한국공작기계학회 2001년도 추계학술대회 논문집 pp.80~84

스케일링 계수를 자동조정하는 퍼지 제어기 설계 및 구현
Design and Implementation of Fuzzy Regulator with The Automatic Adjustment of Scaling factor

이상윤*, 한성현*, 신위재**
*경남대학교 기계자동화공학부, **경남대학교 전기전자공학부

Abstract

When the fuzzy controller apply to a real plant, We have not excepted result of a satisfactory control by modeling error and lacking information about an plant. In this case, we have to adjust the control factors for improvement of the control performance and this method need a lot of time and cost for perform a trial and error.

In this paper, we proposed the fuzzy regulator with the automatic adjustment of scaling factors. It was improve upon the control performance using a adequate scale factor by fuzzy inference.

We implemented the controller using the DSP processor and applied in a hydraulic servo system. And then we observed an experimental results.

Ⅰ. 서론

퍼지제어기는 제어대상에 대한 작업자의 경험이나 전문가의 언어적인 표현을 쉽게 제어기와 결합시킬 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 플랜트 파라미터 변동이나 외부 외란에 크게 영향을 받지 않는 강인한 제어기의 특성도 지니고 있다.[1] 이러한 퍼지제어기의 성능은 입출력 변수의 스케일링 계수(Scaling factors), 소속함수의 모양, 제어규칙에 의해 영향을 받는다. 이들 제어인자들은 작업자의 경험이나 설계자의 플랜트에 대한 지식으로부터 결정되며 시행착오와 경험적으로 선택되었다.[2][3] 경험이나 시행착오에 의한 설계방법은 어느 정도 양호한 제어 결과를 얻을 수 있지만, 그 제어 시스템에 최적이라고 보장할 수 없을 뿐만 아니라 이런 설계 방법은 많은 시간, 노력과 비용이 드는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 퍼지논리를 사용하여 플랜트 응답에 따라 적절한 스케일링 계수를 결정하는 스케일링 계수 자동조정하는 퍼지 제어기를 설계한다. 설정치에 따라 스케일 계수의 출력 범위는 재조정되고, 오차와 오차 변화량을 입력으로 퍼지 레귤레이터는 플랜트 응답에 따라 스케일링 계수를 결정하게 된다. 구해진 스케일링 계수에 의해 퍼지제어기의 출력은 재조정되어 적절한 제어입력을 결정하게 된다. 이를 확인하기 위해 유압 서보시스템을 대상으로 DSP 프로세서를 사용하여 구현한 후 실험결과를 관찰하였다.

Ⅱ. 퍼지제어기[3][4]

그림 1은 본 연구에서 사용한 퍼지 제어시스템 구조를 나타내고 있다. 설정치 $r(k)$와 플랜트 출력사이의 오차 $e(k)$와 오차 변화량 $\Delta e(k)$을 입력변수로 하여 퍼지제어기 출력의 변화량 $\Delta u(k)$을 결정한다. 실제 플랜트 제어입력 $u(k)$은 과거의 제어입력 $u(k-1)$과 제어입력 변화량 $\Delta u(k)$의 합으로 이루어진다.

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

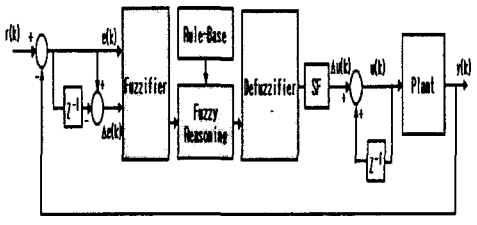

그림 2. 퍼지 제어시스템 구조

여기서 $r(k)$, $y(k)$는 각각 기준 설정치와 플랜트

출력을 나타낸다.

입력변수인 오차와 오차 변화량에 대한 퍼지집합과 언어변수는 "NB", "NMB", "NM", "NMS", "NS", "NVS", "ZE", "PVS", "PS", "PMS", "PM", "PMB", "PB"로 각각 13개씩 정하였다. 입출력 변수들의 언어값의 종류는 제어규칙의 수와 제어기 성능에 큰 영향을 미친다. 언어값의 수가 많으면 제어성능을 향상시킬 수 있으나 제어기의 계산량이 많아지는 단점이다.

소속함수의 모양은 여러 가지 형태를 생각할 수 있으나 그림 2, 3과 같은 종형 소속함수를 사용하였다. 이와 같이 정의된 입력변수와 출력변수의 퍼지집합을 이용하여 표1과 같은 제어규칙을 작성하였다.

