

퍼지 모델을 이용한 비선형 시스템의 적응 PID 제어기

Adaptive PID Controller for Nonlinear Systems using Fuzzy Model

김종화 · 이원창 · 강근택

Zonghua Jin, Wonchang Lee, Geuntaek Kang

부경대학교 대학원 전자공학과

Department of Electronic Engineering, Graduate School, Pukyong National University

요 약

본 논문에서는 퍼지모델을 이용하여 비선형 시스템을 위한 적응 PID 제어기 설계 방법을 제안한다. TSK 퍼지모델을 이용하여 제어입력의 오차를 예측하고 그 오차로부터 PID제어기의 파라미터를 적응 시킨다. TSK 퍼지모델 또한 플랜트의 실제 출력과 모델 출력을 비교하여 모델 파라미터의 적응이 가능하도록 하였다. 제안된 방법으로 비선형의 플랜트에 대한 모호성, 파라미터의 변화 등에 적용할 수 있는 PID 제어기의 설계가 가능하였다. 그리고 몇 개의 비선형 시스템에 대한 시뮬레이션으로 제안된 알고리즘의 유용성도 확인 되었다.

Abstract

This paper presents an adaptive PID control scheme for nonlinear system. TSK(Takagi Sugeno-Kang) fuzzy model is used to estimate the error of control input, and the parameters of PID controller are adapted using the error. The parameters of TSK fuzzy model are also adapted to plant. The proposed algorithm allows designing adaptive PID controller which is adapted to the uncertainty of nonlinear plant and the change of parameters. The usefulness of the proposed algorithm is also certificated by the several simulations.

Key Words : Adaptive PID control, Fuzzy model, Nonlinear system

1. 서 론

산업 사회의 발달이 가속화되면서 고성능의 제어시스템 설계 및 구현이 필요하고, 건설성과 경제적인 문제가 중요한 요소로 부각되고 있다. 전통적으로 시스템의 동특성에 대한 정확한 지식은 제어시스템 개발에 필수적이다. 그러나 최근 시스템들은 그 규모가 점점 커지고 복잡해짐에 따라 비선형성, 파라미터 변동, 외란 등 여러 불확실성을 내포하게 되어, 이로 인해 시스템을 정확히 모델링하고 제어하기가 대단히 어렵다. 이런 경우에 하나의 동작점에서 선형모델을 얻고 이를 근거로 설계되는 고정된 이득을 갖는 일반적인 선형제어기를 사용해서는 환경의 변화에 신속히 대응할 수 없으며 만족할 만한 좋은 결과를 얻기 어렵다. 그러므로 하나의 건설하고 안정한 제어 시스템을 설계하려면 적응 제어시스템 접근을 사용하여야 하고, 이것은 수학적 모델에 대한 의존성을 줄이고, 비선형 시스템의 동적 변화에 좋은 제어 결과를 기대할 수 있다. 최근 많은 적응제어 방법이 제안되고, 계속적인 연구가 진행되고 있다[1-4].

본 논문에서는 퍼지모델을 이용한 비선형 시스템의 적응 PID 제어기 설계 새로운 알고리즘을 제안하고, PID 제어기,

퍼지모델 등 기술과 결합하였다. 또, 퍼지 규칙수가 상대적으로 적고, 결론부가 상수항을 포함한 선형 입출력 방정식이며 넓은 범위에서 비선형 시스템을 잘 표현할수 있는 Takagi Sugeno-Kang (TSK) 퍼지모델을 시스템의 예측모델로 사용한다[5-6]. PID 제어기 및 퍼지모델 파라미터는 온라인 학습 알고리즘을 사용하여 실시간 적응시킨다[7-8]. 두개의 비선형 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 적응 제어기의 실효성과 선형제어기에 대한 우월성을 검증한다.

본 논문은 4개의 주요 부분으로 구성 되었다. 2장에서는 적응 PID 제어시스템에 대해 설명하고, 3장에서는 시뮬레이션 결과 및 고찰을 보여주고, 4장에서는 결론을 맺는다.

