

뉴로-퍼지 제어기 설계 연구

° 임정훈*, 정태진**
한국항공우주연구원*, 한국항공우주산업**

A Study on a Neuro-Fuzzy Controller Design

° Jeong-Heum Im*, Tae-Jin Chung**
Korea Aerospace Research Institute*, Korea Aerospace Industries**

Abstract - There are several types of control systems that use fuzzy logic controller as a essential system component. The majority of research work on fuzzy PID controller focuses on the conventional two-input PI or PD type controller. However, fuzzy PID controller design is a complex task due to the involvement of a large number of parameters in defining the fuzzy rule base.

In this paper, we combined conventional PI type and PD type fuzzy controller and set the initial parameters of this controller from the conventional PID controller gains obtained by Ziegler-Nichols tuning or other coarse tuning methods. After that, by replacing some of these parameters with single neurons, and making them to be adjusted by back-propagation learning algorithm, we designed a neuro-fuzzy controller which showed good performance characteristics in both computer simulation and actual application.

1. 서 론

퍼지 제어기는 기존의 제어 기법이 적용되기 어려운 복잡한 시스템이나 비선형 시스템에 다양하게 적용되어 때때로 기존의 제어기 보다 강인하거나 좋은 성능을 보인다고 보고되고 있다. 그러나 퍼지제어기는 시스템의 동작에 관한 사전 지식이 불충분하거나 없는 경우, 적절한 제어규칙을 얻을 수 없으며 제어규칙 설정에 대한 기준이 없다는 단점이 있다[1]. 신경회로망과 퍼지 이론을 결합한 적응 퍼지 PID 또는 뉴로-퍼지 기법을 응용하여 자동으로 최적의 제어 규칙을 생성하는 연구결과들이 보고되고는 있으나 대부분 제어규칙의 생성, 신경회로망의 훈련 과정이 매우 시간 소모 적이고 과도한 계산량으로 실제 적용이 어렵다는 단점을 갖는다[2][3].

본 논문에서는 위와 같은 단점을 개선하기 위하여 PD 형 퍼지 제어기와 PI 형 퍼지 제어기를 결합한 두 개의 입력력을 갖는 PI-PD 형 퍼지 PID 제어기 구조를 사용하였다. 또한 퍼지 PID 제어기의 입출력 이득, 규칙 기반을 기존의 PID 제어기 이득 조정법을 이용하여 초기화하고 역전파 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 변수값들을 갱신시킴으로써 적응성을 갖도록 하였다.

제시된 제어기는 단순한 구조와 적은 계산량 그리고 현상운전자에게 익숙한 기존 PID 제어기 동조기법을 이용하여 입출력 이득 및 규칙 기반을 초기화함으로써 초기 제어기간 안정성을 보장할 수 있다는 장점을 갖고 있으며 개 루프 불안정 비선형 시스템에 실제 적용하여 제어기의 우수한 성능을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 퍼지 PID 제어기 구조

일반적으로 사용되는 퍼지 PID 제어기 구조는 세 개의 입력과 상호 결합된 퍼지 규칙을 이용하여 제어입력을 한번에 생성하는 방법(Type 1), 세 개의 입력과 독립적인 퍼지 규칙을 사용하여 비례이득, 미분이득, 적분이득에 해당하는 제어기 출력을 각각 생성한 후 이들을 합하여 최종 제어기 출력을 생성하는 방법(Type 2), 그리고 두 개의 입력 값과 상호 결합된 퍼지 규칙을 이용하여 비례이득과 미분이득에 해당하는 출력값을 생성하고 이 값들을 적분하여 얻어진 비례이득 과 적분이득 성분을 합하여 최종 제어기 출력을 생성하는 방법(Type 3)이 있다.