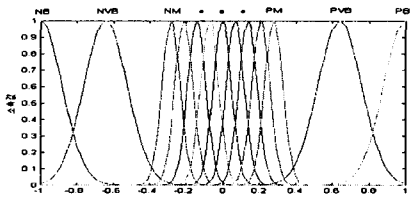

그림 2. $e(k)$와 $\Delta e(k)$에 대한 소속함수

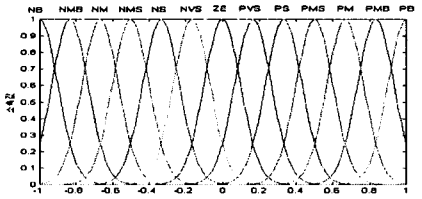

그림 3. $\Delta u(k)$에 대한 소속함수

표 1. 퍼지제어기의 제어규칙

E / ΔE	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE
NMB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS
NM	NB	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS
NMS	NB	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS
NS	NB	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM
NVS	NB	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB
ZE	NB	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB
PVS	NMB	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB
PS	NM	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB
PMS	NMS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB
PM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB
PMB	NVS	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PVS	PS	PMS	PM	PMB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

퍼지 추론과 비퍼지화 방법에는 다양한 방법이 있지만, 본 논문에서는 그림 4와 같은 퍼지추론과 비퍼지화를 사용하였으며 스케일링 계수 SF를 고려한 $\Delta u(k)$는 식(4)와 같다.

$$\Delta u = SF \times y \tag{4}$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{m} \tau_i y^*_i}{\sum_{i=1}^{m} \tau_i} = \frac{\sum_{i=1}^{m} y^*_i \left[\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{i=1}^{m} \left[\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - x_{ij}^*}{\sigma_{ij}} \right)^2 \right) \right]} = \sum_{i=1}^{m} v_i y^*_i \tag{5}$$

여기서, x_{ij}^*, σ_{ij}, y^*_i는 각각 가우스 함수의 중심, 가우스 함수의 폭, 결론부 퍼지집합의 비퍼지화된 값을 나타낸다. 식(4)을 이용하여 식(3)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + SF \times y \tag{6}$$

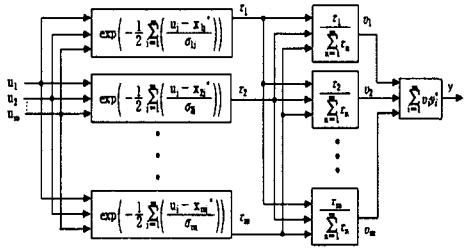

그림 5. 퍼지추론과 비퍼지화

그림 5와 표 2는 각각 스케일링 계수에 따른 플랜트 응답과 성능 비교표를 나타내었다. 스케일 계수가 0.175일 때 작은 최대오버슈트와 빠른 정정시간을 가지게 되고 0.5일 때는 지연시간과 상승시간은 빠르지만 높은 최대오버슈트와 느린 정정시간을 가지게 된다. 그리고 0.05일 때는 매우 느린 지연시간과 상승시간, 정정시간을 갖지만 오버슈트가 발생하지 않는다. 스케일 계수가 너무 크다면 큰 최대 오버슈트을 가지면서 진동하게 된다. 너무 작다면 긴 지연시간과 상승시간으로 인해 주어진 시간내에 수렴하지 못한다.

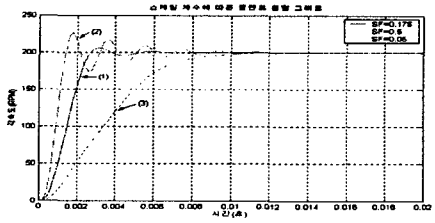

그림 6. 스케일 계수에 따른 플랜트 응답 (200rpm)

표 2. 스케일 계수에 따른 성능 비교

특성 / SF	지연시간	상승시간	정정시간	최대 오버슈트
0.05	3.387 ms	5.322 ms	7.560 ms	없음
0.175	1.476 ms	1.641 ms	2.491 ms	3.06 %
0.5	0.905 ms	0.787 ms	4.802 ms	13.3 %

Ⅲ. 스케일링 계수를 자동조정하는 퍼지 제어기 설계

스케일 계수 퍼지 레귤레이터는 오차 $e_{sf}(k)$와 오차 변화량 $\Delta e_{sf}(k)$을 입력변수로 하고 스케일 계수 $SF(k)$을 출력 변수로 한다.

