

α -레벨집합 분해에 의한 서보제어용 퍼지추론 하드웨어의 구현

홍순일, 이요섭, 최재용
부경대학교 전기공학과

Implement of Fuzzy Inference Hardware for Servo Control Using α -level Set Decomposition

Soon-ill Hong, Yo-seob Lee, Jae-yong Choi
Pukung University

ABSTRACT

As the fuzzy control is applied to servo system, the hardware implementation of the fuzzy information systems requires the high speed operations, short real time control and the small size systems. The aims of this study is to develop hardware of the fuzzy information systems to be apply to servo system.

In this paper, we propose a calculation method of approximate reasoning for fuzzy control based on α -level set decomposition of fuzzy sets by quantize α -cuts. This method can be easily implemented with analog hardware. The influence of quantization levels of α -cuts on output from fuzzy inference engine is investigated. It is concluded that 4 quantization levels give sufficient result for fuzzy control performance of dc servo system.

It examined useful with experiment for dc servo system.

Key-word : α -level set decomposition, quantization levels of α -cuts

1. 서 론

퍼지추론 연산은 컴퓨터로 소프트웨어적으로 행하는 경우가 많고 또한 연산시간이 소요되므로 서보계 등 응답속도가 빠른 것을 대상으로 한 시스템에는 적절하지 않다. 따라서 퍼지제어기를 하드웨어적으로 실현할 필요가 있다.

본 연구는 α -레벨 집합의 분해 원리에 기초하여 α -컷 양자화에 따라 퍼지추론의 방법을 나타내었다. 이 방법은 퍼지제어기의 아날로그 하드웨어화에 그 구성을 쉽게 행할 수 있음을 나타내었다. 서보계의 시뮬레이션으로 α -컷 양자화에 따른 퍼지추론 영향을 평가하였

고 α -컷 4단계에서 DC 서보시스템의 퍼지제어에 양호한 결과를 얻었다.

2. α -레벨 집합에 의한 퍼지제어 계산

2.1 α -컷 분해에 의한 퍼지추론

퍼지제어는 오차 e 와 오차 변화분 Δe 의 입력에서 제어규칙에 기초하여 퍼지추론하고 추론 결과의 퍼지집합을 비퍼지화하여 확정값을 출력한다. 제어규칙은 n 개라 하면 다음과 같이 추론한다.

$$R_i : \text{if } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } u \text{ is } C_i$$

단, $i = 1 \dots n$ 이고 A_i, B_i, C_i 는 퍼지 라벨이며 퍼지집합을 나타낸다.

추론방법은 $\min \cdot \min \cdot \max$ 중심법을 취한다. 퍼지추론의 α -레벨 집합에 의한 표현은 上原[2]이 퍼지관계를 하드웨어화의 적용에서 비퍼지화까지 통일적으로 연산하는 것을 생각하여 구체적인 계산식을 나타낸다.

퍼지집합 F 의 α -레벨 집합 F_α 는 식(1)으로 정의되고 α -컷집합이라 한다.

$$F_\alpha = \{x \mid \mu_F(x) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1] \quad (1)$$

여기서, $0 < \alpha < 1$ 이고 F_α 는 모든 α 를 이용하여 분해원리로 나타낼 수 있다.

$\min \cdot \min \cdot \max$ 법에 의한 추론계산은 식(2)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \mu_{C'}(u) &= \bigvee_{i=1}^n [\mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e)] \wedge \mu_{C_i}(u) \\ &= \bigvee_{i=1}^n \mu_{C_i'}(u) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, μ_C 는 퍼지집합 C의 소속함수, C_i' 는 각 제어규칙의 추론결과 퍼지집합이고 C' 는 최종 추론결과 퍼지집합을 나타낸다.

퍼지제어기의 입력변수는 오차e와 오차변화분 Δe 이고 각 규칙의 추론결과 $C_i\alpha'$ 는 제어규칙 수를 m, α -컷 양자화수를 n($i = 1, 2, \dots, m, \alpha = 1, 2, \dots, n$)라 하면 식 (3)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_i\alpha' &= \{u \mid [\mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e)] \wedge \mu_{C_i}(u) \geq \alpha\} \\ &= \begin{cases} C_i\alpha' & \mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e) \geq \alpha \\ \emptyset & \text{otherwise} \end{cases} \\ &= \begin{cases} C_i\alpha' & e \in A_i\alpha \text{ and } \Delta e \in B_i\alpha \\ \emptyset & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 비퍼지화 회로

중심법에 의한 출력 퍼지집합 C'의 중심값은 식 (4)과 같이 된다.

$$u = \frac{\int \mu_{C'}(u)u du}{\int \mu_{C'}(u) du} \quad (4)$$

이 중심의 계산은 Fig. 1과 같이 2차원적으로 생각하여 적분순서를 교환하고 α -컷집합을 이용하여 나타내면 식 (5)과 같다.

