

기준모델 추종 퍼지 제어기의 파라미터 자동 동조

노청민^{*)}, 서승현^{*}, 고봉운^{**}, 남문현^{*}

건국대학교 전기공학과

The Parameter Auto-tuning of the Reference Model Following Fuzzy Logic Controller

Chung-Min Roh^{*)}, Seung-Hyun Suh^{*}, Bong-Woon Ko^{**}, Moon-Hyon Nam^{*}

*Dept. of Electrical Engineering, Kon-Kuk University, **Dept. of Electrical Cheju Junior College.

Abstract

In this paper, each parameter was identified by the gradient descent method to overcome difficulty deciding fuzzy rules of FLC for the unknown process and the type of membership functions.

Usually PID or optimal control theories have been mostly used in control field so far. However, optimal control requires much time for calculation because of adaptation for disturbance and nonlinearity. And intricate technique such as MRAS which can be realized only by an expert are limited to be used in the systems requiring rapid and precise response because of comparatively longer calculating time and complicateness.

Gradient descent method is a method to find Z minimizing a function about a certain vector Z. And required output of FLC is gained using gradient approaching method in order to adapt control rule parameters of FLC. Simulation proved validation of this algorithm.

1. 서론

퍼지 제어기(Fuzzy Logic Controller, FLC)는 사람의 주관울 표현하는 것이 쉽기 때문에 숙련자의 지식을 자연스럽게 표현하는 것이 가능하고, 지식의 병렬처리가 가능하기 때문에 부분적인 지식의 집합으로 표현하는 것이 가능하며, 비선형 제어계를 용이하게 구축할 수 있다는 특징이 있다.[3] 따라서 퍼지 제어기는 구조적으로 전혀 알려지지 않았거나, 일부의 정보만을 알고 있는 플랜트의 제어에 적당한 제어기이다. 이러한 시스템들에 대해 FLC를 적용한 것이 기존의 방법으로 설계된 제어기들보다 더 좋은 성능을 나타낸다.[1] 그러나 많은 매개변수로 구성 되어야 하는 퍼지 제어기는 설계를 위한 체계적인 방법론이 제시되지 않아서 때로는 희망하는 성능에 도달하기까지 수많은 시행착오를 거쳐야 되는 어려움이 따르게 된다. 특히 제어규칙과 입·출력 이득은 제어성능에 가장 큰 영향을 주는 요소로서 입·출력 이득의 수정은 적절한 제어규칙의 구축이 선행되어야 한다.[2] 제어규칙은 전문가의 지식과 고전적인 제어전략을 기초로 IF-THEN 형태의 규칙기반으로 표시된 언어적 규칙들로 정의된다.[4] 퍼지논리를 사용함으로써 제어규칙은 수학적인 형태로 처리될 수 있으며, 만약 언어적 규칙이 알려졌다면 합리라도 제어기술자는 여전히 퍼지 집합의 수, 소속함수와 정규화 factor(후에 적용영역을 정규화된 폐구간 [-1,1]으로 변경시키는 값)를 선택해야만 된다.

FLC 파라미터의 적용은 다음과 같은 이점을 갖는다. 첫 번째, 불합리하게 선택된 FLC의 파라미터들은 더 좋은 성능을 산출하

기 위하여 변화된다. 두번째, 외란이나 프로세서의 동특성 변화 시 조절 메카니즘은 FLC의 특성을 변화시킨다. 세 번째, 제어기는 비선형 시스템의 다른 동작점을 조절할 수 있다. 네 번째, 자기 구성 FLC를 갖는 적응 메카니즘의 조합은 제어기의 완전한 자동 튜닝의 결과를 가져올 수 있다[2].