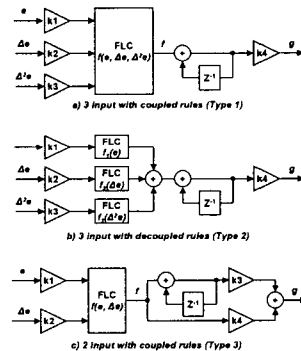


그림 1 퍼지 PID 제어기 구조
Fig. 1 Structure of fuzzy PID controller

Type 1 제어기는 세 개의 입력성분이 서로 결합되어 퍼지 규칙이 생성되기 때문에 규칙 생성 과정이 매우 복잡하며 오차값, 오차의 미분값, 그리고 오차의 적분값(또는 오차의 2차 미분값)의 입력구간을 각각 N_1, N_2, N_3 개의 언어변수로 분리하여 full rank로 퍼지 규칙을 생성한다고 가정하였을 때 필요한 규칙의 개수는 $N_1 \times N_2 \times N_3$ 이다. Type 2 는 세 개의 입력에 대하여 각각 제어 규칙을 설정해야 하며 이 때 필요한 규칙의 개수는 $N_1 + N_2 + N_3$ 이다. Type 3 의 경우 일반적으로 널리 사용되는 PD형 퍼지 제어기의 출력값과 이 값을 적분한 값을 합하여 최종 제어기 출력을 생성하므로 퍼지 규칙 생성이 상대적으로 용이하며 필요한 규칙의 개수는 $N_1 \times N_2$ 이다. 본 논문에서는 구조적 단순성과 계산량의 부담을 고려하여 뉴로-퍼지 제어기의 기본 구조로서 두 개의 입력과 결합된 퍼지규칙을 이용하는 퍼지 PID 제어기를 사용하였다.

2.2 퍼지 PID 제어기 설계

퍼지 제어기의 두 입력인 정규화된 오차값과 오차의 미분값에 해당하는 퍼지 집합을 각각 A와 B라 할 때, 이들 퍼지 집합 A와 B를 그림 2와 같이 인접 소속함수와 50% 씩 중첩되는 대칭 삼각 소속함수를 갖는 $2n+1$ 개의 언어변수로 분할한다. n 은 임의의 수를 사용하여도 무방하지만 계산량과 성능을 고려하면 2 또는 3 정도가 적당하다. 본 논문에서의 n 값은 2를 사용하였다.

$$A_i (i \in I = [N2, M1, Z0, P1, P2])$$

$$B_j (j \in J = [N2, M1, Z0, P1, P2])$$

정규화된 오차값 a 와 오차의 미분값 b 의 대집합은 각각 $A \subset R, B \subset R$ 이다.

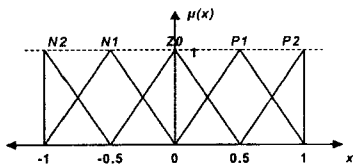


그림 2 소속 함수 (A & B)

Fig. 2 Membership function(A & B)

퍼지 제어 규칙은 식 (1)과 같은 형태로 설정한다.

$$\text{if } a \text{ is } A_i \text{ and } b \text{ is } B_j \text{ then } u \text{ is } u_{i,j} \quad (1)$$

이때 $u_{i,j}$ 는 언어변수 A,와 B,의 중심값의 합으로 언어변수가 아닌 실제값이다. 마지막으로 product-sum 추론법과 무게 중심법 비퍼지화 기법을 사용하여 퍼지제어기의 출력 f 를 생성한다. product-sum 추론법을 이용한 퍼지 제어기의 전전부 실제값은 다음과 같다.

$$z_{i,j} = A_i(a)B_j(b) \quad (i \in I, j \in J) \quad (2)$$

무게 중심법 비퍼지화를 적용한 제어기의 실제 출력 f 는 식 (3)과 같이 주어 진다.

$$f = \frac{\sum_{i,j} z_{i,j} u_{i,j}}{\sum_{i,j} z_{i,j}} \quad (3)$$

위와 같이 설계된 퍼지 PID 제어기는 도식적으로 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

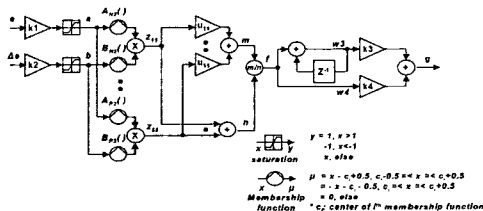


그림 3 PI-PD형 퍼지 PID 제어기

Fig. 3 PI-PD type fuzzy PID controller

퍼지 제어기의 입력단은 포화 함수를 이용하여 입력 공간을 제한하고 정규화 시켰으며 추후 오차값과 오차의 변화값을 충분히 반영할 수 있도록 입력측 이득 k_1, k_2 를 조절하여야 한다. 오차값과 오차의 변화값을 각각 5개의 구간으로 분할하여 full rank로 규칙을 구성하였으므로 총 25개의 규칙이 생성 되었다. 임의의 순간에 적용받게 되는 규칙의 수는 최대 4개를 넘지 않으며 $\sum_{i,j} s_{i,j}$ 는 그림 4에서와 같이 입력값에 의해 소속값이 정해지므로 항상 1이 된다.

