

퍼지-뉴럴 제어 시스템을 이용한 직류 서보 전동기의 위치 및 속도 제어

강영호, 정현주, 김만철, 김낙교
건국 대학교 전기공학과

The position and Speed Control of a DC Servo-Motor Using Fuzzy-Neural Network Control System

Young-Ho Kang, Heon-Joo Jeong, Man-Cheol Kim, Nak-Kyo Kim
Department of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

*. ABSTRACT

In this paper, Fuzzy-Neural Network Control system that has the characteristic of fuzzy control to be controlled easily and the good characteristic of an artificial neural network to control the plant due to its learning is presented. A fuzzy rule to be applied is selected automatically by the allocated neurons. The neurons correspond to Fuzzy rules which are created by an expert. To adaptivity, the more precise modeling is implemented by error back-propagation learning of adjusting the link-weight of fuzzy membership function in Fuzzy-Neural Network. The more classified fuzzy rule is used to include the property of Dual Mode Method. To test the effectiveness of the algorithm presented above, the simulation for position and velocity of DC servo motor is implemented.

1. 서론

거의 대부분의 산업기기에 사용되고 있는 전동기는 산업 현장에서 기계적 동력의 공급원으로 대단히 중요한 위치를 차지한다. 특히 제어 시스템에 있어서 정밀성이 대단히 강조되고 있는 현 시점에서 직류 전동기는 뛰어난 제어성으로 인하여 그 비중이 매우 크다. 그러나 실제의 시스템 출력에서는 잡음, 공급 전압의 변동, 허용치, 온도나 습도 등의 주위 환경이 방해 요인으로 존재하므로 이러한 비선형 요소들을 제거하여 안정적이고 적절한 출력을 얻기 위한 전동기 제어방법이 계속 연구되고 있다[1]. 따라서 최근에는 이러한 문제들을 해결하기 위해서 인공지능을 이용한 적응제어 기법들이 연구되고 있다.

퍼지제어이론은 1965년 미국의 Zadeh 교수가 퍼지집합을 제안한 후 [2], 1974년 영국의 Mamdani 교수에 의해서 스티븐 엔진에 처음으로 적용되었다[3][4]. 퍼지제어는 전문가적 경험을 바탕으로 해서 인간의 언어적 판단 논리를 이용한 제어이론이다. 퍼지제어는 병렬 분산형 제어이므로 전반적인 목적함수를 필요로 하지 않기 때문에 비선형적인 입출력 관계도 쉽게 나타낼 수 있다. 또한 논리형 제어이므로 제어규칙의 조건부에 다양한 전제조건을 나타낼 수 있어 물리적인 추경할 수 없는 돌발적인 외란까지도 처리할 수 있다. 그리고 언어적 제어이므로 언어 변수를 조작함으로써 쉽게 제어기의 성능을 개선할 수 있다[4][5].

인공신경회로망은 1943년 W.S. McCulloch와 W. Pitts에 의해서 인간의 신경세포를 모방한 *neuroda*가 제안되면서 시작되었다[6]. 인공신경회로망은 병렬분산 처리에 의해 입출력 관계 일부 데이터 만으로도 복잡한 계산을 수행할 수 있다. 따라서 정확한 알고리즘이 없이도 학습능력과 보관 능력에

의해서 비선형 함수를 구하는 등의 어렵고 복잡한 작업을 하는데 유용하다. 따라서 종래의 제어이론으로는 제어가 불가능했던 시스템을 제어해주거나 더욱 효과적인 제어를 가능하게 해주기도 한다[7][8].

인공지능형 제어에는 이러한 장점들이 있는 반면에 각각의 단점들 때문에 제어 시스템을 구성하는데 한계가 있다. 즉, 퍼지제어 시스템은 한번 결정된 퍼지 규칙들은 쉽사리 조정되거나 변화되지 않는다. 또한 인공신경회로망은 그 내부적 동작을 파악하기 어렵다. 따라서 최근에는 퍼지제어 이론의 특성과 신경회로망의 학습 특성을 결합하여 이러한 문제들을 해결하려는 노력을 하고 있다. Iwata는 오차 역전달 학습 알고리즘(Back-Propagation)을 사용하여 퍼지제어규칙을 다층신경회로망(Multilayered Neural Network)에 학습시키고 이것을 퍼지제어에 이용하였다[9]. Horikawa는 전문가의 경험데이터를 이용하여 자동적으로 퍼지제어규칙을 찾아내고 소속함수의 미세조절을 할 수 있는 신경회로망을 이용한 새로운 퍼지논리제어기를 제안하였다[10].

