 같다.

$$K_c(k) = K_c(k-1) + \Delta K_c(k)$$

$$\tau_i(k) = \tau_i(k-1) + \Delta \tau_i(k) \quad (2)$$



$$\Delta \quad \Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$\nabla_P \quad K_c(k) = K_c(k-1) + \Delta K_c(k)$$

$$\nabla_I \quad \tau_i(k) = \tau_i(k-1) + \Delta \tau_i(k)$$

그림 1. 퍼지 동조기의 구조

3. 퍼지 규칙 정의

공정 출력의 오차와 오차의 변화율을 이용하여 구해진 비례이득의 변화량 $\Delta K_c(k)$ 와 적분시간의 변화량 $\Delta \tau_i(k)$ 를 추론하여 이전의 값에 더하여 새로운 $K_c(k)$ 와 $\tau_i(k)$ 를 구할 때 퍼지 규칙은 다음과 같다.

1. $\Delta K_c(k)$ 에 대한 추론 규칙은 식 (3)과 같다.

$$R^i: \text{If } e(k) \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B_i \text{, Then } \Delta K_c(k) \text{ is } C_{i,1} \quad (3)$$

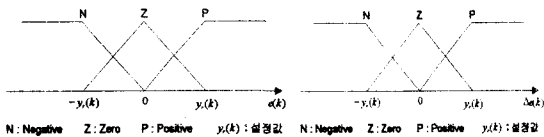
$i (i = 1, \dots, 9)$ 는 규칙수

2. $\Delta \tau_i(k)$ 에 대한 추론 규칙은 식 (4)와 같다.

$$R^i: \text{If } e(k) \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B_i \text{, Then } \Delta \tau_i(k) \text{ is } D_{i,1} \quad (4)$$

3.1 전반부 소속함수

전반부의 소속함수는 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대해서 각각 그림 2 (a)와 그림 2 (b)와 같이 삼각형 형태를 갖도록 정의하였다



(a) 오차 (b) 오차 변화율

그림 2. 전반부 소속함수

3.2 후반부 파라미터 정의

후반부 파라미터는 PID 제어기에서 비례이득 K_c 가 증가하면 오버슈트가 증가하고, 상승시간이 감소하게 되며, 적분시간 τ_I 가 증가하면 상승시간이 감소하게 되는 특징을 이용하여 퍼지 언어변수로 정의하였다.

K_c 와 τ_I 에 대한 후반부 변수는 그림 3의 공정의 오차곡선으로부터 각 구간에 대하여 규칙을 정의하였다

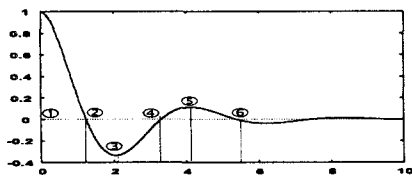


그림 3. 공정의 오차곡선

K_c 에 대한 후반부 변수를 각 구간에 대하여 다음처럼 정의하였다.

- ① - ② 구간 : $K_c(k)$ 값을 크게 하여 출력을 증가,
- ② - ③ 구간 : $K_c(k)$ 를 작게 하여 출력을 감소,
- ③ - ④ 구간 : $K_c(k)$ 를 작게 하여 출력을 감소,
- ④ - ⑤ 구간 : $K_c(k)$ 를 크게 하여 출력이 증가하도록 하였으며, 위의 규칙을 정리하면 표 1과 같다.

$\Delta e(k)$ \ $e(k)$	N	Z	P
N	N	P	N
Z	P	Z	N
P	P	N	P

표 1. K_c 에 대한 후반부 변수

τ_I 에 대한 후반부 변수는 그림 3에 의해서 각 구간에 대하여 다음과 같이 정의하였다.

- ① - ② 구간 : $\tau_I(k)$ 를 작게 하여 출력을 증가,
- ② - ③ 구간 : $\tau_I(k)$ 를 크게 하여 출력을 감소
- ③ - ④ 구간 : $\tau_I(k)$ 를 크게 하여 출력을 감소,
- ④ - ⑤ 구간 : $\tau_I(k)$ 를 작아지도록 하여 출력이 증가하도록 하였으며, 위의 규칙을 정리하면 표 2와 같다.