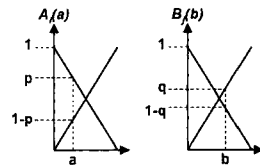


그림 4 소속값

Fig. 4 Membership value

2.3 퍼지 PID 제어기 초기 이득 설정

소속 함수, 제어규칙, 비퍼지화 방식을 2.2절에서와 같이 설정하고 입력측 이득을 적절히 설정하면 퍼지 PID 제어기의 출력은 그림 5 b)와 같은 구조를 갖는 PI-PD형 선형 PID 제어기와 매우 유사한 입출력 특성을 보인다[4]. 그러므로 퍼지 PID제어기의 초기 이득값들을 기존의 PID 제어기 동조 기법에 의하여 얻어진 비례이득, 미분이득, 적분이득을 이용하는 구하는 방법을 고려할 수 있다.

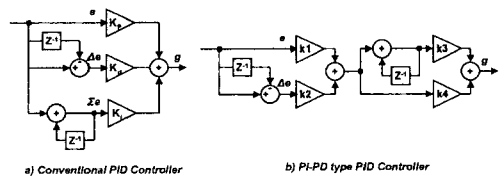


그림 5 기존의 PID 제어기와 PI-PD형 PID 제어기

Fig. 5 Conventional & PI-PD type PID Controller

기존의 PID 제어기를 동조시키는 방법으로는 Ziegler-Nichols 방법, 릴레이 조정 방법 등 여러 가지 방법이 제시되었으나 이러한 동조기법에 의해 구해진 비례이득, 미분이득, 적분이득은 그림 5의 PI-PD형 선형 PID 제어기의 4개의 이득과 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$K_p = k_1 k_4 + k_2 k_3, \quad K_d = k_2 k_4, \quad K_i = k_1 k_3 \quad (4)$$

이 때 기존의 PID 제어기의 이득 개수는 3개이며 PI-PD형 PID 제어기의 입출력 이득 개수는 4개이므로 먼저 PI-PD형 PID 제어기의 입출력 이득 중 하나를 설정하여야 한다. 기준입력을 단위계단입력으로 출 때 오차값은 일반적으로 1이상을 넘어서지 않으므로 퍼지제어기의 입력값 정규화 및 제한값을 고려하여 오차와 관련된 이득은 1로 선택하고 나머지 이득 값들은 식 (4)를 이용하여 구한다.

2.4 뉴로-퍼지 제어기 설계

그림 3의 퍼지 PID 제어기를 간략화 시켜 플랜트에 적용시키면 그림 6과 같다. 오차 추적 성능을 향상시키고 적응성을 갖도록 하기 위하여 그림 6의 점선으로 된 두 블록을 단일 신경회로망 구조로 변형시키면 각각의 뉴론은 선형 활성화함수를 갖는 신경회로망이 되고 블록내 각 이득들은 연결강도의 의미를 갖는다[5].

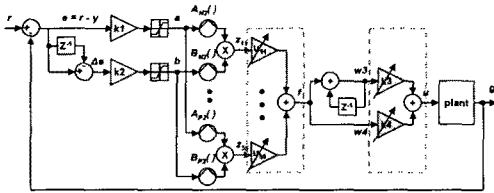


그림 6 뉴로-퍼지 제어기

Fig. 6 A Neuro-Fuzzy Controller

성능지수 J 를 식 (5)와 같이 정의 하고 성능 지수 J 를 최소화 하도록 역전파 알고리즘을 적용하면 식 (6)과 같으며 편미분을 계산하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} (r(kT) - y(kT))^2$$

$$= \frac{1}{2} e(kT)^2, \quad e(kT) = r(kT) - y(kT) \quad (5)$$

T : sampling Time, $k = 1, 2, \dots$

$$u_{i,j}(kT) = u_{i,j}((k-1)T) - \eta \frac{\partial J}{\partial u_{i,j}} \Big|_{kT}$$

$$k_l(kT) = k_l((k-1)T) - \eta \frac{\partial J}{\partial k_l} \Big|_{kT} \quad (6)$$