2. 적응 PID 제어시스템

본 논문에서 제안하는 적응 PID 제어시스템은 먼저 제어 대상 비선형 시스템에 대한 초기 TSK 퍼지모델을 만들고, 다음 TSK 퍼지모델을 이용하여 제어입력의 오차를 예측하여 그 오차로부터 PID 제어기의 파라미터를 실시간에 조정 시킨다. TSK 퍼지모델 또한 플랜트의 실제 출력과 퍼지모델 출력을 비교하여 얻은 오차로 퍼지모델 파라미터를 실시간에 적응시킨다.

적응 PID 제어시스템 구성도는 그림 1과 같다.

접수일자 : 2002년 11월 9일

완료일자 : 2003년 2월 1일

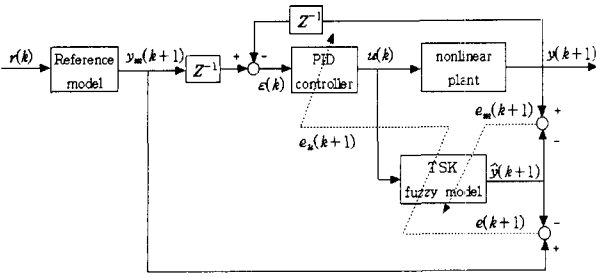


그림 1. 적응 PID 제어시스템 구성도
Fig. 1 The structure of adaptive PID control system

2.1 TSK 퍼지모델

일반적인 TSK 퍼지 입출력 모델의 i 번째 규칙은 다음과 같다.

$$M^i: \text{if } z_1 \text{ is } F_1^i, \dots, z_l \text{ is } F_l^i \text{ then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_n^i x_n \quad (1)$$

퍼지모델의 출력 \hat{y} 는 다음과 같다.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^m w^i(z) y^i}{\sum_{i=1}^m w^i(z)} \quad (2)$$

여기서, r 은 규칙의 개수이며, $w^i(z)$ 는 i 번째 규칙의 적합도를 나타내며 다음과 같이 구한다.

$$w^i(z) = \prod_{j=1}^m F_j^i(z_j) \quad (3)$$

여기서 $F_j^i(z_j)$ 는 퍼지집합 F_j^i 에서 z_j 의 멤버쉽치이다. 본 논문에서는 이제부터 $\sum_{i=1}^m w^i(z) = 1$ 로 가정한다.

2.2 온라인 학습 알고리즘

본 논문에서 사용한 온라인 학습 알고리즘(Recursive Least Square algorithm)은 수식 (4)와 (5)에서 표현된다.

$$\hat{\theta}(n+1) = \hat{\theta}(n) + \frac{P(n+1)z(n+1) \times [y(n+1) - z^T(n+1)\hat{\theta}(n)]}{1 + z^T(n+1)P(n+1)z(n+1)} \quad (4)$$

$$P(n+1) = P(n) - \frac{P(n)z(n+1)z^T(n+1)P(n)}{1 + z^T(n+1)P(n)z(n+1)} \quad (5)$$

여기서, $\hat{\theta}(0) = 0, P(0) = aI$ (a 는 매우 큰 값), $\hat{\theta}(n)$ 는 추정할 파라미터이며, $y(n+1)$ 는 원하는 값이고, $z^T(n+1)\hat{\theta}(n)$ 는 실제 출력 값이다.

2.3 적응 PID 제어기 설계

PID 제어규칙을 이용한 제어입력 $u(k)$ 는 아래 식과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + K_1(k)h_1(k) + K_2(k)h_2(k) + K_3(k)h_3(k) \quad (6)$$

여기서 $K_1(k), K_2(k), K_3(k)$ 는 PID제어기 파라미터이고, $h_1(k) = \epsilon(k) - \epsilon(k-1), h_2(k) = \epsilon(k), h_3(k) = \epsilon(k) - 2\epsilon(k-1) + \epsilon(k-2)$ 이며, $\epsilon(k) = y_m(k) - y(k)$ 는 피드백 오차이다. $y_m(k)$ 는 규범모델 출력이고, $y(k)$ 는 플랜트의 실제 출력이다.

제어기 파라미터 $K_1(k), K_2(k), K_3(k)$ 를 시스템에 적응

시킨다. 그 방법은 비선형 시스템을 TSK 퍼지모델로 표현하고 그 모델로부터 제어입력의 오차를 예측하여 제어기 파라미터를 조정한다.