MRAS는 고전 제어기들을 적용시키는 잘 알려진 접근법이다. MRAS는 플랜트와 제어기로 구성된 내부 피드백 루프와 제어기의 파라미터들을 조절하는 외부 루프로 구성된다[2][8]. 플랜트의 출력과 요구 성능을 나타내는 기준모델 사이의 차이는 조절 메카니즘의 입력이다. 이러한 조절 알고리즘에 대한 전제조건은 시스템 구조에 대한 지식이며 지배적인 플랜트 동특성의 분석적 표현은 필수적이다. 제어기의 파라미터들을 변화시킴으로써 시스템과 기준모델의 출력들 사이의 차이는 영으로 같게 만들어지며 이것은 모델 추종 문제로 언급된다.

본 논문은 기본적인 Robust fuzzy controller 출력 조절을 위한 Model Reference-Based Fuzzy Tunning 알고리즘으로 구성된 적응 퍼지 제어기를 제안하였다. 제안된 적응 제어 기법은 퍼지 제어기 출력의 값을 조정하는 이득 계수의 동조를 위한 알고리즘과 전건부의 소속 함수와 추론 규칙 결론부의 실수값들이 Descence Method에 의해 동조되는 알고리즘을 포함한다. FLC는 분석적으로 알려지지 않은 플랜트에 대해 전문가나 작동자 지식을 사용함으로써 설계되어졌다고 가정한다. 제안된 적응 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 제어대상으로는 3차 선형 시불변 함수 $G_1(s)$, 불안정한 2차 발산시스템 $G_2(s)$ 을 설정하여 시뮬레이션 하였으며, 외란에 대한 동조 성능도 평가하였다.

서로 다른 특성의 2차 및 고차의 선형 플랜트에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고 설정치와 플랜트 동특성의 변화 및 부하 외란에 대한 적응 법칙과 제어 성능을 기존의 퍼지 제어기와 비교하여 평가하였다.

II. 모델기준 적응 퍼지 제어기

1) 퍼지 제어기(FLC)

입력변수로는 오차와 오차의 변화율을 사용하고, 출력변수는 singleton형태를 취한다.

일반적으로 입력을 x_1, x_2, \dots, x_n 이라 표현하고, 출력을 y 라고 표현할 때 퍼지추론의 추론규칙은 식(2.1)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{1n}, \\ & \text{THEN } y \text{ is } w_i, (i=1, \dots, n) \end{aligned} \tag{2.1}$$

이 때, i 는 규칙의 숫자이고, A_{11}, \dots, A_{nm} 는 전건부의 소속함수들이고, w_i 는 후건부의 언어변수이다.

퍼지추론 방법으로는 비교적 연산속도가 빠르고 계산과정이 간단한 단순 퍼지추론 방식을, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 채택하였고, 이를 수식으로 표현하면 식(2.2), (2.3)와 같다.

$$\mu_i = A_{i1}(x_1) \cdot \dots \cdot A_{im}(x_m) \quad (2.2)$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^m A_{ij}) \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^m A_{ij})} \quad (2.3)$$

이 때 μ 는 전건부의 소속값이다.

그리고, 일반적으로 퍼지 변수의 수는 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB의 7개이지만, Medium을 생략하여 5개로 하는 경우도 있다. 수를 줄이면 퍼지제어 규칙의 전건부의 조합수가 줄어들기 때문에 규칙수도 적게 되고, 전체로서 대략적인 제어 알고리즘으로 된다. 멤버십 함수는 초기에 범중형을 이용하기도 했지만 최근에는 거의가 삼각형이 사용되고 있다. 이것은 삼각형 쪽의 계산이 편하고, 성능에 있어서 거의 차이가 없기 때문이다.[4]

2) 모델기준 적응 퍼지 제어기

2-1) 평가 함수

경사법(Gradient descent method)은 어떠한 벡터 Z 에 관한 함수 $E(Z)$ 가 있을 때 함수 $E(Z)$ 를 최소화시키는 Z 를 찾는 방법으로, 이때 Z 는 $E(Z)$ 를 감소시키는 방향으로 식(3.5)에 의해 조정된다.

$$z_i(t+1) = z_i(t) - K \cdot \frac{\partial E}{\partial z_i} \quad (i = 1, \dots, p) \quad (2.4)$$

이 때, t 는 조정반복횟수이고, K 는 적응 이득을 나타내는 상수이다.