$i, j = 1, 2, 3, 4, 5, \quad l = 3, 4, \quad \eta = 0 \sim 1$

$$u_{i,j}(kT) = u_{i,j}((k-1)T) - \eta e z_{i,j} (w_3 f + w_4) \frac{\partial y}{\partial g} \Big|_{kT} \quad (7)$$

$$k_l(kT) = k_l((k-1)T) + \eta e w_l \frac{\partial y}{\partial g} \Big|_{kT}$$

2.5 실험

뉴로-퍼지 PID 제어기의 성능을 실제 검증하기 위하여 개루프 불안정이며 비선형성이 강한 시스템으로 알려진 자기부양 시스템을 사용하였다. 시스템의 전기 기계학적 방정식에 실제 변수들을 대입하여 얻은 시스템의 전달함수와 이를 기반으로 설정된 기존의 PID 제어기를 설계하여 얻은 모의실험 결과를 그림 7에 보였다.

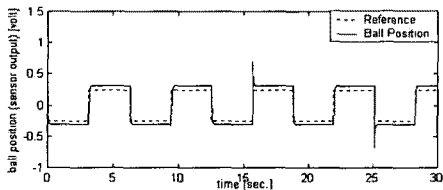


그림 7 PID 응답 (모의실험)

Fig. 7 PID controller response (simulation)

그림 8은 동일한 PID 이득을 실제 플랜트에 적용한 것이며 그림 9는 본 논문에서 제시한 뉴로-퍼지 제어기를 적용하였을 때의 결과이다.

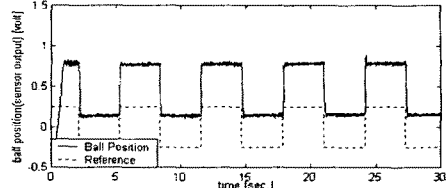


그림 8 PID 응답 (실제 플랜트)

Fig. 8 PID controller response (real plant)

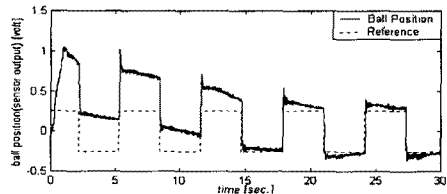


그림 9 뉴로-퍼지 응답

Fig. 9 Neuro-fuzzy controller response

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 PID 제어기 이득 조정 기법과 신경회로망의 역전파 학습 알고리즘을 채용한 PI-PD형 퍼지 PID 제어기의 구조를 갖는 뉴로-퍼지 제어기를 설계하였다. 제시된 제어기는 단순한 구조, 적은 계산량은 물론 현장운전자들에게 익숙한 기존의 PID 제어기의 조정 기법을 이용하여 퍼지제어기의 변수들을 초기화 할 수 있다는 장점을 갖고 있어 실제 산업현장에서 쉽게 응용이 가능하며 개 루프 불안정 비선형 시스템에 실제 적용하여 제어기의 우수한 성능을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Li-Xin Wang, "Adaptive fuzzy systems and control: Design and Stability Analysis", Prentice Hall, 1994
- [2] Li CS, Priemer R, "Self-learning general purpose PID controller", Journal of the Franklin Institute, vol. 334B no. 2, 1997
- [3] Marian B. Gorzalczany, "On some idea of a nero-fuzzy controller", Information Sciences, vol. 120 no. 1-4, 1999
- [4] S. Gallchet and L. Foulloy, "Fuzzy Controller: Synthesis and equivalences", IEEE Trans. Fuzzy Systems., vol. 3, pp. 140-148, 1995
- [5] Minyou Chen, D. A. Linkens, "A hybrid neuro-fuzzy PID controller", Fuzzy Sets and Systems, vol. 99, pp. 27-36, 1998