TSK 퍼지모델을 이용하여 구하는 제어입력의 예측오차 $e_u(k+1)$ 는 다음과 같다.

$$e_u(k+1) = e(k+1) / \frac{\partial \hat{y}(k+1)}{\partial u(k)} \quad (7)$$

여기서, $e_u(k+1) = u^*(k+1) - u(k+1)$ 이고, $e(k+1) = y_m(k+1) - \hat{y}(k+1)$ 이다. $u^*(k+1)$ 는 시스템 출력 $y(k+1)$ 이 규범모델 출력 $y_m(k+1)$ 과 같게 되도록 하는 이상적인 제어입력이고, $u(k+1)$ 는 제어기로부터 계산된 값이다. 식 (2) 와 $\sum_{i=1}^m w^i(z) = 1$ 의 가정에서

$$\frac{\partial \hat{y}(k+1)}{\partial u(k)} = \sum_{i=1}^m w^i(z) b^i \quad (8)$$

이다. 여기서 b^i 는 퍼지모델에서 입력 $u(k)$ 의 파라미터이다.

식 (6)에서 제어입력 $u(k)$ 는 파라미터 K_1, K_2, K_3 의 선형 식으로 표현되어진 형태이다. 그러므로 TSK 퍼지모델을 이용하여 구한 제어입력의 예측오차 $e_u(k+1)$ 와 알고리즘 식 (4)와 (5)로부터 제어 입력 $u(k)$ 의 파라미터 K_1, K_2, K_3 을 실시간 적응시킬 수 있다.

2.4 TSK 퍼지모델 파라미터 적응

TSK 퍼지모델을 이용하여 제어입력의 오차를 예측하고 PID 제어기의 파라미터를 적응하므로 TSK 퍼지모델이 대상 시스템을 정확히 표현하여야 제어기 파라미터 적응이 순조롭게 이뤄진다. 또한 외란 또는 시스템 파라미터의 변동 등이 생길 경우에도 TSK 퍼지모델은 시스템 변화에 적응하여야 한다. 따라서 TSK 퍼지모델 파라미터의 온라인 적응이 필요하다.

퍼지모델을 시스템 파라미터 변화에 적응 시키므로 퍼지 모델 결론부 파라미터를 온라인 학습시킨다. TSK 퍼지모델의 출력의 추론식인 식(2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \frac{\sum_{i=1}^m w^i(z) y^i}{\sum_{i=1}^m w^i(z)} \\ &= a_0^1 g_0^1 + a_1^1 g_1^1 + a_2^1 g_2^1 + \dots + a_n^1 g_n^1 + \\ &\quad a_0^2 g_0^2 + a_1^2 g_1^2 + a_2^2 g_2^2 + \dots + a_n^2 g_n^2 + \\ &\quad \vdots \\ &\quad a_0^r g_0^r + a_1^r g_1^r + a_2^r g_2^r + \dots + a_n^r g_n^r \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $g_j^i = w^i(z) x_j / \sum_{i=1}^m w^i(z)$ (단, $x_0 = 1$) 이다.

식 (9)에서 퍼지모델 출력의 추론식 \hat{y} 는 결론부 파라미터 $a_0^1, a_1^1, \dots, a_n^r$ 의 한개 선형식으로 표현되어진 형태이다. 그러므로 플랜트의 실제 출력과 퍼지모델 출력을 비교하여 얻은 오차와 알고리즘 식(4)와 (5)로부터 퍼지모델 파라미터 $a_0^1, a_1^1, \dots, a_n^r$ 을 실시간 적응시킬 수 있다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해

여 두개의 비선형 시스템을 예로 하여 시뮬레이션 하였다.