본 논문에서 사용된 평가함수는 요구되는 출력 y' 과 실제의 출력 y 간의 오차에 관한 함수식으로서 식(2.4)와 같이 정의하고, 이것이 각 소속함수에 대한 식(2.5)의 방법으로 그림 3.4에서 보듯이 설계자가 원하는 정도의 값(C)이하로 최소화되도록 하는 방법을 제시한다.

$$E = \frac{1}{2} \cdot (y - y')^2 \leq C \quad (2.5)$$

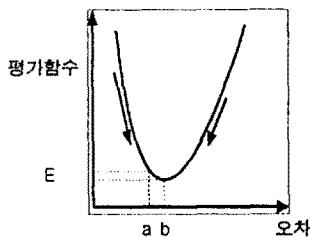


그림 2.1 평가함수와 오차와의 관계 (a-b:허용오차, b:최적점)

2-2) 동조 알고리즘

단순 퍼지제어기의 제어규칙은 설정치에 도달할 때까지의 모든 가능한 상태를 고려하여 적절한 제어입력을 발생하도록 구성되어 있다. 그러나 고정적으로 설정된 매개변수들을 가진 제어기의 구조로는 주위환경이 변화에 따라 제어가 곤란한 경우가 발생할 수 있다. 이를 보완하기 위하여 퍼지제어기에 학습능력을 부여하여 자동으로 소속함수의 모양 및 제어 규칙과 이득 계수를 조정하는 알고리즘을 도입한다.

본 논문에서 사용한 전건부의 소속함수를 A_i 라고 할 때, 그림 2.2에서 보듯이 소속함수를 결정짓는 매개변수들은 꼭지점의 위치값 a_{ij} 와 밑변의 폭 b_{ij} 에 의해 정의되므로, A_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

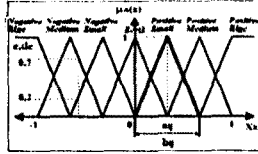


그림 2.2 전건부 소속함수

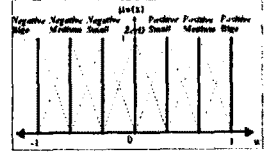


그림 2.3 후건부 소속함수

$$A_{ij}(x_j) = 1 - \frac{2 \cdot |x_j - a_{ij}|}{b_{ij}} \quad (2.6)$$

언어적 레이블의 개수는 제한이 없으나 언어가 갖는 특성을 살릴 수 있도록 적은 수의 레이블로 많은 데이터를 함축적으로 표현할 수 있도록, 시스템이 갖는 특성에 따라서 적절한 수의 레이블을 상호 간의 관계를 고려해서 선정한다. 다시 말하면, 그림 2.2에서 데이터 x_k 는 속성 E에 대해서 언어적 레이블 NS과는 그레이드 0.2의 관련성 있고, 언어적 레이블 NM과는 0.7의 관련이 있다. 이와 같이, 각각의 데이터는 복수 개의 레이블과 관련이 있을 수 있으므로, 각각의 레이블(NB, NM, ..., PB)의 배치는 서로간의 관계를 고려해서 경험적인 지식을 이용하여 결정한다.

평가함수 E 는 조정매개변수 a_i, b_i, w_i ($i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$)로 이루어진다. 그러므로, 제시하고자 하는 방법은 평가함수 $E(Z)$ 를 최소화시키는 벡터 Z , 즉 최적의 벡터 Z 에 의해 경사법에 적용할 수 있고 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(z_1, z_2, \dots, z_p) = (a_{11}, \dots, a_{nm}, b_{11}, \dots, b_{nm}, w_1, \dots, w_m) \quad (2.7)$$

이 때, $p = 2nm + n$ 이다.

그러므로 단순화된 퍼지추론의 조정규칙은 다음의 식(2.8), (2.9), (2.10)으로 표현될 수 있다.