$$e_{sf}(k) = |e(k)| \tag{7}$$

$$\Delta e_{sf}(k) = e_{sf}(k) - e_{sf}(k-1) \tag{8}$$

표 3. 단어집합과 언어변수

매우 작다.	작다	작지는 않다	중간보다는 작다	중간이다.	중간보다는 크다	크지는 않다.	크다.	매우 크다.
VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB

표 4. 스케일링 계수 퍼지 레귤레이터의 제어규칙

E_{sf} / ΔE_{sf}	VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB
VS	VS	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB
S	S	NS	SM	M	BM	NB	B	VB	VB
NS	NS	SM	M	BM	NB	B	VB	VB	VB
SM	SM	M	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB
M	M	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB
BM	BM	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB
NB	NB	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
B	B	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB
VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB	VB

언어변수와 단어 집합은 표 3과 같으며, $e_{sf}(k)$와 $\Delta e_{sf}(k)$, $SF(k)$ 소속함수는 각각 그림 6, 7과 같다. 그리고 제어규칙은 표 4와 같으며 퍼지추론과 비퍼지화 과정은 그림 4와 같다.

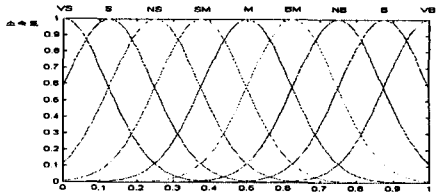

그림 7. $e_{sf}(k)$와 $\Delta e_{sf}(k)$ 소속함수

$$M = \frac{r(k)}{R_I} M_I \tag{9}$$

여기서, R_I, M_I는 각각 초기 설정치와 그때의 $SF(k)$에 대한 대집합 최대값을 나타낸다.

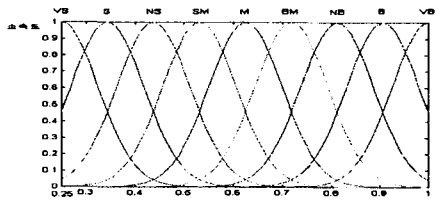

그림 8. SF(k) 소속함수

스케일링 계수 퍼지 레귤레이터는 첫 번째 오버슈트가 발생할 때까지만 동작하여 스케일 계수를 조정하게 된다. 이는 정상상태에 도달할수록 스케일링 계수가 줄어듬으로 인해 $\Delta u(k)$가 더욱 작아져 수렴시간이 길어지는 현상이 발생할 수 있기 때문에 계수를 고정시킬 필요가 있다.

Ⅳ. 실험 및 결과고찰

본 논문에서 제안한 신경망과 퍼지보상기를 이용한 속도제어기의 성능을 확인하기 위하여 비선형 유압 서보시스템에 적용하여 그 성능을 확인한다.

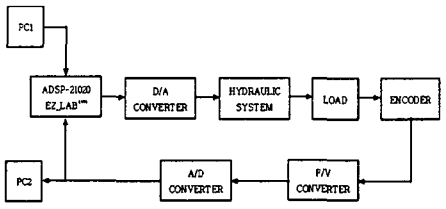

그림 8. 유압 서보 시스템 실험 구성도

그림 8은 DSP 프로세서로 유압 서보모터의 속

도제어를 하기 위한 전체 실험장치의 구성도이다.[8]

PC1은 ADSP-21020 계열 개발 소프트웨어를 사용하여 C 언어로 작성하고 제안한 알고리즘을 DSP 어셈블리 언어로 번역한 뒤 실행 파일을 생성시켜 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 RS-232 통신 방식으로 다운로딩(Down loading)하여 알고리즘을 수행한다.

유압 서보시스템은 유압모터와 직접구동 밸브(Direct Drive valve), 관성부하로 이루어진다. 유압 서보시스템에서 제어기의 제어 입력 신호를 D/A 변환기를 사용하여 아날로그 전압으로 바꾼 다음 직접구동 밸브에 인가한다. 직접구동 밸브는 서보 증폭기를 내장하고 있는 일체형으로 직접구동 밸브의 구동신호(제어입력)는 ±10V로 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드에 D/A 변환기를 연결하여 생성하며 직접구동 밸브의 A, B 포트는 유압모터의 포트로 연결되고 유압모터의 축은 커플링을 통해 관성부하를 연결하는 축에 결합된다. 밸브에 의해 제어된 유량은 유압모터로 공급되고 공급된 유량에 비례하여 회전력을 발생시킨다. 관성부하를 고정하는 축은 다시 커플링을 통하여 증분 광부호기로 연결된다. 증분 광부호기는 유압모터의 회전수를 감지하는 부분으로 F/V 변환기를 사용하여 유압모터의 회전수를 전압신호로 변환하고, 변환된 신호는 A/D 변환기를 통과하여 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 연결된다.