$\Delta e(k)$ \ $e(k)$	N	Z	P
N	P	N	P
Z	N	Z	P
P	N	P	N

표2. τ_I 에 대한 후반부 변수

3.3. 추론 방법

본 논문에서 사용한 추론방법은 후반부에 선형식을 이용한 추론법의 특수한 경우인 후반부를 간략화 한 추론법을 사용하였다.[6]

$\Delta K_c(k)$ 의 추론식은 식 (5)와 같다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i C_{j,l}}{\sum w_i} \quad (5)$$

n 은 규칙 수, $C_{j,l}$ 는 $\Delta K_c(k)$ 의 무게 중심값 이고, w_i 는 i 번째 규칙에 대한 전반부 적합도이며 식 (6)처럼 구한다.

$$w_i = \mu_{A_i}(e(k)) \times \mu_{B_i}(\Delta e(k)) \quad (6)$$

$j = 1, 2, 3, \quad l = 1, 2, 3$

$\Delta \tau_I(k)$ 의 추론식은 식 (7)과 같고, $\Delta K_c(k)$ 와 같은 방법으로 추론한다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i D_{j,l}}{\sum w_i} \quad (7)$$

4. 파라미터 불확실성 공정

파라미터 불확실성공정은 실계수 $a_i(q)$ 의 n 개의 다항식 $p(s, q)$ 로 정의되며, $p(s, q)$ 는 l 차원 vector의 불확실성 파라미터 q 의 연속함수 이다. q 는 각각 구간 $[q_i^-, q_i^+]$ 의 임의의 값을 갖는다.

$$p(s, q) = a_0(q) + a_1(q)s + a_2(q)s^2 + \dots + a_n(q)s^n \quad (8)$$

$q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_l)$

그리고 집합

$$Q = \{q : q_i^- \leq q_i \leq q_i^+, i = 1, 2, 3, \dots, l\}$$

로 표시된다.

$p(s, q)$ 로 표현되는 제어시스템의 공정은 식 (9)와 같다

$$P(s, q) = \frac{N_P(s, q)}{D_P(s, q)} \quad (9)$$

$$= \frac{b_{n-1}(q)s^{n-1} + b_{n-2}(q)s^{n-2} + \dots + b_1(q)s + b_0}{a_n(q)s^n + a_{n-1}(q)s^{n-1} + \dots + a_1(q)s + a_0}$$

$N_P(s, q)$ 는 분자식, $D_P(s, q)$ 는 분모식이다.

불확실성 공정의 예로서 DC모터의 전달함수는 식 (10)과 같다.

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{LJs^3 + (RJ + BL)s^2 + (K^2 + RB)s} \quad (10)$$

(L : 아마추어 인덕턴스, R : 아마추어 저항, K : 모터 상수, J : 관성 모멘트 and B : 기계적 마찰 계수)

DC 모터의 파라미터들의 공칭치들은 다음과 같다.

$$J = 0.042, \quad B = 0.01625 \quad K = 0.9, \quad L = 0.025, \quad R = 5 :$$

그러나 DC모터의 파라미터들 중에서 관성 모멘트 J 는 $J = [0.03 \sim 0.15]$ 의 구간에서 변화하는 파라미터 불확실성 공정을 갖는다. 따라서 파라미터 불확실성 공정으로써 DC 모터를 식(11)과 같이 정의하고 시뮬레이션을 하였다.

$$\begin{aligned}
 p(s, q) &= \frac{N_p(s, q)}{D_p(s, q)} \\
 &= \frac{K}{Lqs^3 + (Rq + BL)s^2 + (K^2 + RB)s}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

관성 모멘트는 $J = q = [0.03 \sim 0.15]$ 이다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 Ziegler-Nichols 동조에 의한 PID 제어를 이용한 경우

$J = [0.03 \sim 0.15]$ 의 구간에서 Ziegler-Nichols 동조에 의한 PID 제어를 이용한 경우의 단위계단응답이 그림 4 와 같다. J 가 0.07 보다 클 경우에는 응답이 overshoot가 커지며 불안정한 응답을 보임을 알 수 있다.