3.1 시뮬레이션 1

대상 시스템 1은 다음과 같다.

$$y(k+1) = \frac{y(k)y(k-1) + u(k)}{1 + y(k)^2} \quad (10)$$

먼저 TSK 퍼지모델을 인식하기 위해 구간 $[-1, 1]$ 에 분포한 랜덤한 $u(k)$ 를 (10)식에 입력하여 1,000개의 입출력 데이터를 구하고, 그 데이터로부터 TSK 퍼지모델을 인식하였으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M^1: & \text{if } y(k) \text{ is } F_1 \text{ then} \\ & y(k+1)^1 = -0.016842 - 0.018649y(k) \\ & \quad - 0.547545y(k-1) + 0.614453u(k) \\ M^2: & \text{if } y(k) \text{ is } F_2 \text{ then} \\ & y(k+1)^2 = -0.000418 - 0.039118y(k) \\ & \quad - 0.041679y(k-1) + 1.068477u(k) \\ M^3: & \text{if } y(k) \text{ is } F_3 \text{ then} \\ & y(k+1)^3 = 0.032814 - 0.046590y(k) \\ & \quad + 0.590577y(k-1) + 0.636600u(k) \end{aligned} \quad (11)$$

전제부의 퍼지집합 그림 2에 나타나 있다.

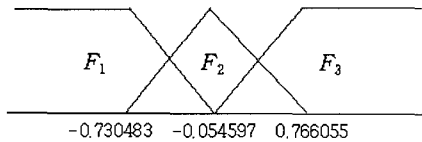


그림 2. 퍼지 모델(11)의 퍼지 집합
Fig. 2 The fuzzy sets in the fuzzy model (11)

그림 3에서는 원하는 규범모델 출력 값 $y_m(k+1) = r(k) = 0.8 \sin(2\pi k/300)$ 일 때 적응 제어 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 보여주는 바, 실제 시스템의 출력은 규범모델의 출력을 아주 잘 추적함을 보여준다.

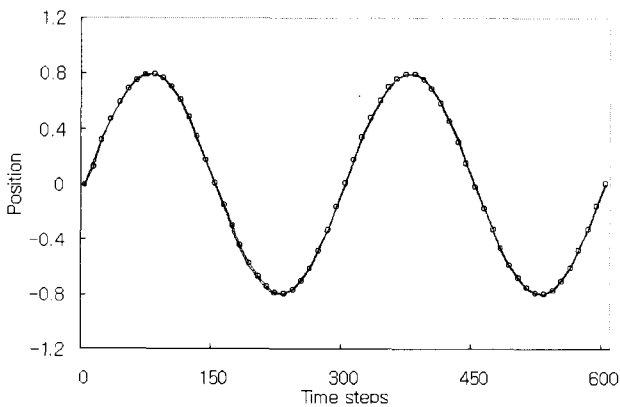


그림 3. 규범모델 출력과 실제 시스템 출력 (— 규범모델 응답, ○— 시스템 출력)
Fig. 3 Reference model and actual system output (— the reference model, ○— the system)

그림 4에서는 그림 3의 경우의 사인파를 추적함에 있어서 적응 PID제어기 파라미터의 변화를 보여준다.

그림 5에서는 $r(k)$ 가 구형파일 때 제어기 성능을 비교한 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 이용한 규범모델은 다음과 같은 2차 시스템이다.

$$y_m(k+1) = 1.8y_m(k) - 0.81y_m(k-1) + 0.01r(k) \quad (12)$$

이 시뮬레이션에서는 PID 제어기 파라미터의 적응 효과를 알아보기 위해서, 계속 제어기 파라미터를 적응하였을 때와 도중에 파라미터 적응을 중단하였을 때를 비교하였다. 그림 5에서 \ominus 는 계속 제어를 적응할 경우 결과이며, 점선은 300 step 이후에서는 제어기 파라미터를 고정시키고 제어기 적응을 하지 않을 경우 제어 결과이다. 제어기 파라미터 적응을 중단 할 경우 시스템이 비선형이므로 규범모델 출력을 잘 추적하지 못함을 볼 수 있다.

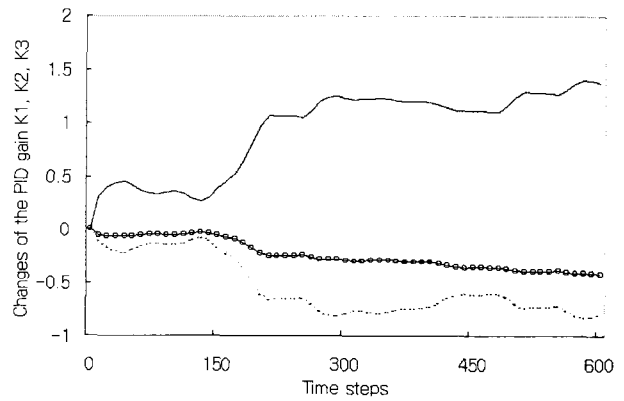


그림 4. PID 제어기 파라미터 (..... K1, — K2, —○— K3) 변화
Fig. 4 Changes of the PID controller parameters (..... K1, — K2, —○— K3)