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) - K_a \cdot \frac{\partial E}{\partial a_{ij}} \quad (2.8)$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) - K_b \cdot \frac{\partial E}{\partial b_{ij}} \quad (2.9)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) - K_w \cdot \frac{\partial E}{\partial w_i} \quad (2.10)$$

식(2.8)에서 (2.10)은 조정된 매개변수의 $(t+1)$ 번째값을 나타낸다. 이 때 K_a, K_b, K_w 는 적응이득을 의미하는 상수이다.

식(2.8)~(2.10)에서, 평가함수의 gradient($-\frac{\partial E}{\partial a_{ij}}, -\frac{\partial E}{\partial b_{ij}}, -\frac{\partial E}{\partial w_i}$)는 식(2.2), (2.4), (2.6)에 의해 다음과 같다.

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) - K_a \cdot \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \cdot (y - y') \cdot (w_i - u) \cdot \text{sgn}(x_j - a_{ij}) \cdot \frac{2}{b_{ij} \cdot A_{ij}(x_j)} \quad (2.11)$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) - K_b \cdot \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \cdot (y - y') \cdot (w_i - u) \cdot \frac{1 - A_{ij}(x_j)}{A_{ij}(x_j)} \cdot \frac{1}{b_{ij}} \quad (2.12)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) - K_w \cdot \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \cdot (y - y') \quad (2.13)$$

이러한 조정규칙들은 평가함수의 값을 감소시키는 방향으로 매개변수들을 변화시킨다. 즉 초기에 설정된 퍼지제어기의 여러 매개변수들이 부적절하게 설정되었을 경우에도 제시한 알고리즘에 의해 전건부에서의 소속함수 모양과 후건부에서의 출력변수 값을 동시에 평가함수의 값을 허용정도의 값 이하가 되도록 조정해 나간다.

III. 시뮬레이션

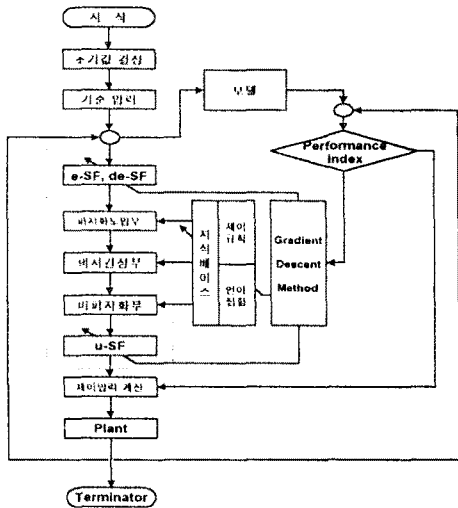


그림 3.1 전체 시스템 구성도

본 연구에서는 삼각형 멤버십함수의 형태와 제어규칙이 달라짐에 따라 퍼지 제어 시스템의 과도응답 특성을 앞에서 정의한 성능지표를 이용하여 평가하였다.

표 3.1 제어 규칙

e	de	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB

시뮬레이션은 기존의 단순 퍼지제어기와 동일 조건하에서 식 (3.1)과 같은 전달함수로 표현되는 플랜트에 다양한 입력을 인가하여 제어를 수행하고 그 성능을 비교하였고 이때의 샘플링 시간은 5ms이다. 이 때, 플랜트는 선형화시킨 일반 공명모델로 이득값이 커서 크게 발진한다.

$$G(s) = \frac{25.04(s+0.2)}{s(s+5.02)(s+0.01247)} \quad (3.1)$$

사례 1 : 그림 3.2에서는 입력을 구형파로 하여 단순퍼지제어기(FLC)와 자동동조퍼지제어기(Auto-Tuning FLC)의 요구되는 출력에 대한 추종능력을 비교하였다. FLC의 매개변수들도 설정이 잘 되어 있는 상태라서 출력결과와 양호하지만 정착시간이 길다는 것을 알 수 있다. 그러나 굽은 선의 자동동조 퍼지제어기의 출력결과를 보면 초기의 초과량이 시간이 지날수록 감소하는 것을 알 수 있고 약 5sec 부근에서부터 정착시간이 50%이상 감소된 것을 알 수 있다.