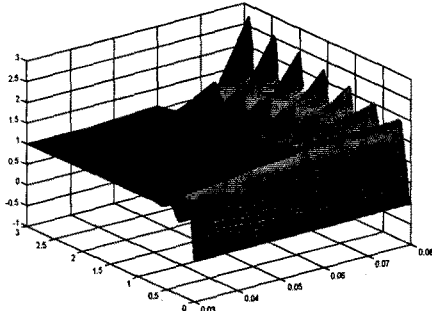


그림 4. PID 제어기에 Z-N 동조법을 적용시 파라미터 변화에 따른 공정 출력

5.2 Ziegler-Nichols 동조에 의한 잡음제거 필터를 부가한 PID 제어를 이용한 경우

$J = [0.03 \sim 0.15]$ 의 구간에서 Ziegler-Nichols 동조에 의한 잡음제거 필터를 부가한 PID 제어를 이용한 경우의 단위계단응답이 그림 10 과 같다. J 가 0.12 보다 클 경우에는 응답이 overshoot가 커지며 불안정한 응답을 보임을 알 수 있다

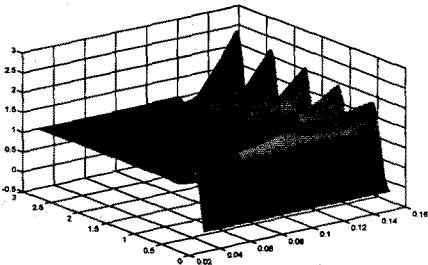


그림 5. 잡음제거 Filter형 PID 제어기에 Z-N 동조법 적용시 파라미터 변화에 따른 공정출력

5.3 퍼지자동동조에 의한 잡음제거 필터를 부가한 PID 제어를 이용한 경우.

$J = [0.03 \sim 0.15]$ 의 구간에서 퍼지자동동조에 의한 잡음제거 필터를 부가한 PID 제어를 이용한 경우의 응답은 그림 6과 같다. $J = [0.03 \sim 0.15]$ 의 모든 구간에서 안정하며, 상승시간 및 정정시간등의 과도 응

답이 매우 우수함을 알 수 있다.

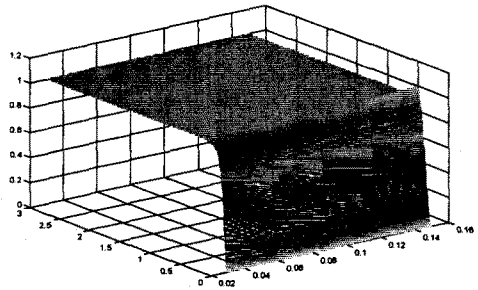


그림 6. 잡음제거 Filter형 PID제어기에 퍼지자동동조 적용시 파라미터 변화에 따른 공정출력

6. 결론

본 논문에서는 PID 제어기의 파라미터를 결정하기 위한 방법으로 퍼지이론을 도입하였다. 이 방법은 릴레이 실험으로부터 임계이득과 임계주기를 구한 다음, 이 두 가지의 값으로부터 Ziegler-Nichols 동조 테이블을 이용하여 PID 파라미터를 구한다. 이 값들을 초기 값으로 사용하여, 퍼지 추론에 의해 PID 제어기의 파라미터를 동조한다. 이 방법은 공정출력의 변화에 적응하도록 PID 파라미터를 적절하게 변화시키므로, 공정의 파라미터가 변화하는 불확실성 공정에 적합함을 확인하였다..

파라미터 불확실성 공정으로 DC모터의 파라미터인 관성모멘트(q)가 0.03에서 0.15까지 변하는 경우에 대해서 Ziegler-Nichols동조에 의한 PID제어기와 잡음제거 Filter형 PID 제어기가 적용된 경우와 본 논문에서 제시된 Fuzzy자동동조에 의한 PID제어기의 단위계단응답을 구하였다. 본 논문에서 제시된 Fuzzy 자동동조에 의한 PID제어기는 파라미터의 동조 과정이 다소 복잡하나 안정도, 상승시간 및 정정시간등에서 매우 우수한 특성을 보였다.

[참고 문헌]

- [1] ZIEGLER, J.G., and NICHOLS, N.B., "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, 1942, 65, pp. 433-444
- [2] HANG, C.C., and Åström K.J., "Refinements of the Ziegler Nichols tuning formula for PID auto-tunners", Proc. ISA Conf., USA
- [3] Åström, K.J., C.C. HANG, P. PERSSON, W.K. HO, "Towards Intelligent PID Control", 1991 International Federation of Automatic Control
- [4] Åström, K.J., and Hagglund, T., "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins", Automatica, 1984, 20, pp.645-651
- [5] Åström, K.J., "Ziegler-Nichols auto-tunners", Report TFRT-3167, Dept. of Automatic Control, Lund Inst. of Tech., Lund, Sweden.
- [6] R. M. Tong, "Synthesis of fuzzy models for industrial processes", Int. J. Gen. Syst, Vol4, pp. 143-162, 1978