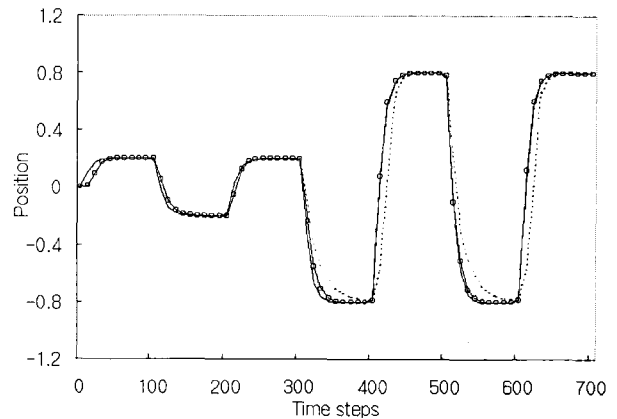


그림 5. 제어기 성능 비교 (— 규범모델 응답, —○— 제어기의 적응이 있을 때 응답, 제어기의 적응이 없을 때 응답)
Fig. 5 Comparison of controller performance (— Responses of the reference model, —○— Responses of the adaptive controller, Responses of the linear controller)

그림 6에서는 퍼지모델 파라미터 적응의 유용함을 보여주기 위한 시뮬레이션의 결과이다. 이 시뮬레이션에서 규범모

델 출력은 $y_m(k+1) = r(k) = 0.8\sin(2\pi k/300)$ 인 사인파이며 150step 시점에서 시스템의 출력에 0.5 크기의 외란을 첨가하였다. 그림에서 \ominus 는 제어기 파라미터와 퍼지모델 파라미터 모두 적용시킬 경우 응답이며, 점선은 제어기 파라미터만을 적용 시키고 퍼지모델 파라미터는 식(11)의 값으로 고정 시킬 때 응답이다. 그림에서 퍼지모델 파라미터를 적용 시킬 경우 시스템이 변화하여도 퍼지모델이 잘 적응되어 시스템 출력이 규범모델 출력을 잘 따라간다. 하지만 퍼지모델 파라미터를 적용 시키지 않을 경우 제어입력 오차의 예측이 정확히 이뤄지지 않기 때문에 규범모델 출력을 따라가지 못하고 있다.

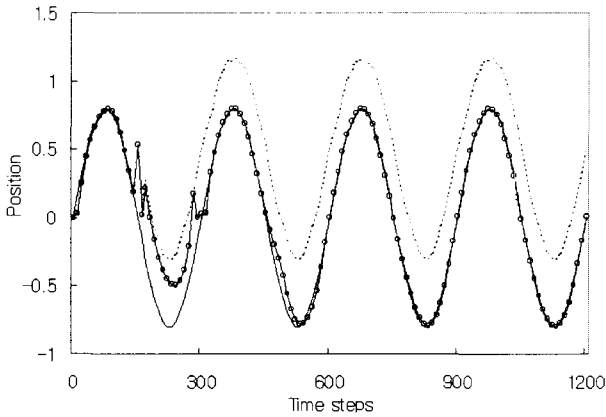


그림 6. 제어 성능 비교(— 규범모델 응답, —○— 퍼지모델 적응이 있을 때 응답, 퍼지모델 적응이 없을 때 응답)

Fig. 6 Comparison of control performance (— Responses of the reference model, —○— Responses of the adaptive fuzzy model, Responses of the nonadaptive fuzzy model)

3.2 시뮬레이션 2

대상 시스템 2는 다음과 같다.

$$y(k+1) = \frac{y(k)y(k-1)y(k-2)u(k-1)(y(k-2)-1) + u(k)}{(1 + y(k-2))^2 + y(k-1)^2} \quad (13)$$

먼저 TSK 퍼지모델을 인식하기 위해 구간 $[-1, 1]$ 에 분포한 랜덤한 $u(k)$ 를 (13)식에 입력하여 800개의 입출력 데이터를 구하고, 그 데이터로부터 TSK 퍼지모델을 인식하였으며 그 결과는 다음과 같다.