PC2는 A/D 변환 카드(Lab-PC-1200/AI)로 실험결과를 기록한다.

부하는 프라이 휠(Fly wheel) 형태의 회전 관성부하 48.836 kg/㎠을 사용하였고 유압모터의 축에 스프링 커플러를 연결하여 사용하였다. 유압 서보시스템 실험장치는 서보밸브를 100% 열고 유압펌프의 압력을 최대로 하면 222[rpm]으로 모터가 회전하지만, 실험은 설정치가 200[rpm]일 때 80[kg/㎠]의 유압을 유지하여 수행하였다. 이상의 실험 결과는 표 7에서 비교 검토하였다.

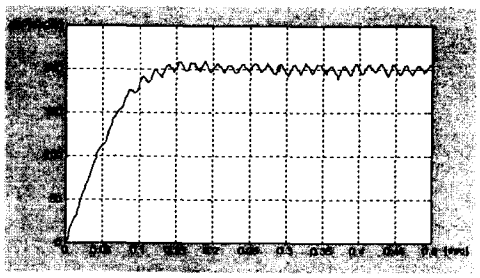

그림 10. 설정치 200rpm일 때 퍼지제어기

표 5. 제어기 응답특성 비교

특성 / 제어기	지연시간	상승시간	정정시간
퍼지제어기	41.5ms	92.1ms	112ms
제안한 퍼지제어기	38.6ms	74ms	81ms

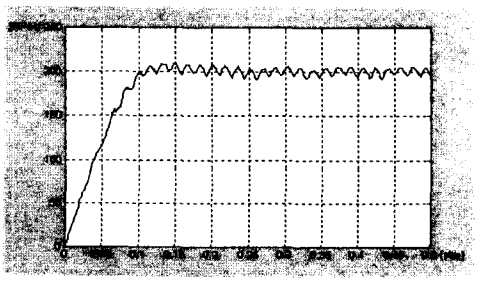

그림 11. 200rpm일 때의 스케일링 계수를 자동조정하는 퍼지 제어기

스케일링 계수를 고정했을 때보다 지연시간이 2.9ms, 상승시간이 18.1ms 더 빠른 것으로 나타났고 이로 인해 수렴시간 역시 31ms 더 빠른 것으로 나타났다. 그리고 정상상태 오차는 퍼지제어기가 +4.8444~-15.5556 rpm 이고, 제안한 제어기는 +9.8663~-4.6667rpm으로 진동을 한다.

리플이 주기적으로 좀 더 크게 나타나는 것은 스프링 커플러에 의한 것이고, 큰 리플 속에 포함된 작은 리플은 제어기에서 디지털 회로가 동작할 때 나타나는 스위칭 잡음으로서 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드가 제어 알고리즘을 수행할 때 DSP 프로세서에 의해서 유도되는 잡음이다. 필요한 노이즈 대책을 적용하여 잡음을 많이 제거하였기 때문에 측정 데이터를 확대하여 보면 A/D 변환시 발생하는 양자화 잡음으로 생각해도 무방하다.

V. 결론

스케일링을 자동조정하는 퍼지 제어기가 스케일 계수를 고정하여 사용하는 퍼지제어기보다 지연시간, 상승시간, 정정시간, 최대오버슈트 모두 우수한 성능을 나타내는 것을 비선형 유압 서보 시스템에 실험을 통하여 확인하였다. 앞으로의 연구과제는 정상상태에 도달했을 때 나타나는 진동을 어떻게 제어할 수 있을 것인가 이다.

VI. 참고문헌

[1] E.H.Mamdani, "Twenty years of fuzzy control : Experiences gained and lessons learnt", proc. 2nd IEEE Int. Conf. fuzzy systems, San Francisco, CA, pp339-344, 1993

[2] M. Braae and D.A.Rutherford, "Selection of parameters for a fuzzy logic controller", Fuzzy sets and systems, Vol.2, pp.185-199, 1979

[3] Kevin M.Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison-Wesley, Inc. pp.21-85, 1998

[4] Ronald R.Yager, Dimitar P.Filev, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control", John Wiley & Sons, Inc. pp.109-238, 1994

[5] 이상윤, "지능구조를 갖는 궤환제어기 설계에 관한 연구", 박사학위논문, 경남대학교 대학원 전자공학과, 1998