본 논문에서는 위에서 제안된 퍼지-뉴럴 제어기의 각각의 장점을 수용하기 위해 전문가에 의해서 생성된 퍼지제어 규칙들에 해당하는 뉴런을 배치하여 자동적으로 퍼지제어 규칙을 찾아내고, 적응성을 위하여 다층신경회로망의 오차 역전달 학습에 의해서 퍼지제어규칙의 소속함수를 미세조정하여 좀더 정밀한 모델링이 되도록하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안된 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 직류 서보 전동기의 위치 및 속도제어에 관한 시뮬레이션을 시행하였다.

2. 제어기 설계

2-1. 제어기 구성

본 논문에서 제안된 퍼지-뉴럴 제어기는 초기위치(initial position)와 최종위치(final position) 그리고 작업수행 시간(operation time)과 샘플링 시간(sampling time)을 입력받아 기준 위치와 속도(reference position and velocity)를 자동적으로 만들어내는 동작발생기(Motion Generator), 직류 서보 전동기에 제어입력 신호를 생성해주는 퍼지-뉴럴 제어기(FNN : Fuzzy-Neural Network Controller), 플랜트로서 직류 서보 전동기, 그리고 직류 서보 전동기의 출력과 기준 위치와 속도를 비교하여 역전달 학습을 통해 퍼지-뉴럴 제어기의 연결가중치(link weight)를 조정하게 하는 비교기(Comparator)로 구성된다. 전체 구성도는 그림1에 나타난다.

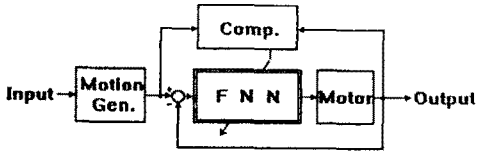


그림1. 퍼지-뉴럴 제어기의 전체 구성도

2-2. 퍼지모델 생성

본 논문에서 사용된 제어기의 제어규칙은 IF 문으로 나타내어지는 조건부(antecedent)를 혼합명제로하였고 THEN 문으로 나타내어지는 결론부(consequent)를 단일명제로 하였다. 그 퍼지제어규칙의 일반적인 식은 다음과 같다.

Rule : IF (E is A_i) and (EC is A_j) THEN (Z is C_k)
 $E = R - O, \quad EC = E_{k-1} - E_k$

- E : 위치와 속도에 따른 오차의 퍼지 입력변수
- EC : 오차 EC의 변화량의 퍼지 입력변수
- R : 기준 위치 및 속도
- O : 직류 서보 전동기의 출력
- Z : 직류 서보 전동기의 제어입력을 위한 퍼지 출력변수

퍼지제어규칙의 소속함수를 정량화하는 방법 중의 하나인 Dual Mode 방법은 설정치 근처에서 오차가 큰 구간과 작은 구간을 구분하여서 각각 다른 제어규칙을 적용함으로써 제어의 정밀도를 높이는 방법이다. 본 논문에서는 이 Dual Mode 방법을 기본 개념으로 오차가 작은 범위를 좀더 세분화하여서 정량화하도록 규칙을 생성하였다. 본 논문에서 사용된 제어 규칙을 표1에 나타내었다.

EC \ E	NB	NSB	NSM	NSS	ZE	PSS	PSM	PSB	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
NSB	NB	NB	NSB	NSB	NSB	NSM	NSM	NSM	ZE
NSM	NB	NSB	NSB	NSM	NSM	NSS	ZE	ZE	PSM
NSS	NB	NSB	NSM	NSM	NSS	ZE	PSS	PSM	PSB
ZE	NSB	NSB	NSM	NSS	ZE	PSS	PSM	PSB	PSB
PSS	NSB	NSM	NSS	ZE	PSS	PSM	PSM	PSB	PB
PSM	NSM	ZE	ZE	PSS	PSM	PSM	PSB	PSB	PB
PSB	ZE	PSM	PSM	PSB	PSB	PSB	PSB	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