$$M^1: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_1 \text{ and } y(k-2) \text{ is } B_1 \\ \text{then } y(k+1)^1 = 0.008 + 0.974y(k) + 0.333y(k-1) - 0.279y(k-2) + 0.494u(k) - 0.468u(k-1)$$

$$M^2: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_1 \text{ and } y(k-2) \text{ is } B_2 \\ \text{then } y(k+1)^2 = 0.021 - 0.030y(k) + 0.058y(k-1) + 0.127y(k-2) + 0.419u(k) + 0.029u(k-1)$$

$$M^3: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_2 \text{ and } y(k-2) \text{ is } C_1 \\ \text{then } y(k+1)^3 = 0.004 - 0.173y(k) + 0.211y(k-1) + 0.009y(k-2) + 0.619u(k) + 0.111u(k-1)$$

$$M^4: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_2 \text{ and } y(k-2) \text{ is } C_2 \\ \text{then } y(k+1)^4 = 0.002 - 0.012y(k) + 0.005y(k-1) + 0.007y(k-2) + 0.977u(k) + 0.007u(k-1)$$

$$M^5: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_2 \text{ and } y(k-2) \text{ is } C_3 \\ \text{then } y(k+1)^5 = 0.003 - 0.099y(k) + 0.011y(k-1) - 0.020y(k-2) + 0.587u(k) + 0.058u(k-1)$$

$$M^6: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_3 \text{ and } y(k-2) \text{ is } D_1 \\ \text{then } y(k+1)^6 = -0.003 - 0.062y(k) + 0.010y(k-1) - 0.192y(k-2) + 0.380u(k) + 0.079u(k-1)$$

$$M^7: \text{if } y(k-1) \text{ is } A_3 \text{ and } y(k-2) \text{ is } D_2 \\ \text{then } y(k+1)^7 = -0.112 + 0.131y(k) - 0.001y(k-1) + 0.144y(k-2) + 0.382u(k) - 0.138u(k-1) \quad (14)$$

전제부의 퍼지집합은 그림 7에 나타나 있다.

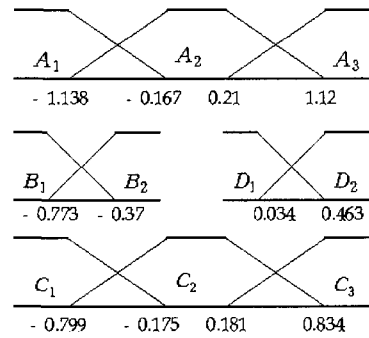


그림 7. 퍼지 모델 (14)의 퍼지집합
Fig. 7 Fuzzy sets of the fuzzy model (14)

그림 8에서는 원하는 값 $r(k) = 0.8\sin(2\pi k/300)$ 이고 규범모델 출력 $y_m(k+1) = r(k)$ 인 사인파와 추적도를 보여준다. 그림에서 보여주는바, 실제 시스템의 출력은 규범모델의 출력을 아주 잘 추적함을 볼수있다.

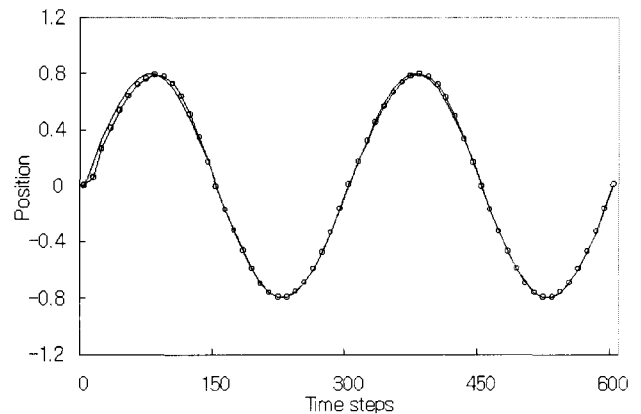


그림 8. 규범모델 출력과 실제 시스템 출력 (— 규범모델 응답, —○— 시스템 출력)
Fig. 8 Reference model and actual system output (— the reference model, —○— the system)

그림 9에서는 그림8의 경우인 사인파를 추적함에 있어서 시뮬레이션 시간내 적응 PID 제어기 파라미터 변화를 보여준다.