사례 2 : 그림 3.3에서는 목표치가 변하는, 즉 요구출력이 변하는 상태에서 FLC와 자동동조 퍼지제어기의 응답과 오차를 비교하였다.

FLC의 응답을 보면 소속함수에 관한 매개변수가 고정되어 있기 때문에 목표치의 변화량에 비례하여 초과량이 증·감하는 데 반해, 자동동조 퍼지제어기의 응답에서는 목표치가 변함에 따라 소속함수를 다시 조정하기 때문에 초과량이 시간이 지날수록 줄어들고 정착시간도 70%이상 감소함을 알 수 있다.

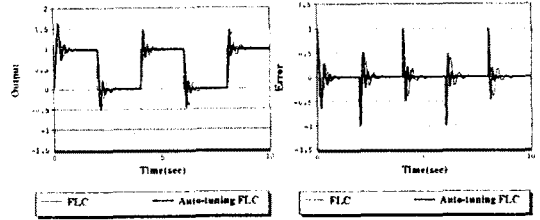


그림 3.2 사례 1의 FLC와 Auto-tuning FLC의 출력응답과 오차

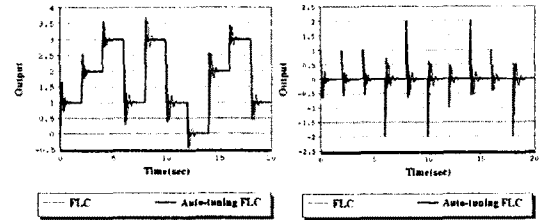


그림 3.3 사례 2의 FLC와 Auto-tuning FLC의 출력응답과 오차

V. 결론

이 논문에서 제안된 적응 메카니즘 방법들이 FLC를 적용시킨다. 즉 MRAS와 gradient 근사법에 기초한 방법들이 FLC의 매개변수를 변화시키는데 사용된다.

FLC의 파라미터들을 적용시키기 위하여 gradient 근사법에 기초한 메카니즘이 개발되었으며 FLC의 감도함수는 해석적이거나 수학적으로 계산 되는데 수학적 계산은 아주 간단하게 FLC에 적용시킬 수 있었다. 새롭게 개발된 적응 메카니즘을 가진 시뮬레이션은 좋은 결과를 나타냈다. 게다가 DC servo motor의 실험을 통한 성능 평가와 알고리즘의 안정성은 현재 연구 중이다. 다른 관심 부분은 로봇 매니플레이트의 궤적제어를 위한 퍼지 매개변수(정규화 factor, 제어규칙, 이득계수)들의 전체적 적용 행위에 대한 조항이다. 미래에 자기 조직화 FLC와 발전된 파라미터 조절 메카니즘의 조합이 가능해 질 것이다.

References

- [1] 남문현, 이상호, 남부희, 제어 시스템 공학, 자유 아카데미, 1989.
- [2] S. Shao, "Fuzzy Self-Organizing Controller and its Application for Dynamic Process", Fuzzy Sets and Systems. vol. 26, pp. 151-164, 1988.
- [3] M. Maeda, T. Sato, and S. Murakami, "Design of the Self-Tuning Fuzzy Controller" in Proc. of Inter. Conf on Fuzzy Logic & Neural Networks, Iizuka, Japan, pp. 393-396, 1990
- [4] 박민용, 최항직 공저, "퍼지 제어 시스템", pp. 79, 1990
- [5] 이광형, 오길복 공저, "퍼지 이론 및 응용", Vol.1,2, 1991
- [6] John A. Bernard. "Use of a rule-based system for process control" IEEE Control Systems Magazine, pp.3-13, October, 1988.
- [7] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller, Part I, II," IEEE Transactions on Syst, Man, Cybern., Vol. SMC-20, No.2, pp.404-435, 1990
- [8] K.J. Astrom and B.Wittenmark, "Adaptive Control" Addison Wesley, 1989.