- NB : Negative Big
- NSB : Negative Small Big
- NSM : Negative Small Medium
- NSS : Negative Small Small
- ZE : Zero
- PSS : Positive Small Small
- PSM : Positive Small Medium
- PSB : Positive Small Big
- PB : Positive Big

표1. 퍼지제어규칙

본 논문에서는 소속함수를 사다리꼴(Trapezoidal)의 형태로 하였다. 그것은 직류 서보 전동기의 선형 및 비선형의 2가지 특성을 모두 나타내기 위한 것으로, 그림2는 사다리꼴로 구성된 퍼지제어규칙의 소속함수를 나타낸다. 각 소속함수는 Dual Mode 특성을 갖도록 하기 위하여 0을 기준으로 가까이 있는 레벨의 폭은 좁고, 차츰 (+) 또는 (-)쪽의 절대값이 큰 레벨로 갈수록 그 폭을 넓게 하였다.

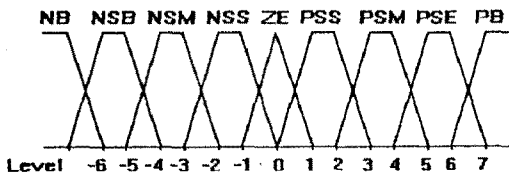


그림2. 퍼지제어규칙의 소속함수

각 소속함수의 정량화를 위한 값은 표2에 나타낸다.

Level	E	EC	V
-7	-1.00	-0.15	-12.0
-6	-0.81	-0.12	-9.8
-5	-0.64	-0.10	-7.7
-4	-0.37	-0.07	-5.7
-3	-0.33	-0.05	-3.9
-2	-0.19	-0.03	-2.3
-1	-0.07	-0.01	-0.9
0	0.00	0.00	0.0
1	0.07	0.01	0.9
2	0.19	0.03	2.3
3	0.33	0.05	3.9
4	0.37	0.07	5.7
5	0.64	0.10	7.7
6	0.81	0.12	9.8
7	1.00	0.15	12.0

표2. 각 소속함수의 Level 값

2-3. 인공신경회로망의 구성

본 논문에서 사용된 제어기는 퍼지 제어기의 구조를 인공신경회로망으로 구성한 것이다. 따라서 기본 퍼지 제어기가 갖는 퍼지화부(fuzzifier), 추론부(inference engine), 퍼지규칙부(fuzzy rule-base), 비퍼지화부(defuzzifier)를 인공신경회로망에서 구성하였다.

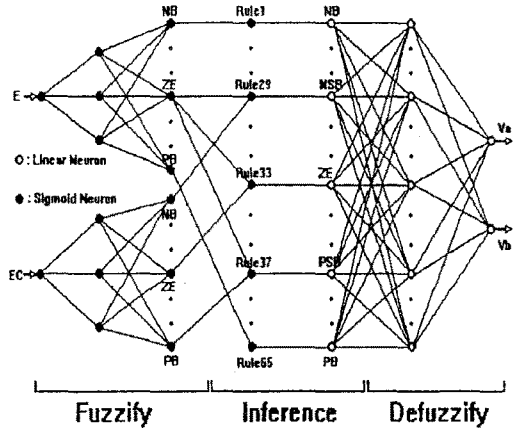


그림3. 퍼지 제어기를 갖는 인공신경 회로망

2-3-1. 퍼지화부(Fuzzifier)

오차 E와 오차변화 EC를 퍼지제어규칙의 조건부 명제로 만드는 과정을 시그모이드 함수로 구현하여 그 각각의 비선형적인 특징들을 퍼지화하도록 하였다. 각각의 입력변수 E와 EC의 정확한 정성화를 위해서, 단일 은닉층을 갖는 신경회로망을 구성하여 지도학습(supervised learning)을 기초로 한 역전달 학습을 수행한 후 학습된 가중치를 가지고 정성화를 행하도록 하였다. 이 방법은 단순 퍼지제어기를 프로그래밍하는 과정에서 발생하는 수많은 if문을 제거하여 비교적 짧은 시간 내에 상당히 정확한 소속함수값을 생성하게 된다.