그림 10에서는 구형파를 추적함에 있어서 제어기 성능 비

교를 보여 준다. 이용한 규범모델은 다음과 같다.

$$y_m(k+1) = 2.4y_m(k) - 1.92y_m(k-1) + 0.512y_m(k-2) + 0.008u(k) \quad (16)$$

즉 계속 제어기 적응이 있을 때 응답과 450초까지만 적응을 하고 나머지 시간에서는 450초 되는 점에서 얻은 제어기 파라미터를 고정시키고 적응을 하지 않을 때 응답을 보여준다. 제어기 적응이 없을 때 규범모델의 출력을 잘 추적하지 못함을 볼 수 있다.

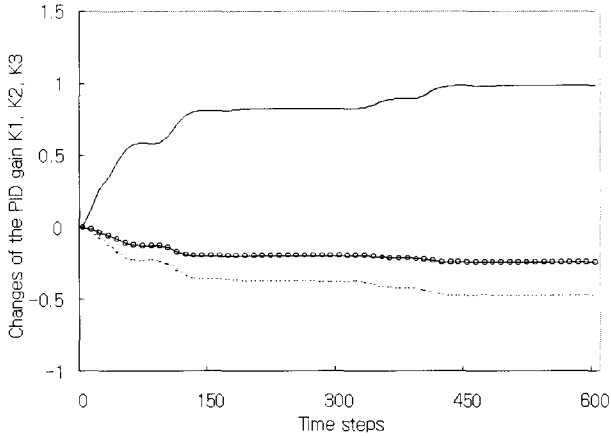


그림 9. PID 제어기 파라미터(..... K1, —— K2, —○— K3) 변화

Fig. 9 Changes of the PID controller parameters (..... K1, —— K2, —○— K3)

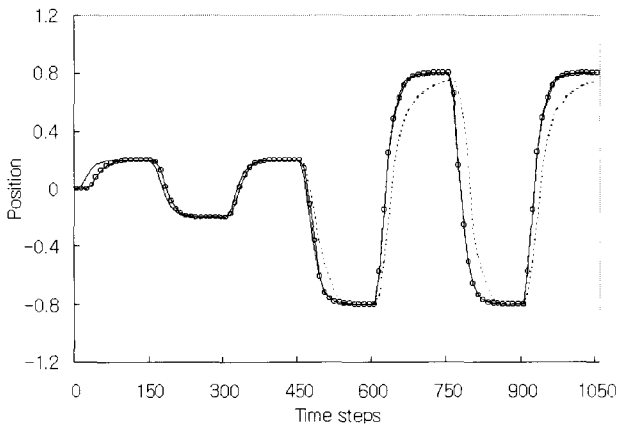


그림 10. 제어기 성능 비교 (—— 규범모델 응답, —○— 제어기의 적응이 있을 때 응답, 제어기의 적응이 없을 때 응답)

Fig. 10 Comparison of controller performance(—— Responses of the reference model, —○— Responses of the adaptive controller, Responses of the linear controller)

그림 11은 시스템 파라미터 변동이 있을 때 퍼지모델 파라미터 적응의 효과를 보여준다. 원하는 값 $r(k) = 0.8 \sin(2\pi k/300)$ 이고 규범모델의 출력 $y_m(k+1) = r(k)$ 인 사인파를 추적함에 있어서 150초 되는 지점에서 비선형 시스템의 출력에 0.5 크기의 외란을 가하였을 때 제어 성능 비교를 보

여 준다. 즉, 전체 시뮬레이션 시간내 제어기와 퍼지모델의 적응이 있을 때 응답과 제어기만 적응을 하고 퍼지모델의 적응이 없을 때 응답을 보여준다. 그림에서 볼 수 있는바 퍼지모델의 적응이 없을 때는 시스템 변동으로 규범모델의 출력을 추적하지 못함을 볼 수 있다.