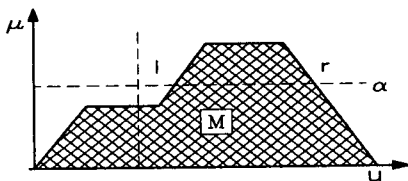


그림 1 비퍼지화 적분범위

Fig. 1 Region of integral range for defuzzification.

$$u = \frac{\int_0^1 \frac{1}{2}(r_a^2 - l_a^2) da}{\int_0^1 (r_a - l_a) da} = \frac{\int_0^1 (w_a g_a) da}{\int_0^1 w_a da} \quad (5)$$

단, l_a, r_a 는 후건부 퍼지집합의 좌단과 우단이다.

3. α -레벨 양자화 영향에 대한 평가

시뮬레이션에 사용한 제어규칙은 Table 1과 같고 입력은 5명제, 출력은 7명제로 하여 25개의 제어규칙으로 라벨로 구성하였으며 소속함수는 Fig. 2에 표시한 삼각형법으로 하고 K_1, K_2 및 K_0 는 입력과 출력의 스텔링 팩터이다.

Table 1 Control rules

표 1 제어규칙

| | | Δe | | | | |
|---|----|------------|----|----|----|----|
| | | NB | NS | ZE | PS | PB |
| e | NB | NB | | | | |
| | NS | PM | ZE | NS | NM | NB |
| | ZE | PB | PS | ZE | NS | NB |
| | PS | PB | PM | PS | ZE | PB |
| | PB | PB | | | | |

여기서, NB: Negative Big, NS: Negative Small, NM : Negative Middle, ZE: Zero

PB: Positive Big, PS: Positive Small, PM: Positive Middle.

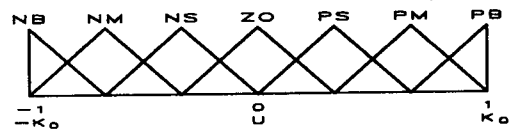
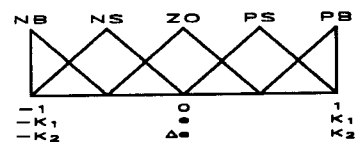


그림 2 소속함수

Fig. 2 Membership functions.

(Upper : conditional part, Down: Consequential part)

3.1 시뮬레이션에 의한 퍼지제어기의 입출력과 응답특성

Fig. 3은 α -레벨 단계를 각각 1, 4로 양자화한 경우 시뮬레이션에 의한 입출력 관계를 나타낸다. 그리고 시뮬레이션에 사용한 스케일링 팩터는 $K_1 = 5.0$, $K_2 = 1.0$, $K_0 = 15.0$ 이고 제어규칙은 표 1을 이용하며 소속함수는 그림2에 나타낸 삼각형법을 이용한다.

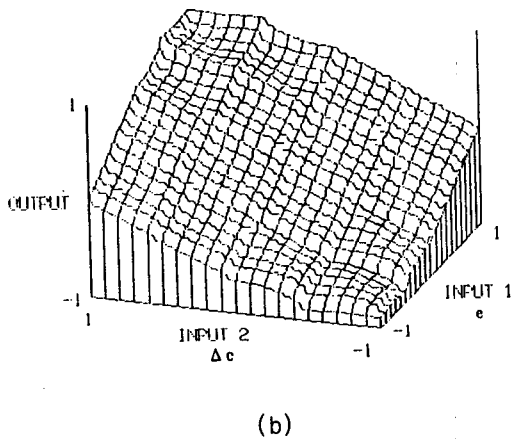
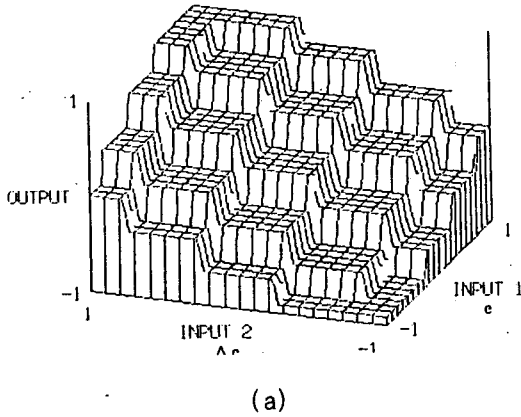


그림 3 양자화수에 따른 제어기 입출력관계
Fig. 3 Input-output characteristics by quantize

Fig. 3(a)의 양자화 1단계는 후건부의 각 소속함수가 중첩되지 않는 크리스프 집합으로 추론하는 것과 등가로 된다.