2-3-2. 추론부(Inference Engine)

퍼지 제어규칙에서 조건부를 혼합명제로 할 경우에는 조건부의 각 퍼지명제의 소속정도를 조합해서 조건부 명제의 소속정도를 생성할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 조건부의 각 퍼지명제들 간에 퍼지 논리곱(logical AND)을 채택하여 입력변수 결합 자체의 비선형성에 대응하였다. 이렇게 만들어진 조건부 혼합명제의 소속정도는 각 퍼지규칙의 전제조건 적합도를 나타내게 된다. 또한 각 퍼지제어규칙

에 해당하는 시그모이드 뉴런을 배치하여 그 각각의 뉴런이 갖는 연결가중치가 그 규칙의 적합도를 나타내도록 하였다.

2-3-3. 비퍼지화부(Defuzzifier)

추론 결과를 비퍼지화하기 위하여 회전모멘트에 의한 무게중심 계산법을 적용하였다. 무게중심 계산을 위한 식은 다음과 같다.

$$V = \frac{V_a - V_b}{V_a + V_b} \times \text{정방향 최대 정격 전압}$$

여기서 V_a 는 정방향 최대 제어입력점에서의 회전토크의 크기를 나타내고, V_b 는 역방향 최대 제어입력점에서의 회전토크의 크기를 나타낸다. 또한 V 는 플랜트에 최종적으로 입력되는 제어입력을 의미한다. 회전모멘트에 의한 무게중심 계산법을 그림4에 도시하였다.

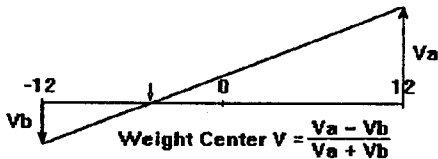


그림4. 회전모멘트에 의한 무게중심 계산법

2-3-4. 역전달 학습

각 층(layer)에서 각각의 뉴런에 대한 입력(net input)에 관한 식은 다음과 같다.

$$I_i = \sum_{j=1}^n W_j X_j$$

뉴런의 함수 $f(I)$ 가 시그모이드(sigmoid)일 때 그 뉴런의 출력 y 에 관한 식은 다음과 같다.

$$y = f(I) = \frac{1}{1 + e^{-I}}$$

그리고 그 출력의 미분은 다음과 같다.

$$f'(I) = f(I)(1-f(I))$$

가중치의 변화는 다음과 같은 델타룰(delta rule)을 이용한다.

$$\Delta W_i = E_j f'(I_j) + \alpha \Delta W_i^{previous}$$

여기서 오차 E 는 기준 출력과 출력층의 뉴런 출력과의 오차이다.

중간층의 오차는 출력층으로부터 가중치를 곱해서 역전달된 오차의 합과 순방향(forward) 경로에서 중간층의 뉴런의 출력의 미분을 곱하여 다음식과 같이 정해진다.

$$E_i^{middle} = df(I_i^{middle}) \frac{1}{dt} \sum_{j=1}^n (W_{ij} E_j^{output})$$

3. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안된 알고리즘을 직류 서보 전동기의 위치 및 속도를 제어하는 시뮬레이션에 적용하였다. 본 시뮬레이션에서 가정된 직류 서보 전동기의 정격전압은 +12[V]에서 -12[V]로 가정하였다. 입력변수로는 오차와 오차변화를 사용하였고 출력변수로는 직류 서보 전동기의 전기자에 인가되는 전압으로 하였다. 또한 플랜트의 작업수행 시간을 10[sec]로 하였고, 샘플링 시간은 0.1[sec]로 하였다. 설정치는 0-3600[degree]로 하였다. 본 시뮬레이션은 IBM PC 486에서 퍼지제어기만을 가지고 제어한 경우와 비교하여 수행하였다. 그림5에서는 퍼지제어기를 사용한 경우의 속도변화를 나타내고, 그림6에서는 퍼지-뉴럴 제어기를 사용한 경우의 속도변화를 나타낸다. 그림7은 각각의 제어기를 사용한 경우에 직류서보 전동기의 위치를 나타낸다.