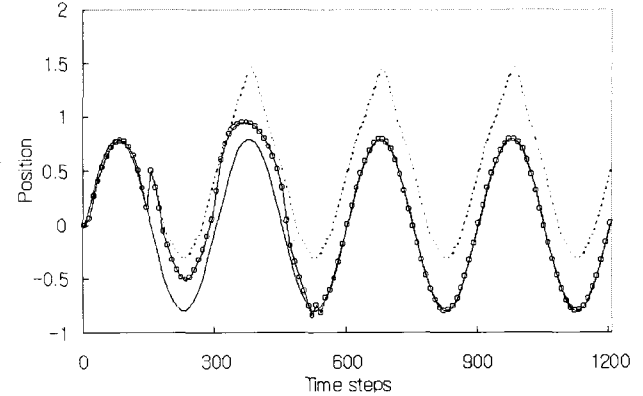


그림 11. 제어 성능 비교(—— 규범모델 응답, —○— 퍼지모델 적응이 있을 때 응답, 퍼지모델 적응이 없을 때 응답)

Fig. 11 Comparison of control performance(—— Responses of the reference model, —○— Responses of the adaptive fuzzy model, Responses of the nonadaptive fuzzy model)

4. 결 론

본 논문에서는 비선형 제어시스템의 성능 개선을 위한 퍼지모델을 이용한 적응 PID 제어기 설계 새로운 알고리즘을 제시하였다. 즉, TSK 퍼지모델을 이용하여 제어입력의 오차를 예측하고 그 오차로부터 PID 제어기의 파라미터를 실시간에 적응시켰다. TSK 퍼지모델 또한 플랜트의 실제 출력과 퍼지모델 출력을 비교하여 퍼지모델 파라미터를 실시간 적응시켰다.

두개의 비선형 시스템에 대한 시뮬레이션을 통해 제안하고 설계된 적응 PID 제어기는 고정 이득을 갖는 선형 제어기에 비해 빠른 수렴 능력과 견실성을 부여함으로써 제안된 알고리즘의 실효성과 우월성도 확인 되었다.

참 고 문 헌

- [1] Venelinov Topalov, A.; Kaynak, O. "Online learning in adaptive neurocontrol schemes with a sliding mode algorithm", *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 31, pp. 445 -450, 2001.
- [2] Wang Beilei, Zhao Lin, Tan Zhenfan "Neural network based online self-learning adaptive PID control", *Proc. of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, Vol. 2, pp. 908 -910, 2000.
- [3] Van Rensburg, P.J.; Shaw, I.S.; Van Wyk, J.D. "Adaptive PID control using a genetic algorithm",

Proc. KES'98. Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Vol. 2, pp. 133-138, 1998.

- [4] Carrukki, F.J.; Haddouche, K.; Rotella, F. "Hybrid real time adaptive PID control system for turning", *Proc. IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 492-497, 1996.
- [5] Kang, G., Lee, W. and Sugeno, M., "Design of TSK fuzzy controller based on TSK fuzzy model using pole placement", *Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 246-251, 1998.
- [6] Kang, G., Lee, W. and Sugeno, M., "Stability analysis of TSK fuzzy systems", *Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 555-560, 1998.
- [7] 中溝高好, "線形離散時間システムの同定手法", *システム制御*, Vol. 25, No. 8, pp. 476-489, 1981.
- [8] R. Isermann, K. Lachmann, D. Matko, *Adaptive Control Systems*, Prentice-Hall, 1992.



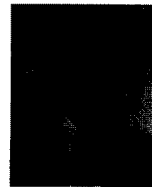
이원창(WonChang Lee)

1983년 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)

1985년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)

1992년 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

1993년~현재 : 부경대학교 전자공학과 부교수



강근택(GeunTaek Kang)

1976년 : 서울대학교 응용물리학과(공학사)

1984년 : 일본 동경공업대학 시스템과학 (공학석사)

1987년 : 일본 동경공업대학 시스템과학 (공학박사)

1987년~현재 : 부경대학교 전자공학과 교수

저 자 소 개



김종화(ZongHua Jin)

1998년 : 중국 할빈공업대학교 제어계측공학과(공학사)

2001년 : 부경대학교 전자공학과(공학석사)

2001년~현재 : 부경대학교 전자공학과 박사과정

관심분야 : 퍼지 및 지능시스템, 적응제어

Phone : +82-51-620-6464

Fax : +82-51-620-6464

E-mail : jinzh@hanmail.net