(b)는 양자화수 4단계에서 입출력관계를 나타낸 것으로 이와 같이 분해수를 증가하면 추론결과는 계단상의 폭이 좁게 되고 연속한 경사면상의 형상이 선형에 가깝게 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 양자화의 영향은 α -컷 4단계 이상에서 출력이 평탄한 부분이 많고 입출력 특성의 선형성은 α -컷 단계가 높을수록 좋아지는 것으로 생각된다. Fig. 4는 표1의 제어규칙과 Fig. 3의 소속함수로서 α -레벨 양자화를 변화하여 추론연산을 서보계에 적용한 경우의 스텝응답을 시뮬레이션으로 나

타낸 것이다. α -컷 분해의 수는 적어도 4단 이상이 필요하다는 것을 알 수 있다.

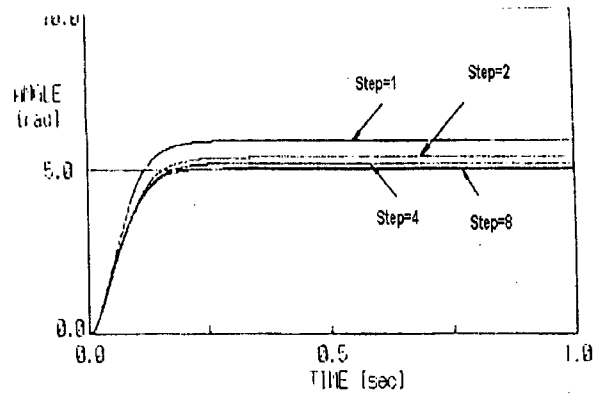


그림 4 α -컷 단계에 따른 시뮬레이션 응답
Fig. 4 Step responses for fuzzy controller as parameter α -cut

4. α -레벨 퍼지제어기의 하드웨어실현

Fig. 6은 시뮬레이션으로 검토한 결과에 기초하여 퍼지추론에서 비퍼지화까지 직접 PWM신호를 출력하는 퍼지제어기의 하드웨어 구성도를 나타낸다. 퍼지제어기는 크게 나누어서 입력부, 추론부 및 비퍼지화부로 구성되고, 비퍼지화부에는 제어기의 출력을 얻기 위한 PWM 신호발생부도 포함된다.

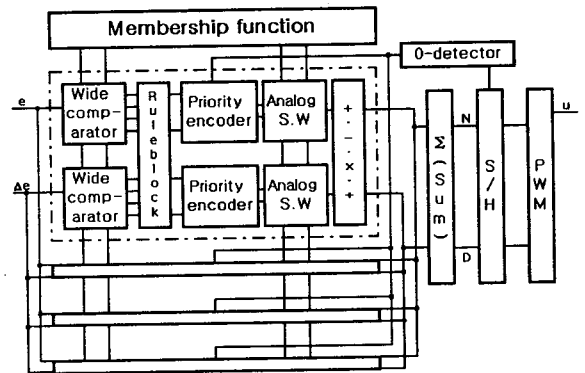


그림 5 퍼지제어기의 하드웨어 구성
Fig. 5 Hardware configuration of fuzzy controller

4.3 제작한 퍼지제어기에 의한 실험

Fig. 7은 퍼지제어에 의한 직류 서보전동기의 위치제어 시스템을 나타내고 전동기 정수 $K_m = 10.0[\text{rad/sec}]$, $T_m = 0.04[\text{sec}]$ 이다.