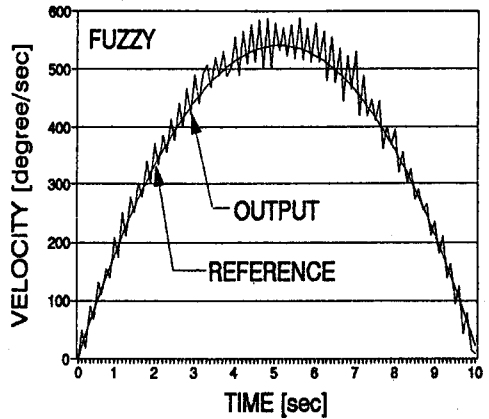


그림5. 퍼지제어기를 사용한 경우 직류 서보 전동기의 속도

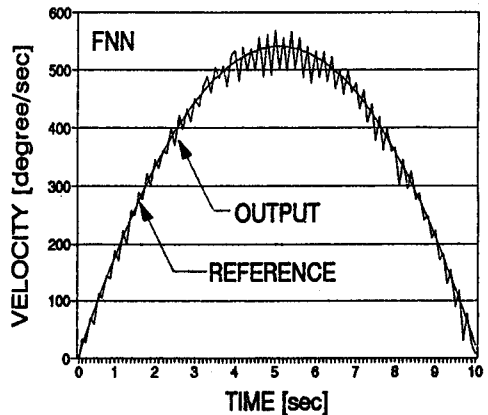


그림6. 퍼지-뉴럴 제어기를 사용한 경우 직류 서보 전동기의 속도

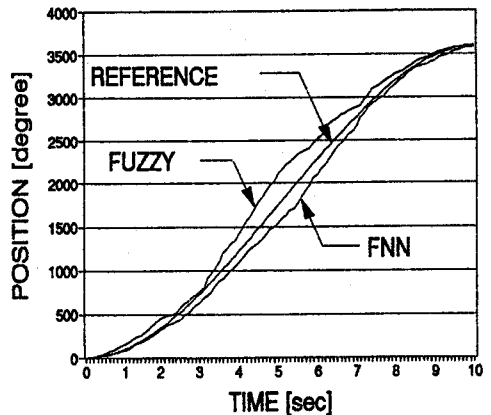


그림7. 직류 서보 전동기의 위치

4. 결론

본 논문에서는 제어기의 입력부분을 신경회로망의 학습 기능을 이용하여 순수 퍼지 제어기보다 빠른 시간에 정상화할 수 있게 하였고, 제어의 정밀성을 위하여 입력변수의 정상화 과정에 Dual Mode의 특성을 갖도록한 새로운 소속함수를 사용하였다. 또한 조건부의 각 퍼지명제 간에 논리곱(logical AND)을 실시하여 혼합명제의 소속함수가 해당 퍼지 제어규칙의 적합도를 나타내도록 하였으며, 신경회로망으로 구성된 출력단 역시 퍼지 제어규칙을 나타내는 layer까지의 역전달 학습에 의해서 규칙들의 적합도가 재조정되도록 하였다.

본 논문에서 제안된 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 직류 서보 전동기의 시뮬레이션을 시행하였다. 결과에서 보는 바와 같이 퍼지-뉴럴제어기가 기준 모델의 위치 및 속도 2가지 모두에서 단순한 퍼지제어기보다 더욱 정확한 출력을 발생시킬 수 있음을 입증하였다.

* 참고문헌

- [1] R. Gayakwad, L. Sokoloff, "Analog & Digital control system," Prentice-Hall, Inc. pp. 112-113, 1988.
- [2] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information & Control vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [3] Michio Sugeno, "An Introductory Survey of Fuzzy Control," Information Science 36, pp. 59-83, 1985.
- [4]菅野道夫 著, 박민용, 최항식 譯, "퍼지 제어 시스템," 大英社, 1990년.
- [5] 寺野, 洸居, 菅野 共著, 박민용, 최항식 譯, "퍼지 시스템의 응용입문," 大英社, 1990년.
- [6] M. Caudill, C. Butler, "Understanding Neural Networks," Vol. 1, The MIT Press, 1992.
- [7] R. P. Lippman, "An Introduction to Computing with Neural Nets," IEEE ASSP Magazine, April 1987.
- [8] 오세영, "신경회로망의 제어분야 응용," 전기학회지 38권 2호, 1989년 2월.
- [9] R. Masuoka, N. Watanabe, A. Kawamura, H. Okada, K. Asakawa, "Neuro-Fuzzy Inference using a Structured Neural Network," Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks(Iizuka, Japan), pp. 173-177, 1990.
- [10] A. Kawamura, N. Watanabe, H. Okada, K. Asakawa, "A Prototype of Neuro-Fuzzy Cooperation System," IEEE, International Conference on Fuzzy System(Sandiego), pp. 1275-1282, 1992.