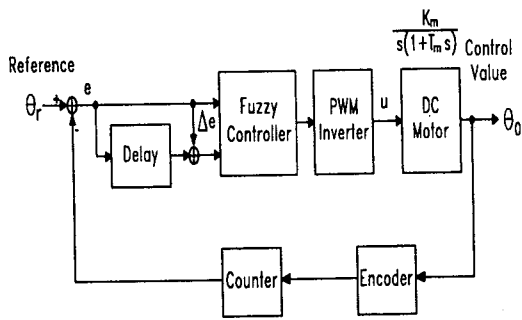


그림 6 퍼지제어기에 의한 서보시스템
Fig. 6 Scheme of servo control system with fuzzy controller

Fig. 7은 제작한 퍼지제어기의 입출력 특성을 나타내고 시뮬레이션에서 얻은 결과 Fig. 3(b)와 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 시뮬레이션 실험에서 결정한 α -컷 단계 4가 적절하게 선정되었다고 생각된다.

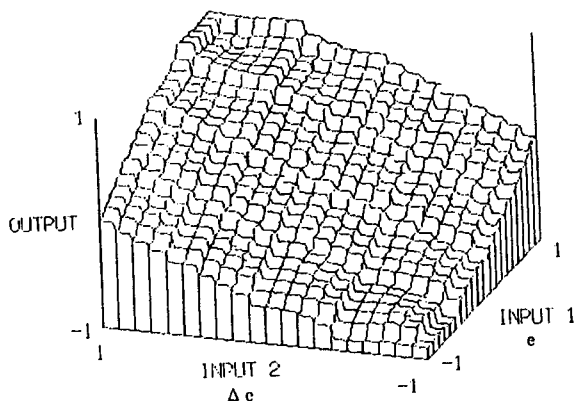


그림 7 제작한 퍼지제어기의 입출력관계
Fig. 7 Input-output characteristics of fuzzy controller

Fig. 8은 하드웨어화 하여 제작한 퍼지제어기로 위치 제어한 스텝응답의 제어결과를 나타낸다. 본 시험장치에서는 α -컷은 4단계로 취급하였으며 각 단계별로 회로 기판을 제작하여 쉽게 뽑고 끼울 수 있도록 하였다.

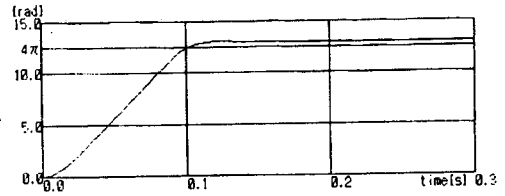


그림 8. 퍼지제어기에 의한 실험 결과
Fig. 8 Result of control experiment of the fuzzy controller

5. 결 론

퍼지제어기 설계에서 퍼지추론은 $\min \cdot \min \cdot \max$ 법에 의해 간단히 하드웨어를 실현할 수 있는 구체적인 계산식 (3)을 도출하였다. 비퍼지화는 중심법을 이용하여 식 (5)과 같이 도출하여 나눗셈을 행하지 않고 직접 PWM 조작신호를 얻는 방법을 제안하였다.

필요한 소속함수의 분할수는 시뮬레이션을 통하여 검토한 결과 비교적 적은 분할수에서 적절한 제어결과가 얻어짐을 알 수 있었다. α -컷 4단계 분할을 이용한 연산회로를 사용하여 아날로그회로에 의해 퍼지제어기를 설계 제작하였다. α -컷 분해에 의한 연산법을 비퍼지화회로에 이용하여 PWM회로와 일체화한 아날로그회로로 실현하고 실험을 통하여 동작을 확인하였다. 퍼지제어기를 아날로그회로로 실현하면 거의 대부분의 제어규칙 내에서 직접응용 가능하게 된다.

参 考 文 献

- [1] 홍순일, 노창주 "서보제어계 설계 지원을 위한 퍼지추론 TOOL의 개발", 한국 박용기관학회 논문지, Vol. 19, no. 4, pp. 370~376, 1995.
- [2] 홍순일, "Development of Fuzzy Reasoning Tool for the Application of Servo System", 전력기술 기초연구 논문집(EESRI), Vol. 1, No. 2, 93-30, pp. 105~108, 1993.
- [3] 上原 "Analog/membership grade 變換機能お有する ファジイ推論 Engine", 情報處理學會 研究報告, 88-AI-60-4, 1990.
- [4] T. Yamakawa and T. Miki, "The Current Mode Fuzzy Logic Integrated by the standard CMOS Process", IEEE, Trans. on Computer, Vol. C5-2, pp. 161~167, 1986.
- [5] T. Yamakawa, "High-Speed Fuzzy Controller Hardware System", 제 2회 ファジイ シンポジウム講演論文集, pp. 122~130, 1986.
- [6] Isao Takahashi et al., "A Simple Positioning Servo System by Breaking Control," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 28, No. 6, pp. 1314~1321, 1992.